

本資料のうち、枠囲みの内容は防
護上の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0610-20_改2
提出年月日	2021年2月1日

補足－610－20 【屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について】

目 次

資料 1 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について

1. 対象設備
2. 屋外重要土木構造物等の要求機能と要求機能に対する耐震評価内容
3. 安全係数
4. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定及び解析手法選定
 - 4.1 断面選定の方針
 - 4.2 各施設の構造上の特徴と断面選定の方針の整理
 - 4.3 解析手法選定の方針
 - 4.4 軽油タンク連絡ダクト
 - 4.5 排気筒連絡ダクト
 - 4.6 原子炉機器冷却海水配管ダクト
 - 4.7 取水路（漸拡部）
 - 4.8 軽油タンク室
 - 4.9 軽油タンク室（H）
 - 4.10 海水ポンプ室
 - 4.11 取水口，貯留堰
 - 4.12 取水路（標準部）
 - 4.13 復水貯蔵タンク基礎
 - 4.14 ガスタービン発電設備軽油タンク室
 - 4.15 第3号機海水ポンプ室
5. 地盤物性及び材料物性のばらつきの考慮方法
6. 許容限界
7. ジョイント要素のばね設定
8. 隣接構造物のモデル化方針
9. 地震応答解析における構造物の減衰定数
10. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における追加解析ケースの選定
11. 等価剛性モデルの作成方法

資料 2 軽油タンク連絡ダクトの耐震安全性評価

資料 3 排気筒連絡ダクトの耐震安全性評価

資料 4 原子炉機器冷却海水配管ダクト（水平部）の耐震安全性評価

資料 5 原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）の耐震安全性評価

資料 6 取水路（漸拡部）の耐震安全性評価

資料 7 軽油タンク室の耐震安全性評価

資料 8 軽油タンク室（H）の耐震安全性評価

資料 9 海水ポンプ室の耐震安全性評価

資料 10 取水口，貯留堰の耐震安全性評価

資料 11 取水路（標準部）の耐震安全性評価

資料 12 復水貯蔵タンク基礎の耐震安全性評価

資料 13 ガスタービン発電設備軽油タンク室の耐震安全性評価

資料 14 第 3 号機海水ポンプ室の耐震安全性評価

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価についての参考資料

- 参考資料 1 O. P. 14. 8m盤に分布する盛土・旧表土の液状化特性
- 参考資料 2 地中構造物の耐震性に支配的な要因（土圧）
- 参考資料 3 地震応答解析による断面選定及び解析手法選定の確認
- 参考資料 4 断層の影響を評価する断面
- 参考資料 5 新設する構造物のコンクリートの圧縮強度の設定
- 参考資料 6 後施工せん断補強工法の適用性**
- 参考資料 7 地中構造物への鉛直地震動の位相が与える影響
- 参考資料 8 等価剛性モデルにおける鉛直方向床応答への影響

参考資料 6 : 本日の説明範囲

参考資料 6 後施工せん断補強工法の適用性

目次

1. 概要.....	1
2. CCb 工法について	18
2.1 CCb 工法を適用した部位	18
2.2 CCb 工法の概要	18
3. 建設技術審査証明報告書の概要.....	20
3.1 CCb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け	20
3.2 建設技術審査証明報告書における CCb 工法の適用範囲.....	21
3.3 建設技術審査証明報告書における CCb 工法の設計方法.....	22
3.3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法.....	22
3.3.2 使用材料・強度.....	44
3.3.3 構造部材の評価.....	50
3.3.4 構造細目.....	52
3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認.....	53
3.4.1 施工の確実性.....	53
3.4.2 施工の容易性.....	53
3.4.3 施工手順の設定.....	53
4. 女川 2 号機における CCb 工法の適用性の確認.....	67
4.1 適用性確認フロー.....	67
4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定.....	69
4.3 ①適用性確認項目の抽出.....	70
4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認.....	72
4.5 ③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確 認.....	85
4.5.1 せん断補強効果の確認内容.....	85
4.5.2 せん断補強効果の確認.....	85
4.6 ④CCb の施工精度に影響を与える項目の確認	88
4.6.1 削孔方法.....	88
4.6.2 削孔角度.....	89
4.6.3 削孔位置.....	91
4.6.4 グラウトの充てん性.....	92
4.7 ⑤施工実績・研究事例等の確認.....	102
4.7.1 施工実績の整理.....	102
4.7.2 過去の地震の経験事例.....	105

4.7.3	レベル2地震動を対象とした設計事例.....	106
4.7.4	後施工せん断補強工法の比較.....	106
4.7.5	後施工せん断補強筋に関する研究事例.....	109
4.8	女川2号機におけるCCb工法の保守性と設計上の制限の整理.....	119
4.8.1	CCb工法の保守性.....	119
4.8.2	女川2号機においてCCbにより耐震補強を行うにあたっての保守性..	119
4.8.3	女川2号機においてCCbにより耐震補強を行うにあたっての設計上の制限.....	119
4.8.4	有効係数 β_{aw} の保守性.....	120
4.8.5	CCb工法によるせん断補強の設計検討フロー.....	122
4.9	CCbの適用性確認結果.....	123
5.	女川2号機におけるCCb工法の適用性確認のまとめ.....	124

添付資料1	建設技術審査証明書
添付資料2	女川2号機における部材諸元他の適用性の検討
添付資料3	女川2号機におけるひび割れに対する定着機能保持の検討
添付資料4	女川2号機におけるコンクリートの健全性の検討
添付資料5	ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性の検討
添付資料6	面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性の検討
添付資料7	増厚補強部におけるCCb工法の適用性の検討
添付資料8	詳細設計を踏まえCCb補強を行う構造物に対するCCb工法の適用性の検討

：設置変更許可審査時から内容を補足した箇所

1. 概要

女川2号機の屋外重要土木構造物等には、基準地震動 S_s の大加速度化に伴い、せん断破壊に対して耐震補強工事が必要となる既設鉄筋コンクリート構造物がある。




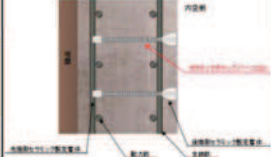
せん断破壊に対する補強工法としては、部材のせん断耐力を向上させる後施工せん断補強工法の他に、増厚工法や地盤改良工法等があるが、女川2号機の屋外重要土木構造物等については、部材の耐力を直接向上させる合理的な補強工法で、後施工せん断補強工法の一つである、セラミックキャップバー（以下「CCb」という。）工法を採用している。（第1-1表、第1-2表参照）

CCb工法は、第1-1図に示すとおり、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、部材を削孔後、その孔内にCCbを挿入し、グラウト充てんにて固定し、せん断耐力を向上させるものである。

CCbによる耐震補強の対象となる構造物の一覧を第1-2表に、耐震補強箇所及び補強概要を第1-2図～第1-13図に示す。なお、詳細設計を踏まえCCb補強を行う構造物に対するCCb工法の適用性の確認については、添付資料8において設置変更許可審査時と同様の確認をしている。

本資料は、本補強工法が開発された際の実験の範囲と女川2号機で用いる部材厚や破壊形態に差異があること等から、CCb工法を採用する目的、効果及び女川2号機への適用性について説明するものである。

第1-1表 主なせん断補強工法

	従来工法（先施工）	増厚工法	地盤改良工法	後施工せん断補強工法
概 要	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート打設前の鉄筋組立時に、せん断補強筋を主筋または配力筋にフックを掛けて定着させる工法。 せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> 既設コンクリート構造物表面にコンクリートを打ち足すことで、断面を増厚する工法。 部材厚の増により、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> 既設コンクリート構造物周辺地盤にセメントミルク等を噴射し、地盤改良体を構築する工法。 地盤改良を行うことにより、地震時荷重（主に土圧）が低減され、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> 既設コンクリート構造物を削孔し、その孔内にせん断補強筋を差し込み充てん材で固定する工法。 せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。
図				
備 考	<ul style="list-style-type: none"> 女川2号機他、多数の施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 女川2号機では施工実績はないが、一般土木構造物において施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 女川2号機他、多数の施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 美浜3号機にて、工認実績有り。（ポストヘッドバー（PHb工法））

第 1-2 表 (1) CCB による耐震補強対象の構造物

構造物 名称	部 材	部材厚 (mm)	CCb 径	せん断 スパン比 ^{※2}	備 考	
取水路 (漸拡部)	隔壁	1,200	D16, D22	5.61		
原子炉機器 冷却海水配 管ダクト (水平部)	隔壁	1,200	D25	6.02		
軽油 タンク室	底版	1,500	D25	第 1-7 図 参照		
	側壁	1,200	D22			
	隔壁	1,000	D16			
復水貯蔵 タンク基礎	遮蔽壁	地上部	500	D13	第 1-8 図 参照	
		地中部	1,000	D16, D25		
	バルブ室	頂版	800	D16		
		側壁	1,000	D19		
		隔壁	600	D16		
	連絡 トレンチ	頂版	800	D16		
側壁						
取水口	頂版	1,000	D16, D19, D22, D25	1.15～ 12.03	詳細設計 反映	
	底版	1,500～ 3,200	D22, D29	1.39～7.64		
	側壁	1,200～ 1,500	D25, D29	2.80～7.30		
	導流壁	1,000～ 1,200	D19, D22, D29	2.80～9.35		
	妻壁	1,500	D22	2.92～3.65		
取水路 (標準部) ^{※1}	頂版	1,000	D25	5.75	詳細設計 反映	
	底版	1,500	D22	3.79		
	隔壁	1,000	D25	3.45		

※1：変更の可能性あり

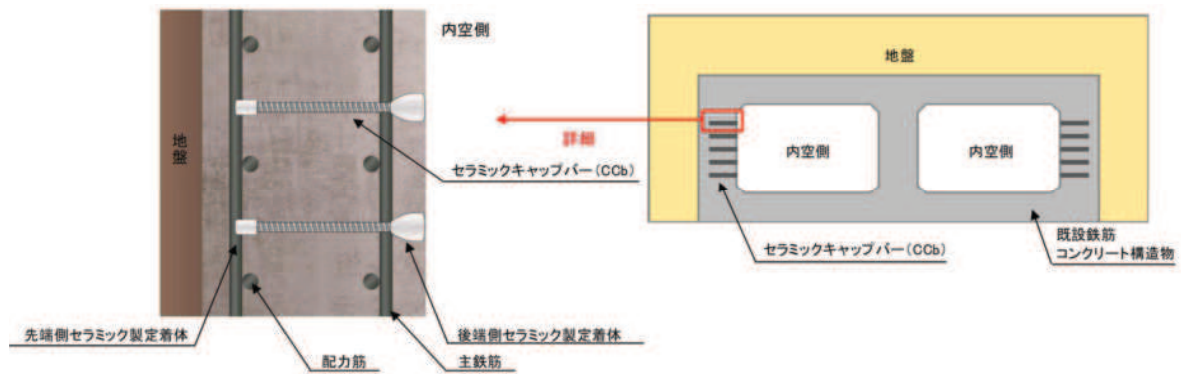
※2：せん断スパン比：a/d (a：支間長，d：有効高さ)

第1-2表(2) Ccbによる耐震補強対象の構造物

構造物名称	部材	部材厚 (mm)	Ccb径	せん断 スパン比 ^{※2}	備考
海水 ポンプ室 ^{※1}	底版	2,000～ 3,500	D16, D22, D25, D32	0.83～ 35.59	詳細設計 反映
	側壁	2,000～ 4,700	D22, D25, D29, D32	1.86～ 35.59	
	隔壁	1,000～ 1,500	D22, D25, D29, D32	1.02～ 37.01	
	妻壁	1,500	D22, D25, D29, D32	3.54～ 22.44	
	導流壁	1,500	D22, D25, D29, D32	3.54～ 49.61	
	中床版	1,000～ 1,500	D22, D25, D29, D32	3.51～ 17.32	
原子炉機器 冷却海水 配管ダクト (鉛直部) ^{※1}	側壁	1,500	D16	1.52	詳細設計 反映
第3号機海水 ポンプ室 ^{※1}	底版	3,000	D25, D29, D32	1.30～ 14.80	詳細設計 反映
	側壁	1,800～ 3,000	D25, D29, D32	2.65～ 19.17	
	隔壁	1,500～ 2,000	D32	4.12～ 22.44	
	妻壁	1,500～ 2,000	D25, D29, D32	2.83～ 16.10	
	導流壁	1,500～ 3,300	D25, D29, D32	1.34～ 13.36	
	中床版	1,500	D25, D29, D32	2.83～ 12.68	

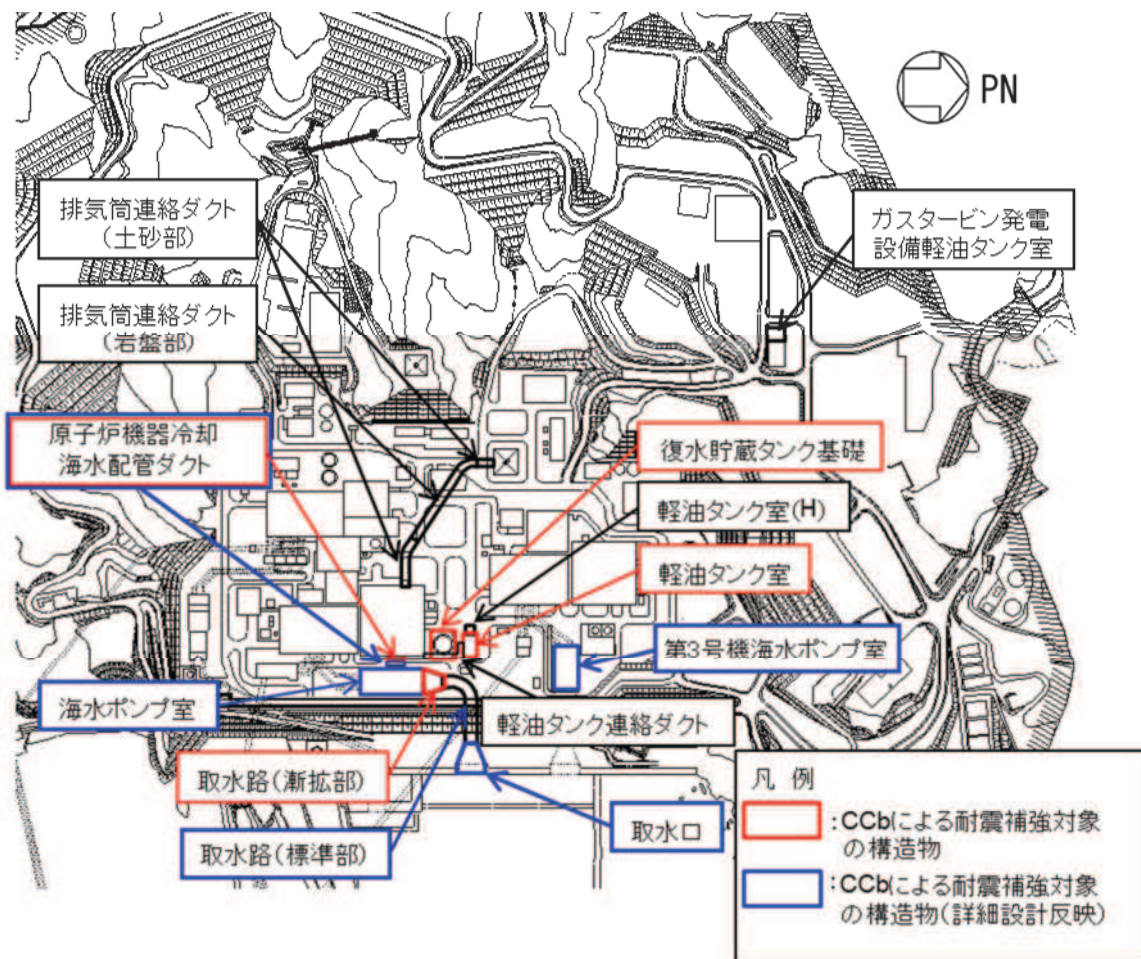
※1：変更の可能性あり

※2：せん断スパン比：a/d (a：支間長，d：有効高さ)

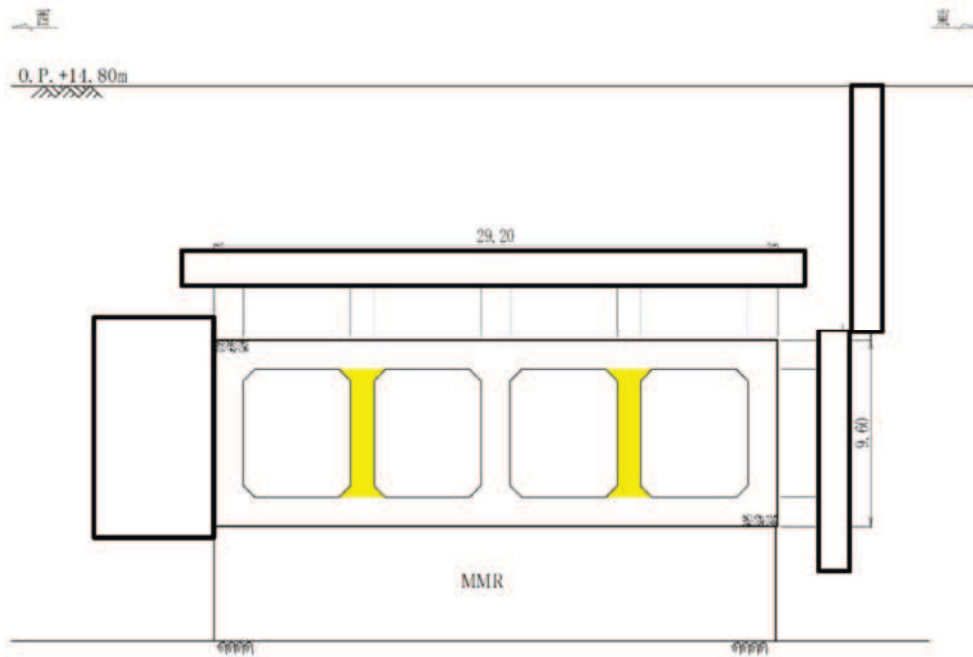


第 1-1 図 Ccb 工法の概要図※

※：セラミックキャップバー (CCb) 工法研究会 HP より引用。一部修正・加筆。



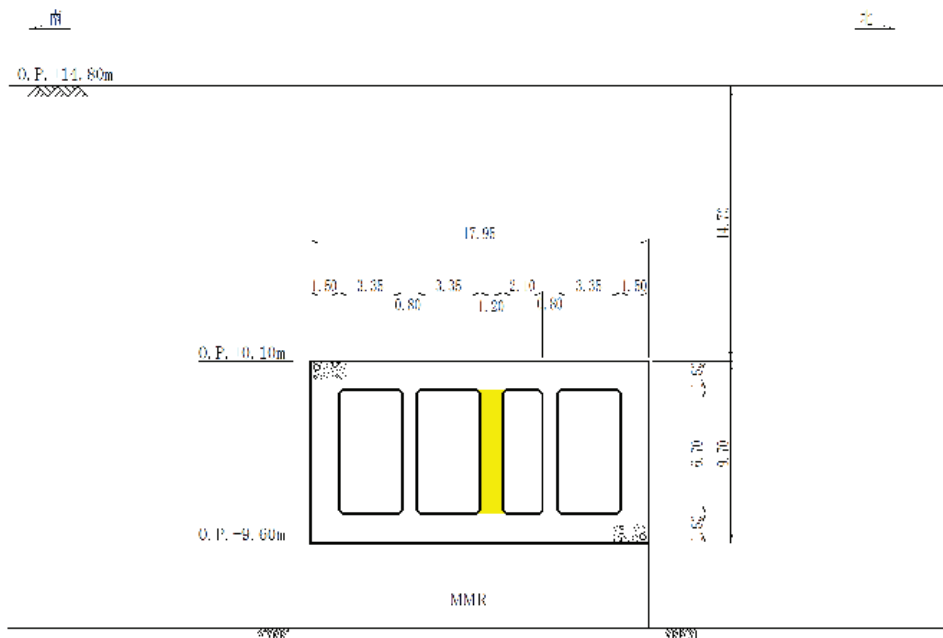
第 1-2 図 Ccb による耐震補強対象の構造物 (配置図)



(単位：m)

■ : CCb による耐震補強箇所

第 1-3 図 CCb による耐震補強対象の構造物
(取水路 (漸拡部))



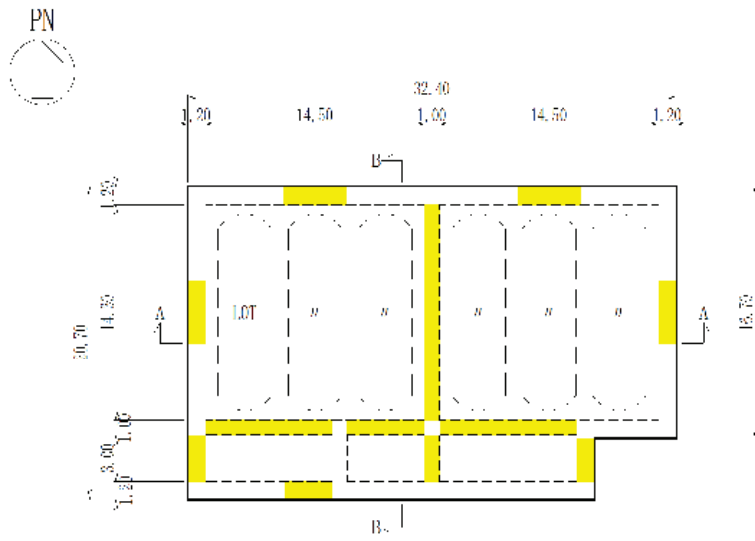
(単位：m)

■ : CCb による耐震補強箇所

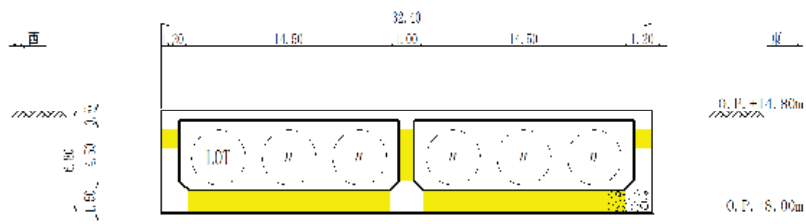
第 1-4 図 CCb による耐震補強対象の構造物
(原子炉機器冷却海水配管ダクト)

(参考) 6-5

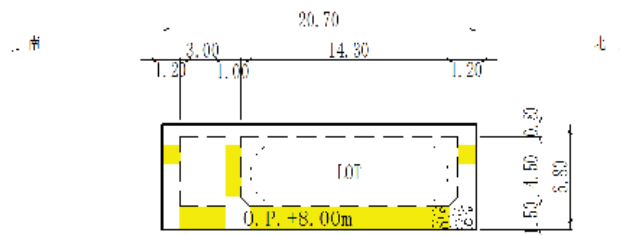
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



平面図



A-A 断面

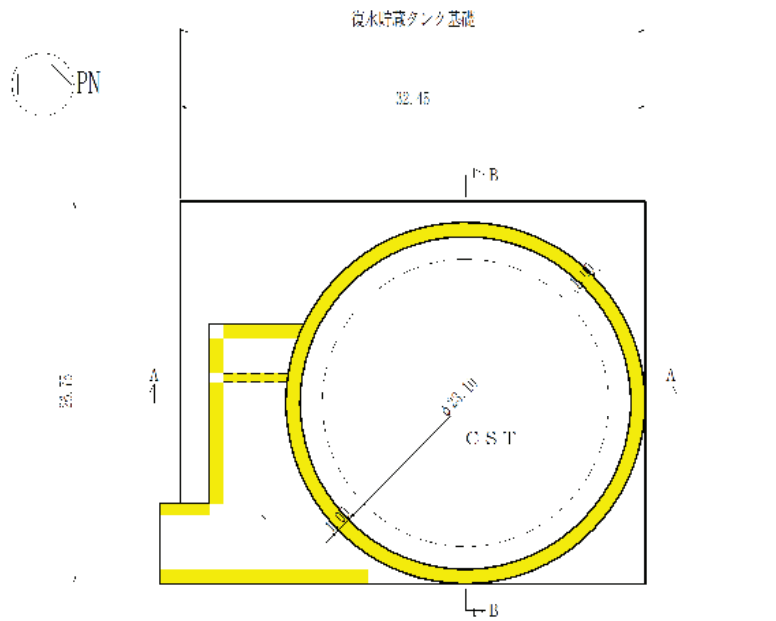


B-B 断面

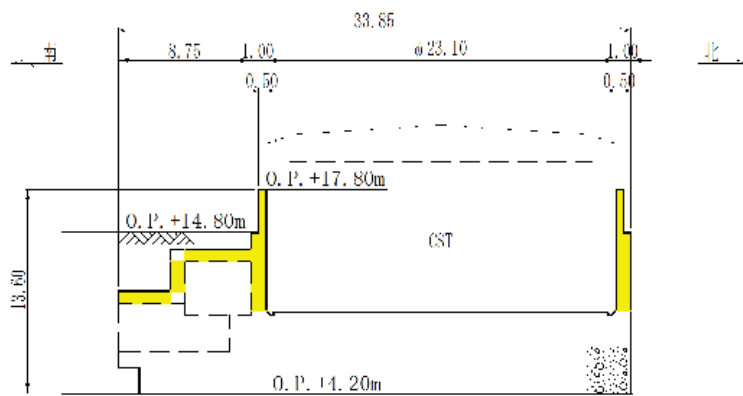
(単位：m)

■ : CCb による耐震補強箇所

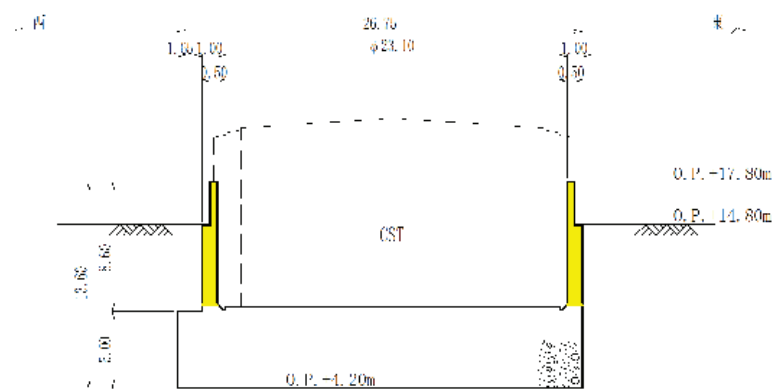
第 1-5 図 CCb による耐震補強対象の構造物
(軽油タンク室)



平面図



A-A 断面



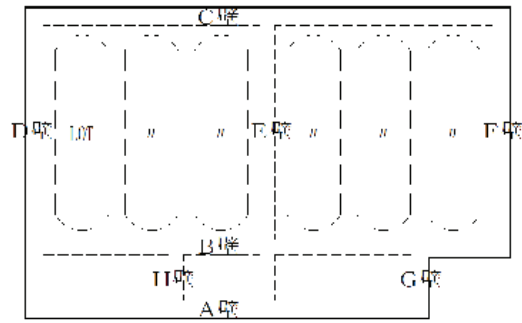
B-B 断面

(単位：m)

■ : Ccb による耐震補強箇所

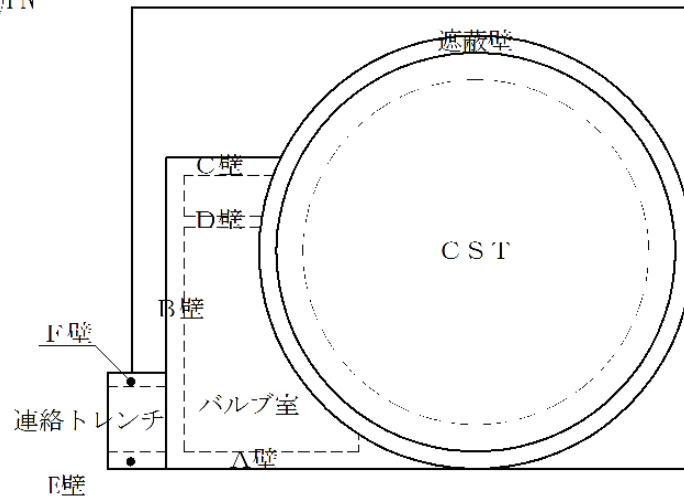
第 1-6 図 Ccb による耐震補強対象の構造物
(復水貯蔵タンク基礎)

(参考) 6-7



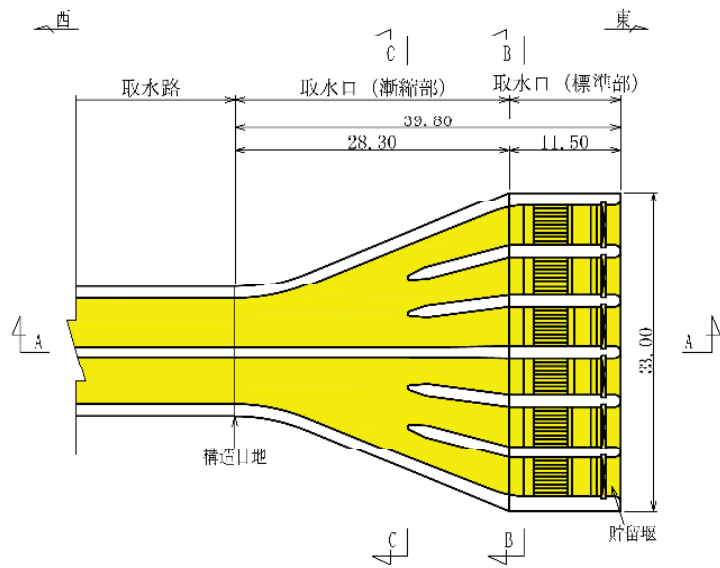
		東西方向・水平方向			南北方向・鉛直方向			
		支間長	有効高さ	せん断 スパン比	支間長	有効高さ	せん断 スパン比	
		a (m)	d (m)	a / d	a (m)	d (m)	a / d	
軽油 タンク 室	底版	5.10~14.50	1.30	3.92~11.15	3.00~14.30	1.30	2.31~11.00	
	側壁	A壁 (南壁)	8.40	1.00	8.40	4.50	1.00	4.50
		C壁 (北壁)	14.50	1.00	14.50	4.50	1.00	4.50
		D壁 (西壁)	3.00~14.30	1.00	3.00~14.30	4.50	1.00	4.50
		F壁 (東壁)	14.30	1.00	14.30	4.50	1.00	4.50
	G壁 (東壁)	3.00	1.00	3.00	4.50	1.00	4.50	
	隔壁	B壁 (中壁)	5.10~9.10	0.85	6.00~10.71	4.50	0.85	5.29
E壁 (中壁)		3.00~14.30	0.85	3.53~16.82	4.50	0.85	5.29	

第 1-7 図 Ccb による耐震補強対象の構造物
(せん断スパン比：軽油タンク室)

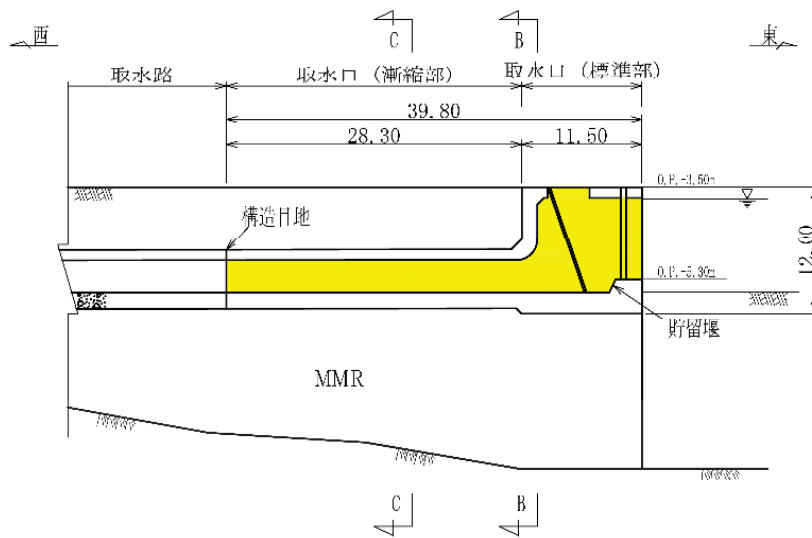


		東西方向・水平方向			南北方向・鉛直方向				
		支間長	有効高さ	せん断 スパン比	支間長	有効高さ	せん断 スパン比		
		a (m)	d (m)	a / d	a (m)	d (m)	a / d		
復水貯蔵タンク基礎	遮蔽壁	地上部	—	—	—	3.10	0.40	7.75	
		地中部	—	—	—	4.15~8.60	0.90	4.61~9.56	
	バルブ室	頂版	1.00~13.05	0.68	1.47~19.19	4.53~10.10	0.68	6.66~14.86	
		側壁	A壁 (東壁)	10.10	0.88	11.48	3.65	0.88	4.15
			B壁 (南壁)	2.40~13.05	0.88	2.73~14.83	1.95~3.65	0.88	2.22~4.15
			C壁 (西壁)	5.19	0.88	5.89	3.65	0.88	4.15
	隔壁	D壁 (中壁)	4.53	0.48	9.43	3.65	0.48	7.60	
	連絡トレンチ	頂版	3.70	0.68	5.44	—	—	—	
		側壁	E壁 (東壁)	—	—	—	3.15	0.68	4.63
			F壁 (西壁)	—	—	—	3.15	0.68	4.63

第 1-8 図 Ccb による耐震補強対象の構造物
(せん断スパン比：復水貯蔵タンク基礎)



平面図



A-A 断面

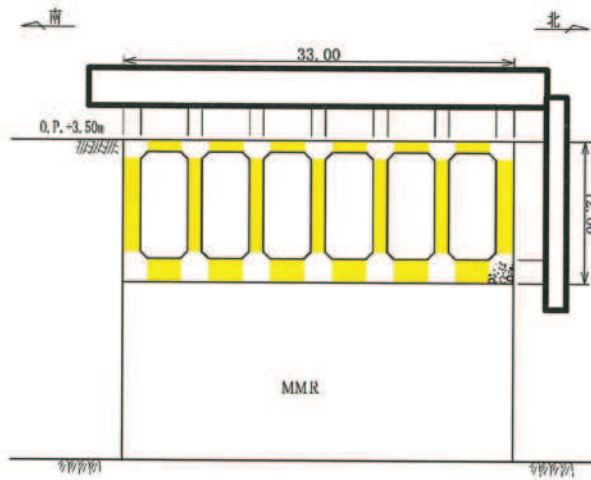
(単位：m)

■ : Ccb による耐震補強箇所

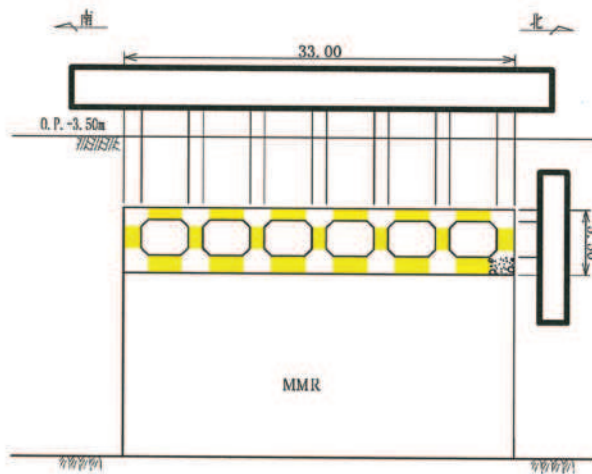
第 1-9 図 (1) Ccb による耐震補強対象の構造物 (詳細設計反映)

(取水口) (1/2)

(参考) 6-10



B-B 断面



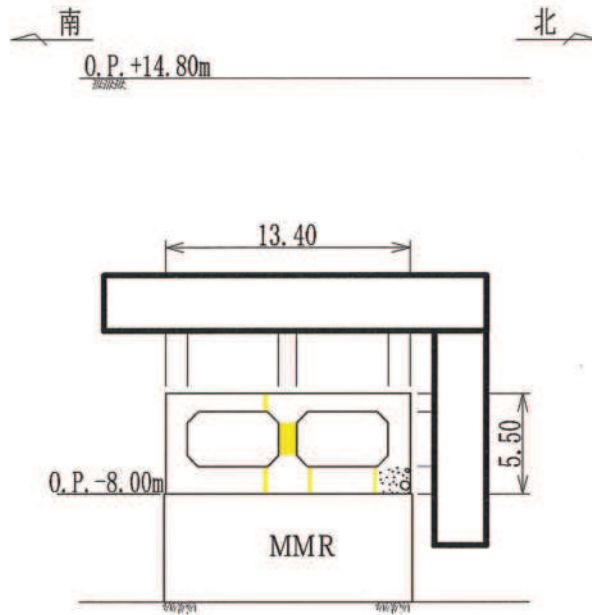
C-C 断面

(単位：m)

■ : Ccb による耐震補強箇所

第 1-9 図 (2) Ccb による耐震補強対象の構造物 (詳細設計反映)
(取水口) (2/2)

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



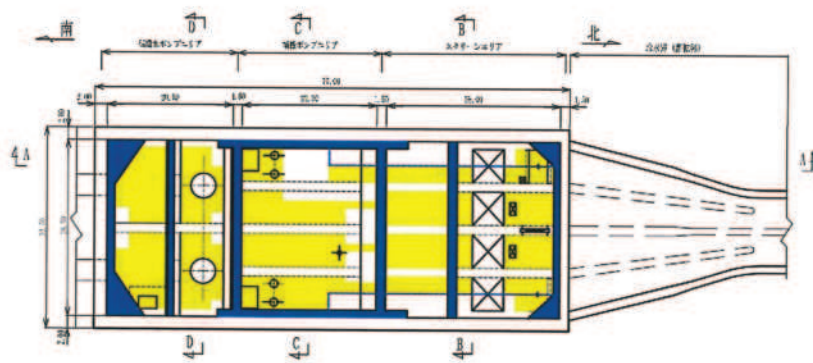
(単位：m)

■：CCbによる耐震補強箇所※

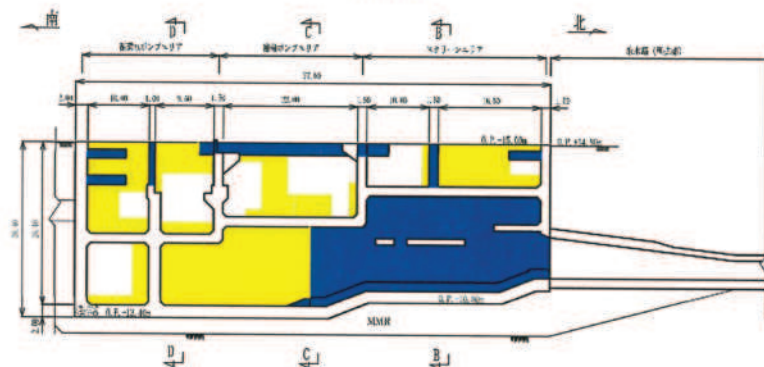
※：変更の可能性あり

第 1-10 図 Ccb による耐震補強対象の構造物 (詳細設計反映)
(取水路 (標準部))

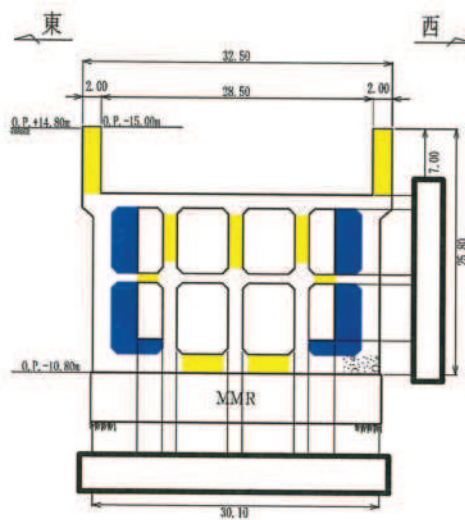
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



平面図



A-A 断面 (投影)



B-B 断面

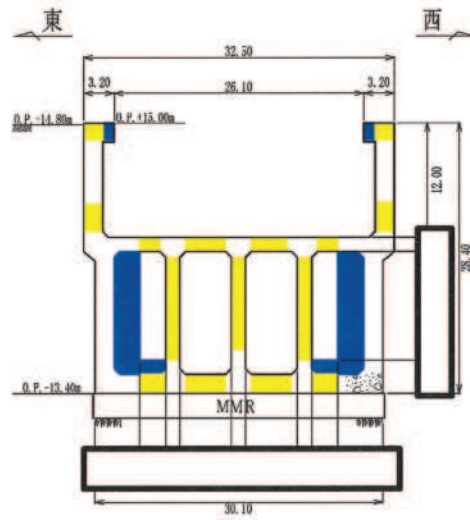
(単位：m)

- : Ccb による耐震補強箇所※
- : 部材増厚または部材追加箇所

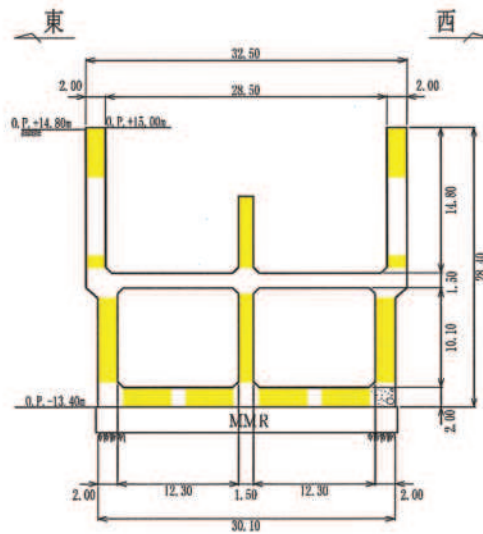
※：変更の可能性あり

第 1-11 図 (1) Ccb による耐震補強対象の構造物 (詳細設計反映)

(海水ポンプ室) (1/2)



C-C 断面



D-D 断面

(単位：m)

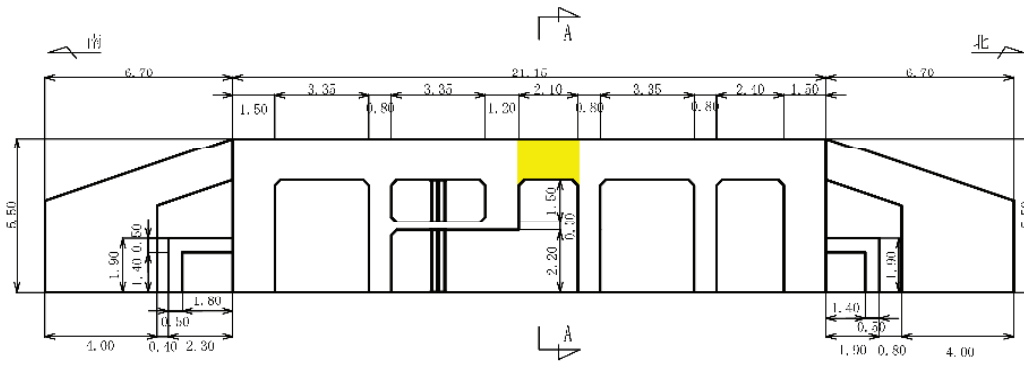
- : Ccb による耐震補強箇所*
- : 部材増厚または部材追加箇所

※：変更の可能性あり

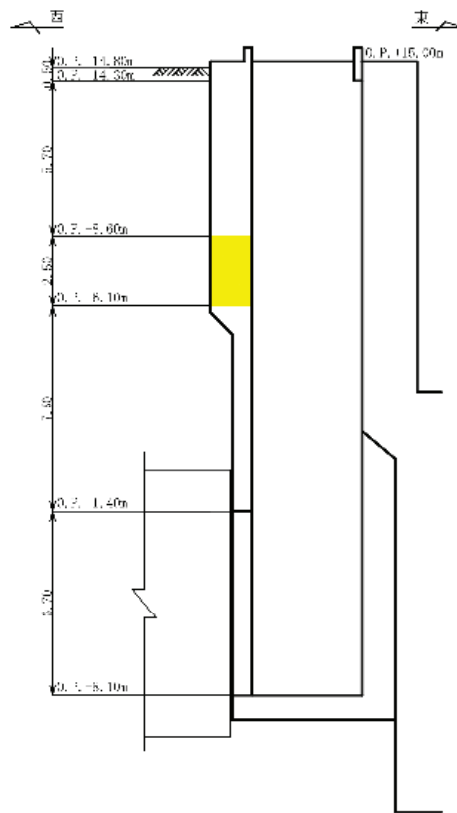
第 1-11 図 (2) Ccb による耐震補強対象の構造物 (詳細設計反映)

(海水ポンプ室) (2/2)

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



平面図



A-A 断面

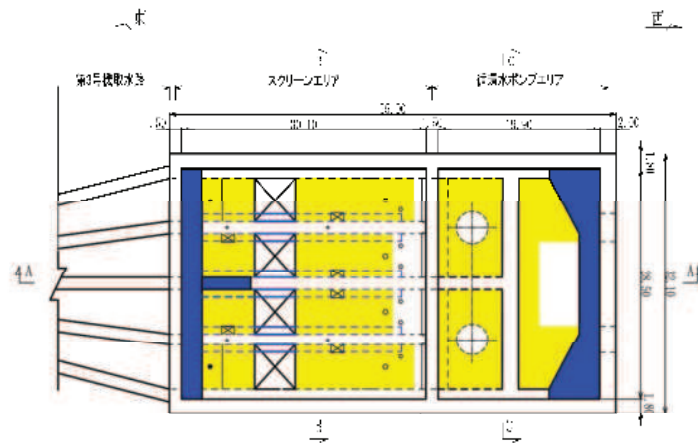
(単位：m)

■ : Ccb による耐震補強箇所*

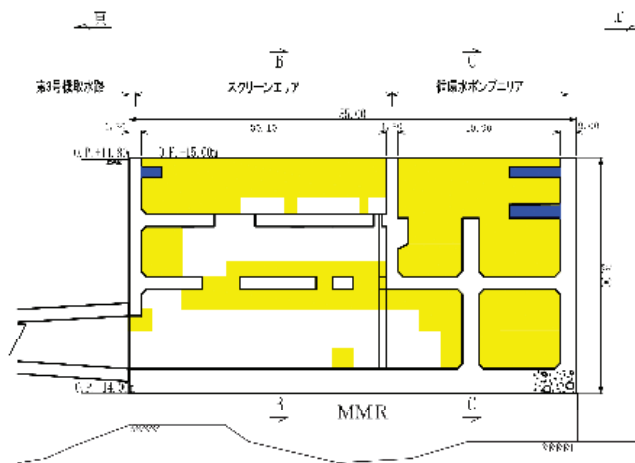
※ : 変更の可能性あり

第 1-12 図 Ccb による耐震補強対象の構造物 (詳細設計反映)

(原子炉機器冷却海水配管ダクト (鉛直部))



平面図



A-A 断面

(単位：m)

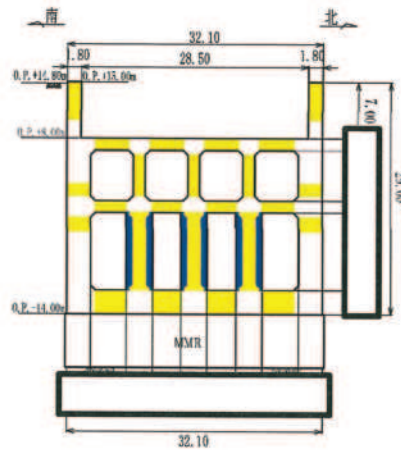
■ : Ccb による耐震補強箇所※

■ : 部材増厚または部材追加箇所

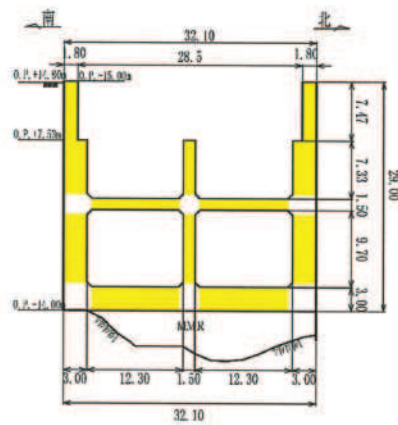
※ : 変更の可能性あり

第 1-13 図 Ccb による耐震補強対象の構造物 (詳細設計反映)

(第 3 号機海水ポンプ室) (1/2)



B-B 断面



C-C 断面

(単位：m)

■ : Ccb による耐震補強箇所※

■ : 部材増厚または部材追加箇所

※ : 変更の可能性あり

第 1-13 図 Ccb による耐震補強対象の構造物 (詳細設計反映)

(第 3 号機海水ポンプ室) (2/2)

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

2. CCb 工法について

2.1 CCb 工法を適用した部位

女川 2 号機の屋外重要土木構造物等においては、基準地震動発生時に屋外重要土木構造物等としての機能（設計基準対象施設のうち耐震 S クラス施設の間接支持機能、重大事故等対処施設の間接支持機能、非常時における海水の通水機能、貯水機能及び止水機能）を維持するために、耐震安全性を確保する必要がある。そのため、屋外重要土木構造物等の一部の部材においては、せん断に対する安全性を確保するために、CCb 工法を適用し、せん断耐力の向上を図っている。

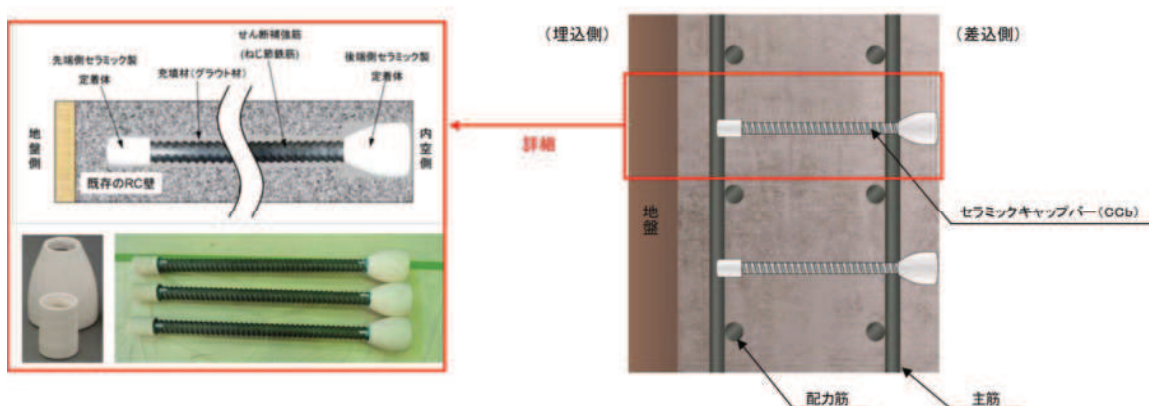
CCb 工法を適用した部材は、第 1-2、第 1-3 表及び第 1-3 図～第 1-13 図に示すとおり、各構造物の隔壁、側壁、底版等である。

2.2 CCb 工法の概要

CCb 工法は、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、CCb を既設の鉄筋コンクリート構造物の部材に挿入・一体化させて、せん断耐力を向上させるものである。CCb は第 2.2-1 図に示すように、せん断補強筋の両端に耐腐食性に優れたセラミック製の定着体を取り付けた構造となっており、海水を通水する取水路（漸拡部）のような構造物に適した材料である。

CCb 工法の具体的な施工方法は、第 2.2-1 表に示すように、既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内にせん断補強材である Ccb を差し込み、充填材で固定することにより構造躯体と一体化を図っており、従来工法（先施工）とは施工方法が異なる。


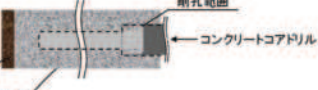



また、CCb 工法は第 2.2-2 表に示すように、「セラミック定着体とコンクリート間の支圧（後端側）」と「セラミック定着体及び Ccb とコンクリート間の付着（先端側）」により定着しており、フックを掛けて定着する従来工法（先施工）とは定着機構が異なる。そのため、CCb 工法では設計・照査において、通常の従来工法（先施工）であるせん断補強筋によるせん断耐力に有効性を示す係数（ β_{aw} ）を乗じることにより、せん断補強効果を評価している。



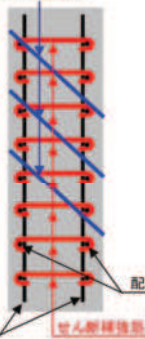
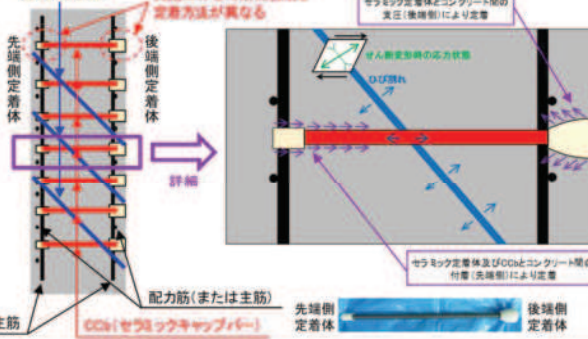
第 2.2-1 図 CCb の詳細図※

※：セラミックキャップバー（CCb）工法研究会及び鹿島建設 HP より引用。一部修正・加筆。

第 2.2-1 表 施工方法の違い

従来工法（先施工）	CCb工法（後施工）
	<p>①削孔工 コンクリートコアドリルによる削孔  削孔範囲 コンクリートコアドリル 地盤 既設鉄筋 コンクリート構造物</p> <p>②CCb定着工 グラウトの充填  CCbの挿入  養生用蓋の設置  CCb (セラミックキャップバー)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • コンクリート打設前の鉄筋組立時に、せん断補強筋を主筋または配力筋にフックを掛けて設置している。 • 多数の施工実績があり、コンクリート打設前にせん断補強筋を設置するという確実性の高い施工方法である。 	<ul style="list-style-type: none"> • 既設コンクリート構造物を削孔し、その孔内にCCbを差し込み充てん材で一体化している。 • 従来工法（先施工）と比較すると施工実績が少なく、既設コンクリートを削孔して部材と直交する方向にCCbを設置し削孔部をグラウトにて充てんするものである。

第 2.2-2 表 定着機構の違い

従来工法（先施工）	CCb工法（後施工）
<p>斜めひび割れ</p>  <p>配力筋(または主筋) せん断補強筋 主筋</p>	<p>斜めひび割れ</p>  <p>先施工のせん断補強筋と定着方法が異なる</p> <p>セラミック定着体とコンクリート間の支圧(後端側)により定着</p> <p>せん断変形時の応力伝達</p> <p>ひび割れ</p> <p>セラミック定着体及びCCbとコンクリート間の付着(先端側)により定着</p> <p>先端側定着体</p> <p>後端側定着体</p> <p>CCb(セラミックキャップバー)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • せん断補強筋は、主筋または配力筋にフックを掛けて定着しており、主に当該部にて定着効果を期待している。 	<ul style="list-style-type: none"> • CCbは「セラミック定着体とコンクリート間の支圧（後端側）」と「セラミック定着体及びCCbとコンクリート間の付着（先端側）」により定着している。

3. 建設技術審査証明報告書の概要

3.1 CCb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け

女川2号機のせん断補強が必要な各構造部材に配置した CCb については、『建設技術審査証明報告書 技術名称 後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー(CCb)」』(以下「建設技術審査証明報告書」という。)に適用範囲及び設計方法が示されている。

本工法は、添付資料1「建設技術審査証明書」のとおり、高度な技術を有する第三者機関である一般財団法人土木研究センター(以下「PWRC^{*}」という。)により審査証明を受けており、試験データを用いて、CCb が受け持つせん断耐力の算定方法において、CCb の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔及び CCb の埋込側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。なお、建設技術審査証明報告書では、片側からしか補強の施工ができない部材について、CCb を設置する手順を設定し、この工事に必要な施工要素(補強設計に基づく CCb の配置、CCb 配置位置での削孔方法、削孔内への CCb の固定方法、CCb 設置後の仕上げ等の施工性)を確認しており、それぞれの要素に対して施工上の考慮を示すなど、施工性に関しても審査対象となっている。

また、建設技術審査証明報告書では、設計・施工マニュアルが添付され、材料及び施工に関する事項が示されている。

※:PWRC は、国土交通大臣認可の公益法人として国土建設技術の発展向上に寄与することを目的に設立された公益法人組織であり、土木に関して、河川、道路、土質・地盤、施工、橋梁等、幅広い分野にまたがる研究開発と調査研究の受託、さらに開発された技術の普及及び技術支援に取り組んでいる。PWRC では、建設技術審査証明事業を行っており、当該審査証明技術について学識経験者及び当センターの専門技術者による審査証明委員会を設け、開発の趣旨、開発目標及び技術内容、既存の技術との対比、実績等について審査を行っており、高度な技術を有し、十分な信頼性を有した第三者機関である。

3.2 建設技術審査証明報告書における Ccb 工法の適用範囲

本工法では、地震時の変形量が限定される地中構造物など、背面に地盤等があり部材の片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対しても、後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。Ccb が受け持つせん断耐力は鉄筋の材質 (SD295A, SD295B, SD345), 径 (D13~D32) 毎に定め、その値は、先施工のせん断補強鉄筋に Ccb のせん断耐力の向上への有効性を示す係数 β_{aw} を考慮することにより評価が可能である。

Ccb は、主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、片側から施工する既設コンクリート構造物に対し、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

また、両側から施工が可能な既設コンクリート構造物であり、じん性確保を目的としない場合、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

3.3 建設技術審査証明報告書における Ccb 工法の設計方法

3.3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法

本工法では実験により性能を確かめることで、設計方法等を設定しており、その概要を以下にまとめた。

3.3.1.1 実験方法

本工法を用いた設計で Ccb のせん断耐力への寄与分を確認するために、梁試験体の交番載荷試験（せん断破壊モード試験体）を実施することにより、Ccb を用いて補強することによるせん断耐力の向上の確認が行われている（第 3.3-1 図参照）。

試験に用いられた試験体の諸元一覧を第 3.3-1 表に、せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法を第 3.3-2 図に、せん断耐力向上性能試験の加力要領を第 3.3-3 図に示す。

3. 1. 2 「セラミックキャップバー (Ccb)」後施工によるせん断耐力

梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験（せん断破壊モード試験体）を実施することにより、「セラミックキャップバー (Ccb)」を用いた後施工補強のせん断耐力の向上効果を確認する。梁試験体は、せん断補強鉄筋に D22 を用いたものが 3 体（シリーズ 1）、せん断補強鉄筋に D29 を用いたものが 2 体（シリーズ 2）、およびせん断補強鉄筋 D16 を用いたものが 10 体（シリーズ 3、4）である。

シリーズ 1 は、825×685mm の断面を有する RC 梁部材において、せん断スパンにせん断補強鉄筋のない試験体 (No.1-1)、通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.1-2) および「セラミックキャップバー (Ccb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.1-3) の 3 体である。なお、No.1-3 試験体の「セラミックキャップバー (Ccb)」の埋込み深さは、削孔の先端が補強面と反対側のコンクリート表面から 50mm となる 655mm である。

シリーズ 2 は、825×800mm の断面を有する RC 梁部材において、そのせん断スパンに通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.2-1) および「セラミックキャップバー (Ccb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.2-2) の 2 体である。なお、No.2-2 試験体の「セラミックキャップバー (Ccb)」の埋込み深さは、削孔の先端が補強面と反対側のコンクリート表面から 50mm となる 750mm である。

シリーズ 3、4 は、600×500×4500mm の断面を有する RC 梁部材において、せん断スパンにせん断補強鉄筋のない試験体 (No.3-1)、通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.3-2) および「セラミックキャップバー (Ccb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.3-3～3-6、4-1～4-4) の 10 体である。このうち、No.3-3～3-6 試験体は、「セラミックキャップバー (Ccb)」の埋込み位置が異なる。すなわち、埋込み側の先端位置は、主鉄筋の図心位置、主鉄筋の手前、または配力鉄筋の手前である。No.3-4 と No.3-5 については、ばらつきを確認するため同条件の試験体である。No.4-1～4-3 試験体は両端に先端型定着体を用いた両端先端型、No.4-4 試験体は両端に後端型定着体を用いた両端後端型であり、定着体は両端とも、コンクリート表面に一致している。なお、No.4-1 と No.4-2 については、ばらつきを確認するため同条件の試験体である。

各ケースの試験体の種類を表 II-3.2～3.5 に、試験体図を図 II-3.6～3.8 に示す。また、載荷装置図を図 II-3.9 に示す。載荷は、規格強度に基づいた各試験体のせん断耐力の計算値に達するまでは、段階的に荷重制御により加力を行い、以後は、その時点の加力点変位を基準とする同一振幅における繰返し回数 1 回の振幅漸増型の変位制御による交番加力を行った。

第 3.3-1 図 実験方法
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

第 3.3-1 表 各ケースの試験体の諸元
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

表 II-3.2 各ケースの試験体の諸元 (シリーズ 1)

	No.1-1	No.1-2	No.1-3
断面寸法 $b \times h$	825 × 685 mm		
せん断スパン長 a	1,640 mm		
せん断スパン比 a/d	2.78		
実験時の コンクリート圧縮強度 f'_c	32N/mm ²	33N/mm ²	34 N/mm ²
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	—	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 セラミックキャ ップバー (CCb)
せん断補強鉄筋比 p_w	0	0.29 %	
試験の目的	コンクリート負担分 V_c の評価	後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価	

表 II-3.3 各ケースの試験体の諸元 (シリーズ 2)

	No.2-1	No.2-2
断面寸法 $b \times h$	825 × 800 mm	
せん断スパン長 a	1,960 mm	
せん断スパン比 a/d	2.78	
実験時の コンクリート圧縮強度 f'_c	37N/mm ²	38N/mm ²
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	SD345 D29 両端フック	SD345 D29 セラミックキャ ップバー (CCb)
せん断補強鉄筋比 p_w	0.48 %	
試験の目的	後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価	

第 3.3-1 表 各ケースの試験体の諸元
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

	No.3-1	No.3-2	No.3-3	No.3-4	No.3-5	No.3-6
断面寸法 $b \times h$	600×500 mm					
せん断スパン長 a	1,195mm					
せん断スパン比 a/d	2.78					
実験時のコンクリート 圧縮強度 f'_c [N/mm ²]	41.2	40.6	42.4	42.6	42.9	42.6
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	—	SD345 D16 両端フック	SD345 D16 セラミックキャップバー (CCb)			
せん断補強鉄筋比 ρ_w	0.33%					
セラミックキャップ バー (CCb) の埋込み 側先端位置	—	—	主鉄筋の 図心	主鉄筋の表面 から 5mm 手前	配力鉄筋の 表面から 5mm 手前	
定着体の組合せ	—	—	標準型			
試験の目的	試験体諸元の 妥当性検討		後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価			

	No.4-1	No.4-2	No.4-3	No.4-4
断面寸法 $b \times h$	600×500 mm			
せん断スパン長 a	1,195mm			
せん断スパン比 a/d	2.78			
実験時のコンクリート 圧縮強度 f'_c [N/mm ²]	34.0	34.3	35.5	33.9
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	SD345 D16 セラミックキャップバー (CCb)			
せん断補強鉄筋比 ρ_w	0.33%			
セラミックキャップ バー (CCb) の埋込み 側先端位置	主鉄筋の表面から 5mm 手前	配力鉄筋の表面か ら 5mm 手前		—
定着体の組合せ	両端先端型			両端後端型
試験の目的	後施工せん断補強鉄筋による有効率 β_{aw} の評価			

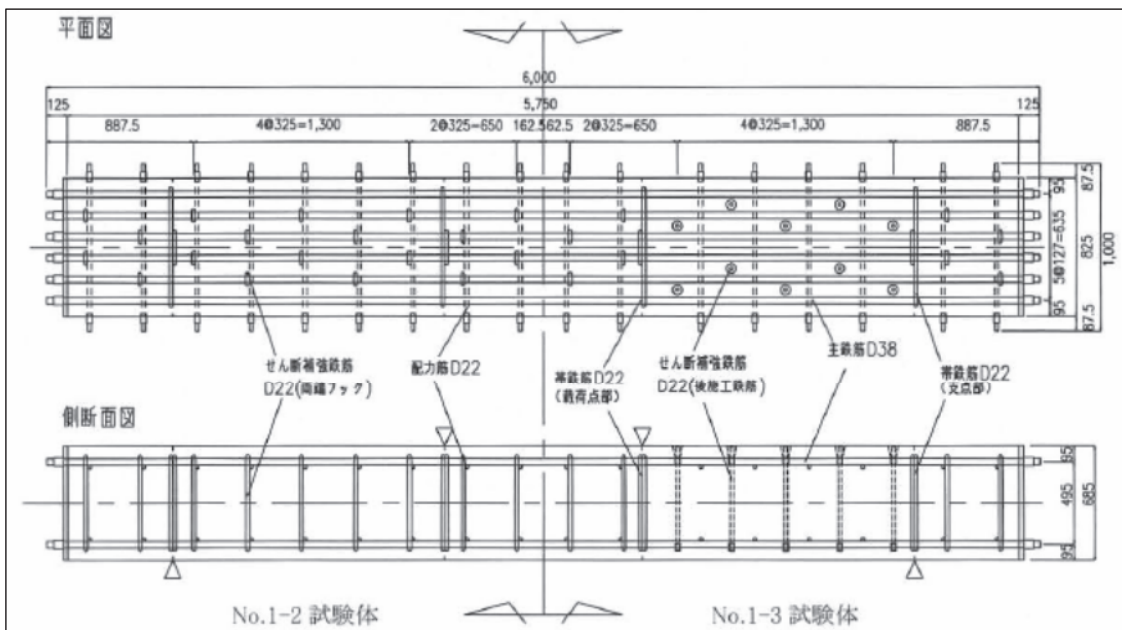


図 II-3.6 試験体図 (シリーズ 1)

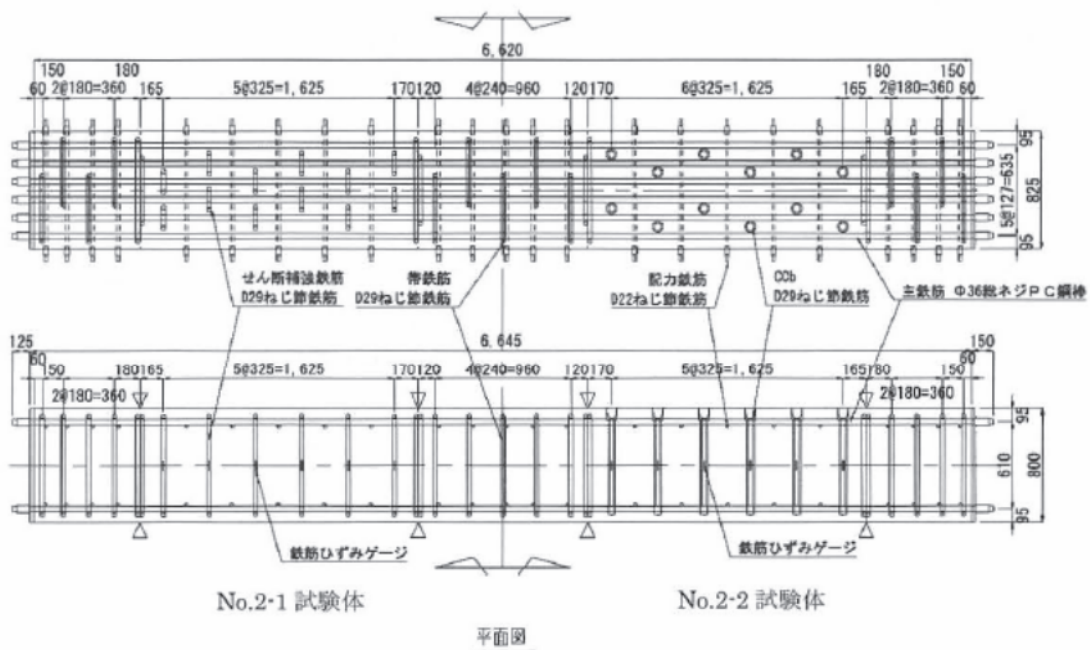
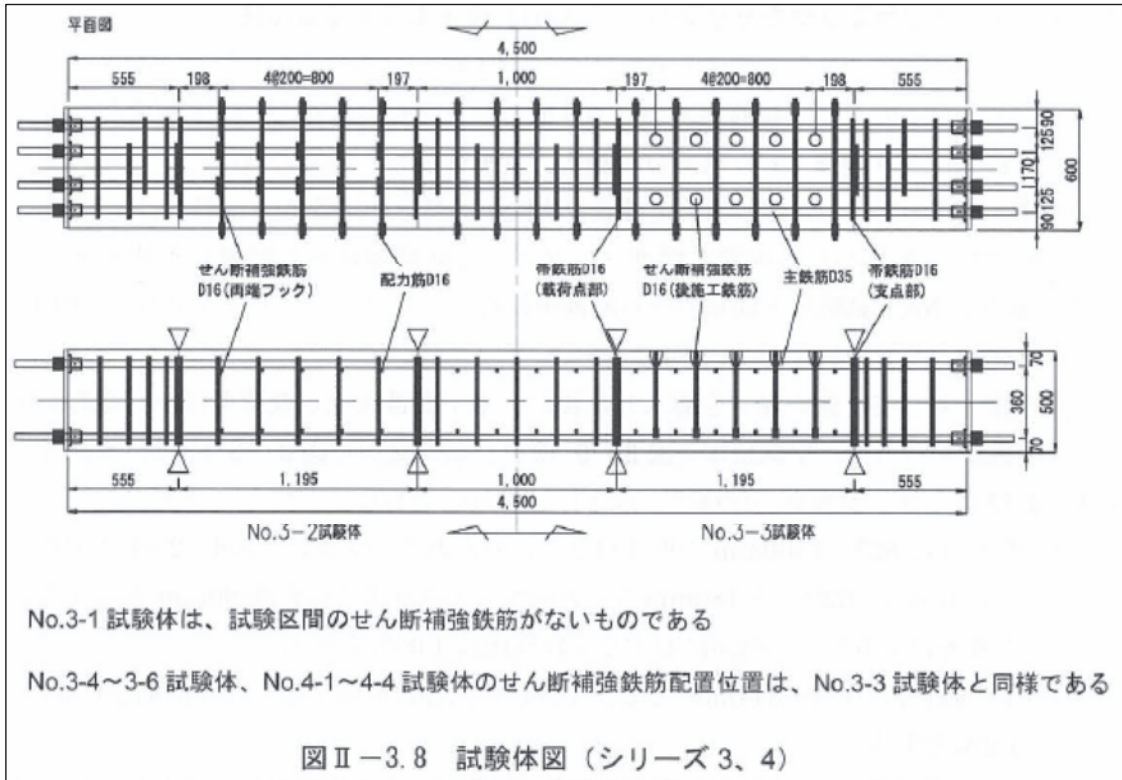
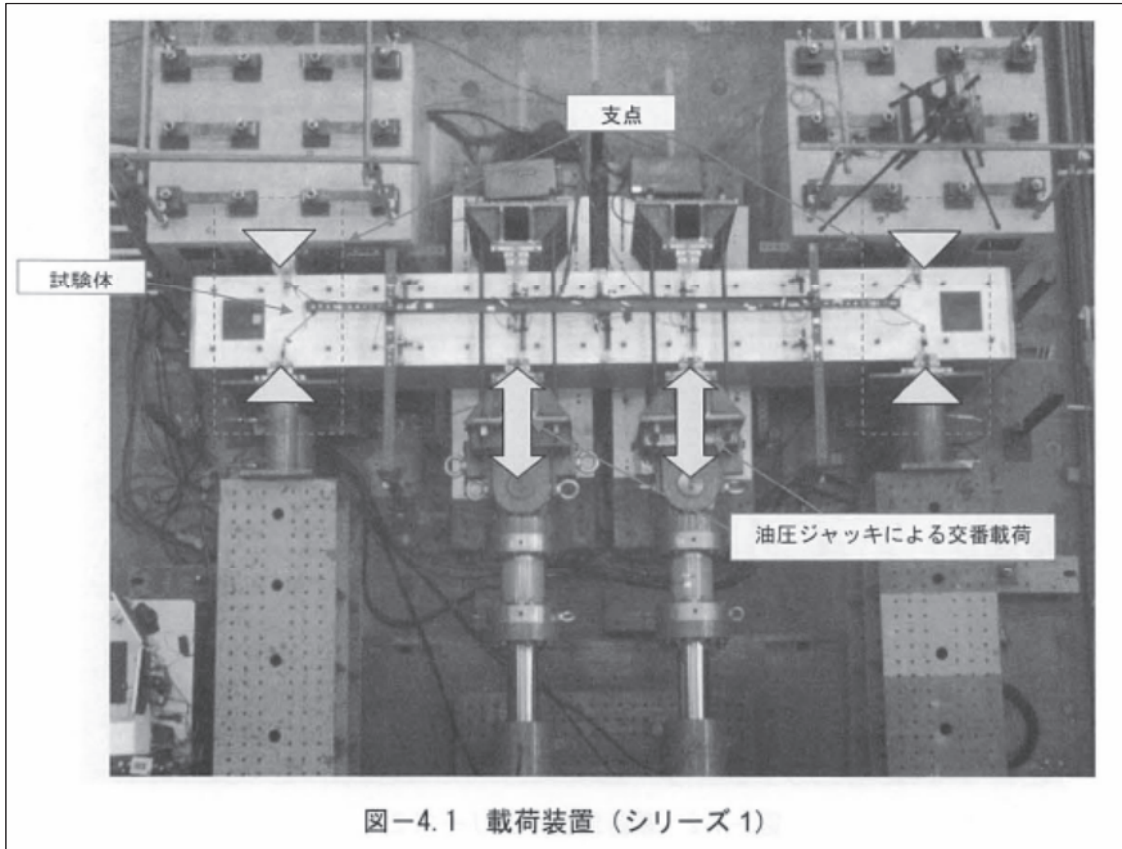


図 II-3.7 試験体図 (シリーズ 2)

第 3.3-2 図 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)



第 3.3-2 図 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)



第 3.3-3 図 せん断耐力向上性能試験の加力要領
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

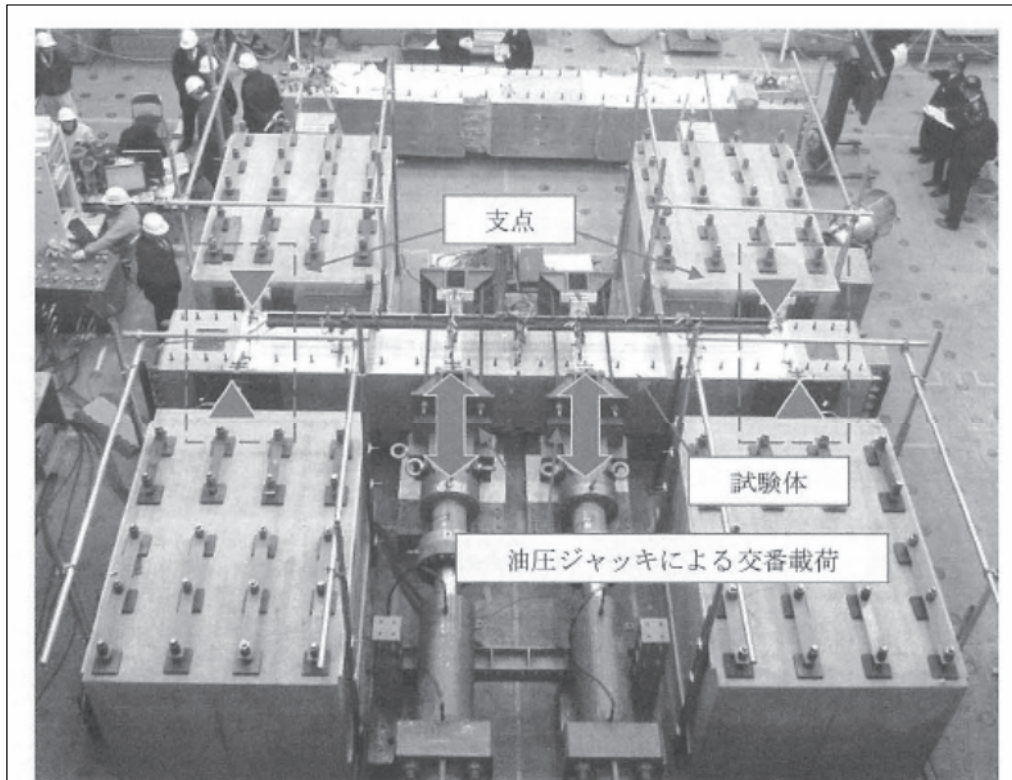


図-4.2 载荷装置 (シリーズ2)

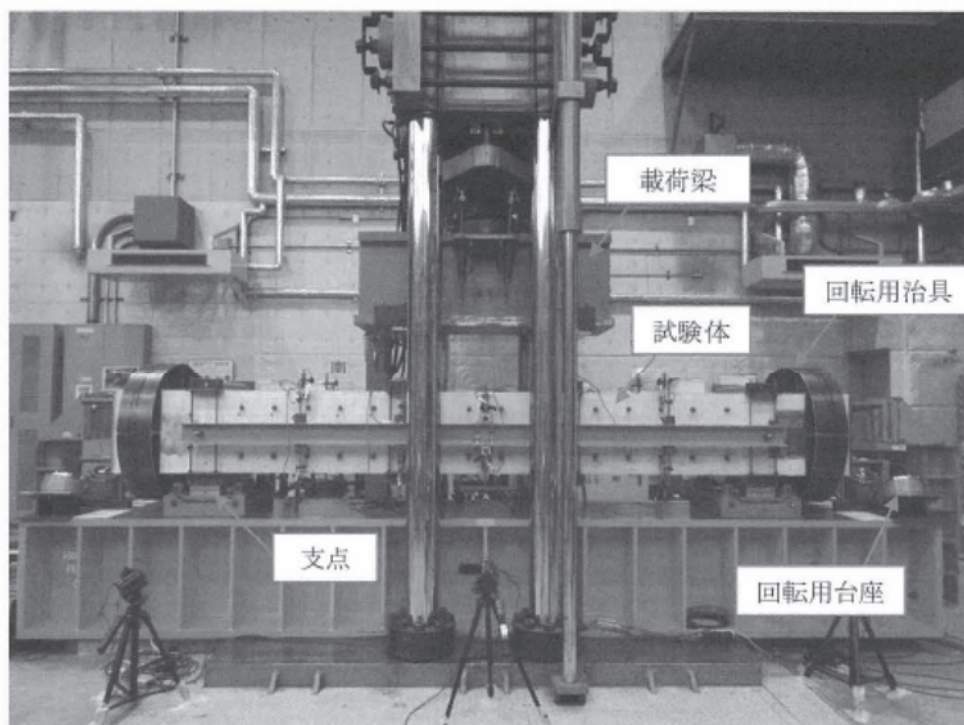


図-4.3 载荷装置 (シリーズ3、4)

第 3.3-3 図 せん断耐力向上性能試験の加力要領
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.3.1.2 実験結果

3.3.1.1の実験結果を、第3.3-4図及び第3.3-2表に示す。

本実験では、セラミックキャップバー（CCb）工法によるせん断耐力の向上効果を評価するために、せん断破壊する梁試験体に対する交番載荷実験を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- ・ セラミックキャップバー（CCb）で後施工せん断補強した梁試験体の最大せん断耐力は、同量の両端フック型のせん断補強鉄筋であらかじめせん断補強した梁試験体のそれと、概ね等しい値であった。
- ・ 梁の交番載荷実験時におけるセラミックキャップバー（CCb）のひずみ挙動は、両端フック型のせん断補強鉄筋と同様であり、せん断ひび割れを架橋する複数のセラミックキャップバー（CCb）が規格降伏強度相当以上のせん断力を負担していることを確認した。
- ・ セラミックキャップバー（CCb）の埋込み位置の先端を主鉄筋の表面から5mm手前および配力筋の表面から5mm手前に配置した試験体においても、せん断ひび割れを架橋する複数のセラミックキャップバー（CCb）が規格降伏強度相当以上のせん断力を負担していることを確認した。
- ・ 定着体の組合せのうち、両端に先端型定着体を装着した試験体、および両端に後端型定着体を装着した試験体のいずれにおいても、せん断ひび割れを架橋する複数のセラミックキャップバー（CCb）が規格降伏強度相当以上のせん断力を負担していることを確認した。
- ・ せん断補強鋼材として、D16、D22 および D29 のセラミックキャップバー（CCb）を用いた場合、いずれの試験ケースにおいても同様のメカニズムでせん断補強鉄筋として機能していることが確認された。
- ・ 両端フック型のせん断補強鉄筋のせん断耐力負担分に対する、セラミックキャップバー（CCb）のせん断耐力負担分の比で表される有効率 β_{aw} は、いずれの鉄筋径においても計算値以上であった。
- ・ セラミックキャップバー（CCb）の埋込み位置の先端および定着体の組合せを検討したいずれの試験ケースにおいても、通常のせん断補強鉄筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する、セラミックキャップバー（CCb）のせん断耐力負担分の比

第3.3-4図 実験結果
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

で表される有効率 β_{aw} は計算値以上であった。

- ・ 実験におけるセラミックキャップバー (CCb) のせん断補強効果に対する有効率 β_{aw} は、式(5)または式(9)～(12)による算出値よりも大きかった。また、複数のセラミックキャップバー (CCb) が通常のせん断補強鉄筋と同様にせん断ひび割れを架橋し、せん断耐力を負担できている。このことから、セラミックキャップバー (CCb) によるせん断補強効果を、トラス理論に基づいて通常のせん断補強鉄筋により負担されるせん断耐力に式(5)または式(9)～(12)による有効率 β_{aw} を乗じて評価することは、安全側であることが分かる。

第 3.3-4 図 実験結果
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

※：第 3.3-4 図に示す式(5) は 3.3.1.3 に、式(9)～(12)は 3.3.1.4 に詳細を示す。

第 3.3-2 表 実験結果の一覧
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

		No.1-1	No.1-2	No.1-3	備考
せん断補強鉄筋の種類・形状		せん断補強鉄筋なし	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 セラミック定着体	
せん断耐力の実験値	V	454 kN	1,045 kN	1,050 kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
	V_c	454 kN	401 kN	403 kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値。
	V_s	0 kN	644 kN	647 kN	$V_s=V-V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	396 kN	898 kN	837 kN	計算値は、コンクリート標準示方書 [設計編] に基づき、安全係数を 1.0 として算出した値。
	$V_{c cal}$	396 kN	401 kN	403 kN	
	$V_{s cal}$	0 kN	497 kN	437 kN	No.1-3 は示方書による V_s に有効率 $\beta=0.88$ を乗じた値。
せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw}				647 / 644=1.00	No.1-2 試験体と No.1-3 試験体の比較による値。

		No.2-1	No.2-2	備考	
せん断補強鉄筋の種類・形状		SD345D29 両端フック	SD345D29 セラミック定着体		
せん断耐力の実験値	正側	V	1597kN	1598kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V_c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V_s	1168kN	1164kN	$V_s=V-V_c$ として
	負側	V	1577kN	1498kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V_c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V_s	1148kN	1064kN	$V_s=V-V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	1372kN	1263kN	計算値は、コンクリート標準示方書 [設計編] に基づき、安全係数を 1.0 として算出した値	
	$V_{c cal}$	429kN	434kN		
	$V_{s cal}$	943kN	829kN	No.2-2 は示方書による V_s に有効率 $\beta=0.88$ を乗じた値	
せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw}		正側	1164/1168=1.00	No.2-1 試験体と No.2-2 試験体の比較による値	
		負側	1064/1148=0.93		

第 3.3-2 表 実験結果の一覧
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

表-8.4 実験結果の一覧 (シリーズ 3、4)

試験 ケース	「セラミックキャップ (CCb)」の仕様		実験での最大 せん断耐力(kN)		算定式による せん断耐力(kN) $V_{cal}=V_{cd}+V_s$			「セラミックキャップ バー (CCb)」が負担 するせん断力(kN)		せん断補強鉄筋の 有効率 β_{av} (V_{CCb}/V_s)			有効率の 設計値 β_{av}
			正側	負側	V_{cal}	V_{cd}	V_s	正側	負側	正側	負側	平均	
	定着体の 組合せ	先端位置	V_{exp}	V_{exp}	V_{cal}	V_{cd}	V_s	V_{CCb}	V_{CCb}	正側	負側	平均	
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	<u>563</u>	<u>499</u>	542	253	289	310	246	<u>1.07</u>	0.85	0.96	0.89
No.3-4	標準型	主鉄筋の表面 より5mm手前	515	570	543	254	289	261	316	0.90	1.09	1.00	0.83
No.3-5	標準型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>531</u>	509	543	254	289	277	255	<u>0.90</u>	0.88	0.92	
No.3-6	標準型	配力鉄筋の表面 より5mm手前	<u>497</u>	<u>526</u>	543	254	289	243	272	<u>0.84</u>	<u>0.94</u>	0.89	0.78
No.4-1	両端先端型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>532</u>	<u>520</u>	525	235	290	297	285	<u>1.02</u>	<u>0.98</u>	1.00	0.82
No.4-2	両端先端型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>520</u>	<u>535</u>	526	236	290	284	299	<u>0.98</u>	<u>1.03</u>	1.01	0.82
No.4-3	両端先端型	配力鉄筋の表面 より5mm手前	<u>539</u>	<u>546</u>	524	234	290	305	312	<u>1.05</u>	<u>1.08</u>	1.06	0.78
No.4-4	両端後端型	—	<u>667</u>	<u>588</u>	525	235	290	426	333	<u>1.47</u>	<u>1.15</u>	1.31	1.00

※1 下線は正負交番荷重で最初にせん断破壊したことを示す
 ※2 斜体はせん断破壊をしていない場合、その荷重方向での最大荷重を示す

3.3.1.3 Ccb のせん断補強の考え方

Ccb のせん断補強の考え方を第 3.3-5 図に示す。

(5) 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断補強効果の考え方

「セラミックキャップバー (CCb)」は通常の方法でせん断補強せず、既設構造物を後からせん断補強するために、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕のせん断耐力式におけるせん断補強鉄筋が負担するせん断力 V_{sd} を全て見込むことは困難であると考えられる。そこで「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果を、アルカリ骨材反応を受けて破断したせん断補強鉄筋のせん断耐力評価と同じ方法（参考文献：土木学会アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、2005.9）により検討した。

せん断補強鉄筋が破断した場合は、せん断ひび割れ箇所から破断箇所までの付着長さが短くなることにより、せん断ひび割れを架橋する箇所でせん断補強鉄筋が全強度を発揮できなくなり、せん断補強効果が低下すると考えられる。この効果を以下のように考慮し、定着不良が生じた場合のせん断耐力をトラス理論により評価する。

せん断ひび割れを架橋するせん断補強鉄筋を考えたとき、せん断ひび割れが破断位置にある場合は、そのせん断補強鉄筋はせん断力を負担することができず、一方、破断位置から定着長さ l_y 以上離れた位置にせん断ひび割れがあるせん断補強鉄筋では、付着により十分な定着性能が確保されていると判断され、降伏強度相当のせん断力を負担することができる。また、破断位置から定着長さ l_y 以下の範囲にせん断ひび割れがあるせん断補強鉄筋は、ある程度のせん断力は負担できるが定着性能が低下しているため、降伏強度相当より小さなせん断力のみが負担できるとした。その場合について、せん断ひび割れからのせん断補強鉄筋の定着長さにしたがって負担できるせん断力を線形で仮定したのが、図 II-4.33 に示す概念図である。この仮定によれば、平均化した破断した鉄筋の負担応力の低下率 η は次式で表すことができる。

$$\eta = (d-d')/(4l_y) \quad \text{if } (d-d') \leq 2l_y \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta = 1-l_y/(d-d') \quad \text{if } (d-d') > 2l_y \dots\dots\dots (2)$$

一部のせん断補強鉄筋のみが破断している場合には、その破断割合 α を考慮すると、破断したせん断補強鉄筋を含む有効せん断補強効果割合 β は式(3)となる。

$$\beta = \eta \alpha + (1-\alpha) \dots\dots\dots (3)$$

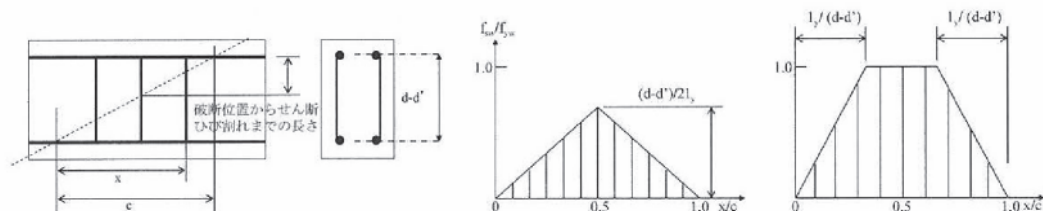


図 II-4.33 斜めひび割れ内の破断したせん断補強鉄筋応力

第 3.3-5 図 Ccb のせん断補強の考え方
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

すなわち、全てのせん断補強鉄筋が有効であるとして、トラス理論に基づきコンクリート標準示方書式で算出したせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力分に、有効せん断補強効果割合 β を乗じることにより、定着が不良であるものを含むせん断補強鉄筋のせん断耐力負担分を評価することができる。

以上の考え方に「セラミックキャップバー (CCb)」の定着性能を適用することにより、「セラミックキャップバー (CCb)」工法のせん断補強効果を評価することができる。「セラミックキャップバー (CCb)」の定着性能については、引抜き試験により以下について明らかとなっている。

- ・ 先端型定着体が、「セラミックキャップバー (CCb)」の規格降伏強度相当以上の定着力を確保するための必要定着長は、定着体の先端から $5D$ (D : 鉄筋の直径) である。
- ・ 後端型定着体は、単体で「セラミックキャップバー (CCb)」の規格引張強度相当以上の定着力を発揮できる。

「セラミックキャップバー (CCb)」の定着長 l_y が $5D$ であることと、「セラミックキャップバー (CCb)」工法の適用部材における主鉄筋間隔が $2l_y$ 以上であるとすると、「セラミックキャップバー (CCb)」の応力低下率 η の算出では、式(2)を基本とすることができる。また、後端型定着体部においては、せん断補強鉄筋の材端までせん断耐力に対して有効に作用することから、式(2)の第2項の $l_y/(d-d')$ には、係数 $1/2$ が乗じられる (式(4))。さらに、式(3)において破断している鉄筋は無いことから $\alpha = 1$ とすると、「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断補強の有効率 β_{aw} は、式(5)により算出できる。

$$\eta = 1 - \frac{l_y}{2(d-d')} \dots\dots\dots (4)$$

$$\beta_{aw} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2(d-d')} \dots\dots\dots (5)$$

第 3.3-5 図 CCb のせん断補強の考え方
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.3.1.4 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価

実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価について、第 3.3-6 図に示す。

(6) 実験結果に基づく「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果の評価

i) 「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果の評価

上記の考え方の適用性を検討するために、「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} をシリーズ 1 の実験結果に基づいて評価する。

「セラミックキャップバー (CCb)」によって負担されるせん断耐力 V_{CCb} は、式(6)に示すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 $V_{exp,no1-3}$ から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。また、せん断補強鉄筋によって負担されるせん断耐力 V_s は、式(7)に示すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 $V_{exp,no1-2}$ から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。

第 3.3-6 図 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/9)

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効性は、前述のように有効率 β_{aw} により評価される。有効率 β_{aw} は、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する有効率である。すなわち、本実験においては、No.1-2 試験体におけるせん断補強鉄筋が負担するせん断力 V_s と、No.1-3 試験体の「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力 V_{CCb} との比として式(8)のように評価することができる。

$$V_{CCb} = V_{exp,no1-3} - V_{c,no1-3} \dots\dots\dots(6)$$

$$V_s = V_{exp,no1-2} - V_{c,no1-2} \dots\dots\dots(7)$$

$$\beta_{aw} = V_{CCb} / V_s \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

V_{CCb} : 「セラミックキャップバー (CCb)」による負担されるせん断耐力

$V_{exp,no1-2}$: 実験で得られた No.1-2 試験体のせん断耐力

$V_{exp,no1-3}$: 実験で得られた No.1-3 試験体のせん断耐力

$V_{c,no1-2}$: せん断補強鉄筋を用いない場合の No.1-2 試験体のせん断耐力の計算値

$V_{c,no1-3}$: せん断補強鉄筋を用いない場合の No.1-3 試験体のせん断耐力の計算値

V_s : 通常のせん断補強鉄筋に負担されるせん断耐力の計算値

β_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力の補強効果を示す有効率

表Ⅱ-4.1 に各試験体の実験結果、および土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出した設計計算値を示す。なお、No.1-2、1-3 試験体のコンクリート負担分 V_c は、実験時のコンクリート強度を用いて土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出した。また、表中の計算値は、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出したものであり、No.1-3 試験体のせん断耐力については、有効率 β_{aw} を式(5)により以下のように算出し、No.1-2 試験体のせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力の計算値に乗じている。

$$d-d' = 495\text{mm}, l_y = 110\text{mm} (5D, D = 22\text{mm}) \text{ より}$$

$$\beta_{aw} = 1 - 1/2 \cdot l_y / (d - d') = 1 - 1/2 \cdot (110/495) = 0.88$$

表Ⅱ-4.1 より、各試験体の実験結果に基づいて算出される「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率 β_{aw} が、コンクリート負担分を計算値に基づいた場合で 1.00 であり、式(5)による有効率 0.88 以上であることが分かる。また、各試験体の設計計算値と実験結果との比較においても、全ての試験体の実験結果は設計計算値よりも大きくなっている。

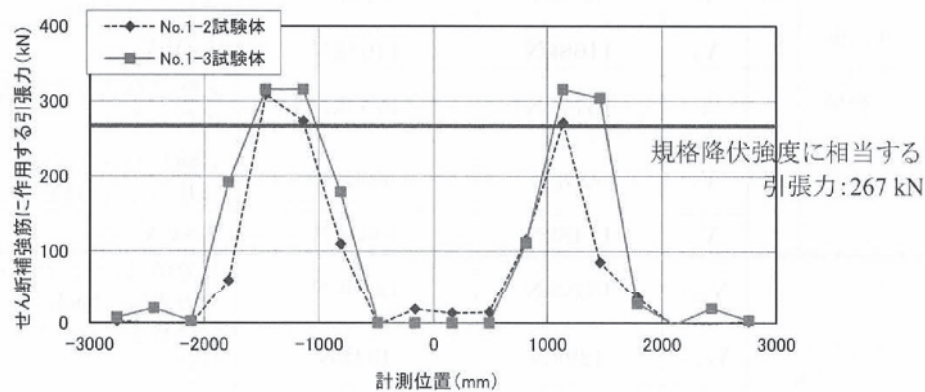
次に、図Ⅱ-4.34 に最大せん断耐力経験時におけるせん断補強鉄筋に作用する引張力の分布について、比較したものを示す。なお、図Ⅱ-4.34 におけるせん断補強鉄筋の引張力

第 3.3-6 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/9)

は、せん断補強鉄筋のひずみゲージの測定値を材料試験による応力-ひずみ関係に基づいて引張応力に換算し、断面積を乗じた値である。図Ⅱ-4.34より、「セラミックキャップパー (CCb)」で後施工補強した No.1-3 試験体においても、通常のせん断補強を行った No.1-2 試験体と同様に、1つの斜めひび割れに対して複数本の「セラミックキャップパー (CCb)」が規格降伏強度以上の引張力を負担していることが確認できる。

表Ⅱ-4.1 実験結果の一覧 (シリーズ1)

		No.1-1	No.1-2	No.1-3	備 考
補強鉄筋の種類・形状		せん断補強鉄筋なし	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 セラミック定着体	
せん断耐力の実験値	V	454 kN	1,045 kN	1,050 kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
	V_c	454 kN	401 kN	403 kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
	V_s	0 kN	644 kN	647 kN	$V_s = V - V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	396 kN	898 kN	837 kN	計算値は、コンクリート標準示方書 [設計編] に基づき、安全係数を 1.0 として算出した値
	$V_{c cal}$	396 kN	401 kN	403 kN	
	$V_{s cal}$	0 kN	497 kN	437 kN	No.1-3 は示方書による V_s に有効率 $\beta = 0.88$ を乗じた値
せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw}				647 / 644 = 1.00	No.1-2 試験体と No.1-3 試験体の比較による値



図Ⅱ-4.34 せん断補強鉄筋に作用する引張力の比較 (シリーズ1)

また、シリーズ2のD29の「セラミックキャップパー (CCb)」においても、セラミック定着体および周囲へ充てんされたグラウトによって、両端フックを有するせん断補強鉄筋

第3.3-6 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/9)

と同様なメカニズムでせん断補強鉄筋として機能することが確認された。そこで、シリーズ1と同様に「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率を実験に基づいて評価する。

表Ⅱ-4.2に各試験体の実験結果、および土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出した設計計算値を示す。載荷方向正側と負側でせん断耐力が若干異なるものの、「セラミックキャップバー(CCb)」による補強効果が小さい方である負側の有効率は0.93であった。これに対し、No.2-2の試験体の諸元から式(5)に基づいて以下の様に算出される有効率の設計計算値は0.88 ($d-d' = 610\text{mm}$ 、 $l_y = 145\text{mm}$ (5D、 $D = 29\text{mm}$))である。つまり、D29のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合でも、式(5)から算出される有効率以上のせん断補強効果が期待できることが確認された。

次に、図Ⅱ-4.35に最大せん断耐力経験時におけるせん断補強鉄筋に作用する引張力の分布について、比較したものを示す。同図より、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強したNo.2-2試験体においても、通常のせん断補強を行ったNo.2-1試験体と同様に、1つの斜めひび割れに対して複数本の「セラミックキャップバー (CCb)」が規格降伏強度以上の引張力を負担していることが確認できる。

表Ⅱ-4.2 実験結果の一覧 (シリーズ2)

		No.2-1	No.2-2	備考	
補強鉄筋の種類・形状		SD345D29 両端フック	SD345D29 セラミック定着体		
せん断耐力の実験値	正側	V	1597kN	1598kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V _c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V _s	1168kN	1164kN	V _s =V-V _c として
	負側	V	1577kN	1498kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V _c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V _s	1148kN	1064kN	V _s =V-V _c として
せん断耐力の計算値	V _{cal}	1372kN	1263kN	計算値は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づき、安全係数を1.0として算出した値	
	V _{c cal}	429kN	434kN		
	V _{s cal}	943kN	829kN	No.2-2は示方書によるV _s に有効率β=0.88を乗じた値	
せん断補強鉄筋の有効率 β _{aw}	正側		1164/1168=1.00	No.2-1試験体とNo.2-2試験体の比較による値	
	負側		1064/1148=0.93		

第3.3-6 図 実験結果に基づくCCbによるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/9)

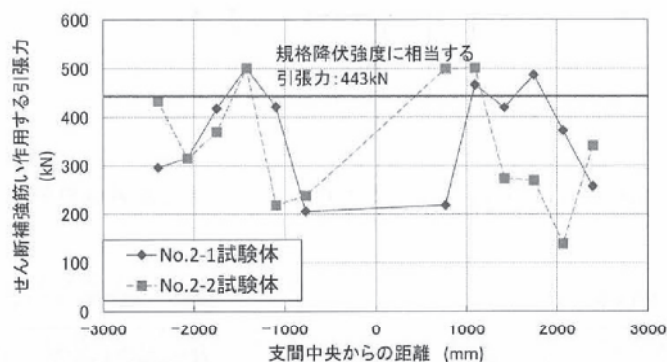


図 II-4.35 セン断補強鉄筋に作用する引張力の比較 (シリーズ 2)

以上より、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を、トラス理論に基づいて算出した「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なして求められるせん断耐力負担分に、式(5)による有効率 β_{aw} を乗じて算出することは、設計上、安全側となることが分かる。

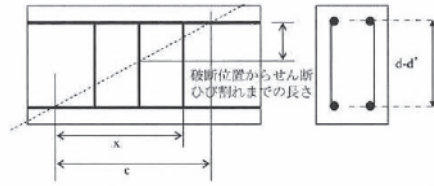
ii) 「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置および定着体の組合せによるせん断補強効果の評価

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} に対して、「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置の先端および定着体の組合せが及ぼす影響をシリーズ 3、4 の実験結果に基づいて評価する。

前述の結果より、式(5)による有効率 β_{aw} を乗じて「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を評価できる。シリーズ 3、4 における実験結果より、斜めひび割れ発生状況およびせん断補強鉄筋のせん断力負担はシリーズ 1、2 とほぼ同様であることが確認されている。つまり、埋込み位置の先端が主鉄筋の図心より手前となる「セラミックキャップバー (CCb)」や、定着体の組合せが標準型、両端先端型、両端後端型である「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力負担分を、シリーズ 1、2 と同様の手法で評価できると考えられる。

ここで、各種条件に応じた「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率算定における概念図を図 II-4.36 に示す。検討ケースは、表 II-4.3 に示すとおりである。

第 3.3-6 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/9)



(a)斜めひび割れ内に定着不良が生じたせん断補強鉄筋

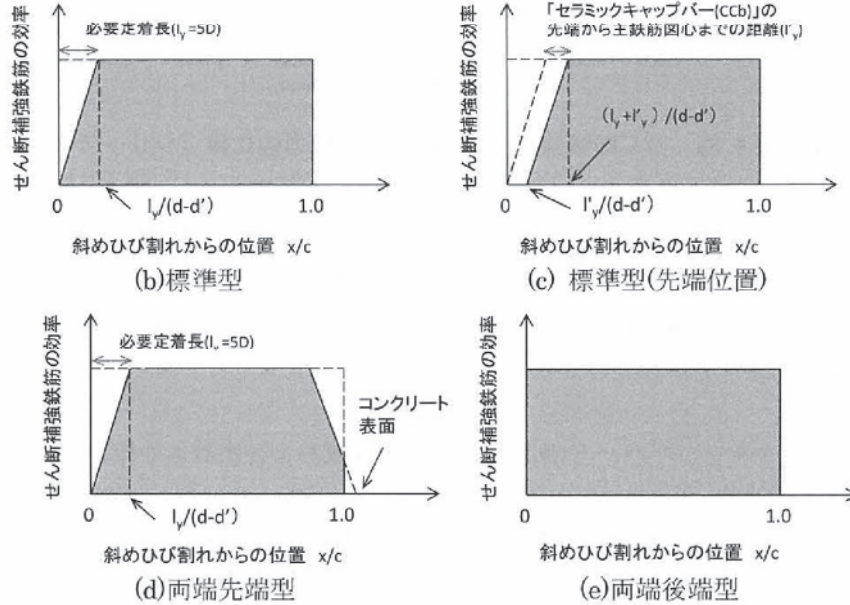


図 II - 4. 36 有効率算定の概念図

表 II - 4. 3 検討ケースの一覧

検討ケース	埋込側の定着体タイプ	差込側の定着体タイプ	埋込み位置
(b) 標準型	先端型定着体	後端型定着体	主鉄筋の図心
(c) 標準型 (先端位置)	先端型定着体	後端型定着体	主鉄筋の図心より手前
(d) 両端先端型	先端型定着体	先端型定着体	主鉄筋の図心
(e) 両端後端型	後端型定着体	後端型定着体	—

先端型定着体の先端位置が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前となる「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率は、図 II - 4. 36 (c) に示すように、実際の埋込み位置から差込側の主鉄筋の図心までの範囲の有効率 (β_{awxd-f}) のみを考慮することで算出できると考えられる。

両端ともに先端型定着体を設置した「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率 (β_{awxx}) は、差込側においても埋込側と同様に、必要定着長に応じた有効率の低減を考慮すること

第 3. 3-6 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (6/9)

で評価できる。ただし、差込側の定着体は、コンクリートの表面に定着されていることを考慮して、**図Ⅱ-4.36(d)**に示すような有効率を算出することとする。

両端ともに後端型定着体を設置した「セラミックキャップバー (CCb)」では、両側で標準フックと同等の定着性能が期待できる。そのため、その補強効果も両端フックのせん断補強鉄筋と同様となり、有効率 (β_{awdd}) は 1.0 であると考えられることができる。

図Ⅱ-4.36 を参考に式(5)を拡張すると、それぞれのせん断補強有効率は式(9)~(11)と表すことができる。なお、両端先端型を用いて、かつ埋込み位置が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前となる場合は、式(10)に対して式(9)の算出方法を組み合わせることで式(12)により有効率 (β_{awxx-f}) を評価することができる。

$$\beta_{awxd-f} = \eta = 1 - \frac{(l_y + 2l'_y)}{2(d - d')} \dots\dots\dots (9)$$

$$\beta_{awxx} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2(d - d')} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y(d - d')} \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta_{awdd} = \eta = 1 \dots\dots\dots (11)$$

$$\beta_{awxx-f} = \eta = 1 - \frac{(l_y + 2l'_y)}{2(d - d')} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y(d - d')} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

β_{awxd-f} : 標準型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いて、その埋込み位置の先端が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前である場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awxx} : 両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awdd} : 両端後端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awxx-f} : 両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いて、その埋込み位置の先端が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前である場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

d' : 差込側の部材表面から圧縮鋼材図心までの距離

l'_y : 埋込側の主鉄筋の図心から「セラミックキャップバー (CCb)」の先端までの距離

上記の考え方の適用性を検討するために、「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} をシリーズ 3、4 の実験結果に基づいて評価する。

「セラミックキャップバー (CCb)」によって負担されるせん断耐力 V_{CCb} は、式(13)に示

第 3.3-6 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (7/9)

すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 V_{exp} から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。また、せん断補強鉄筋によって負担されるせん断耐力 V_s は、式(14)に示すように、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なすことで求めることができる。つまり、「セラミックキャップバー (CCb)」の鉄筋配置が決まれば、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕のせん断耐力式と同様に求められる。なお、安全係数は 1.0 とした。

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効性は、前述のように有効率 β_{aw} により評価される。有効率 β_{aw} は、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する有効率である。すなわち、各試験体諸元を基に通常のせん断補強鉄筋と仮定して算出されるせん断耐力 V_s と、その試験体の「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力 V_{CCb} との比として式(15)のように評価することができる。

$$V_{CCb} = V_{exp} - V_{cd} \dots\dots\dots(13)$$

$$V_s = [A_{aw} f_{awy} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / s_{aw}] z / \gamma_b \dots\dots\dots(14)$$

$$\beta_{aw} = V_{CCb} / V_s \dots\dots\dots(15)$$

ここで、

V_{CCb} : 「セラミックキャップバー (CCb)」による負担されるせん断耐力

V_{exp} : 実験で得られたせん断耐力

V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない場合のせん断耐力の計算値

V_s : 「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋とみなして求められるせん断耐力の計算値

A_{aw} : 単位長さあたりの区間 s_{aw} におけるセラミックキャップバー (CCb) の総断面積

f_{awy} : 「セラミックキャップバー (CCb)」の降伏強度で 400N/mm² 以下とする

α_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」が部材軸となる角度

z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材区心までの距離で、一般に $d/1.15$ とし
てよい

γ_b : ここでは、1.0

β_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力の補強効果を示す有効率

表Ⅱ-4.4 にシリーズ 3、4 における実験結果の一覧を示す。有効率 β_{aw} は、正側載荷時および負側載荷時についてそれぞれ算出した。また、梁の正負交番載荷実験において、最初にせん断破壊した載荷方向におけるせん断耐力に表中に下線で示す。実験から得られた最初にせん断破壊した側の有効率 β_{aw} は、式(9)~(12)で算出される有効率 β_{aw} よりも、いず

第 3.3-6 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (8/9)

れの試験ケースにおいても大きな値であることが分かる。つまり、「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置の先端および定着体の組合せが異なる場合においても、式(9)~(12)から算出される有効率 β_{aw} 以上のせん断補強効果が期待できることが確認された。

以上より、鉄筋の埋込み位置の先端および定着体の組合せが異なる場合においても、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を、トラス理論に基づいて算出した「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なして求められるせん断耐力負担分に、式(9)~(12)による有効率 β_{aw} を乗じて算出することは、設計上、安全側となることが分かる。

表 II-4.4 実験結果の一覧 (シリーズ 3、4)

試験ケース	「セラミックキャップバー (CCb)」の仕様		実験での最大せん断耐力(kN)		算定式によるせん断耐力(kN) $V_{cal}=V_{cd}+V_s$			「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力(kN)		せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw} (V_{CCb}/V_s)			有効率の設計値 β_{aw}
			正側	負側	V_{cal}	V_{cd}	V_s	正側	負側	正側	負側	平均	
	定着体の組合せ	先端位置	V_{exp}	V_{exp}				V_{CCb}	V_{CCb}				
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	<u>563</u>	<u>499</u>	542	253	289	310	246	<u>1.07</u>	0.85	0.96	0.83
No.3-4	標準型	主鉄筋の表面より5mm手前	<u>515</u>	<u>570</u>	543	254	289	261	316	<u>0.90</u>	<u>1.09</u>	1.00	
No.3-5	標準型	主鉄筋の表面より5mm手前	<u>531</u>	509	543	254	289	277	255	<u>0.96</u>	0.88	0.92	
No.3-6	標準型	配力鉄筋の表面より5mm手前	<u>497</u>	<u>526</u>	543	254	289	243	272	<u>0.84</u>	<u>0.94</u>	0.89	0.78
No.4-1	両端先端型	主鉄筋の表面より5mm手前	<u>532</u>	<u>520</u>	525	235	290	297	285	<u>1.02</u>	<u>0.98</u>	1.00	0.82
No.4-2	両端先端型	主鉄筋の表面より5mm手前	<u>520</u>	<u>535</u>	526	236	290	284	299	<u>0.98</u>	<u>1.03</u>	1.01	0.82
No.4-3	両端先端型	配力鉄筋の表面より5mm手前	<u>539</u>	<u>546</u>	524	234	290	305	312	<u>1.05</u>	<u>1.08</u>	1.06	0.78
No.4-4	両端後端型	—	<u>667</u>	<u>568</u>	525	235	290	426	333	<u>1.47</u>	<u>1.15</u>	1.31	1.00

※1 下線は正負交番荷重で最初にせん断破壊したことを示す

※2 斜体はせん断破壊をしていない場合、その荷重方向での最大荷重を示す

第 3.3-6 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (9/9)

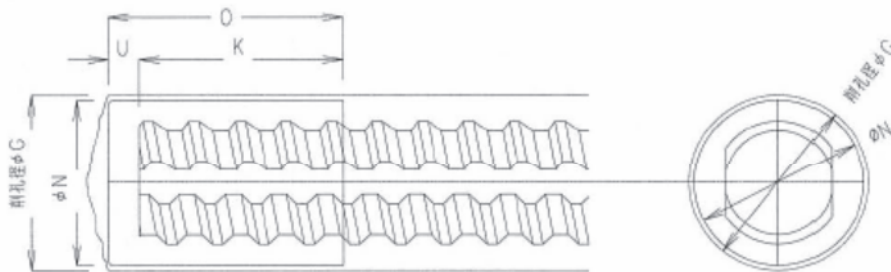
3.3.2 使用材料・強度

実験を元にした本設計法では、第3.3-7図に示すとおり使用材料を定めている。今回の設計でも、これらに適合する使用材料・強度を用いる。

- (1) セラミックキャップパー（CCb）工法は、使用の目的に対してせん断耐力が不足する部材のせん断補強および地震時のじん性が不足する部材のじん性確保などの目的に使用する。
- (2) セラミックキャップパー（CCb）工法の適用範囲は、以下の条件に該当するものとする。
- ・主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、片側から施工する既設コンクリート構造物に対し、後施工によるせん断補強の目的で用いる。
 - ・両側からの施工が可能な既設のコンクリート構造物であり、じん性確保を目的としない場合、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

第 3.3-7 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/6)

セラミックキャップパー (CCb) は、D32、D29、D25、D22、D19、D16、D13のねじ鉄筋の両端に高純度アルミナ系セラミック製のキャップを設け定着体をなす構造とする。先端型・後端型の定着体の例、およびねじ鉄筋の寸法を図-2.1~2.3に示す。



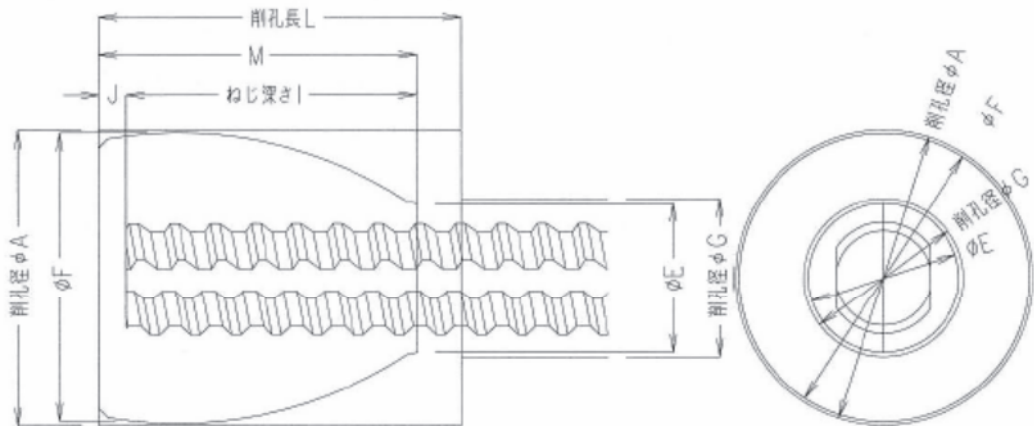
呼び名	削孔寸法	継手仕様時
	削孔径 ΦG mm	削孔寸法 削孔径 ΦG mm
D13	30.0	30.0
D16	30.0	34.0
D19	34.0	36.0
D22	36.0	40.0
D25	46.0	46.0
D29	50.0	50.0
D32	55.0	55.0

呼び名	定着体の寸法			
	ΦN mm	O mm	ねじ深さK mm	U mm
D13	25.0	36.0	30.0	6.0
D16	27.0	46.0	40.0	6.0
D19	30.0	46.0	40.0	6.0
D22	33.0	46.0	40.0	6.0
D25	42.0	52.0	46.0	6.0
D29	45.0	59.0	53.0	6.0
D32	50.0	64.0	58.0	6.0

【先端型定着体 (CX)】

図-2.1 セラミック定着体、ねじ鉄筋の例 (その1)

第 3.3-7 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/6)



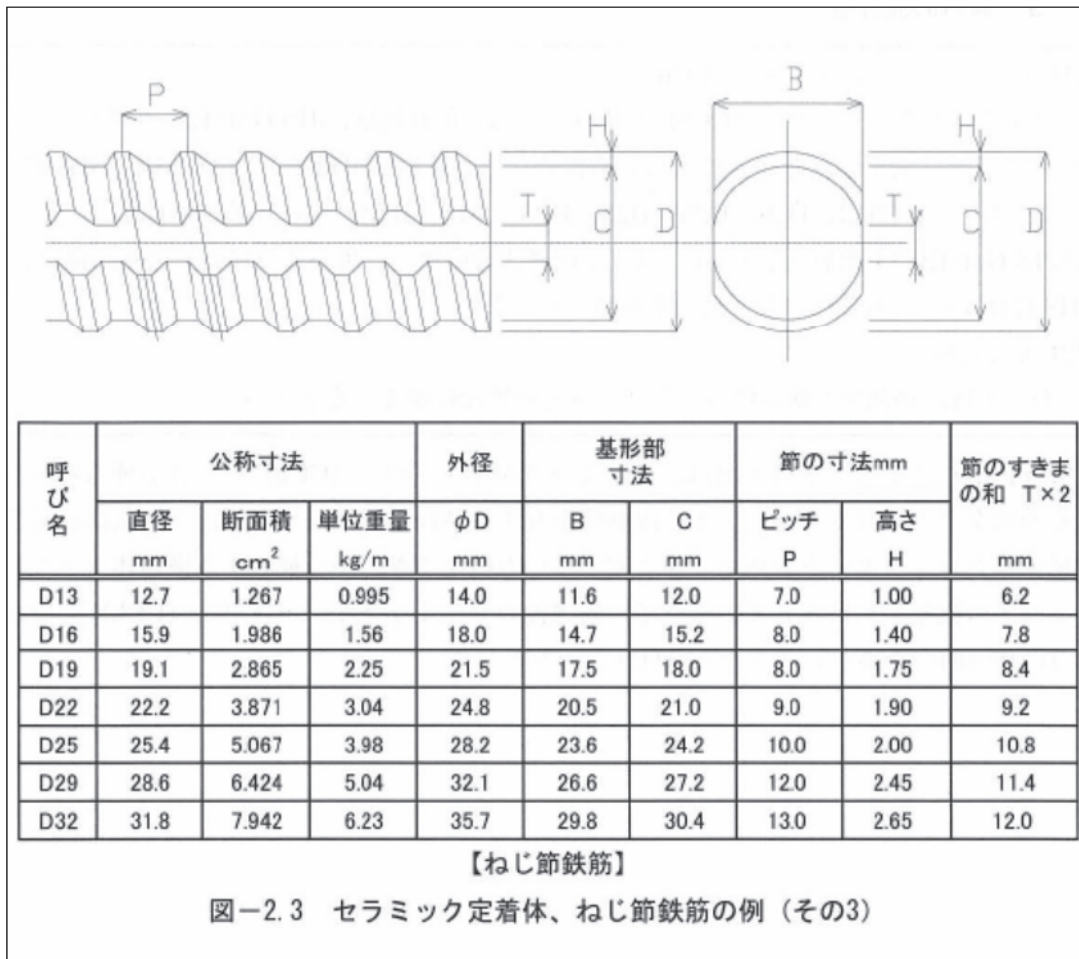
呼び名	削孔寸法		
	削孔径ΦA mm	削孔径ΦG mm	削孔長L mm
D13	60.0	30.0	80.0
D16	60.0	30.0	80.0
D19	65.0	34.0	80.0
D22	65.0	36.0	80.0
D25	70.0	46.0	80.0
D29	75.0	50.0	80.0
D32	75.0	55.0	80.0

呼び名	定着体の寸法				
	ΦF mm	ΦE mm	M mm	ねじ深さI mm	J mm
D13	53.5	22.0	70.0	64.0	6.0
D16	55.5	25.0	70.0	64.0	6.0
D19	58.5	29.0	70.0	64.0	6.0
D22	62.5	32.0	70.0	64.0	6.0
D25	65.5	35.0	70.0	64.0	6.0
D29	69.5	39.0	70.0	64.0	6.0
D32	72.5	42.0	70.0	64.0	6.0

【後端型定着体(CD)】

図-2.2 セラミック定着体、ねじ筋鉄筋の例 (その2)

第 3.3-7 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/6)



第 3.3-7 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/6)

セラミック定着体は、JIS R 1600 に示すファインセラミックスに分類されるセラミックにて製作されており、顆粒物性においてアルミナ純度 96%以上のアルミナ材で、焼成体物性において 300N/mm²以上の曲げ強度(JIS R 1601)を製造会社が保証するものを用いることを原則としている。

セラミック定着体の寸法、ねじ節強度及び密度については、以下のとおり品質管理基準を定めている。

・セラミック定着体			
解説表-3.4 セラミック定着体の品質管理基準			
管理項目	管理内容	規格値	管理頻度
最外径	ノギスによる計測	(D13~D25) 先端型：設計値±0.8mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 10 体。
全高	ノギスによる計測	(D13~D25) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.2mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 10 体。
ねじ部長さ	測定治具による計測	(D13~D25) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 10 体。
ねじ節強度	ねじ節強度試験	母材となるねじ節鉄筋の規格降伏強度相当以上	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 3 体。
密度	密度試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製造者から発行される材料証明書の密度との誤差が ±0.05g/cm³ 以内 ・ 各試験値が平均値の ±1.5% 以内 ・ 各試験値が 3.75 g/cm³ 以上 	1 焼成ロット (最大 2,000 体) ごとに 10 体。

第 3.3-7 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/6)

(1) セラミックキャップバー (CCb)

セラミックキャップバー (CCb) を構成するねじ節鉄筋は、JIS G 3112に準拠したネジテツコン (東京鐵鋼株式会社製ねじ節鉄筋) で、種類はSD295A、SD295B、SD345とし、呼び名はD32、D29、D25、D22、D19、D16、D13とする。特性値 f_{yk} および f_{uk} はJIS G 3112の下限值としてよい。また、限界状態の検討に用いる異形鉄筋の断面積は、JIS G 3112による各呼び名の公称断面積としてよい。

(2) 充てん材

充てん材は補強する構造体コンクリートと同等な性能であるとする。

第 3.3-7 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (6/6)

3.3.3 構造部材の評価

3.3.1 で示した基本的考え方にに基づき、第 3.3-8 図で示すコンクリート標準示方書[設計編] (土木学会, 2012) (以下「コンクリート標準示方書 2012」という。)の考え方を準用した設計式を用いてせん断耐力を定めている。

セラミックキャップバー (CCb) により補強された壁部材のせん断耐力が作用するせん断力より大きいことを確認することにより、補強後の構造物の安全性の照査を行う。

セラミックキャップバー (CCb) により補強された壁部材の単位長さ当たりのせん断耐力 V_{pyd} は、式(1)と式(2)によりセラミックキャップバー (CCb) のせん断耐力への寄与を考慮し、2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準] 3編 2.4.3.2に準じて、以下のように求めてよい。

$$V_{pyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{CCbd} \dots\dots\dots(1)$$

$$V_{CCbd} = \beta_{aw} \cdot V_{awd} = \beta_{aw} [A_{aw} \cdot f_{awyd} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / S_{aw}] z / \gamma_b \dots\dots\dots(2)$$

$$\beta_{awxd} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2S_{rb}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\beta_{awxx} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2S_{rb}} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y S_{rb}} \dots\dots\dots(4)$$

$$\beta_{awdd} = \eta = 1 \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 V_{cd} ：せん断補強鋼材を用いない壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{sd} ：既存のせん断補強鋼材により受け持たれる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{CCbd} ：セラミックキャップバー (CCb) により受け持たれる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{awd} ：セラミックキャップバー (CCb) を通常のスターラップとみなして求められる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 β_{aw} ：セラミックキャップバー (CCb) のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awxd} ：標準型のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awxx} ：両端先端型のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awdd} ：両端後端型のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 A_{aw} ：単位長さあたりの区間 S_{aw} におけるセラミックキャップバー (CCb) の総断面積
 f_{awyd} ：セラミックキャップバー (CCb) の設計降伏強度で 400N/mm^2 以下とする

第 3.3-8 図 せん断に対する安全性照査
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

α_{aw} : セラミックキャップバー (CCb) が部材軸となす角度
 S_{aw} : セラミックキャップバー (CCb) の配置間隔
 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で一般に $d/1.15$ としてよい
 γ_b : 部材係数 (一般に1.10としてよい)
 l_y : セラミックキャップバー (CCb) の先端型定着体の定着長 (5D としてよい)
 S_{rb} : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔

第 3.3-8 図 せん断に対する安全性照査
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.3.4 構造細目

本設計方法では、想定外の破壊形式をとらないように、第3.3-9図で示す構造細目を定めている。

- (1) セラミックキャップバー (CCb) によって補強された壁部材では、補強前に配置されていたせん断補強鉄筋とセラミックキャップバー (CCb) を加えたせん断補強鉄筋の断面積比が0.15%以上になるように、セラミックキャップバー (CCb) を配置する。
- (2) セラミックキャップバー (CCb) を配置する最大の間隔は、補強前に配置されていたせん断補強鉄筋の位置も含めて、壁部材の有効高さの1/2でかつ300mm以下としなければならない。また、計算上でセラミックキャップバー (CCb) による補強を必要とする区間の外側の有効高さに等しい区間にも、これと同量のセラミックキャップバー (CCb) を配置しなければならない。
- (3) 差込側のセラミック定着体は、差込側のコンクリート表面に配置することを標準とする。
- (4) 埋込側の先端は、主鉄筋の中心まで配置することを原則とする。ただし、掘削孔の先端から埋込側の表面まで厚さは50mm以上とする。

第3.3-9図 構造細目 (建設技術審査証明報告書より抜粋)

3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認

3.4.1 施工の確実性

建設技術審査証明報告書において確認されている、CCbの施工の確実性について、第3.4-1図に示す。

背面に地盤などがあり、片側からしか施工できないRC部材に対して、補強後の掘削孔内にエア抜き用ホースを残置せずにせん断補強できることが確認された。

両側からの施工が可能な既設鉄筋コンクリート部材に対し、両端に後端型定着体を設置する場合、片方のセラミック定着体をグラウト中で接合することで、施工が確実に進められることが確認された。

第3.4-1図 施工の確実性
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

3.4.2 施工の容易性

建設技術審査証明報告書において確認されている、CCbの施工の容易性について、第3.4-2図に示す。

狭い空間や複雑な部位において、大型機材を用いずに容易に施工でき、安定した品質を確保できることが確認された。

挿入する「セラミックキャップバー (CCb)」の長さを確保できないような狭い空間での施工においても、カプラーによる機械式継手を用いて、安定した品質の作業を容易に施工できることが確認された。

第3.4-2図 施工の容易性
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

3.4.3 施工手順の設定

建設技術審査証明報告書において設定されている、CCbの施工手順について、第3.4-3図に示す。

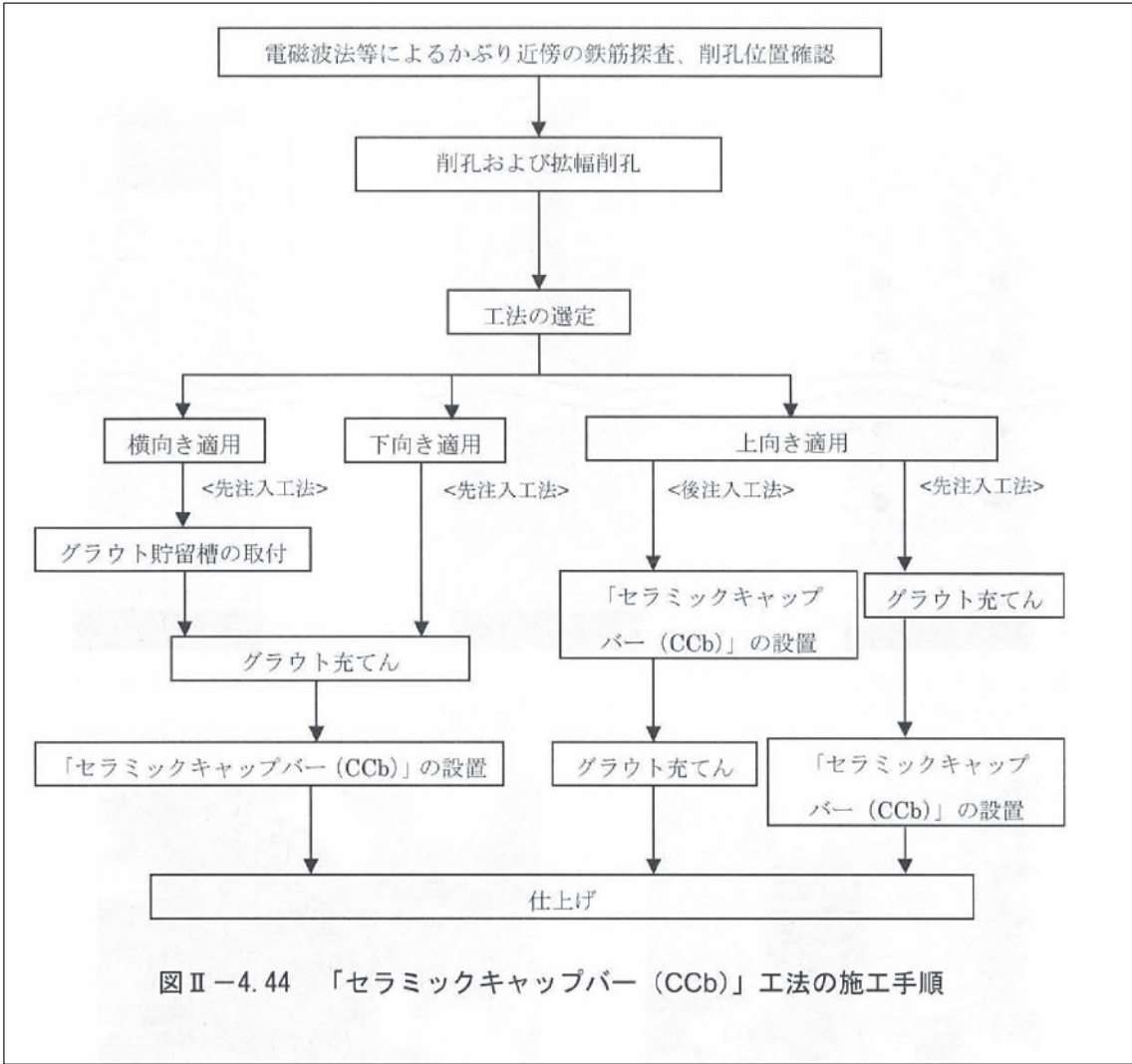
片側からしか補強施工できない部材について、鉛直下向きに「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む手順、および横向きあるいは鉛直上向きに「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む手順を設定し、この工事に必要な施工要素を確認した。

横向きあるいは鉛直下向き、上向きに「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む場合 (先充てん後挿入)、および鉛直上向きに「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む場合 (先挿入後充てん) の各々の工法における施工手順を図II-4.44に、設置方法の例を図II-4.45~図II-4.54に示す。

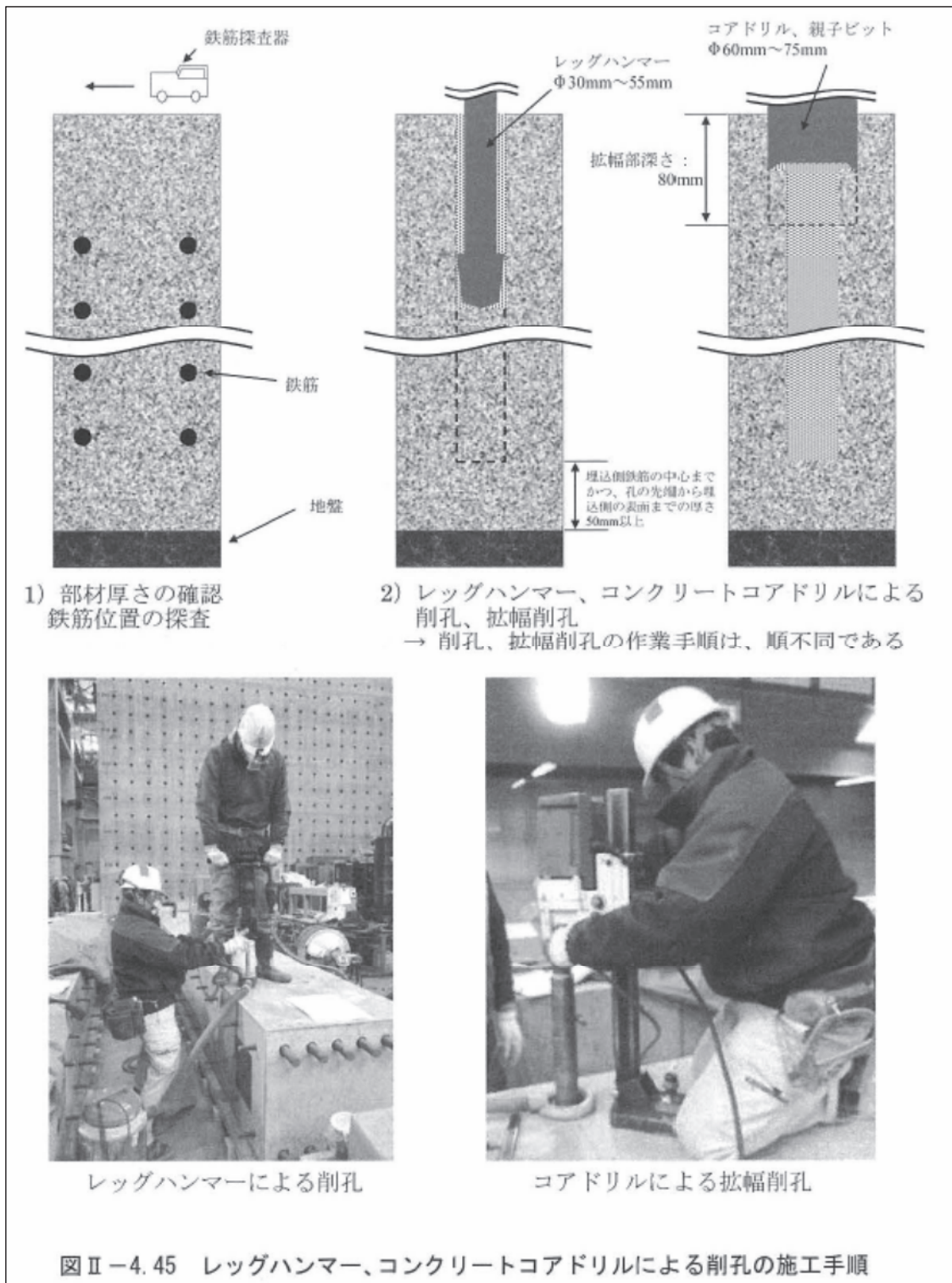
両側からの施工が可能な部材に対する設置方法の例を図II-4.55~図II-4.57に示す。

さらに、カプラーによる機械式継手を使用し、接続しながら、「セラミックキャップバー (CCb)」を差し込む場合の設置方法の例を図II-4.58、59に示す。

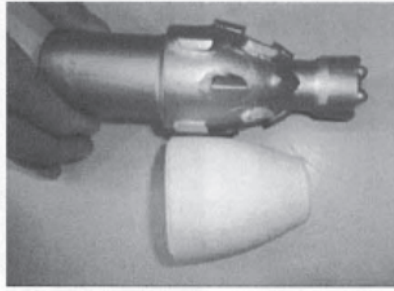
第3.4-3図 CCbの施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/14)



第 3.4-3 図 CCb の施工手順の設定
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/14)

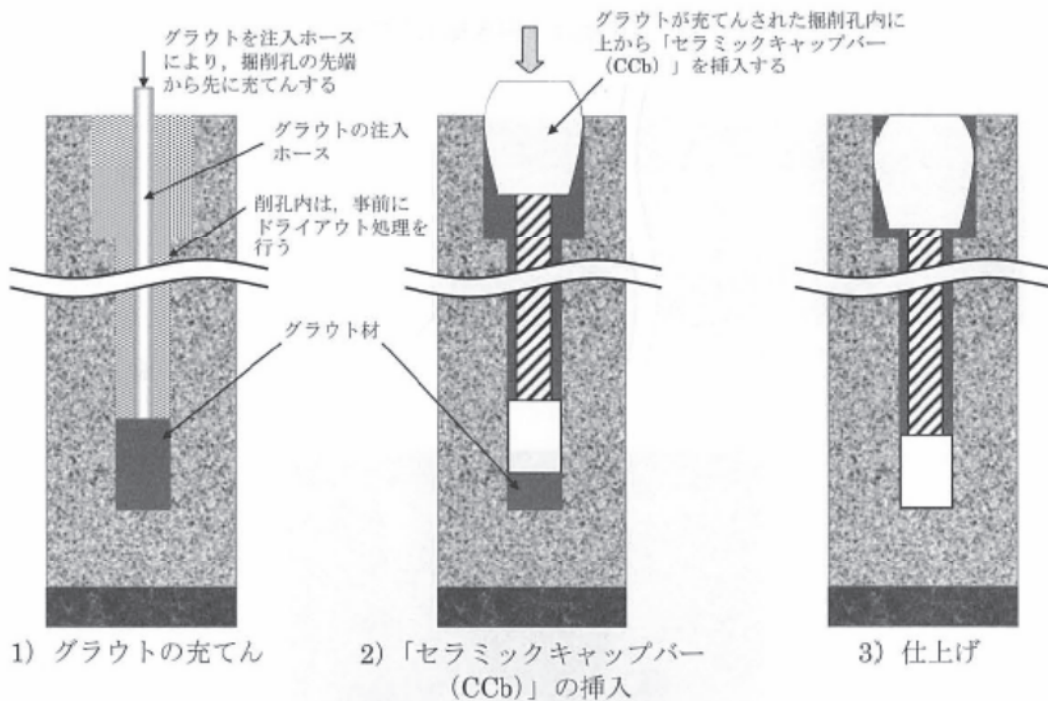


第3.4-3 図 Ccb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/14)



拡幅削孔用親子ビット

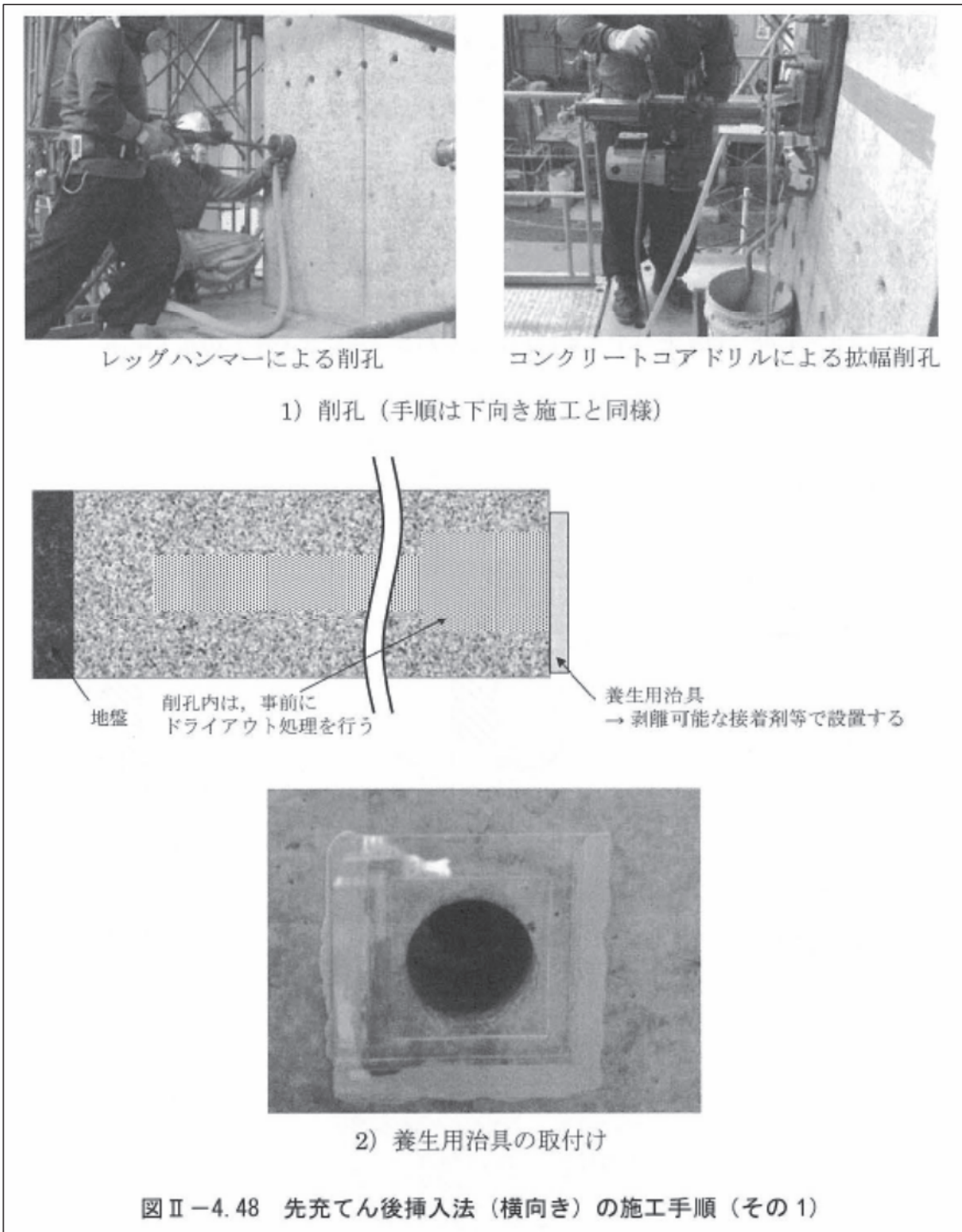
図Ⅱ-4.46 親子ビットを用いたレッグハンマーによる削孔の施工手順



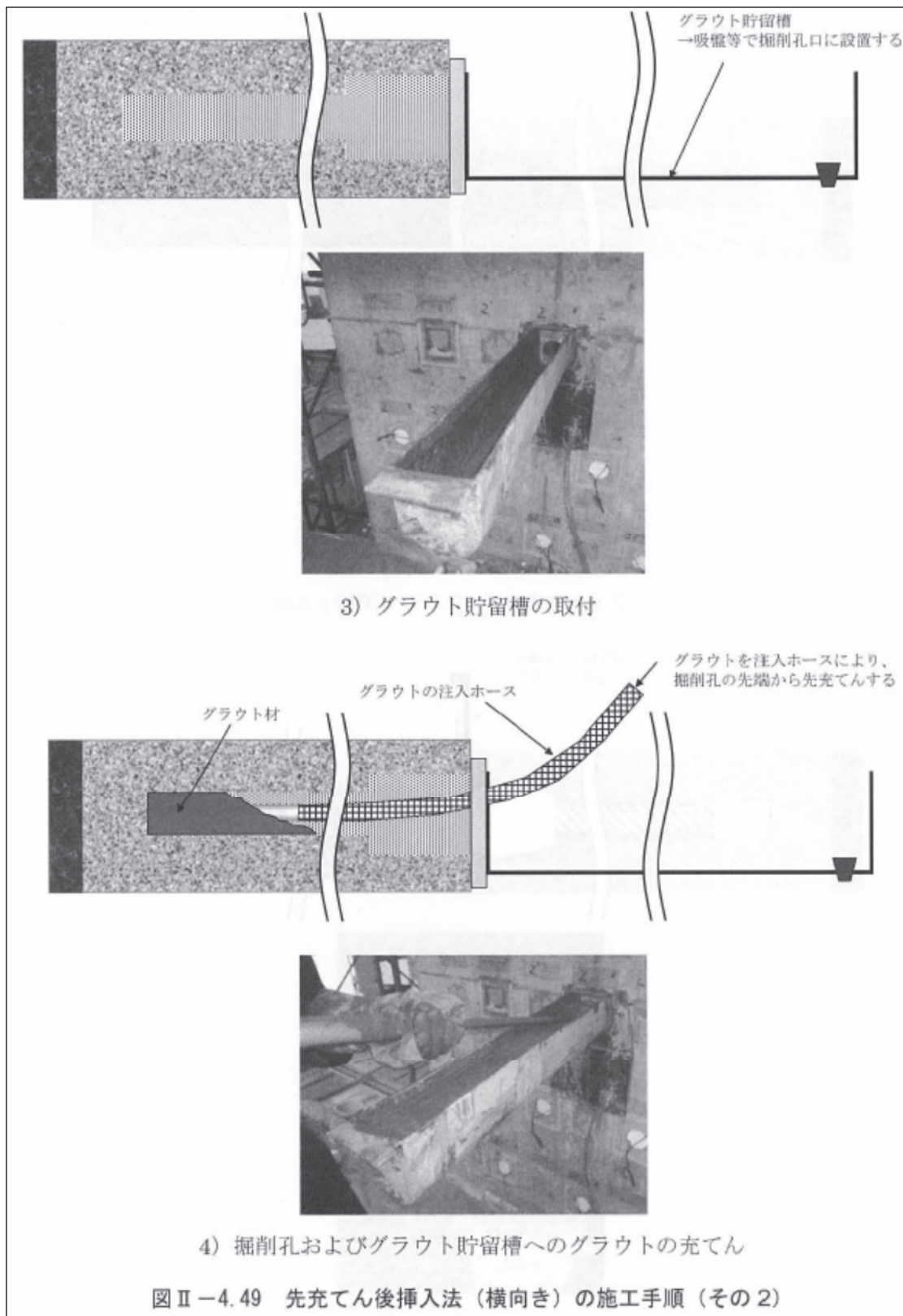
「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入

図Ⅱ-4.47 先充てん後挿入法 (下向き) の施工手順

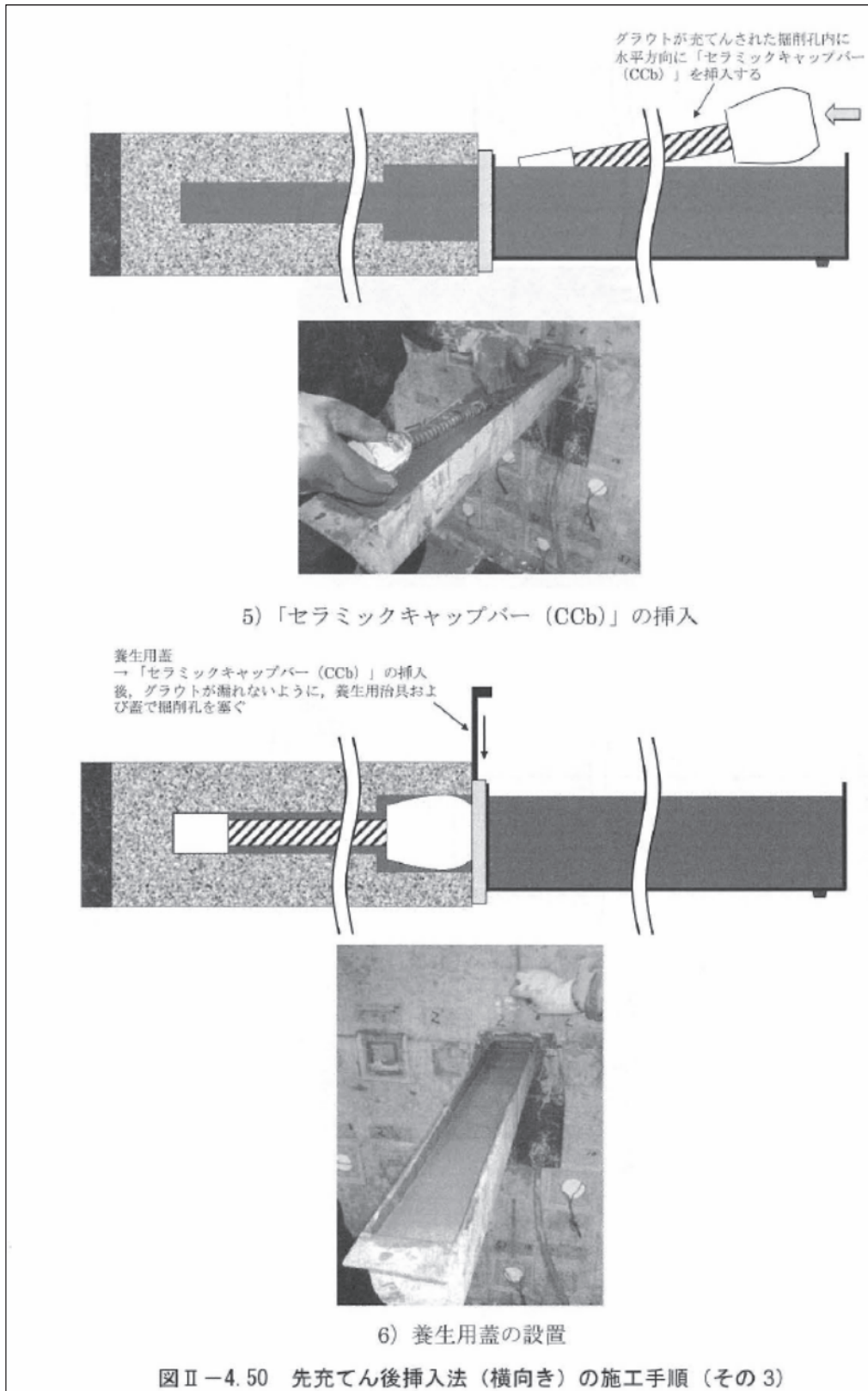
第 3.4-3 図 CCb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/14)



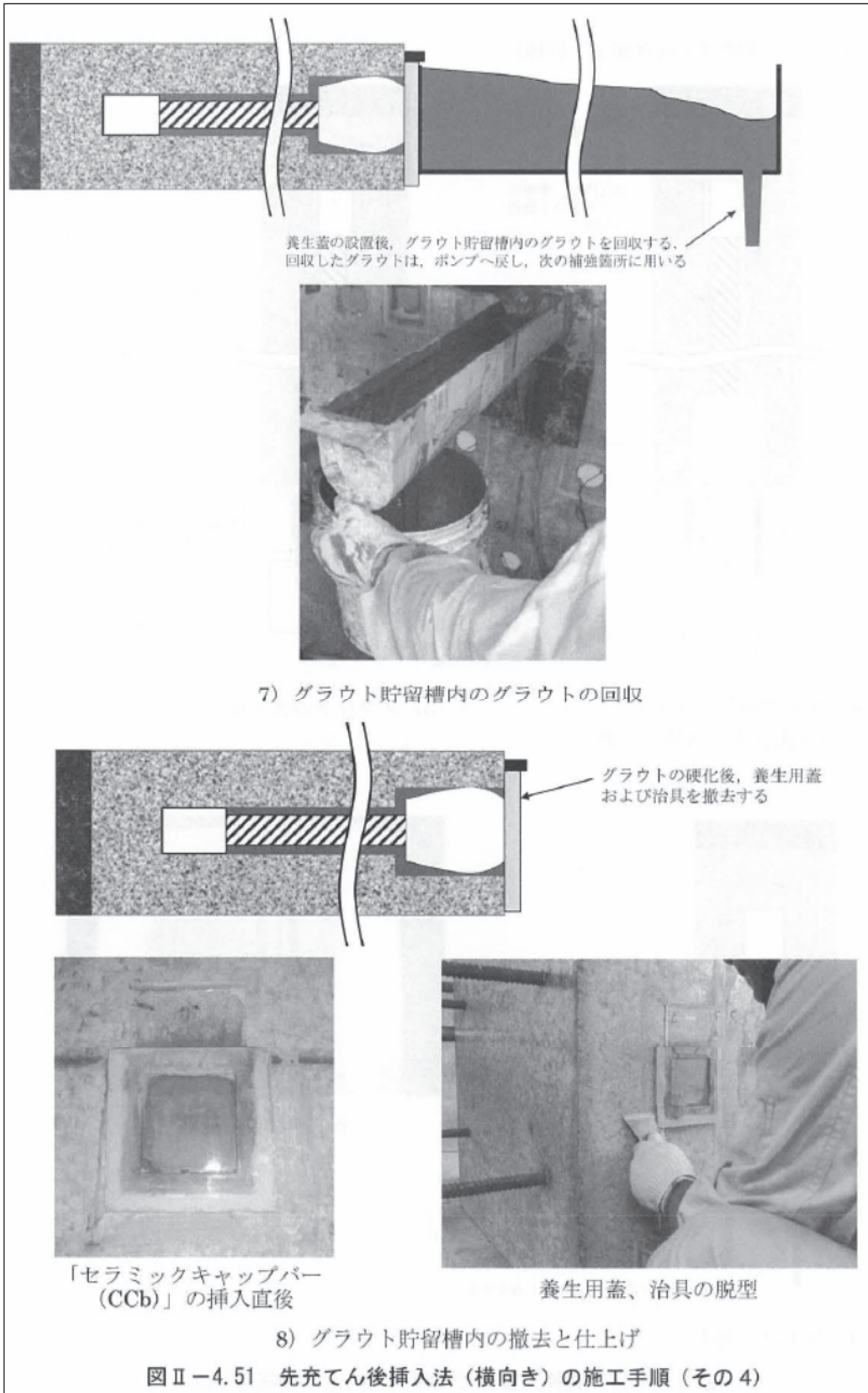
第3.4-3 図 Ccb の施工手順の設定
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/14)



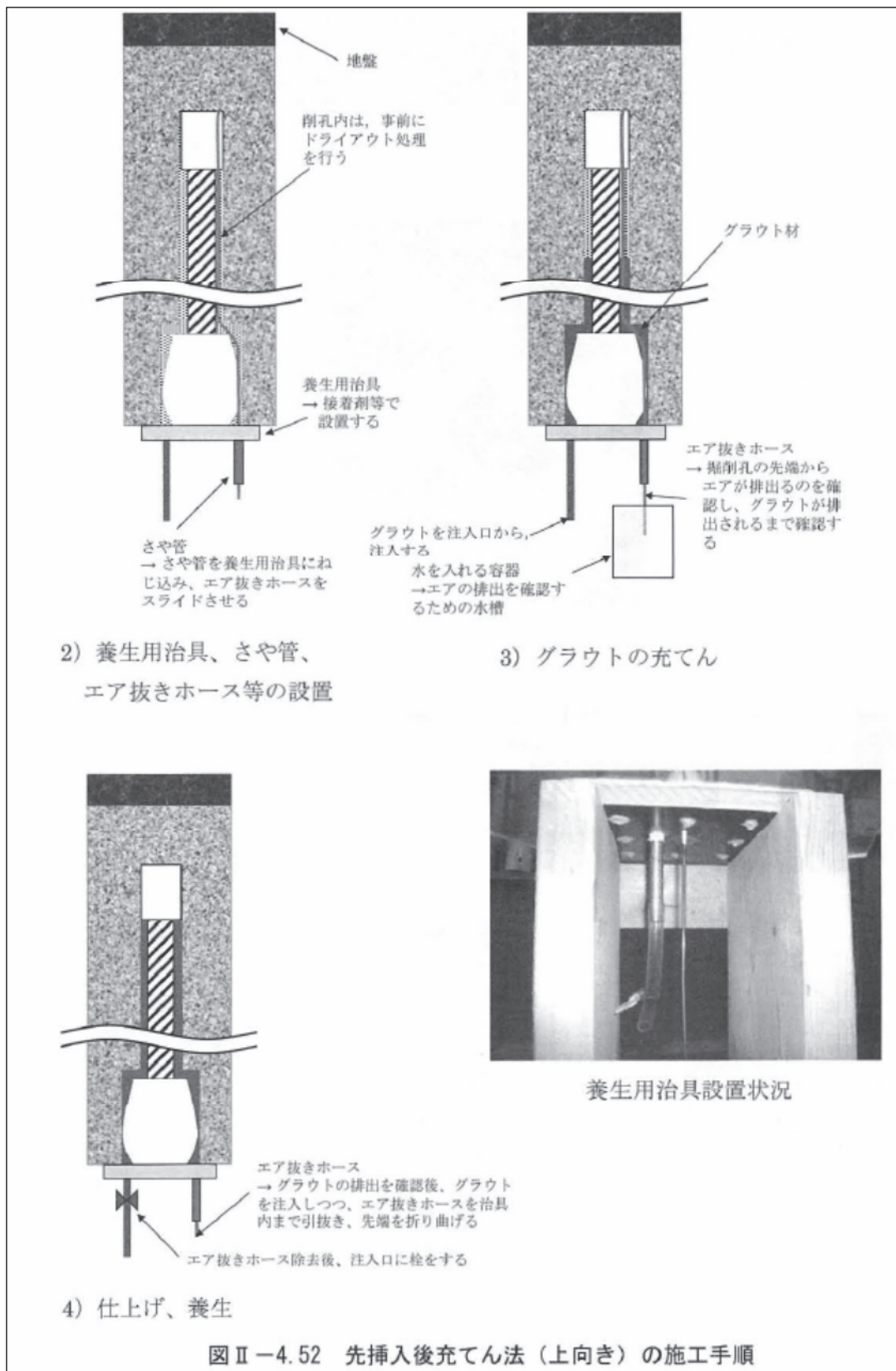
第 3. 4-3 図 Ccb の施工手順の設定
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (6/14)



第 3.4-3 図 CCb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (7/14)

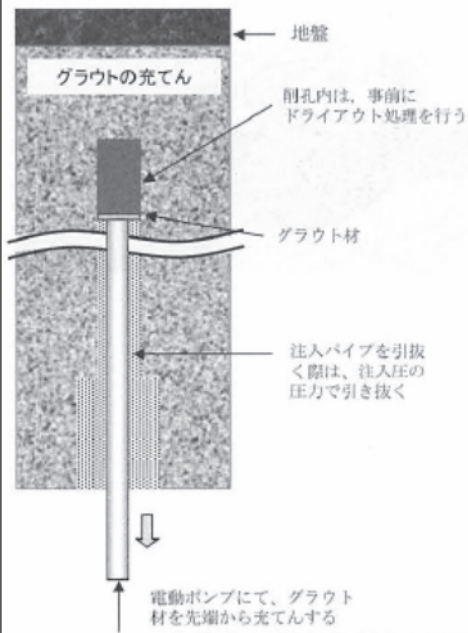


第3.4-3 図 CCb の施工手順の設定
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (8/14)

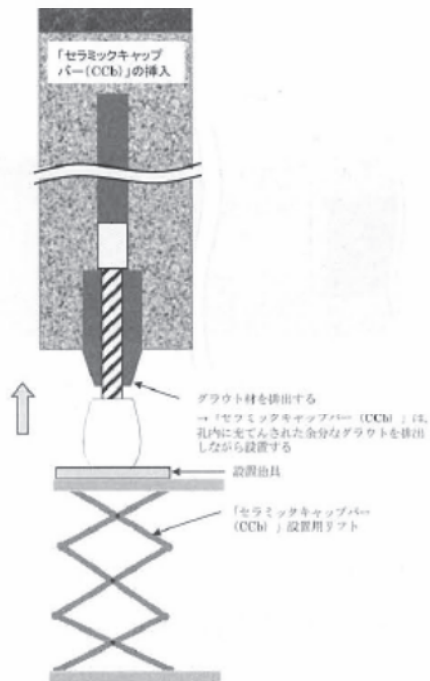


第 3.4-3 図 Ccb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (9/14)

1) 削孔 (手順は下向き施工と同様)



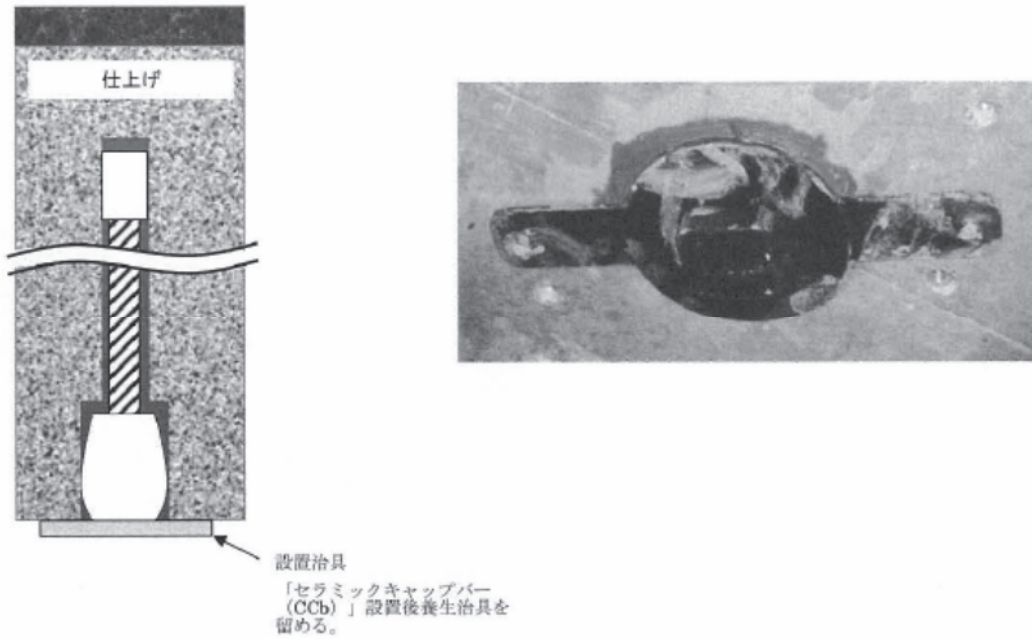
2) グラウトの充てん



3) 「セラミックキャップバー (CCb)」設置例

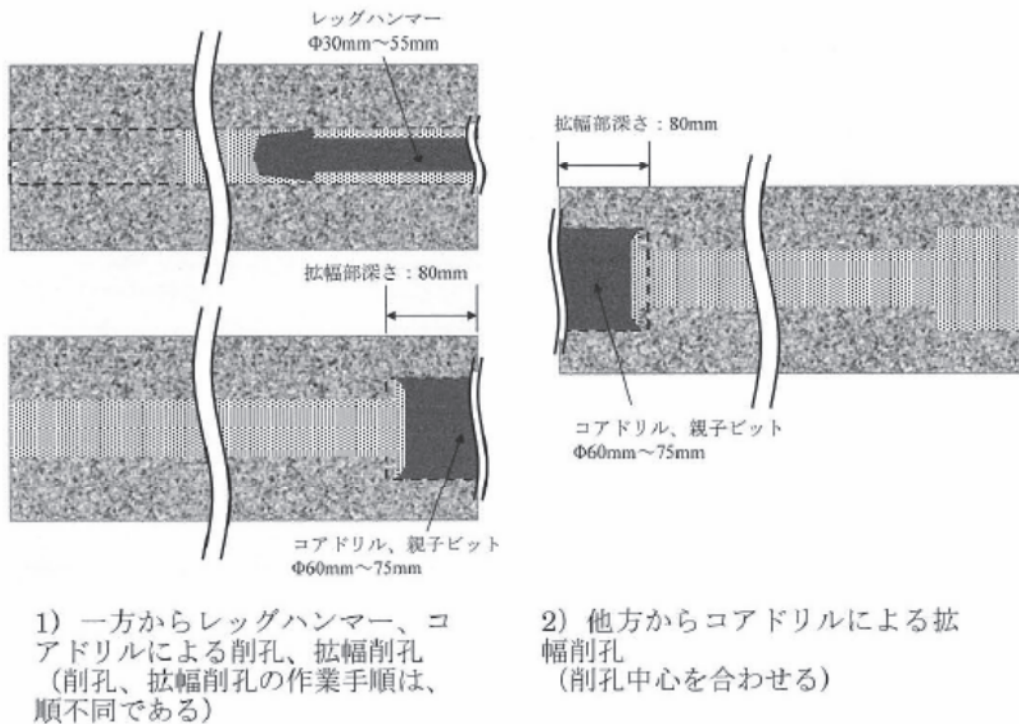
図Ⅱ-4.53 先充てん後挿入法 (上向き) の施工手順 (その 1)

第 3.4-3 図 CCb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (10/14)



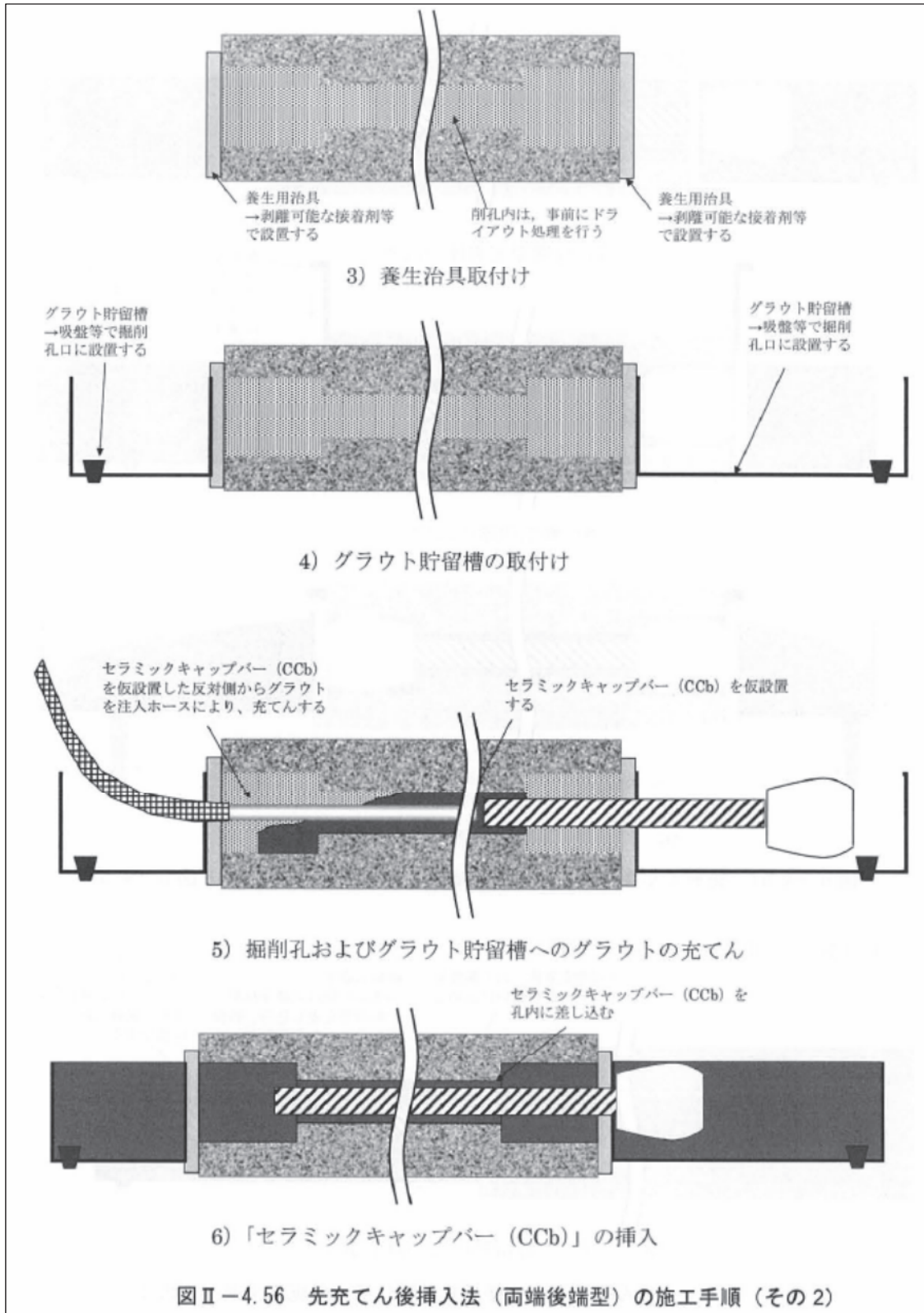
4) 仕上げ

図Ⅱ-4.54 先充てん後挿入法（上向き）の施工手順（その2）



図Ⅱ-4.55 先充てん後挿入法（両端後端型）の施工手順（その1）

第3.4-3 図 CCb の施工手順の設定
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（11/14）



第3.4-3 図 Ccb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (12/14)

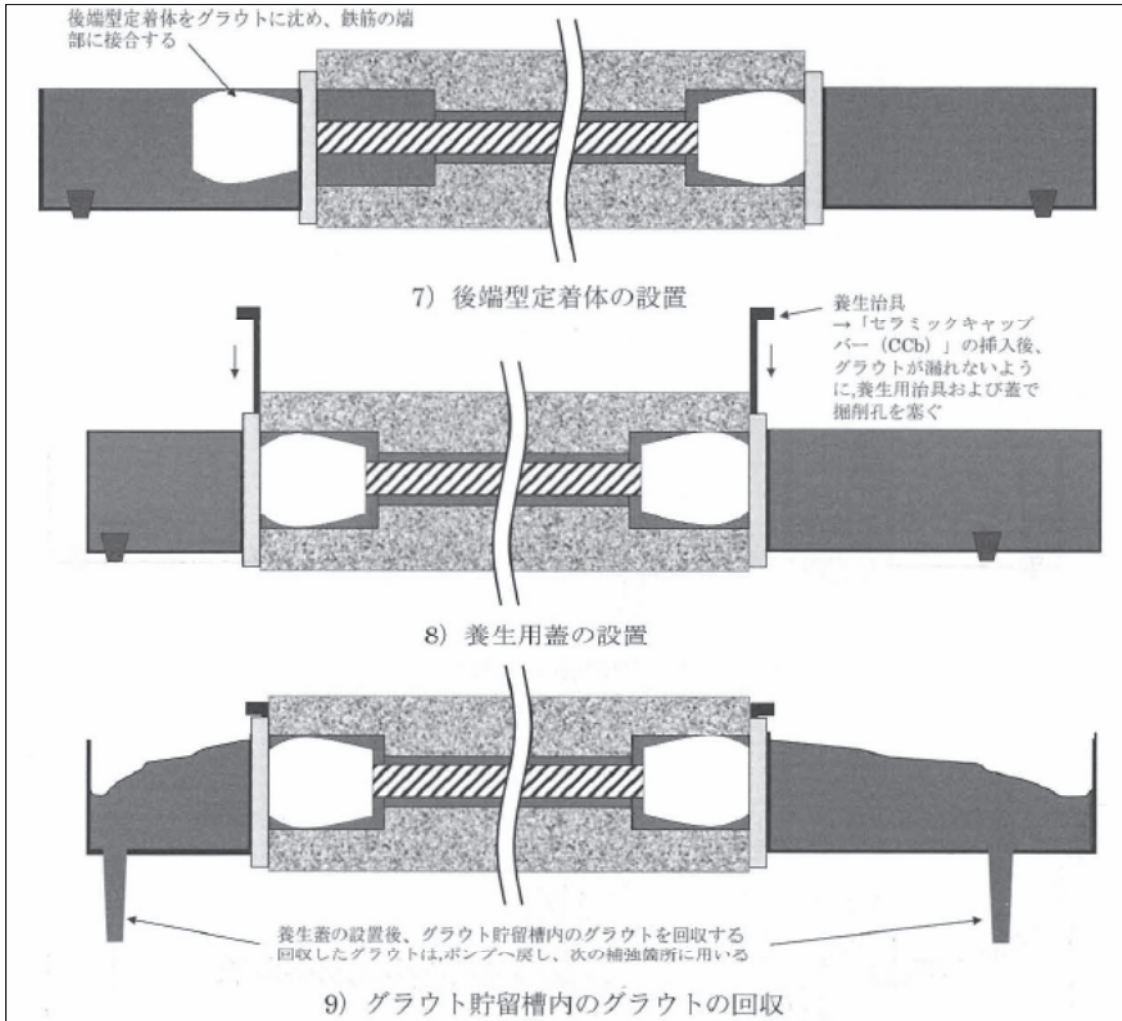


図 II - 4.57 先充てん後挿入法（両端後端型）の施工手順（その 3）

1) 削孔（手順は下向き施工と同様）

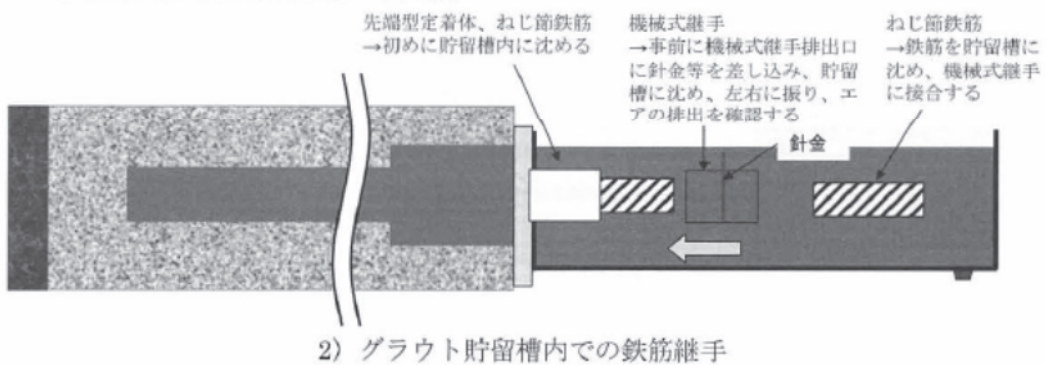
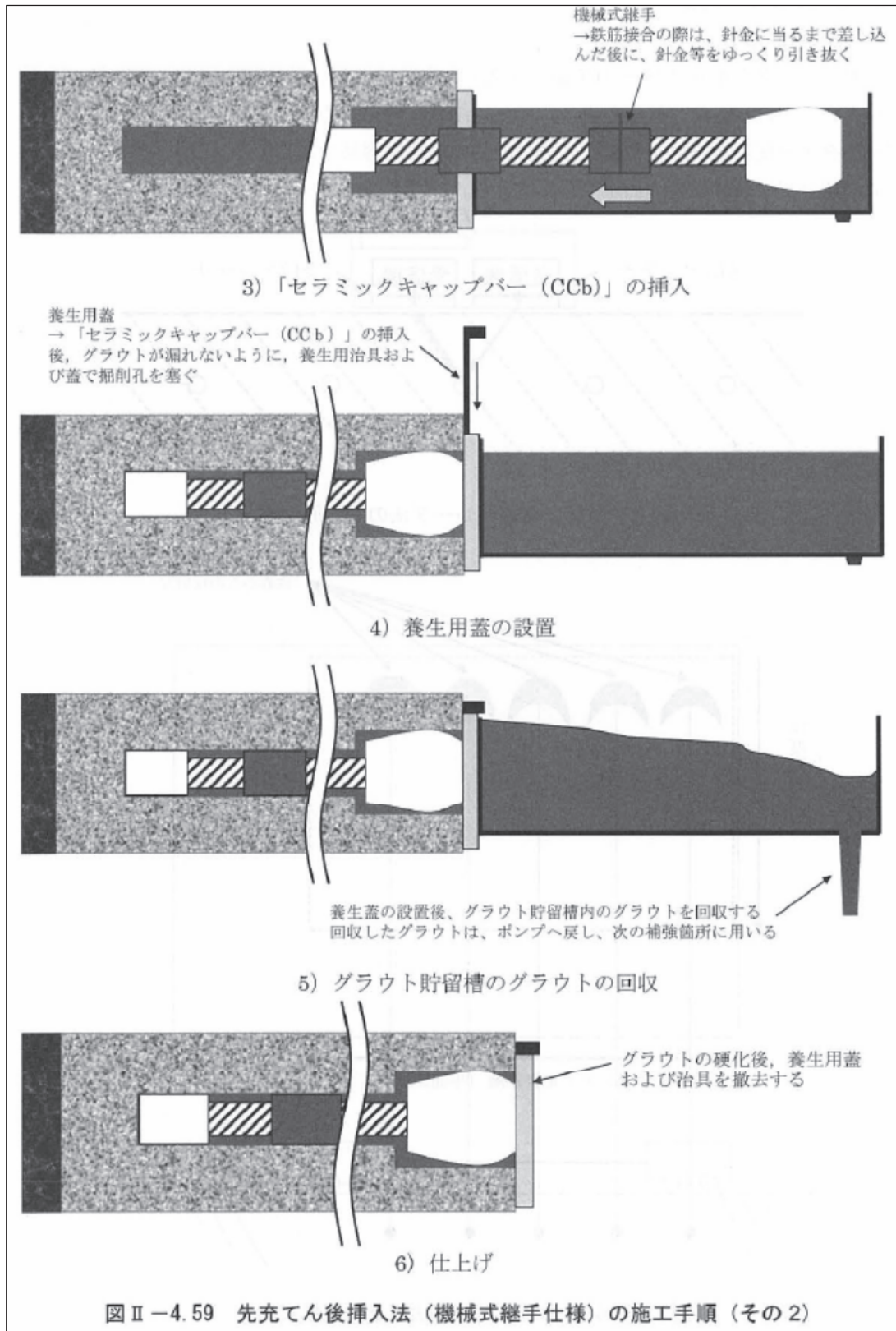


図 II - 4.58 先充てん後挿入法（機械式継手仕様）の施工手順（その 1）

第 3.4-3 図 CCb の施工手順の設定
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（13/14）



第 3.4-3 図 CCb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (14/14)

4. 女川 2 号機における CCb 工法の適用性の確認

4.1 適用性確認フロー

CCb 工法は、建設技術審査証明報告書により後施工せん断補強方法としての有効性が証明されており、これまでに数多くの施工実績がある。

CCb 工法を女川 2 号機の屋外重要土木構造物等に適用するにあたり、建設技術審査証明報告書、美浜 3 号機で工認実績のある PHb 工法、施工実績及び研究事例等から適用範囲を整理し、女川 2 号機の屋外重要土木構造物等の構造形式・部材諸元、使用環境等が適用範囲に該当することを第 4.1-1 図に示すフローにて確認する。

① 適用性確認項目の抽出

後施工によるせん断補強において、せん断補強効果に影響を与えると考えられる項目及び美浜 3 号機で工認実績のある PHb 工法との差異を抽出する。

その際、建設技術審査証明報告書に記載されている審査証明の範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出する。

② 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

女川 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用した補強仕様が CCb 工法の建設技術審査証明報告書において規定されている適用範囲内に収まっているか確認する。

③ ②以外の項目に対するせん断補強効果の確認

①で挙げた適用性確認項目のうち②で確認できていない項目について、適用性の確認を実施する。適用性確認の際は、せん断補強効果が期待できるかという点について検討する。

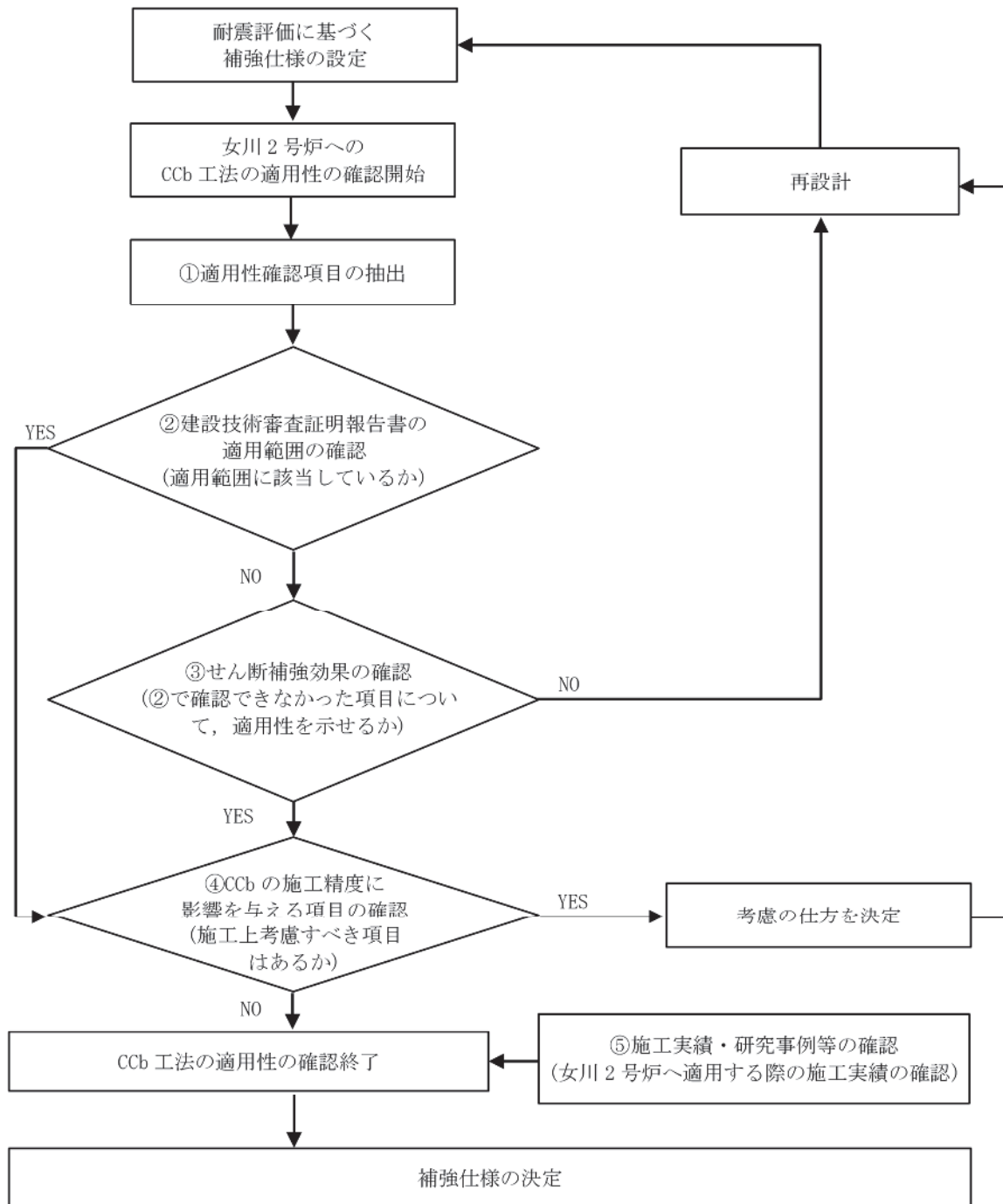
④ CCb の施工精度に影響を与える項目の確認

CCb の施工を行う際に、施工精度に影響を与える項目がないか確認を行う。

施工精度に影響を与える項目（施工上考慮すべき項目）がある場合は、施工上又は設計上どのように考慮するかを決定したうえで、必要により再設計を実施するか適宜判断を行う。

⑤ 施工実績・研究事例等の確認

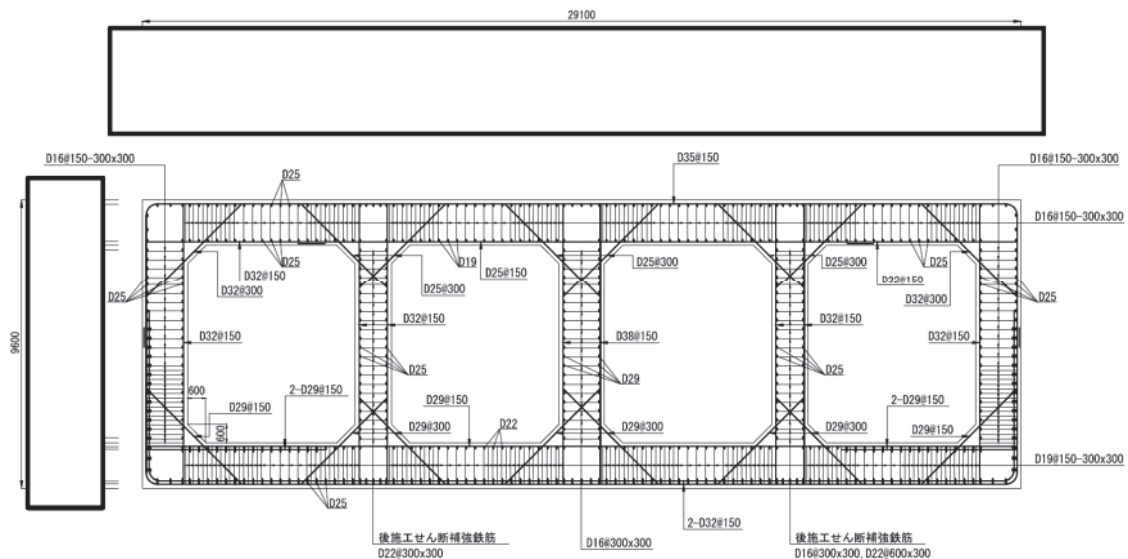
後施工せん断補強筋に関する施工実績・研究事例について、要旨、着目すべき事項を整理し、CCb 工法への反映事項を確認する。



第 4.1-1 図 Ccb 工法の適用性確認フロー

4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定

耐震安全性評価を実施し、せん断に対する安全性を確保するように設定した結果の一例として、取水路（漸拡部）での補強仕様を第4.2-1図に示す。



第4.2-1図 取水路（漸拡部）の補強仕様

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

4.3 ①適用性確認項目の抽出

CCb 工法の特徴，女川 2 号機固有の条件及び美浜 3 号機における確認項目等の観点から，適用性を確認するために必要な項目を抽出する。以下に項目と確認内容を示す。

I. 使用目的

建設技術審査証明報告書に明記されている目的に該当しているか。

II. 構造形式

建設技術審査証明報告書で想定している構造形式に該当しているか。

III. 構造細目

建設技術審査証明報告書で規定している構造細目に該当しているか。

IV. 部材諸元

建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された部材あるいは実績のある部材厚か。

せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度について，建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された範囲内であるか，又は範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。

V. 載荷方法

建設技術審査証明報告書の実験適用性が確認された範囲内であること，又は範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。

VI. 使用材料（せん断補強筋）

建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。

せん断補強筋は，JIS G 3112 に準拠した熱間圧延異形棒鋼ネジテツコン（東京鐵鋼株式会社製）で，鉄筋の種類は SD295A，SD295B，SD345 とし，呼び名は D32，D29，D25，D22，D19，D16，D13 とする。

VII. 使用材料（セラミック製定着体）

建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。

VIII. 使用材料（充てん材）

建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。

IX. せん断補強鉄筋の定着長

建設技術審査証明報告書で設定している定着長を考慮して設計しているか。

X. せん断ひび割れ抑制効果の確認

建設技術審査証明報告書の実験にて確認していない諸元において、せん断ひび割れ抑制効果を確認できるか。

X I. ひび割れに対する定着機能の保持

CCb 工法は、従来工法（先施工）とせん断補強筋の定着機構が異なることから、せん断補強筋としての機能を発揮するために、定着体部にひび割れが生じて、定着機能が保持されているか。

X II. 変形量

変形に伴うかぶりコンクリート部の剥落によって、CCb の定着体部の定着機能を阻害するおそれがあることから、建設技術審査証明報告書の実験の変形量を超えていないか。

X III. 使用環境

建設技術審査証明報告書で想定している使用環境において使用しているか。

また、女川 2 号機では海水環境下にて使用していることから、海水環境下相当での実績があるか。

X IV. CCb を適用した部材のコンクリートの健全性

CCb を適用した部材のコンクリートに CCb のせん断補強効果を阻害するひび割れがなく、構造物が健全であるか。

X V. PHb 工法（美浜 3 号機）との差異

PHb 工法及び美浜 3 号機での適用実績と比較を行い、抽出された差異が建設技術審査証明報告書で規定された適用範囲に収まっているか。

X VI. 増厚補強部への適用性※

建設技術審査証明報告書で規定又は建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された範囲内であるか、又は範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。

※：詳細設計を踏まえ適用性の確認を補足する項目

4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

CCb 工法を適用するにあたり、4.3 で抽出した項目について建設技術審査証明報告書から適用範囲を確認する。確認結果を以下に示す。

(1) I. 使用目的

CCb により耐震補強を行った構造物は地中構造物であり、既設コンクリート部材に対して後施工によるせん断補強の目的で用いていることから、建設技術審査証明報告書に合致している。(第 4.4-1 表参照)

第 4.4-1 表 CCb 工法の適用範囲と使用状況
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

<p>4. 2 審査証明の範囲</p> <p>主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、施工が片側からしか実施できない壁状の既設鉄筋コンクリート部材に対し、鉄筋の埋込側に先端型定着体を、差込側に後端型定着体を設置した標準型、または、鉄筋の両端に先端型定着体を設置した両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」により、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p> <p>ただし、両側からの施工が可能な既設の構造物に対しては、変形性能の向上を目的としないことを前提として、鉄筋の両端に後端型定着体を設置した両端後端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。</p>	
--	--

建設技術審査証明報告書の適用範囲	使用箇所及び状況
<p>主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、施工が片側からしか実施できない壁状の既設鉄筋コンクリート部材に対し、鉄筋の埋込側に先端型定着体を、差込側に後端型定着体を設置した標準型又は鉄筋の両端に先端型定着体を設置した、両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」により、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>	<p>地中構造物であり、片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>
<p>ただし、両側からの施工が可能な既設の構造物に対しては、変形性能の向上を目的としないことを前提として、鉄筋の両端に後端型定着体を設置した両端後端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。</p>	<p>両側からの施工が可能な既設の構造物に対して、変形性能の向上を目的としないことを前提として、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>

(2) II. 構造形式

建設技術審査証明報告書に、「CCb 補強工法によれば、相次ぐ地震によりその耐震補強の必要性が高まっている原子力施設などの重要地下構造物、高速道路、鉄道及び上下水処理施設などの地下構造物、また、水門あるいは堰の門柱・堰柱など、構造上、巻立て補強が適用できない構造物の耐震性能を改善することができる」と記載されていることから、女川 2 号機の屋外重要土木構造物等にも適用可能である。

(3) III. 構造細目

建設技術審査証明報告書に、以下のとおり構造細目として記載されており、建設技術審査証明報告書と合致している。

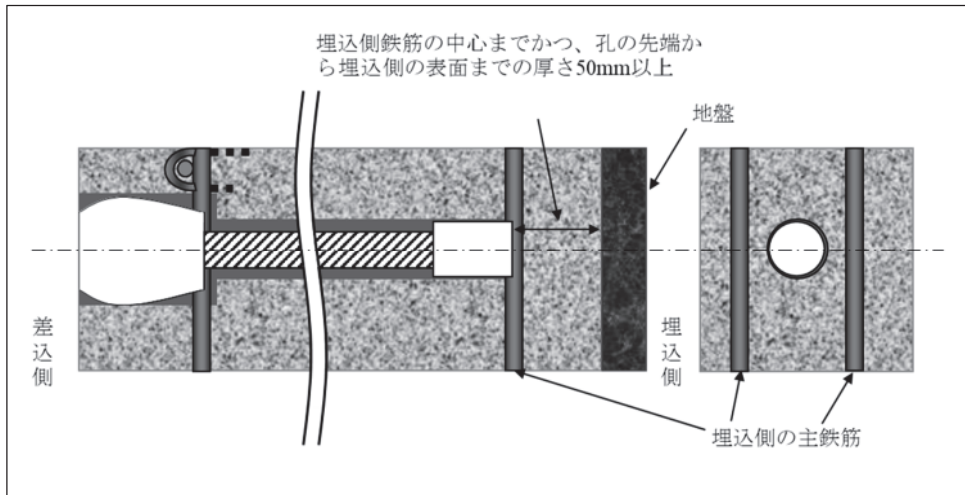
- ① せん断補強筋の断面積比 $\geq 0.15\%$ とする。
- ② 補強前に配置されていたせん断補強筋を含めた CCb との最大配置間隔 \leq 補強対象部材の有効高さの $1/2$ かつ 300mm とする。
- ③ CCb の配置は第 4.4-1 図に示す標準配置によるものとする。
- ④ CCb の埋込側の先端は、主鉄筋の中心まで配置することを原則とする。ただし、孔の先端から埋込側の表面までの厚さは 50mm 以上とする。

②の最大配置間隔 300mm は、収縮等によるひび割れの発生を防ぐための用心鉄筋としての配慮である。

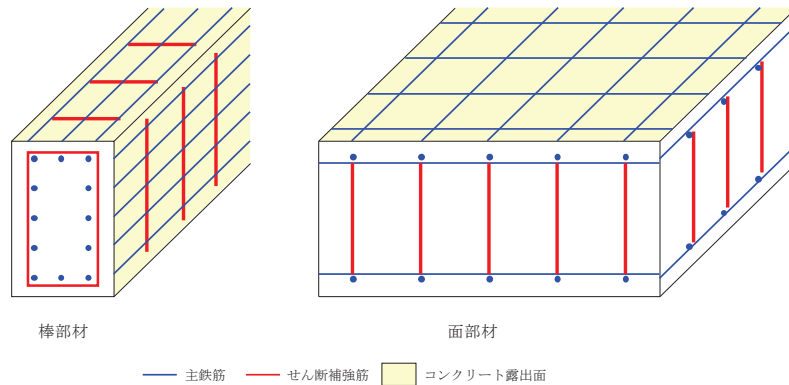
用心鉄筋としての配慮については棒部材の場合、スターラップが露出面（腹部）に配置されることから、「露出面の用心鉄筋」に規定される「 1m 当たり 500mm^2 以上の鉄筋を 300mm 以下の間隔で配置する」に準じて規定されたものである。一方、面的な広がりをもつボックスカルバートや箱型構造物の各部材に配置されるせん断補強鉄筋は、各部材の中間的な位置に配置され、「露出面の用心鉄筋」としての機能は不要であるため、「面部材ではせん断補強鋼材の配置間隔は、部材有効高さの $1/2$ 倍以下で配置すればよい」とされている（コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会，2017）（以下「コンクリート標準示方書 2017」という。））（第 4.4-2 図参照）。

女川 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物は建設後 20 年以上経過しており、収縮が収束していると考えられること、また、せん断補強鋼材が露出面に配置されない面部材に対する耐震補強であることから、この規定（最大配置間隔 300mm 以下）は除外することができる。

なお、CCb により耐震補強を行った構造物に対する、せん断補強鉄筋比及び最大配置間隔の適用範囲及び整理結果を第 4.4-2 表及び第 4.4-3 表に「(4) IV. 部材諸元, V. 載荷方法」と併せて示す。



第 4. 4-1 図 Ccb 標準配置
(建設技術審査証明報告書より抜粋)



第 4. 4-2 図 露出面の用心鉄筋 (棒部材・面部材)

(4) IV. 部材諸元, V. 載荷方法

構造細目, 部材諸元及び載荷方法について, Ccb により耐震補強を行った構造物への適用範囲及び整理結果を第 4. 4-2 表及び第 4. 4-3 表に示す。

第 4. 4-3 表に示すとおり, 部材諸元については, 部材厚, せん断スパン比及び主鉄筋比が, 建設技術審査証明報告書又は建設技術審査証明報告書の実験から確認した範囲に合致していない。

また, 載荷方法については, 集中荷重による正負交番載荷を行っているが, 女川 2 号機にて Ccb により耐震補強を行った構造物に作用する荷重は, 実験より大きく, 集中荷重及び分布荷重であるため合致していない。

よって, 部材諸元及び載荷方法については, フロー③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認として, 4. 5 にて確認する。

第 4.4-2 表 適用範囲の整理

構造物名称	III. 構造細目		IV. 部材諸元		V. 載荷方法
	せん断補強鉄筋比 (%)	最大配置間隔	部材厚 (mm)	せん断スパン比	
建設技術審査証明書で規定されている適用範囲	せん断補強鉄筋比 $\geq 0.15\%$ 以上	最大配置間隔 \leq 部材の有効高さの1/2	—	—	—
	—	—	500~800	2.78 (棒部材的な破壊)	1.05~1.48
建設技術審査証明報告書の 実験から確認した範囲	—	—	—	—	集中荷重

第 4.4-3 表 CCb により耐震補強を行った構造物への整理結果

構造物名称	部材	III. 構造細目		IV. 部材諸元			V. 載荷方法
		せん断補強鉄筋比 (%)	最大配置間隔 (mm) 有効高さ (mm)	部材厚 (mm)	せん断スパン比 ^{※1,2}	CCbの鉄筋径	
取水路 (漸拡部)	隔壁	0.430~0.436	300 1070	1,200	5.61	D16 D22	集中荷重
		0.563	300 1080	1,200	6.02	D25	
原子炉機器冷却海水配管ダクト	隔壁	0.187	600 1300~1350	1,500	2.31~11.15	D25	分布荷重
		0.191~0.430	450 1000~1050	1,200	3.00~14.50	D22	
軽油タンク室	隔壁	0.220~0.441	300 850	1,000	3.53~16.82	D16	集中荷重
		0.231	200 400	500	7.75	D13	
遮蔽壁	地上部	0.178~0.315	300 900	1,000	4.61~9.56	D16 D25	分布荷重
		0.248	200 680	800	1.47~19.19	D16	
バルブ室	側壁	0.358	200 880	1,000	2.22~14.83	D19	分布荷重
		0.248	200 480	600	7.60~9.43	D16	
復水貯蔵タンク基礎	頂板	0.248	200 680	800	1.47~19.19	D16	集中荷重
		0.248	200 680	800	4.63	D16	
連絡トレンチ	側壁	0.248	200 680	800	5.44	D16	分布荷重
		0.248~0.372	200 680	800	4.63	D16	

□ : フロー② (建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認)より確認できた範囲 □ : フロー③ (せん断補強効果の確認)より確認する範囲

※1 : せん断スパン比 a/d (a : 支間長, d : 有効高さ)
 ※2 : せん断スパン比 (a/d) が3.5以上 (土木学会マニキュアル2005参照) かつ荷重形態が集中荷重の場合は棒部材と判断して「フロー②より確認できる範囲」とし, a/d が3.5以上であっても荷重形態が分布荷重の場合は等価せん断スパン比を考慮すると, ディアピーアーム的せん断スパン比となる可能性から「フロー③より確認する範囲」として整理している。

(5) VI～VIII. 使用材料（せん断補強筋，セラミック製定着体，充てん材）

建設技術審査証明報告書に記載されている使用材料と合致している。（第 4.4-4 表参照）

使用材料のうち，セラミック製定着体及び充てん材は従来工法（先施工）と Ccb 工法の特徴的な差異となることから，これらの材料の役割と要求性能について詳細に整理する。

第 4.4-5 表に示すとおり，材料特性や要求性能に対する性能確認試験（定着性能試験・ねじ節強度試験）により，弱部が生じないことや部材と一体となって挙動するといった要求性能が満たされていることが確認されており，Ccb 工法を採用するにあたり，その性能に悪影響を与える要因がないことを確認している。

また，定着体であるセラミックキャップの損傷（割れや欠け）の要因となる傷がないことを確認している。さらに，施工箇所となる部材にはセラミックキャップの損傷となるような衝撃荷重が作用しないことから，定着体が破損する要因はない。


第 4.4-4 表 Ccb の適用条件と使用状況
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

2. 2 セラミック定着体		2. 3 材料の設計値
(1) セラミック定着体は、所定の材料により製作する。 (2) セラミック定着体は、所定の製造工程で製作されたものを用いる。 (3) セラミック定着体の検査は、形状、外観、ねじ節強度、密度について、所定の頻度で実施する。		(1) セラミックキャップバー（CCb） セラミックキャップバー（CCb）を構成するねじ節鉄筋は、JIS G 3112に準拠したネジテツコン（東京鐵鋼株式会社製ねじ節鉄筋）で、種類はSD295A、SD295B、SD345とし、呼び名はD32、D29、D25、D22、D19、D16、D13とする。特性値 f_{yk} および f_{tk} はJIS G 3112の下限値としてよい。また、限界状態の検討に用いる異形鉄筋の断面積は、JIS G 3112による各呼び名の公称断面積としてよい。 (2) 充てん材 充てん材は補強する構造体コンクリートと同等な性能であるとする。
	建設技術審査証明報告書の材料範囲等	使用状況
せん断補強筋 (ねじ節鉄筋)	径 : D13～D32 強度 : SD295A, SD295B, SD345	左記範囲内の材料を使用する。 (D16～D32 SD345)
セラミック 定着体	所定の材料，製造工程で製作され，所定の頻度で形状，外観，ねじ節強度，密度について検査されたもの	左記検査を受けた材料を使用する。
充てん材	構造体コンクリートと同等な性能	躯体コンクリート以上の強度とする。

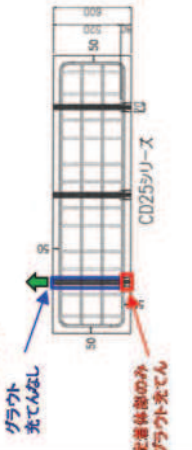
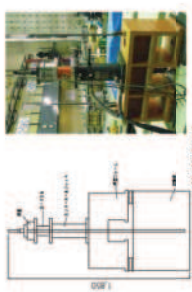
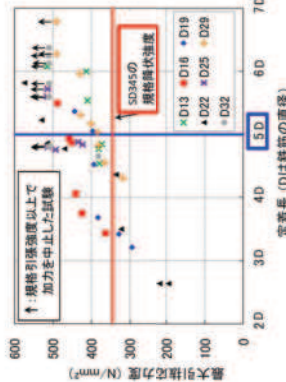
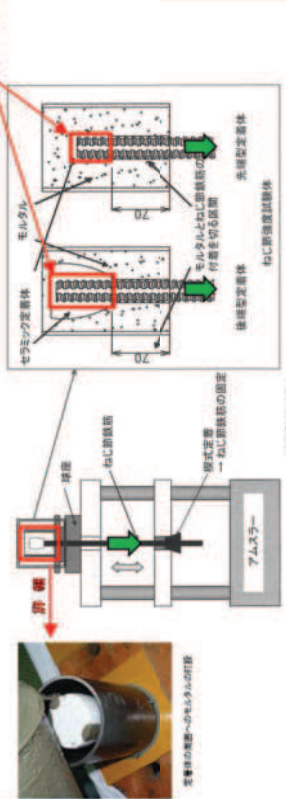

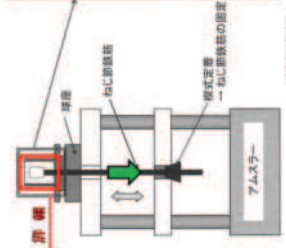

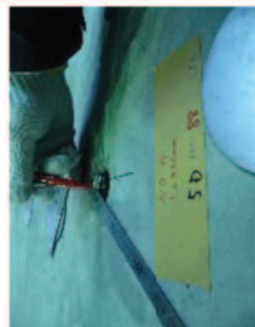
第 4.4-5 表 各使用材料の役割・要求性能・材料特性・材料特性 (1/3)

使用材料	役割	要求性能	要求性能を踏まえた材料特性																														
<p>充てん材 (グラウト)</p>	<ul style="list-style-type: none"> CCbと掘削孔の空隙を充てんし、既設構造部材との一体化を図る。 	<ul style="list-style-type: none"> CCbと掘削孔の充てん時に、隙間がでないこと。 充てん部が弱部とならないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> 硬化後に空隙が発生しないよう、充てん性を考慮した流動性を有する無収縮グラウトを使用している。 既設コンクリートと同等以上の強度を有するため、弱部とならない。 																														
<p>グラウトの品質管理基準</p> <table border="1" data-bbox="448 241 614 779"> <thead> <tr> <th>品質管理対象</th> <th>管理項目</th> <th>管理内容</th> <th>規格値</th> <th>管理制度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>グラウト</td> <td>流動性</td> <td>4A ロート試験</td> <td>15~30 秒</td> <td>作業開始前</td> </tr> <tr> <td></td> <td>圧縮強度</td> <td>圧縮強度試験</td> <td>28 日強度が 49.0N/mm² 以上*1</td> <td>500 本毎</td> </tr> <tr> <td>可塑性</td> <td>流動性</td> <td>フロー試験</td> <td>静置時 105mm~120mm</td> <td>作業開始前</td> </tr> <tr> <td>グラウト</td> <td>圧縮強度</td> <td>圧縮強度試験</td> <td>15 回打撃 150mm~200mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>圧縮強度</td> <td>圧縮強度試験</td> <td>28 日強度が 49.0N/mm² 以上*1</td> <td>500 本毎</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 グラウト強度については、標準となる材料に対する製造者の目標仕様を記載している。 なお、充てん材の強度は前項とする既設コンクリート躯体と同率以上である必要がある。</p>				品質管理対象	管理項目	管理内容	規格値	管理制度	グラウト	流動性	4A ロート試験	15~30 秒	作業開始前		圧縮強度	圧縮強度試験	28 日強度が 49.0N/mm ² 以上*1	500 本毎	可塑性	流動性	フロー試験	静置時 105mm~120mm	作業開始前	グラウト	圧縮強度	圧縮強度試験	15 回打撃 150mm~200mm			圧縮強度	圧縮強度試験	28 日強度が 49.0N/mm ² 以上*1	500 本毎
品質管理対象	管理項目	管理内容	規格値	管理制度																													
グラウト	流動性	4A ロート試験	15~30 秒	作業開始前																													
	圧縮強度	圧縮強度試験	28 日強度が 49.0N/mm ² 以上*1	500 本毎																													
可塑性	流動性	フロー試験	静置時 105mm~120mm	作業開始前																													
グラウト	圧縮強度	圧縮強度試験	15 回打撃 150mm~200mm																														
	圧縮強度	圧縮強度試験	28 日強度が 49.0N/mm ² 以上*1	500 本毎																													
<ul style="list-style-type: none"> 定着体の定着性能を阻害せず、充てん材とコンクリート面の境界が弱部とならないこと。 定着体の強度を確認する定着性能試験により、定着体の定着性能が発揮される材料であること及び鉄筋の規格降伏強度を超える引張荷重を作用させても、CCbが抜け出さないことを確認している。 よって、充てん材とコンクリート面の境界面は弱部とならない。 																																	

第 4.4-5 表 各使用材料の役割・要求性能・材料特性 (2/3)

使用材料	役割	要求性能	要求性能を踏まえた材料特性																																								
セラミック 定着体 (先端・後端)	<ul style="list-style-type: none"> 後施工せん断補強筋として、従来工法(先施工)のフックの代わりとなるために、同等程度の定着性能を得る。 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋コンクリート中の定着体が弱部とならないこと。 	<p>セラミック(アルミナ材)はコンクリートに比べ高強度(曲げ強度300N/mm²以上)であり、鉄筋コンクリートの耐力に影響を与えないことから弱部とならない。</p> <p>アルミナ材の一般物性の試験結果</p> <table border="1" data-bbox="411 331 571 734"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>アルミナ</th> <th>コンクリート</th> <th>単位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>強度 HV (ksi)</td> <td>32.74</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>ヤング率 (kN/mm²)</td> <td>317.5</td> <td>204.8</td> <td>204.8</td> </tr> <tr> <td>弾性係数</td> <td>6.818×10⁸</td> <td>10.08×10⁸</td> <td>10.08×10⁸</td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td>0.227</td> <td>0.17</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>引張強度 (N/mm²)</td> <td>398</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table> <p>※：コンクリートの曲げ強度は、一般的に圧縮強度の1/5~1/8程度</p> <ul style="list-style-type: none"> また、定着体であるセラミックキャップの損傷(割れや欠け)の要因となる傷がないことを確認している。 なお、建設技術審査証明報告書に示す梁試験終了後(せん断破壊後)の状態を確認した結果、定着体に割れや欠けは確認されず、健全である。 <p>CCの品質管理基準</p> <table border="1" data-bbox="735 293 906 786"> <thead> <tr> <th>管理項目</th> <th>管理内容</th> <th>規格値</th> <th>管理強度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>セラミック定着体へのねじ固着部のねじ固着長さ</td> <td>ワーキングが固着に固着していること</td> <td>定着体の端部がワーキングに固着していること</td> <td>全数</td> </tr> <tr> <td>セラミックキャップの長さ</td> <td>メジャーによる計測</td> <td>閉孔後に測定した挿入長さ+10~5mm以内</td> <td>全数</td> </tr> <tr> <td>セラミック定着体の直径</td> <td>目視</td> <td>長さ0.5mm以上の差は認めない</td> <td>全数</td> </tr> </tbody> </table> <p>試験後のセラミック定着体の状況</p>  <p>試験後のセラミック定着体の状況</p> <p>(定着体表面に置かれる灰色の部分は、定着体とアルミナ材が固着したものであり、定着体の割れや欠け等の損傷ではない。)</p>	項目	アルミナ	コンクリート	単位	強度 HV (ksi)	32.74	—	—	ヤング率 (kN/mm ²)	317.5	204.8	204.8	弾性係数	6.818×10 ⁸	10.08×10 ⁸	10.08×10 ⁸	ポアソン比	0.227	0.17	0.3	引張強度 (N/mm ²)	398	—	—	管理項目	管理内容	規格値	管理強度	セラミック定着体へのねじ固着部のねじ固着長さ	ワーキングが固着に固着していること	定着体の端部がワーキングに固着していること	全数	セラミックキャップの長さ	メジャーによる計測	閉孔後に測定した挿入長さ+10~5mm以内	全数	セラミック定着体の直径	目視	長さ0.5mm以上の差は認めない	全数
項目	アルミナ	コンクリート	単位																																								
強度 HV (ksi)	32.74	—	—																																								
ヤング率 (kN/mm ²)	317.5	204.8	204.8																																								
弾性係数	6.818×10 ⁸	10.08×10 ⁸	10.08×10 ⁸																																								
ポアソン比	0.227	0.17	0.3																																								
引張強度 (N/mm ²)	398	—	—																																								
管理項目	管理内容	規格値	管理強度																																								
セラミック定着体へのねじ固着部のねじ固着長さ	ワーキングが固着に固着していること	定着体の端部がワーキングに固着していること	全数																																								
セラミックキャップの長さ	メジャーによる計測	閉孔後に測定した挿入長さ+10~5mm以内	全数																																								
セラミック定着体の直径	目視	長さ0.5mm以上の差は認めない	全数																																								
	<ul style="list-style-type: none"> 後施工せん断補強筋として、せん断補強効果を発揮するための定着性能を有すること。 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋コンクリートと一体となって挙動すること。 	<ul style="list-style-type: none"> セラミックを構成するアルミナ材の熱膨張係数、ポアソン比及びヤング率はコンクリート・鋼材と同等であり、一体となって挙動する(上表「アルミナ材の一般物性の試験結果」参照)。 定着体部の強度を確認する「定着性能試験」及びねじ固着部の強度を確認する「ねじ強度試験」により、定着体がせん断補強効果を発揮するための定着性能を有していることを確認している。 																																								

第 4.4-5 表 各使用材料の役割・要求性能・材料特性 (3/3)

項目	定着性能試験	ねじ筋強度試験						
目的	<ul style="list-style-type: none"> 「定着体部のみ(後端側)」または「定着体部と設計定着長をグラウト充填した試験体(先端側)」の定着部が、母材であるねじ筋鉄筋の規格降伏強度相当の引張荷重以上のねじ筋強度を有していることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 定着体のねじ筋部(定着体とねじ筋鉄筋の接合部)が、母材となるねじ筋鉄筋の規格降伏強度相当の引張荷重以上のねじ筋強度を有していることを確認する。 						
確認内容	<p>【後端型定着体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 定着体部のみをグラウト充填し、定着体のみで定着強度が母材の規格降伏強度以上であることを確認しており、せん断補強効果を発揮するための定着性能を有している。  <p>【先端型定着体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計定着長(5D, D:鉄筋径)の範囲をグラウト充填し、定着体及び鋼材とコンクリートの付着による定着強度が母材の規格降伏強度以上であることを確認しており、せん断補強効果を発揮するための定着性能を有している。 設計定着長(5D)は、下図「先端型定着体の定着力と定着長の関係」とおり、鉄筋の直径の5倍以上の定着長があれば母材の規格降伏強度相当以上まで定着力を確保できることが確認できている。 また、下表「定着体の有無による定着長の比較」のとおりCChの先端型定着体を取り付けることで、定着体無しの場合よりも設計定着長を20%程度低減させ、定着性能を向上させることができる。  <p>【先端型定着体の定着力と定着長の関係】</p>  <table border="1" data-bbox="1149 1478 1292 1814"> <caption>定着体の有無による定着長の比較</caption> <thead> <tr> <th>定着体の種類</th> <th>設計定着長</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>定着体有り(先端側定着体)</td> <td>5D</td> </tr> <tr> <td>定着体無し*</td> <td>6D</td> </tr> </tbody> </table> <p>※: RMA及びベストグラウトバーを参照し記載。</p>	定着体の種類	設計定着長	定着体有り(先端側定着体)	5D	定着体無し*	6D	<ul style="list-style-type: none"> セラミック定着体部のみモルタル付着し、ねじ筋鉄筋とモルタルの付着を切った試験体を用いて試験を行い、ねじ筋部の強度が母材(鋼材)の規格降伏強度以上であることを確認しており、せん断補強効果を発揮するための定着性能を有している。      <p>試験終了時の状況 (孔周辺のコンクリート表面にはひび割れ等は認められない。) ※: 規格降伏強度を確認後、コンクリート表面位置で鉄筋を切断した状況の写真。</p>
定着体の種類	設計定着長							
定着体有り(先端側定着体)	5D							
定着体無し*	6D							

(6) IX. せん断補強筋の定着長

建設技術審査証明報告書で設定されている定着長を考慮していることを確認している。

(7) X. せん断ひび割れ抑制効果の確認

建設技術審査証明報告書の実験と女川2号機にてCCbにより耐震補強を行った構造物の各種諸元(部材厚, せん断スパン比, 主鉄筋比, 載荷方法)が異なっていることから, フロー③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認として, 4.5にて確認する。

(8) XI. ひび割れに対する定着機能の保持

建設技術審査証明報告書の実験と女川2号機にてCCbにより耐震補強を行った構造物では, 発生するひび割れ性状が異なる可能性がある。

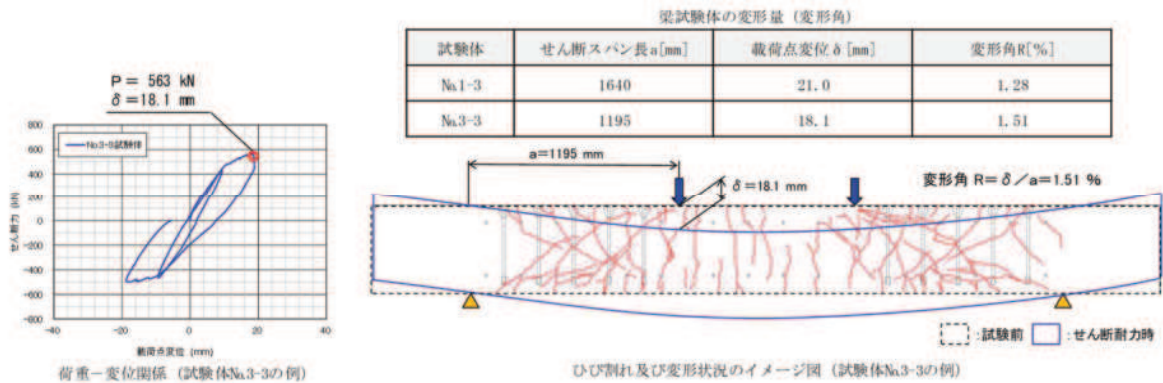
さらに, 定着体部に実験と性状が異なるひび割れが生じても定着機能が保持されていることを確認する必要があることから, フロー③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認として, 4.5にて確認する。

(9) XII. 変形量

CCbにより耐震補強を行った構造物の変形量が建設技術審査証明報告書の実験の変形量を超えないことを確認している。

確認の一例として, 添付資料2「女川2号機における部材諸元他の適用性の検討」にて検討した取水路(漸拡部)の結果を示す。第4.4-3図に示すように, 取水路(漸拡部)の層間変形角は最大でも0.29%(29/10,000)程度(基準地震動Ss-D2による照査結果)であり, 梁試験体の変形量(1%を超える範囲まで確認)以下に収まっていることを確認している。

なお, 女川2号機では, かぶりコンクリートの剥落により, CCbの定着体部の定着機能を阻害するおそれがあるため, かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態である圧縮縁コンクリートひずみ1.0%又は層間変形角1%(1/100)に, 十分な余裕をもってCCb工法を使用する。



第 4.4-3 図 梁試験体の変形量

(10) XⅢ. 使用環境

建設技術審査証明報告書に、「CCb 補強工法によれば、相次ぐ地震によりその耐震補強の必要性が高まっている原子力施設などの重要地下構造物、高速道路、鉄道及び上下水処理施設などの地下構造物、また、水門あるいは堰の門柱・堰柱など、構造上、巻立て補強が適用できない構造物の耐震性能を改善することができる」と記載されており、原子力施設などの重要地下構造物及び女川 2 号機のような海水環境下よりも、より使用環境が厳しい下水処理施設を対象としていることから、女川 2 号機の屋外重要土木構造物等にも適用可能である。

また、4.7 に記載のとおり、CCb 工法については気中及び水中で数多くの施工実績があることが確認されており、硫酸等の影響を受ける腐食環境下にある下水道施設での施工実績もある。

よって、海水中よりも厳しい環境下での施工実績が確認できているため、使用環境として問題がないことを確認している。

(11) XⅣ. CCb を適用した部材のコンクリートの健全性

建設技術審査証明報告書の実験では、新規に供試体を作成しているが、女川 2 号機にて CCb により耐震補強を行った構造物については、東北地方太平洋沖地震 (2011 年 3 月 11 日) 及び宮城県沖の地震 (2011 年 4 月 7 日) により、建設時の基準地震動を一部周期帯で超過する地震動を経験していることから、部材の健全性を確認する。

CCb 工法のせん断補強効果を発揮するためには、コンクリートが CCb 工法のせん断補強効果に悪影響を及ぼす状態にないことを確認する必要があることから、フロー③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認として、4.5 にて確認する。

(12) XⅤ. PHb 工法 (美浜 3 号機) との差異

PHb 工法と CCb 工法の差異及び美浜 3 号機と女川 2 号機の適用性確認における差

異を第 4.4-6 表に示す。

第 4.4-6 表に示すとおり，定着体の構造，対象部材，せん断耐力の設計法（ β_{aw} の設定），検討対象構造物（構造諸元，荷重形態）及び定着体部の状況に差異があることが確認できる。

これらのうち，定着体の構造及びせん断耐力の設計法（ β_{aw} の設定）については，PHb 工法と CCb 工法で差異があるものの，建設技術審査証明報告書に合致していることを確認している。

しかしながら，対象部材，検討対象構造物（構造諸元，荷重形態）及び定着体部の状況については，建設技術審査証明報告書から確認できないことから，フロー③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認として，4.5 にて確認する。

(13) XVI. 増厚補強部への適用性※

建設技術審査証明報告書及び建設技術審査証明報告書の実験では，既設部材へ CCb による耐震補強を行った後に増厚補強を行った部材を対象としていないことから，フロー③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認として，4.5 にて確認する。

※：詳細設計を踏まえ適用性の確認を補足する項目

第 4.4-6 表 PHb 工法 (美浜 3 号機) と Ccb 工法 (女川 2 号機) の差異 (1/2)

確認項目	PHb 工法 (美浜3号炉)	Ccb 工法 (女川2号炉)	差異の有無及び確認結果と概要
目的	<ul style="list-style-type: none"> 地震時荷重によるせん断破壊に対する補強工法として、使用している。 	<ul style="list-style-type: none"> 左に同じ。 	無
定着体の構造	<ul style="list-style-type: none"> せん断補強筋の両端部にプレートを取り付けたもの。 プレートは、摩擦圧接により取り付けられている。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断補強筋の両端部にファイヤセラムミック製の定着体を取り付けたもの。 定着体とせん断補強筋は、ねじ筋構造であり、ねじの噛合せ及びエポキシ樹脂により取り付けられている。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 定着体部に差異有り。 「VII. 使用材料 (セラミック製定着体)」と同様、建設技術審査証明書に合致することを確認した。
施工方法	<ul style="list-style-type: none"> 既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルにより削孔→孔内にPHbを挿入→充てん材で固定。 	<ul style="list-style-type: none"> 左に同じ (使用材料(PHbまたはCcb)の違いのみ)。 既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルにより削孔→孔内にCcbを挿入→充てん材で固定。 	無
認定方法	<ul style="list-style-type: none"> 一般財団法人土木研究センターより建設技術審査証明を受けている。 	<ul style="list-style-type: none"> 左に同じ。 	無
対象部材	<ul style="list-style-type: none"> 梁試験体として、棒部材 (せん断スパン比※: a/d=2.7 他) に加え、せん断スパン比が小さいデイベーム (a/d=1.19~1.58) についても性能確認試験を行っている。 PHb工法の性能確認は、梁試験体による正負交番載荷試験により確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 梁試験体として、棒部材 (a/d=2.78) を対象に性能確認試験を行っている。 Ccb工法の性能確認は、梁試験体による正負交番載荷試験により確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ フロー③にて確認 各工法の性能確認方法に違いはないが、Ccb工法の性能確認試験ではデイベームを対象とした試験を行っている。
せん断耐力の設計法① (せん断耐力の算出方法)	$V_{allow} = V_{awd} \times \beta_{aw}$ $V_{allow} : PHb \text{ で負担されるせん断耐力}$ $V_{awd} : PHb \text{ を通常のせん断補強鋼材とみなして求められるせん断耐力}$ $\beta_{aw} : PHb \text{ のせん断耐力向上への有効性を示す係数}$	$V_{allow} = V_{awd} \times \beta_{aw}$ $V_{allow} : Ccb \text{ で負担されるせん断耐力}$ $V_{awd} : Ccb \text{ を通常のせん断補強鋼材とみなして求められるせん断耐力}$ $\beta_{aw} : Ccb \text{ のせん断耐力向上への有効性を示す係数}$	無
せん断耐力の設計法② (β_{aw} の設定)	$\beta_{aw} = 1 - I_y / (2 \cdot S_{rb})$ $I_y : \text{定着長}$ $S_{rb} : \text{補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔}$ <ul style="list-style-type: none"> β_{aw} の上限値を、0.9としている。 	<ul style="list-style-type: none"> β_{aw} の算出式は、左に同じ。 β_{aw} の上限値は、ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ β_{aw} の算出式に差異はないが、Ccb工法はβ_{aw}に上限値なし。 建設技術審査証明書報告書に合致することを確認した。

※: せん断スパン比a/d (a: 支間長, d: 有効高さ)

PHb工法に係る記載内容については、会合資料やP等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものです。

第 4.4-6 表 PHb 工法（美浜 3 号機）と Ccb 工法（女川 2 号機）の差異（2/2）

確認項目	PHb 工法 (美浜3号機)	Ccb 工法 (女川2号機)	差異の有無及び確認結果と概要
適用性	<ul style="list-style-type: none"> 適用性確認のためのフローを設定している。 建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目については、個別に数値実験等を用いてせん断補強効果を確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 左に同じ。 	—
検討対象 構造物① (構造諸元)	<ul style="list-style-type: none"> 構造物：海水ポンプ室 対象部材：底板 部材厚：2000mm 部材照査：梁に発生する断面力に対して照査を実施。 	<p>①</p> <ul style="list-style-type: none"> 構造物：取水路（漸拡部） 対象部材：隔壁 部材厚：1200mm 部材照査：梁に発生する断面力に対して照査を実施。 <p>②</p> <ul style="list-style-type: none"> 構造物：軽油タンク室 対象部材：側壁 部材厚：1500mm 部材照査：版や壁部材に発生する断面力に対して照査を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> フロー③にて確認 女川2号機では、版や壁部材（面部材）へCcb工法を適用しており、面内荷重と面外荷重が同時に作用することから、その影響について確認する必要がある。
検討対象 構造物② (荷重形態)	<ul style="list-style-type: none"> 分布荷重系 	<ul style="list-style-type: none"> 集中荷重系 分布荷重系 	<p>フロー③にて確認※</p> <ul style="list-style-type: none"> 女川2号機では、Ccbによりせん断補強を行っている部材位置を踏まえ、集中荷重系と分布荷重系の両方に着目し確認する。 ※：「Ⅴ. 載荷方法」と同一の内容であることから、「Ⅳ. 載荷方法」にて確認する。
定着体部の 状況	<ul style="list-style-type: none"> PHbにより耐震補強を行っている海水ポンプ室及び海水管トレンチは、M-Φ曲線の第1折点（ひび割れ発生）程度であり、かぶりコンクリートに顕著なひび割れは発生せず、健全である。 	<ul style="list-style-type: none"> Ccbにより耐震補強を行っている構造物は、主筋の降伏強度以下、M-Φ曲線の第2折点以下（主筋の降伏）または主筋のひずみが増加する範囲にてCcb工法を使用することとしており、部材にひび割れが発生する可能性がある。 	<p>フロー③にて確認※</p> <ul style="list-style-type: none"> 女川2号機においては、主筋の降伏強度以下にてCcb工法を使用することとしているため、ひび割れ発生による定着機能への影響を確認する。 ※：「Ⅺ. ひび割れに対する定着機構の保持」と同一の内容であることから、「Ⅺ. ひび割れに対する定着機構の保持」にて確認する。

適用性確認における差異

他サイトの情報に係る記載内容については、会合資料やHP等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものです。

4.5 ③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認

4.5.1 せん断補強効果の確認内容

4.3 で抽出した適用性確認項目のうち、4.4 の建設技術審査証明報告書の適用範囲から確認できなかった項目について、4.5.2 以降において、数値解析による検証及び建設技術審査証明報告書の実験の確認等により、せん断補強効果が期待できることを確認する。確認する項目を以下に示す。

- (1) 部材諸元
- (2) 載荷方法
- (3) せん断ひび割れ抑制効果の確認
- (4) ひび割れに対する定着機能の保持
- (5) CCb を適用した部材のコンクリートの健全性
- (6) PHb 工法（美浜 3 号機）との差異
- (7) 増厚補強部への適用性※

※：詳細設計を踏まえ適用性の確認を補足する項目

4.5.2 せん断補強効果の確認

- (1) 部材諸元、(2) 載荷方法、(3) せん断ひび割れ抑制効果の確認

女川 2 号機で CCb により耐震補強を行った構造物の多くが、部材諸元（部材厚、せん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度）や載荷方法が建設技術審査証明報告書に記載の実験と異なっているにもかかわらず、せん断ひび割れを抑制し、せん断補強効果を期待できるかを数値解析により確認する。

数値解析の詳細については、添付資料 2 「女川 2 号機における部材諸元他の適用性の検討」に示す。添付資料 2 に示すとおり、建設技術審査証明報告書の実験条件と異なる項目である(1)～(3)の項目においても、CCb 工法が適用可能であること及びせん断ひび割れ抑制効果があることを確認した。併せて、終局荷重時においても特異なひび割れや変形が発生しないことを確認した。

- (4) ひび割れに対する定着機能の保持

女川 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れ（曲げひび割れ、面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びデュープビームに生じる 45 度を超える高角度のひび割れ）が CCb の定着体部やその周囲に生じていても、定着機能が保持されることを確認する。

詳細は、添付資料 3 「女川 2 号機におけるひび割れに対する定着機能保持の検討」に示す。添付資料 3 に示すとおり、女川 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れが、CCb の定着体部やその周囲に実験と性状が異なるひび割れとして生じていても、定着機能が保持されていることを建設技術審査証明報告書の実験との対比から確認した。

なお、建設技術審査証明報告書の実験は、せん断耐力を確認するための実験で

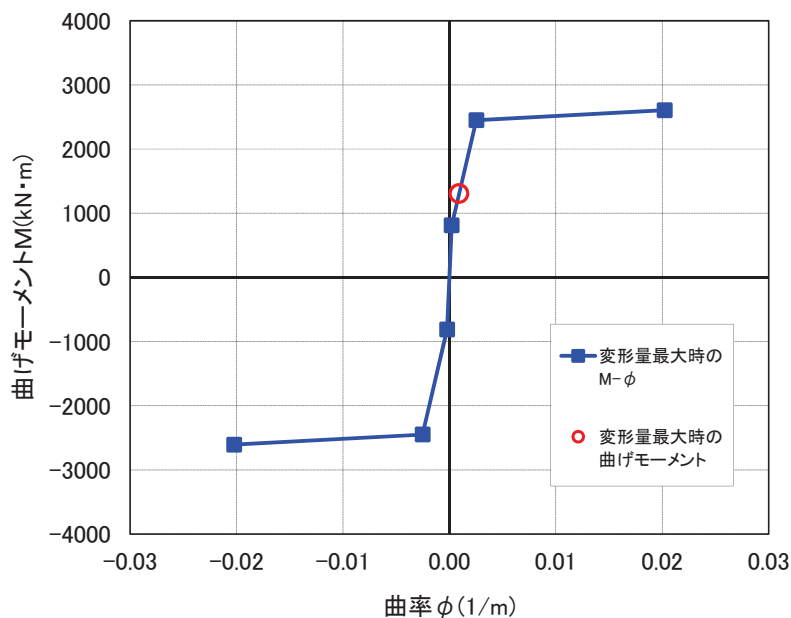
あることから、曲げ降伏させないよう主鉄筋に高強度の鉄筋 (SD490) を使用しており、せん断破壊時における主鉄筋のひずみは、第 4.5-1 表に示すとおり、降伏ひずみ未満の 2363μ まで確認されている。これらを踏まえ、主鉄筋に SD345 を用いている女川 2 号機において Ccb により耐震補強を行った構造物については、応答値として主鉄筋のひずみが降伏ひずみ (1725μ) 未満又は応力が降伏強度 (345N/mm^2) 未満であることを確認する。

確認例として、取水路 (漸拡部) の評価結果 (基準地震動 Ss-D2 による照査結果) を示す。取水路 (漸拡部) は、部材非線形解析 (M- ϕ モデル) により評価していることから、M- ϕ 曲線の第 2 折れ点 (主鉄筋の降伏に相当) 以下であることを確認する。第 4.5-1 図に示すとおり、応答値を M- ϕ 曲線上にプロットすると M- ϕ 曲線の第 1 折点 (ひび割れ発生) 付近であり、主鉄筋は降伏していないため Ccb 工法が適用可能であることがわかる。

第 4.5-1 表 梁試験体に生じた鉄筋ひずみ

項 目		備 考
鉄筋ひずみ	$2363\mu^*$	降伏ひずみ: 2450μ (SD490)

※: コンクリートの引張応力を無視し、縦ひずみは断面の中立軸からの距離に比例するものとして算出した。



第 4.5-1 図 取水路 (漸拡部) の M- ϕ 曲線

(5) CCb を適用した部材のコンクリートの健全性

CCb 工法のせん断補強効果を発揮するためには、コンクリートが健全である必要があることから、ひび割れ状況及び圧縮強度試験によりコンクリートの健全性を確認する。

詳細については、添付資料 4 「女川 2 号機におけるコンクリートの健全性の検討」に示す。添付資料 4 に示すとおり、地震後（東北地方太平洋沖地震（2011 年 3 月 11 日）及び宮城県沖の地震（2011 年 4 月 7 日））のひび割れ状況及び構造物から採取したコンクリートコアの圧縮強度試験結果から、CCb により耐震補強を行った構造物の既設コンクリートの状態が、CCb のせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認した。

(6) PHb 工法（美浜 3 号機）との差異

第 4.4-6 表に示すとおり、CCb 工法ではディープビームを対象とした性能確認試験を行っていないこと、及び女川 2 号機では面内荷重を面外荷重が同時に作用する部材も対象としていることから、これらの適用性について確認する。

詳細については、添付資料 5 「ディープビーム的な破壊に対する CCb 工法の適用性の検討」及び添付資料 6 「面内荷重と面外荷重が作用する部材への CCb 工法の適用性の検討」に示す。

添付資料 5 に示す、ディープビーム的な破壊形態が想定される部材への適用性については、「応力の負担機構」、「設計における保守性」及び「ひび割れの影響」の観点から整理を行い、女川 2 号機において CCb を用いる部材については棒部材式を用いてせん断力に対する評価を行うことに加え、せん断耐力と設計せん断力に対する比（以下、照査値という。）を 0.8 程度に抑える設計上の配慮を行うこと、及びディープビーム的な破壊形態において発生する可能性のある高角度のひび割れについても実験により CCb の補強効果が発揮されることが確認されていることから問題ない。更には、ディープビームを対象とした模型実験を実施し、ディープビームにおいても CCb 工法によりせん断補強効果が発揮され、棒部材式で算定されるせん断耐力を上回ることを確認した。

添付資料 6 に示す、面内荷重と面外荷重が作用する部材への CCb 工法の適用性については、「設計の考え方」及び「ひび割れの影響」の観点から整理を行い、面内荷重及び面外荷重に対する設計上の負担する荷重の観点及び面内荷重により発生するひび割れは、建設技術審査証明報告書の実験で同等のひび割れが生じても、せん断補強効果を確認していることが確認されていることから問題はない。更には、面内荷重と面外荷重が同時に作用する面部材を対象とした数値解析（三次元静的材料非線形解析）を実施し、面内荷重が作用しても CCb へ悪影響がなく、CCb により十分なせん断補強効果が得られていることを確認した。

(7) 増厚補強部への適用性

女川2号機においてCCbによる耐震補強を行った部材に増厚補強を行った部材が、せん断補強効果を発揮することを確認する。

詳細は、添付資料7「増厚補強部におけるCCb工法の適用性の検討」に示す。添付資料7に示すとおり、CCbによる補強部材と増厚部材を二次元静的材料非線形解析により解析し、せん断補強効果が発揮され、新設した増厚部材と一体となってせん断耐力が得られることを確認した。

4.6 ④CCbの施工精度に影響を与える項目の確認

CCb工法によるせん断補強においては、施工精度の低下により計画どおり施工できなかった場合、期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。そのため、施工精度に影響を与える項目を抽出し、施工精度の低下やせん断補強効果に大きな影響を与えないことを確認する。以下に、抽出した項目を示す。

- ① 削孔方法
- ② 削孔角度
- ③ 削孔位置
- ④ グラウトの充てん性

4.6.1 削孔方法

CCb挿入計画位置をドリルにより削孔するが、その削孔方法としてはレッグハンマードリル又はコンクリートコアドリルの使用が主となっている。コンクリートコアドリルは設置面に強固に固定でき、掘削方向と掘削深さを精度良く確保することが容易であることから、原子力発電所施設では主にコンクリートコアドリルでの削孔を採用している。

また、削孔時に既存鉄筋の切断を回避するため、既存鉄筋干渉時にコンクリートコアドリルの回転を停止させる鉄筋センサーの使用を標準装備としている(第4.6-1図参照)。

なお、削孔においては第4.6-1表のとおり、施工精度を確保するために管理基準を設けている。

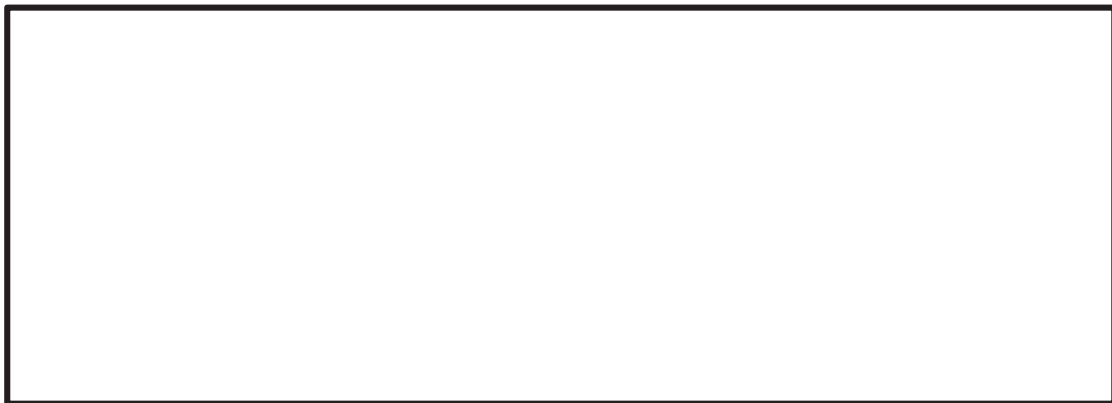
第 4.6-1 表 削孔に関する品質管理基準

管理項目	管理内容	規格値	管理頻度
一般部の削孔長	メジャーによる計測	0mm ≤ 設計値 ≤ 20mm かつ、削孔先端から埋込側表面までの厚さ 50mm 以上	全数
一般部の削孔径 拡幅部の削孔長及び 削孔径	セラミックキャップバ ー (CCb) による計測	CCb が完全に挿入でき ること	

4.6.2 削孔角度

CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、削孔角度に誤差が生じた場合、CCb のせん断補強効果に影響が及ぶ可能性がある。そのためコンクリートコアドリルを専用架台に設置し、ドリルの鉛直方向、水平方向が削孔面に対して垂直となるよう水平器、金尺等で確認し削孔することにより、削孔角度のばらつきが生じる可能性を低減させる。

また、「建設技術審査証明報告書 技術名称 あと施工型せん断補強用無機系モルタルカプセル及びせん断補強筋「RMA」(建技審証第 1203 号)」ではコンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験を実施している(第 4.6-2 図参照)。コンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験では、幅 1200mm × 高さ 600mm × 長さ 1200mm のコンクリートブロック 4 体を削孔し、削孔位置のずれを確認している。コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果を、第 4.6-2 表に示す。女川 2 号機の CCb により耐震補強を行った構造物のうち、最大部材厚は 1500mm である。削孔角度誤差を換算すると、長さ 1200mm, 2400mm は 0.72° , 長さ 3600mm で 0.66° となり、コアドリルによる長尺削孔は十分精度があることが示されている。



第 4.6-1 図 削孔状況

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



第 4.6-2 図 試験概要図

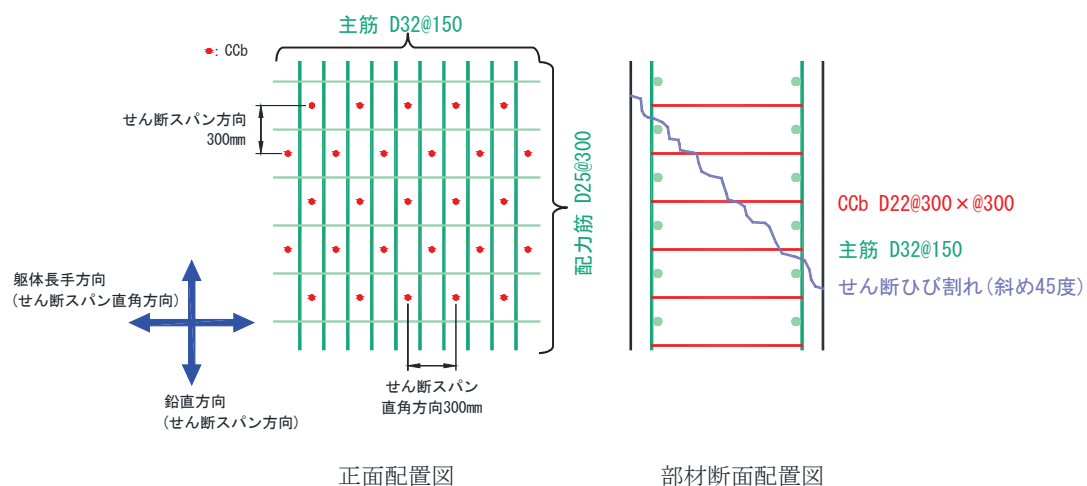
第 4.6-2 表 コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.6.3 削孔位置

CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、部材内部に障害物があり計画位置で削孔できず CCb を計画どおり配置できない可能性がある。その場合は、付近を再削孔し CCb を挿入することで設計上必要な鉄筋量を確保する。再削孔し CCb を配置する際は、4.4 に示す記載事項を満足するものとする。なお、第 4.6-3 図に示すせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図のとおり、再削孔する際は削孔計画位置（赤丸）から位置をずらし、せん断補強効果に影響のない位置に削孔することが可能である。再削孔の際、新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性があることから、孔を隣接させて削孔することが可能なコンクリートコアドリルを使用し、再削孔時の精度向上を図る。

以上より、削孔位置に変更が生じても必要鉄筋量を確保できるためせん断補強効果に影響を及ぼさない。



第 4.6-3 図 取水路（漸拡部）のせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図

4.6.4 グラウトの充てん性

グラウトの充てん性については、グラウト充てん性確認実験により、削孔内に設置したCCbの先端定着部までグラウトが密実に充てんされ、CCbとコンクリート躯体が一体となっていることを確認している。以下に、建設技術審査証明報告書に記載されているグラウト充てん性確認実験の内容を示す。

グラウト充てん性確認実験は、①先充てん工法（横向き）、②先充てん工法（下向き）、③先充てん工法（上向き）、④後充てん工法（上向き）にて実施されている（第4.6-4図参照）。

なお、グラウト充てんでは残留エアが施工品質に影響を与えることから、高流動グラウトを使用する横向き施工においては、残留エアの有無をかき出しにより確認しており、残留エアが無いことを全数確認している。

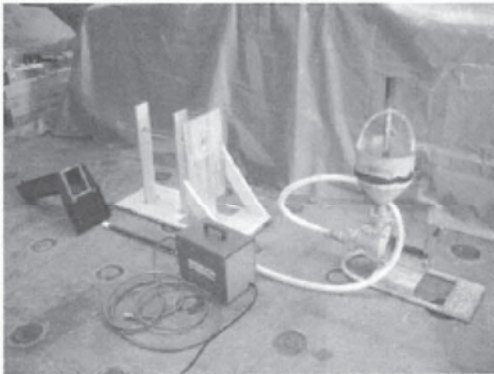
① 先充てん工法（横向き）

先充てん工法（横向き）の場合、コンクリート躯体面に養生用治具を止水剤、接着剤等で設置し、グラウト貯留槽を真空ポンプと吸盤で固定する。そして、グラウトポンプを用いて、掘削孔の先端からエアを追出すようにグラウトを充てんし、削孔部分およびグラウト貯留槽部分にグラウトを満たす。その状態で「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入することにより、エア抜きホースを残置すること無く、「セラミックキャップバー（CCb）」の挿入およびその周囲へのグラウトの充てんを行う。

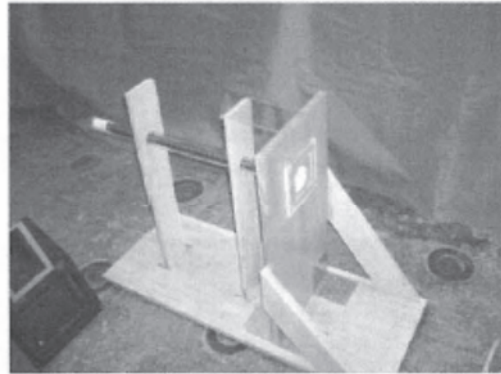
写真Ⅱ-4.9～写真Ⅱ-4.11に示すように、グラウトが充てんされた削孔内に「セラミックキャップバー（CCb）」を抵抗無く挿入でき、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんできることを、アクリル模型およびRC部材を用いた施工試験により確認した。また、実際の施工では、ほぼ水平となるように削孔することが可能であるが、アクリル模型の先端を2°以上、上に傾けた状態でのグラウトの充てん確認試験を実施し、孔内後端部の上部の角部にエアが残留した場合でも、エア抜き工具を用いて残留エアの有無の確認と除去が可能であることを確認している（写真Ⅱ-4.10）。

第4.6-4図 グラウトの充てん性確認実験
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（1/10）

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できるので、最小限の設備と人員での「セラミックキャップバー (CCb)」の横向きの設置が可能である。



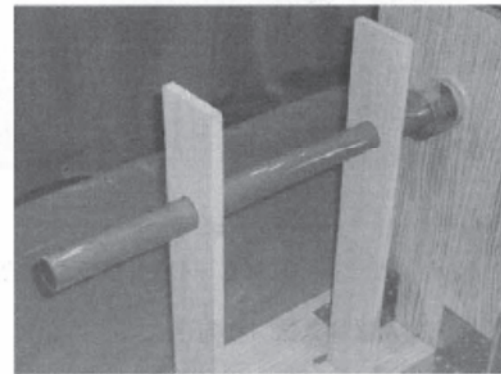
試験器具一式



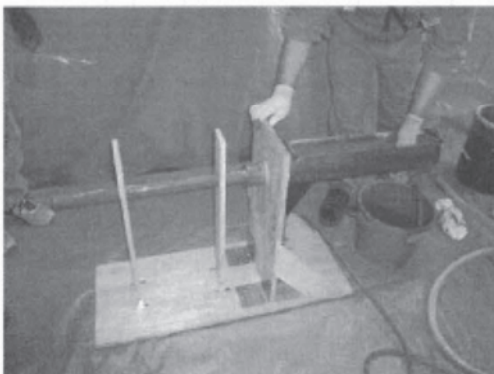
アクリル模型への「セラミックキャップバー (CCb)」の仮設置



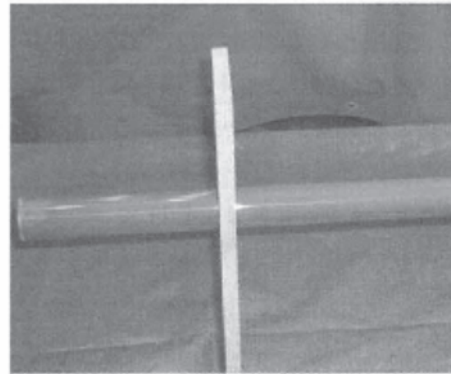
グラウトの充てん状況



グラウトの充てん状況 (先端)



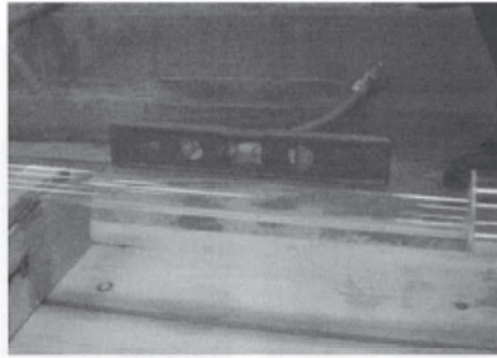
「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



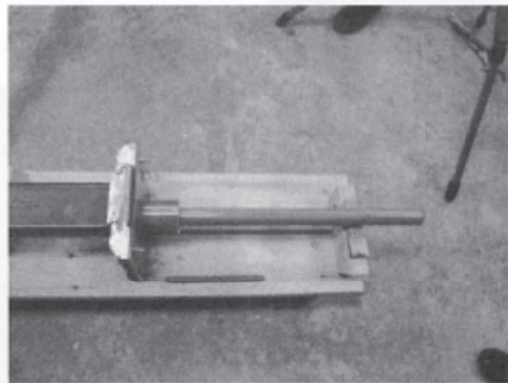
先端部の充てん状況

写真Ⅱ-4.9 アクリル模型によるグラウト充てん性確認実験 (横向き)

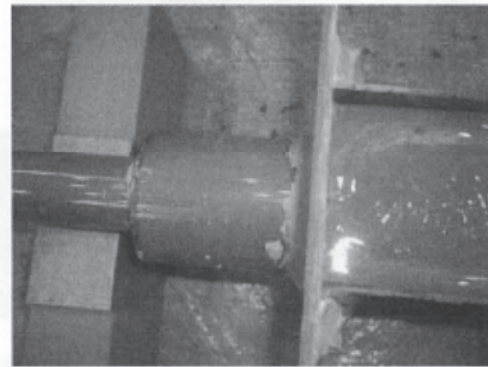
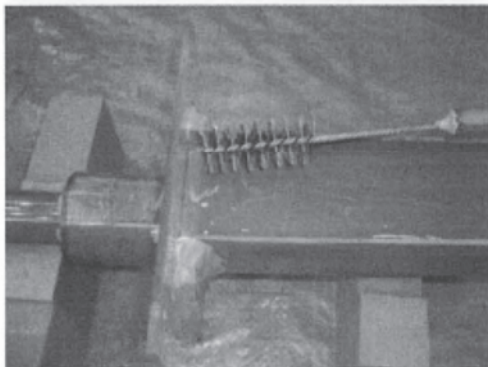
第4.6-4図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/10)



上傾き充てん確認試験



上傾き充てん状況



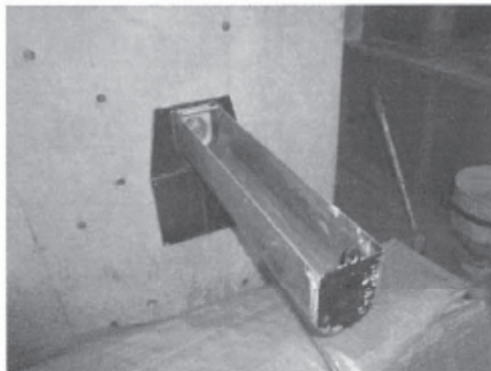
後端部エア抜き確認試験

写真Ⅱ-4.10 アクリル模型によるグラウト充てん性確認実験(先端が上に傾いた場合)

第4.6-4図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/10)



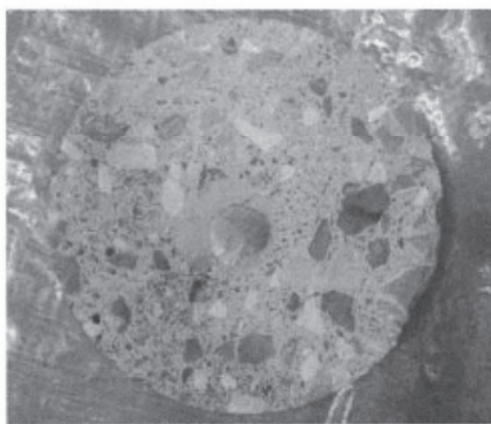
RC 部材への削孔



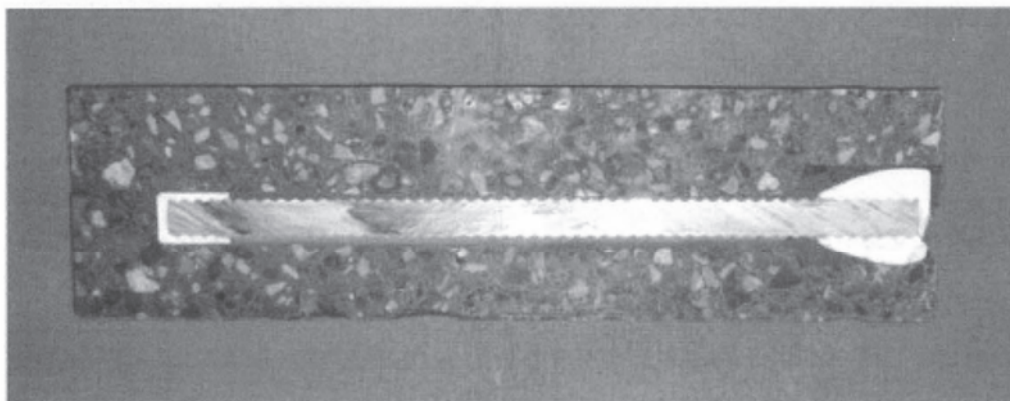
グラウト貯留槽の設置



「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



グラウトの注入状況 (鉄筋部)
「セラミックキャップバー (CCb)」挿入部を切断したもの



グラウトの注入状況 (全体)
「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入部

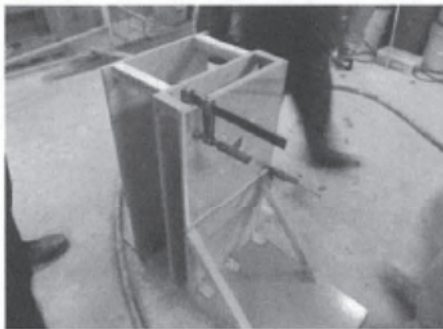
写真Ⅱ-4.11 RC 部材によるグラウト充てん性確認実験 (横向き)

第 4.6-4 図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/10)

ハンチ部の施工や、支障物が近傍にあるために、グラウト貯留槽が使用できない箇所は、表Ⅱ-1.4に示す可塑性グラウトを用いて作業を行うことにより、グラウト貯留槽を用いた時と同様の充てん性能を有していることをアクリル模型の施工試験で確認している。

グラウトポンプを用いて、掘削孔の先端からエアを追出すようにグラウトを充てんする。その後に「セラミックキャップバー (CCb)」をゆっくり挿入することにより、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入およびその周囲へのグラウトの充てんを行う。

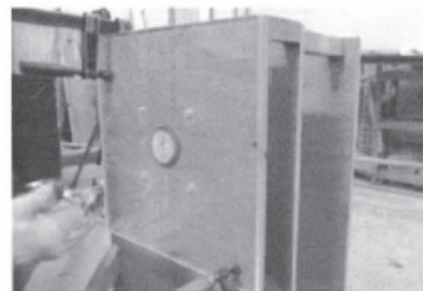
グラウトは、セメントに所定の水を加えてハンドミキサで練り混ぜ、その後に所定の可塑性剤を添加して再度練り混ぜて使用する。



アクリル模型試験体



「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



「セラミックキャップバー (CCb)」の設置

写真Ⅱ-4.12 アクリル模型による可塑性グラウト充てん性確認試験 (横向き)

表Ⅱ-1.4 可塑性グラウトの性能

水セメント比 (%)	添加率 (%)	テーブルフロー値 (mm)	ブリーディング率 (%)	膨張収縮率 (%)	圧縮強度(N/mm ²)		
					3日	7日	28日
33.0~39.0	0.28%~0.32%	(静止) 105mm~120mm (15回打撃) 150mm~200mm	0.0	0.12%~0.18%	35.9	45.5	56.4

圧縮強度は現場封緘養生による結果である。

第4.6-4 図 グラウトの充てん性確認実験 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/10)

② 先充てん工法（下向き）

先充てん工法（下向き）の場合、削孔内にグラウトを充てんし、「セラミックキャップパー（CCb）」を上方から差し込むだけで配置を完了する。削孔内面は、グラウトを充てんする前に湿润状態にするか、あるいはドライアウト防止剤を散布し、グラウトが吸湿されないようにする。

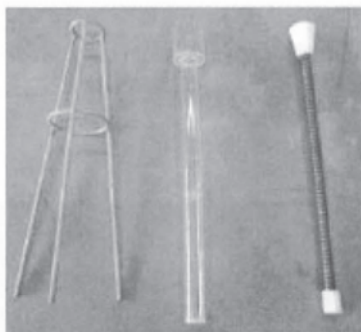
写真Ⅱ-4.8 に示すように、グラウトが表Ⅱ-1.2 に示すものであれば、「セラミックキャップパー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんすることを、アクリル模型を用いた施工試験により確認した。

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できる。

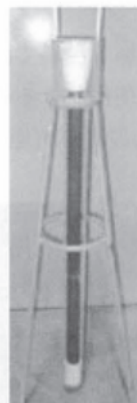
表Ⅱ-1.3 グラウトの性能

水セメント比 (%)	JA ロート流下時間 (秒)	ブリーディング率 (%)	膨張収縮率 (%)	圧縮強度(N/mm ²)			
				1日	3日	7日	28日
33.0~39.0	15~30	0.0	0.14~0.23	22.2	38.6	58.3	65.3

圧縮強度は現場封緘養生による結果である。



試験器具（アクリル管等）



グラウトの充てん



拡張部充てん

写真Ⅱ-4.8 グラウト充てん性確認実験（下向き）

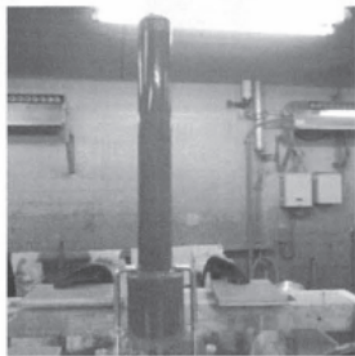
第 4.6-4 図 グラウトの充てん性確認実験
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（6/10）

③ 先充てん工法（上向き）

先充てん工法（上向き）の場合、可塑性グラウトを削孔内にグラウトを充てんし、「セラミックキャップバー（CCb）」を下方から差込むだけで配置を完了する。

写真Ⅱ-4.14、写真Ⅱ-4.15 に示すように、可塑性グラウトであればグラウトで充てんされた削孔内に、「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入でき、エア抜きホースを残置すること無く、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんできることを、アクリル模型およびRC部材を用いた施工試験、専用エアメータを用いた上向き充てん試験により確認した。

グラウトは、セメントに所定の水を加えてハンドミキサで練り混ぜ、その後に所定の可塑性剤を添加して再度練り混ぜて使用できる。



グラウトの充てん



「セラミックキャップバー（CCb）」の設置



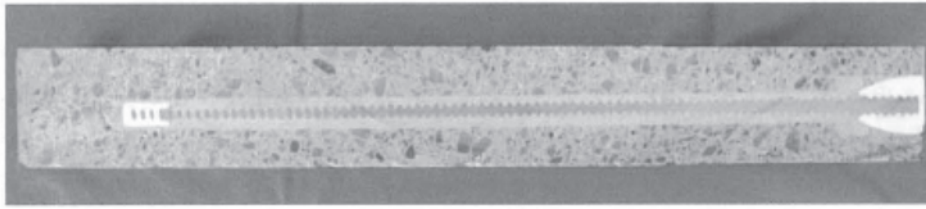
グラウトの充てん



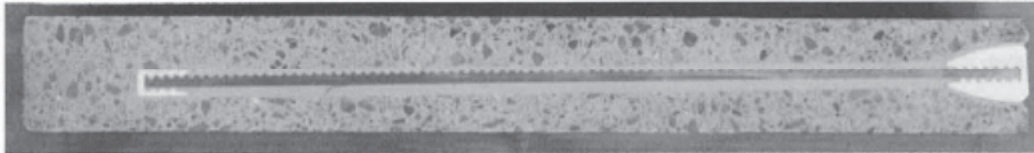
「セラミックキャップバー（CCb）」の挿入

写真Ⅱ-4.14 先充てん後挿入工法グラウト充てん性確認実験（上向き）（その1）

第4.6-4 図 グラウトの充てん性確認実験
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（7/10）

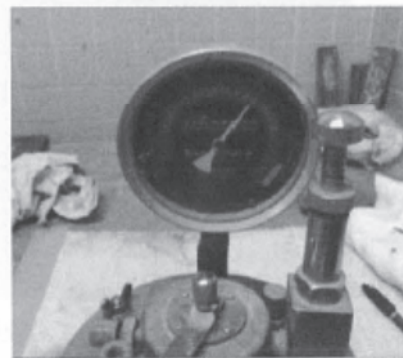
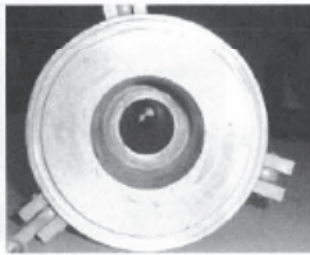
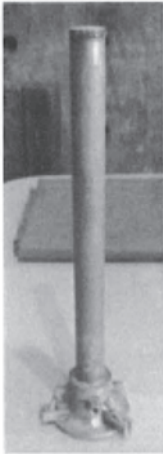


拡幅部通常コア



拡幅部親子ビット

グラウトの注入状況 (全体)



CCb 工法仕様上向き空気量測定

写真Ⅱ-4.15 先充てん後挿入工法グラウト充てん性確認実験 (上向き) (その2)

第4.6-4 図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (8/10)

④ 後充てん工法（上向き）

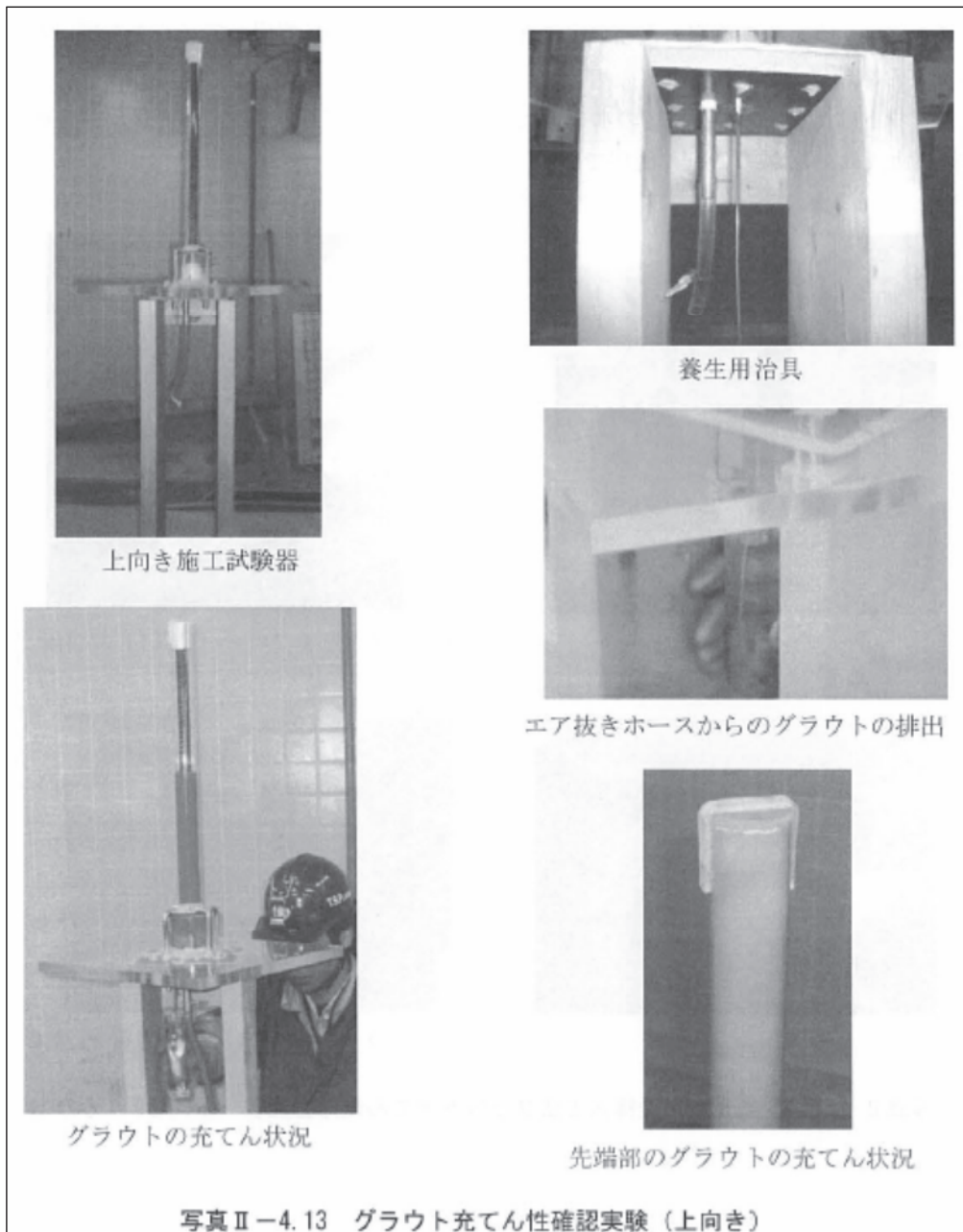
後充てん工法（上向き）の場合、写真Ⅱ-4.13に示すように、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部にエア抜きホースを設置した養生治具を用意し、「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入した削孔口部分に設置する。

そして、高流動性のグラウトを下方から注入し、エア抜きホースから掘削孔内の空気を排出して充てんする。この時、あらかじめ配置した「セラミックキャップバー（CCb）」が削孔の中心部に配置されるように、差込側の定着体に対し、注入治具側にスペーサ等を設置し位置を調整する。削孔内面は、グラウトの注入前に湿潤状態にするか、あるいはドライアウト防止剤を散布し、グラウトが吸湿されないようにする。グラウトの充てん状況は、グラウト注入時におけるエア抜きホースからの空気の排出と、グラウトの流失を確認することによって把握する。そして、グラウトの注入圧を保ったまま、エア抜きホースを養生治具の位置まで引き抜き、その口を閉じる。

写真Ⅱ-4.13に示すように、上向き施工でも「セラミックキャップバー（CCb）」の先端までグラウトを充てんでき、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー（CCb）」設置できることを、アクリル模型を用いた施工試験により確認した。

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できる。

第 4.6-4 図 グラウトの充てん性確認実験
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（9/10）



写真Ⅱ-4.13 グラウト充てん性確認実験（上向き）

第4.6-4 図 グラウトの充てん性確認実験
 （建設技術審査証明報告書より抜粋）（10/10）

4.6.1～4.6.4 に示すとおり，施工上の配慮により，せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工精度の低下が生じる可能性は低いことが確認できる。

しかし，現時点では後施工による施工精度に対して，施工実績に基づく十分な統計がとれていないため，施工精度の低下による影響が生じる可能性を否定することはできない。

以上を踏まえて，適切な施工管理を実施してもなお発生しうる施工精度の低下への設計上の配慮として，耐震評価上の裕度（例えば照査値を8割程度に抑える）を持たせた設計を行うこととする。

4.7 ⑤施工実績・研究事例等の確認

CCb の施工実績及び後施工せん断補強に関する研究事例を踏まえ、CCb 工法及び施工への反映事項を確認する。

4.7.1 施工実績の整理

CCb の施工実績は、第 4.7-1 表に示すように 2017 年 9 月 30 日までに、道路・地下街、浄化センター、浄水場、水門、排水機場、排水路、発電所・プラントなど、施工中案件を含め 174 件の工事に適用され、37.6 万本以上が施工されている。

第 4.7-1 表 CCb の施工実績 (2017 年 9 月 30 日現在)

対象施設		施工件数
道路・地下街	道路橋他	
浄化センター	最終沈澱池, ポンプ室他	
浄水場	配水池他	
水門	防潮水門他	
排水機場	排水機場他	
排水路	地下排水路	
発電所・プラント	貯水池・水路他	
ダム	ダム	
空港	空港	
護岸	防潮堤他	
栈橋	栈橋	

施工中案件を含む 合計 : 174 件 376,000 本以上

CCb の施工実績を部材厚、鉄筋径及び使用環境毎に整理する。部材厚毎に整理した結果を第 4.7-2 表に、鉄筋径毎に整理した結果を第 4.7-3 表に、使用環境(気中又は水中)毎に整理した結果を第 4.7-4 表に示す。なお、カウントする際は、1 件の工事のうち複数にまたがって該当する場合には、各項目でそれぞれカウントしている(例:同一工事内で D13, D16, D19 の鉄筋を用いている場合は D13, D16, D19 の全てにカウント)。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

第 4.7-2 表 Ccb の施工実績（部材厚）（1/4）※

部材厚(mm)	件数
～500	78
501～1000	126
1001～1500	77
1501～2000	39
2001～3000	10
3001～	7

第 4.7-2 表 Ccb の施工実績（部材厚）※
（上記実績のうち横向き施工）（2/4）

部材厚(mm)	件数
～500	53
501～1000	87
1001～1500	47
1501～2000	17
2001～3000	5
3001～	2

第 4.7-2 表 Ccb の施工実績（部材厚）※
（上記実績のうち下向き施工）（3/4）

部材厚(mm)	件数
～500	35
501～1000	61
1001～1500	48
1501～2000	29
2001～3000	6
3001～	5

第 4.7-2 表 Ccb の施工実績（部材厚）※
（上記実績のうち上向き施工）（4/4）

部材厚(mm)	件数
～500	6
501～1000	22
1001～1500	14
1501～2000	0
2001～3000	0
3001～	0

※：ハッチング箇所は，女川 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

第 4.7-3 表 Ccb の施工実績（鉄筋の種類）※

補強鉄筋の種類		件数
SD345	D13	42
	D16	71
	D19	82
	D22	80
	D25	61
	D29	30
	D32	33

※：ハッチング箇所は，女川 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

第 4.7-4 表 Ccb の施工実績（使用環境）※

施工場所	件数
気中	12
水中	162

※：ハッチング箇所は，女川 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

4.7.2 過去の地震の経験事例

CCbにより耐震補強を行った構造物は、過去に多くの地震を受けている(第4.7-5表)。その中には、震度5強の地震を受けた事例もあり、CCb工法研究会に確認したところ、いずれの地点においても、現時点では被害・不具合が発生したという報告はない。

第4.7-5表 震度4以上の地震を受けた構造物

--

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.7.3 レベル2地震動を対象とした設計事例

広島空港直下を通る用倉トンネルにおいて、レベル2地震動を対象として耐震補強に鉄筋差込工法（後施工せん断補強鉄筋工法 RMA 工法）を適用したせん断補強事例が報告されている^{*}。本事例においては、広島空港が大都市拠点空港として空港輸送上重要な空港に位置づけられたため、耐震性能照査を行った結果、せん断耐力が不足していることが判明したことによる。用倉トンネルは現場打ちのアーチカルバートの上に20m弱の盛土をおこなった構造物である。構造形式等の詳細については、4.7.5④に記載する。

※：参考文献

後施工型せん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について（岡崎大宜）

4.7.4 後施工せん断補強工法の比較

CCb 工法以外にも土木研究センターにおいては、類似する後施工せん断補強工法の建設技術審査証明が実施されている。後施工せん断補強工法の比較結果を、第4.7-6表に示す。工法に差異はあるものの、コンクリート部分に付着を期待してせん断耐力の向上を期待する点は共通している。また、せん断耐力の算出方法については、工法により多少の差異は存在するものの、おおむねトラス理論を基にせん断耐力の算出を行っている。

第 4.7-6 表 後施工せん断補強工法の比較 (1/2)

--

※土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

第4.7-6表 後施工せん断補強工法の比較 (2/2)

--

※土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.7.5 後施工せん断補強筋に関する研究事例

後施工せん断補強工法に関する研究事例や施工実績に関する文献から着目すべき事項を整理し、女川2号機におけるCCb工法への反映事項を確認する。

① コンクリート構造物の後施工せん断補強技術

◆ 文献の要旨

既存のコンクリート構造物の耐震補強技術のうち、カルバートや地下貯水槽の壁(地下壁構造)に用いられるせん断補強(後施工せん断補強)技術について述べられたものである。

◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強筋の定着性能の確認試験として、鉄筋の引抜き試験が例示されている。
- ・ 標準フックのせん断補強筋(先施工)が負担できるせん断力に対する後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されている。
- ・ 後施工せん断補強効果の確認試験として、梁試験体の正負交番載荷試験が例示されている。
- ・ 「マルチプルナット」、「セラミックキャップバー (CCb)」、「Post-Head-bar (PHb)」の建設技術審査証明報告書を参考文献としている。

◆ 女川2号機におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・ 後施工せん断補強技術が地下壁構造に対して効果的であることを確認した。
- ・ CCb工法の建設技術審査証明報告書には、本文献と同様の引抜き試験、梁試験体の正負交番載荷試験が実施され、それら試験結果に基づいた有効係数による評価手法が明記されていることを確認した。

② 耐震補強等に用いるあと施工型せん断補強技術（RMA 工法）

◆ 文献の要旨

既設の地中構造物を後施工によりせん断補強する工法として RMA 工法が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強筋の性能確認実験として、引抜き試験による定着性能の確認、梁試験体の正負交番載荷によるせん断補強効果の確認を実施している。
- ・ 後施工せん断補強において、せん断補強筋の定着長を考慮した有効係数によるせん断補強効果の評価手法が示されている。なお、この評価手法は参考文献として示されている「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書」（土木学会，2005）に準じている。
- ・ RMA 工法により補強が実施された構造物は、東日本大地震においても損傷がなかったことが報告されている。

◆ 女川 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ 本文献の工法（RMA 工法）と同様の性能確認試験を CCb 工法でも実施していることを確認した。
- ・ 本文献の工法（RMA 工法）と CCb 工法とでは、定着方法の差異により定着長が異なるが、有効係数の算出方法は同様であり、CCb 工法の建設技術審査証明報告書に示される有効係数の算出方法が一般的であることを確認した。
- ・ CCb により耐震補強を行った構造物において、現時点で地震による被害・不具合が発生していないことを確認した。

③ 論文 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの
載荷実験

◆ 文献の要旨

既存のボックスカルバート等の連続壁に異形鉄筋を埋込みせん断補強を行う方法に対し、その有効性を確認するために梁供試体を用いたせん断試験が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強した供試体のせん断耐力を実験で確認した結果、先施工として算出したせん断耐力（設計値）とほぼ同等のせん断耐力が得られている（実験値/設計値=0.93～1.12）。
- ・ 後施工によりせん断補強した供試体のせん断耐力は、先施工した供試体のせん断耐力と同等のせん断耐力を有している（後施工/先施工=0.85～1.07）。

◆ 女川2号機におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・ 先施工のせん断補強に対するCCb工法の有効係数は、建設技術証明報告書に記載されている梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

④ 後施工型のせん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

◆ 文献の要旨

広島空港の滑走路及び誘導路直下の地下構造物（用倉トンネル）が、レベル2地震動に対する耐震性能照査においてせん断耐力が不足していることが確認された。用倉トンネル(アーチカルバート)に対し耐震補強工法の選定・検討を実施し、RMA 工法による後施工せん断補強が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 重要施設である空港滑走路及び誘導路直下の地下構造物（アーチカルバート）に対して，後施工型せん断補強工法（RMA 工法）による耐震補強が実施されている。
- ・ アーチカルバートの補強には，増厚工法，後施工せん断補強工法（鉄筋差込工法），接着工法，巻立て工法の中から，施工後においても現況の内空断面を確保でき，坑内からの施工も可能である後施工せん断補強工法が選定されている。
- ・ 補強対象のアーチカルバートの部材厚は 1600mm である。

◆ 女川2号機におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・ 地下構造物の補強工法として，後施工せん断補強工法が効果的であることを確認した。
- ・ 女川2号機原子炉機器冷却海水配管ダクト及び取水路（漸拡部）の部材厚（隔壁：1200mm）相当の構造物に対して後施工せん断補強工法の施工実績があることを確認した。

⑤ 地下駅舎 RC 壁のせん断力評価と耐震補強対策

◆ 文献の要旨

地中構造物の側壁隅角部を対象に載荷試験を行い、先施工せん断補強と後施工せん断補強との耐力比較及び後施工せん断補強筋の埋込長の違いによる耐力比較が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ せん断補強筋のピッチ 300mm 以下の規定については、新設構造物を対象とした乾燥収縮等によるひび割れを防ぐためのものであることから考慮せず、有効高さの 1/2 としている。
- ・ 先端を 45 度にカットした後施工によるせん断補強の場合、先施工の設計耐力に対して最低でも 80% 程度のせん断耐力が実験で得られている。

◆ 女川 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ 女川 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物は建設後 20 年以上経過しており乾燥収縮は終了していることから、せん断補強筋のピッチ 300mm 以下の規定は除外した。
- ・ 先施工のせん断補強に対する CCb 工法の有効係数は、建設技術審査証明報告書に記載される梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

⑥ 論文 セン断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響

◆ 文献の要旨

せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断抵抗機構に及ぼす影響を確認することを目的として、せん断補強筋の定着フック及び端部付近の付着を除去したはりを作製し、せん断耐力の低下と破壊モードを実験的に検証している。また、材料非線形解析における定着不良部のモデル化について検討されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ セン断補強筋の定着不良部から鉄筋径の 10 倍程度を鉄筋無効区間として要素内鉄筋比をゼロとすれば、2次元ひび割れ解析でせん断耐力を概略評価することが可能であることが示されている。

◆ 女川 2 号機における Ccb 工法への反映事項の確認

- ・ 女川 2 号機における解析によるせん断補強効果の確認について（添付資料 2）において、Ccb のモデル化に本解析手法を参考とし、実験結果と整合する鉄筋径の 5 倍を後施工せん断補強筋の無効区間とし検討を実施した。

⑦ 地下道における PHb(ポストヘッドバー)工法の採用と積雪寒冷地の施工について

◆ 文献の要旨

既設地下道を耐震補強する目的で採用した PHb 工法の実施内容及び積雪寒冷地での施工方法が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 充てん材の温度と強度の関係を把握するための試験施工が実施されており、充てん材料が 0℃以下の履歴を受けた場合、強度発現が低下することが確認されている。

◆ 女川 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法においては充てん材料が 0℃以下とならないように、施工上の管理基準（5℃以上）を設けて適切な施工管理を実施した。

⑧ せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強

◆ 文献の要旨

東京都港湾局が後施工せん断補強工法における補強効果確認のために行った室内せん断実験の概要，その実験結果の設計への反映，実施工への適用及びその施工結果についての考察が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 施工上予想される不具合を設計上考慮し，せん断耐力に対して低減係数 0.75 を乗じている。

◆ 女川 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法は第三者機関による審査証明が行われており，その中で施工の確実性についても審査対象となっていることから，本研究事例の低減係数をそのまま設計に適用する必要はない。なお，4.6 にて施工精度の向上に向けた方策を記載している。

⑨ セラミック定着型せん断補強鉄筋（CCb 工法）による既設地下コンクリート構造物の耐震補強

第 57 回 電力土木講習会テキスト 平成 27 年 2 月

一般社団法人 電力土木技術協会

◆ 文献の要旨

CCb 工法の設計法および施工法の概要と、電力分野での実績を含む施行実績が紹介されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ CCb 工法の施工実績は、下水道処理場のポンプ棟、分水槽、重力濃縮槽、汚泥処理槽、ポンプ室及び放流渠等が多い。
- ・ CCb 工法の定着体は、アンカーやインサートにも広く用いられている高い耐食性を有する高純度アルミナ系セラミックス製であるため、塩害や硫酸などの影響を受ける厳しい環境（海水に接する発電所の取・放水路や腐食環境にある下水道施設）においても、耐久性を確保できる。

◆ 女川 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法が様々な施設で施工実績があることを確認した。
- ・ 塩害や硫酸などの影響を受ける厳しい環境下においても CCb 工法が使用されていることを確認した。

後施工せん断補強筋に関する施工実績及び各研究事例を踏まえて、設計及び施工へ反映している事項を以下に示す。

- 硫酸等の影響を受ける腐食環境下である浄化センター(下水道処理施設)での実績もあり、女川2号機で採用する環境よりも厳しい環境下での施工実績を確認した。
- 後施工せん断補強筋の性能確認実験として、定着性能の確認、梁試験体の正負交番载荷によるせん断補強効果の確認を実施しており、CCb工法においても同様の確認を行っている。
- 標準フックのせん断補強筋(先施工)が負担できるせん断力に対する、後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されており、CCb工法においても同様の評価手法であることを確認した。

4.8 女川2号機におけるCCb工法の保守性と設計上の制限の整理

女川2号機において、CCbにより耐震補強を行うにあたっての保守性と設計上の制限について整理する。

4.8.1 CCb工法の保守性

設計においてCCbが負担するせん断耐力を算出する際に乗じる有効係数 β_{aw} (CCbのせん断耐力の補強効果を示す有効係数)は、建設技術審査証明報告書において、第4.8-1表のとおり試験結果に対して保守的に小さい値を設定しており、せん断耐力を安全側に評価している。(詳細は、4.8.4に示す。)

第4.8-1表 有効係数 β_{aw} の保守性

表-8.4 実験結果の一覧 (シリーズ3、4)

試験ケース	「セラミックキャップバー (CCb)」の仕様		実験での最大せん断耐力(kN)					算定式によるせん断耐力(kN) $V_{cal}=V_{cal}+V_s$		「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断耐力(kN)		せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw} (V_{CCb}/V_s)			有効率の設計値 β_{aw}
			正側		負側		V_s	V_{CCb}	V_{CCb}	V_{CCb}	正側	負側	平均		
			定着体の組合せ	先端位置	V_{exp}	V_{exp}								V_{cal}	
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	563	499	542	253	289	310	246	1.07	0.85	0.96	0.83		
No.3-4	標準型	主鉄筋の表面より5mm手前	515	570	543	254	289	261	316	0.90	1.09	1.00			
No.3-5	標準型	主鉄筋の表面より5mm手前	531	509	543	254	289	277	255	0.96	0.88	0.92			
No.3-6	標準型	配力鉄筋の表面より5mm手前	497	526	543	254	289	243	272	0.84	0.94	0.89			
No.4-1	両端先端型	主鉄筋の表面より5mm手前	532	520	525	235	290	297	285	1.02	0.98	1.00	0.82		
No.4-2	両端先端型	主鉄筋の表面より5mm手前	520	535	526	236	290	284	299	0.98	1.03	1.01	0.82		
No.4-3	両端先端型	配力鉄筋の表面より5mm手前	532	546	524	234	290	305	312	1.05	1.08	1.06	0.78		
No.4-4	両端後端型	—	661	588	525	235	290	426	333	1.47	1.15	1.31	1.00		

※1 下線は正負交番載荷で最初にせん断破壊したことを示す
 ※2 斜体はせん断破壊をしていない場合、その載荷方向での最大荷重を示す

4.8.2 女川2号機においてCCbにより耐震補強を行うにあたっての保守性

設計においてCCbが負担するせん断耐力は、棒部材式により算出されるせん断耐力よりもディーブビーム式により算出されるせん断耐力の方が大きくなるが、保守的に棒部材式により算出されるせん断耐力により部材の照査を行うことで、本来必要と考えられるせん断補強筋量以上のせん断補強筋を配置している。

4.8.3 女川2号機においてCCbにより耐震補強を行うにあたっての設計上の制限

建設技術審査証明報告書の梁試験では、主鉄筋ひずみが 2363μ (SD490)まで達した状態でのひび割れ状況においてもせん断耐力を保持していることが確認されているが、女川2号機ではSD345の鉄筋を使用していることから、面内せん断力と面外力の合力による鉄筋のひずみが 1725μ 以下 (応力が降伏強度以下)、もしくは面内せん断力に対して、コンクリートのみで抵抗可能な部材を対象におおむね弾性範囲となる状況下でCCb工法を使用する。

建設技術審査証明報告書の梁試験では層間変形角が1% (1/100)を超えている範囲までせん断耐力が保持されていることが確認されているが、かぶりコンクリートの剥落によってCCbの定着機能を阻害するおそれがある。そのため、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態である圧縮縁コンクリートひずみ

1.0%又は層間変形角1%(1/100)に、十分な余裕をもってCCb工法を使用する。なお、当使用制限は一般に上記に示す鉄筋のひずみに対する制限により満足される。

CCbの施工において、施工精度の低下が生じる可能性は低いが完全に否定できるものではないこと等から、設計上の配慮として耐震評価上の裕度(せん断破壊に対する照査値を0.8程度に抑える)を持たせた設計を行う。

4.8.4 有効係数 β_{aw} の保守性

設計においてCCbが負担するせん断耐力を算出する際に乗じる有効係数 β_{aw} の保守性を、設計式と実験結果及び数値解析実験結果の比較により確認する。保守性は、設計式から得られる有効係数 β_{aw} よりも実験値及び解析値から得られる β_{aw} の方が大きいことにより確認する。有効係数 β_{aw} は、せん断耐力評価式で算定するせん断補強筋が負担するせん断耐力 V_{sd} に対するCCbが負担するせん断耐力 V_{ccbd} の比として定義される。なお、実験値及び解析値の有効係数 β_{aw} は、設計式から得られるせん断補強筋が負担するせん断耐力 V_{sd} をベースに算出しており、実験及び解析のCCbが負担するせん断耐力 V_{ccbd} は、実験又は解析から得られたせん断耐力から設計式より算出したコンクリートが負担するせん断耐力 V_{cd} を減じて算出する。

検討ケースは、添付資料2に示す数値解析実験結果のうち、比較データ(実験結果と解析結果)が充実しているステップ①の材料非線形解析にて対象としている試験体(No.3-3)とする。結果を第4.8-2表に示す。

第4.8-2表より、CCbが負担するせん断耐力 V_{ccbd} は、設計式、解析値、実験値の順に大きくなっており、設計式が保守的な評価になっていることが確認できる。よって、設計式、実験値及び解析値から得られる有効係数 β_{aw} の比較結果より、設計式から得られる β_{aw} よりも実験値及び解析値から得られる β_{aw} の方が大きく、設計式から得られる β_{aw} の保守性が確認された。

第 4.8-2 表 有効係数 β_{aw} の比較検討結果

試験ケース	せん断耐力 (kN) ※1							有効係数 β_{aw} ※2		
	設計式 (せん断耐力評価式)			実験値				⑧設計式	⑨実験値	⑩解析値
	① V_{cal}	② V_{cd}	③ $V_{sd} \cdot V_{ccbd}$	④ V_{exp}	⑤ V_{ccbd}	⑥ V_{ana}	⑦ V_{ccbd}			
N0.3-3 従来工法	542	253	289	—	—	—	—	—	—	—
CCb 工法	510	—	257	563	310	550	297	0.89	1.07	1.03

ここに、

- V_{cal} : 設計式 (せん断耐力評価式) から得られるせん断耐力
- V_{cd} : コンクリートが負担するせん断耐力
- $V_{sd} (V_{ccbd})$: せん断補強筋 (CCb) が負担するせん断耐力
- V_{exp} : 実験から得られるせん断耐力
- V_{ana} : 解析から得られるせん断耐力
- $\beta_{aw} : CCb$ のせん断耐力の補強効果を示す有効係数 $\beta_{aw} = (1 - (1_y / 2S_{rb}))$

※1 : 各せん断耐力の算出について

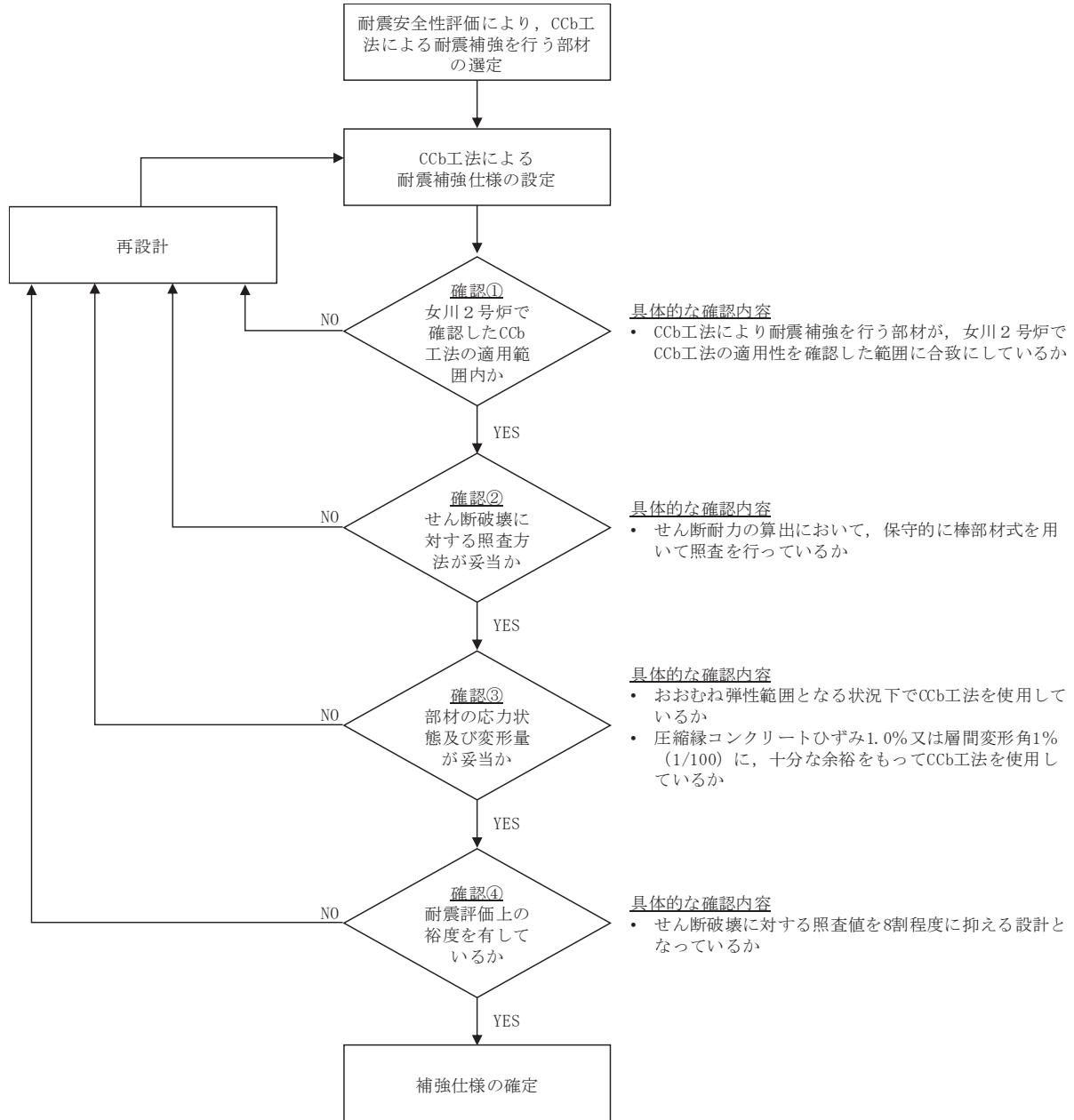
- ①・②・③ : せん断耐力評価式 (棒部材式) より算出
- ④ : 実験から得られたせん断耐力
- ⑤ : 「実験から得られたせん断耐力」から「設計式により算出したコンクリートが負担するせん断耐力」を減じて算出 (⑤=④-②)
- ⑥ : 解析から得られたせん断耐力
- ⑦ : 「解析から得られたせん断耐力」から「設計式により算出したコンクリートが負担するせん断耐力」を減じて算出 (⑦=⑥-②)

※2 : 有効係数 β_{aw} の算出について

- ⑧ : 設計式より得られる有効係数 $(1 - (1_y / 2S_{rb}))$, 1_y : CCb の定着長 (5D, D : 鉄筋径), S_{rb} : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔)
- ⑨・⑩ : CCb を通常のせん断補強筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する有効係数
- ⑨ : 「実験から得られた CCb が負担するせん断耐力」を「設計式から得られる通常のせん断補強筋が負担するせん断耐力」で除して算出 (⑨=⑤(V_{ccbd}) / ③(V_{std}))
- ⑩ : 「解析から得られた CCb が負担するせん断耐力」を「設計式から得られる通常のせん断補強筋が負担するせん断耐力」で除して算出 (⑩=⑦(V_{ccbd}) / ③(V_{std}))

4.8.5 Ccb 工法によるせん断補強の設計検討フロー

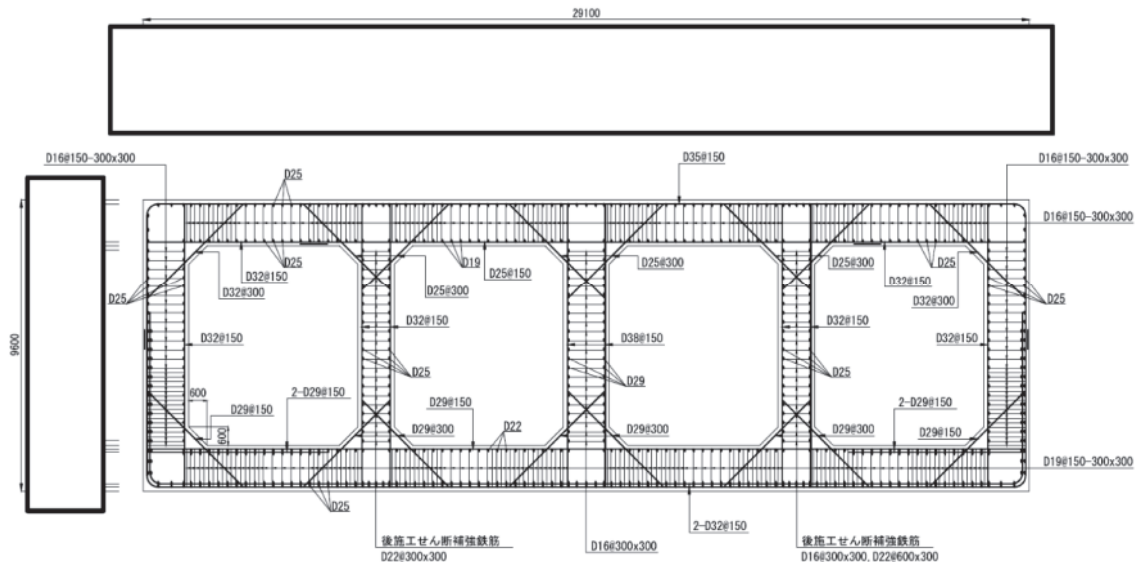
4.8.1～4.8.4 に示す，女川 2 号機において Ccb により耐震補強を行うにあたっての保守性及び設計上の制限を考慮した設計検討フローを第 4.8-1 図に示す。



第 4.8-1 図 Ccb 工法によるせん断補強の設計検討フロー

4.9 Ccb の適用性確認結果

4.2 で設定した取水路（漸拡部）の補強仕様について、4.1 に従い女川2号機屋外重要土木構造物等へのCcb工法の適用性を検討した結果、建設技術審査証明報告書に記載のとおり、せん断補強効果が期待できることを確認した（第4.9-1図参照）。



第4.9-1図 取水路（漸拡部）の補強仕様

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

5. 女川2号機におけるCCb工法の適用性確認のまとめ

女川2号機の取水路（漸拡部）、原子炉機器冷却海水配管ダクト（水平部）、軽油タンク室、復水貯蔵タンク基礎、取水口、取水路（標準部）、海水ポンプ室、原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）及び第3号機海水ポンプ室は、CCb工法による耐震補強の対象となっており、その適用性について以下のとおり確認した。

- ・ 建設技術審査証明報告書の実験を上回る部材厚においても、せん断ひび割れ抑制効果を確認できており、CCb工法が適用できることを確認した。
建設技術審査証明報告書の実験と実施工部材では部材諸元及び載荷方法（設計荷重）等が異なるが、女川2号機でCCbにより耐震補強を行った構造物の部材諸元においても、せん断ひび割れ抑制効果を確認できており、CCb工法が適用できることを確認した。
- ・ CCbにより耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れ（曲げひび割れ、面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びディープビームに生じる45度を超える高角度の斜めひび割れ）が、CCbの定着体部やその周囲に生じても定着機能が保持され、所要のせん断補強効果が発揮できていることを確認した。
- ・ 女川2号機でCCbにより耐震補強を行った構造物にCCbのせん断補強効果に影響を与えるひび割れはなく、圧縮強度においても設計基準強度以上であったことから、既設コンクリートの状態がCCbのせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認した。
- ・ 建設技術審査証明報告書に記載の梁試験体ではディープビームを対象とした試験を実施していないが、ディープビームを対象とした模型実験を実施し、ディープビーム的な破壊となる部材に対しても、CCb工法が適用できることを確認した。
- ・ 女川2号機でCCbにより耐震補強を行った構造物には、面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材があるが、数値解析を実施し、当該部材に対してもCCb工法が適用できることを確認した。
- ・ 女川2号機でCCbによる耐震補強の対象となる構造物には、既設部材へCCbによる耐震補強を行った後に増厚補強を行う部材があるが、当該部材に対してもCCb工法が適用できることを確認した。
- ・ 建設技術審査証明報告書の実験にて確認できている範囲を踏まえ、女川2号機にてCCb工法を適用するにあたっての保守性を設定すると共に、設計上の制限を設定し適用することとした。

建設技術審査証明書



女川 2 号機における部材諸元他の適用性の検討

1. せん断補強効果の確認

CCb による補強効果については、建設技術審査証明報告書の各種実験にて検証している。女川 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物（原子炉機器冷却海水配管ダクト，取水路（漸拡部），軽油タンク室，復水貯蔵タンク基礎）の多くが，部材諸元（部材厚，せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度）や載荷方法が建設技術審査証明報告書に記載の実験と異なっているにもかかわらず，せん断ひび割れを抑制し，せん断補強効果を期待できるかを材料非線形解析により確認する。

材料非線形解析に用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが，ここでは，現在までに実務でも使用され，適用性と信頼性が確認されているコンクリート標準示方書 2017 において標準とされている以下の手法とする。

- ・ 鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ・ 鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては，平均化構成則を用いる。
- ・ 鉄筋との複合作用が及ばない領域では，コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

材料非線形解析に用いる解析コードは，上記の鉄筋コンクリートの構成則を有する解析コードの 1 つである「UC-win/WCOMD ver2.02」及び「WCOMD Studio ver1.00」とする。

1.1 検討方針

CCb を考慮した材料非線形解析により力学的挙動を確認し，女川 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物への CCb 工法の適用性をステップ①～③により確認する（添付 2-1 図参照）。

なお，従来工法である先施工のせん断補強筋を想定した材料非線形解析も比較ケースとして実施する。

1.1.1 ステップ①：CCb の解析上のモデル化方法の確認

材料非線形解析を実施するにあたり，CCb の解析上のモデル化方法を確認する。

CCb は従来工法（先施工）のせん断補強筋と異なり，セラミック定着体により定着していることから，CCb 工法は従来工法よりも定着性能が劣るものと仮定し，CCb のモデル化方法の妥当性を確認する。モデル化は，前川らによる「せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響（コンクリート工学年次論

文集 Vol.26, No.2, 2004)」(以下「前川ら」という。)を参考に、せん断補強筋が機能しない区間(無効区間:要素内鉄筋比をゼロとする区間)を設定することとしている。

モデル化方法の妥当性は、建設技術審査証明報告書のせん断耐力実験を対象に解析モデルを作成し、実験結果と解析結果のせん断耐力の比較により確認する。モデル化は、無効区間の設定方法をパラメータに2パターンの検討を行い、実験への再現性が高い設定方法を用いてステップ②以降の検討を実施する。

1.1.2 ステップ②:建設技術審査証明報告書の実験よりも大きな部材厚に対する適用性の確認

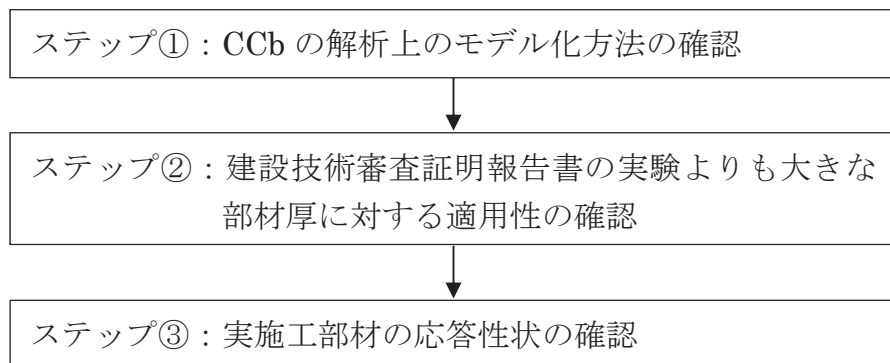
女川2号機のCCbにより耐震補強を行った構造物のうち、最も部材厚の大きい軽油タンク室の底版($t=1,500\text{mm}$)を想定して材料非線形解析を行い、実験よりも大きな部材厚に対する適用性を確認する。適用性の確認は、ステップ①とステップ②の解析結果の比較により行う。

1.1.3 ステップ③:実施工部材の応答性状の確認

ステップ①・②にて適用性を確認の上、実施工部材として、構造物を棒部材でモデル化して地震応答解析及び構造照査を実施している構造物のうち部材厚が最大である取水路(漸拡部)隔壁を対象に材料非線形解析を行い、CCb工法の適用性を確認する。

また、取水路(漸拡部)隔壁に作用する主な荷重は頂版から受ける集中荷重と慣性力であり、地震時増分土圧等が作用する分布荷重系の荷重形態とは異なることから、部材に作用する荷重や破壊形態の違いに着目し、地震時増分土圧が作用する部材のうち部材厚が最大である軽油タンク室側壁についても材料非線形解析を行い、CCb工法の適用性を確認する。

適用性は、取水路(漸拡部)隔壁及び軽油タンク室側壁の部材諸元相当でも変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋の降伏状況に対して、特異な状況とならないことを確認する。



添付 2-1 図 女川2号機における部材諸元他の適用性確認フロー

2. ステップ①：CCbの解析上のモデル化方法

CCbの定着効果及び付着効果を考慮したモデル化方法の妥当性の確認を目的に、建設技術審査証明報告書の実験で用いた試験体をモデル化し、材料非線形解析を行う。

試験体は添付2-1表～添付2-3表のとおり、せん断補強筋径及び定着体の型が女川2号機の施工実績と合致する、シリーズ1（試験体No.1-3）とシリーズ3（試験体No.3-3：CCb先端位置が主筋の図心位置であり女川2号機と同じ条件）を選定する。

添付2-1表 試験体概要

試験体	断面寸法 b×h (mm)	せん断 スパン比	せん断 補強筋径	定着体の 組合せ
シリーズ1	825×685	2.78	D22	標準型※
シリーズ2	825×800	同上	D29	同上
シリーズ3	600×500	同上	D16	同上
シリーズ4	同上	同上	D16	両端先端型 両端後端型

■：女川2号機で実績のある補強 □：材料非線形解析を実施

※：差込側に後端型、埋込側に先端側となる標準的なCCbの組合せ

添付2-2表 シリーズ1の試験体の種類と諸元
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

	No.1-1	No.1-2	No.1-3
断面寸法 $b \times h$	825×685 mm		
せん断スパン長 a	1,640 mm		
せん断スパン比 a/d	2.78		
実験時の コンクリート圧縮強度 f_c	32N/mm ²	33N/mm ²	34 N/mm ²
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	—	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 「セラミックキャ ップバー (CCb)」
せん断補強鉄筋比 p_w	0	0.19%	0.19%
試験の目的	コンクリート負担分 V_c の評価	後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{sw} の評価	後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{sw} の評価

添付2-3表 シリーズ3の試験体の種類と諸元
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

	No.3-1	No.3-2	No.3-3	No.3-4	No.3-5	No.3-6
断面寸法 $b \times h$	600×500 mm					
せん断スパン長 a	1,195 mm					
せん断スパン比 a/d	2.78					
実験時のコンクリート 圧縮強度 f_c [N/mm ²]	41.2	40.6	42.4	42.6	42.9	42.6
帯鉄筋・補強鉄筋の 種類、および形状	—	SD345 D16 両端フック	SD345 D16 セラミックキャップバー (CCb)	—		
せん断補強鉄筋比 p_w	0.33%					
セラミックキャップバー (CCb)の埋込み側先端位置	—	—	主鉄筋の 図心	主鉄筋の表面 から5mm手前	配力鉄筋の 表面から 5mm手前	
定着体の組合せ	—	—	標準型			
試験の目的	試験体諸元の 妥当性検討		後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{sw} の評価			

2.1 Ccb の定着効果のモデル化

CCb のせん断補強効果を確認するための材料非線形解析による数値実験において、CCb 先端の領域では先施工より定着性能が劣る可能性があることから、せん断補強筋が機能しない（無効区間）ものとして Ccb のモデル化を行う。せん断補強筋の無効区間の設定に関する考え方は、前川らの論文を参照しており、せん断補強筋の定着不良を有する部材のせん断耐力評価は、材料非線形解析を用いてせん断補強筋の無効区間を設けることで評価可能であることが示されている。

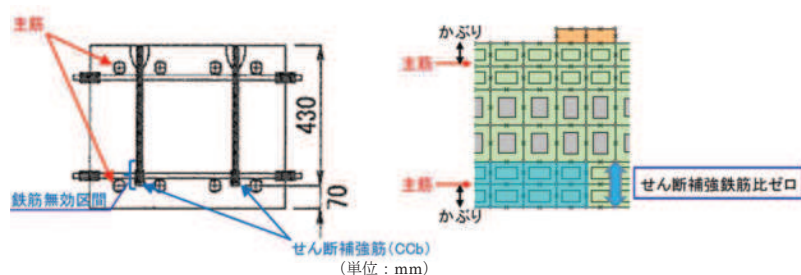
2.1.1 前川らの検討内容

前川らは、せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響の確認を目的に、実験的検証に加え材料非線形解析による定着不良部のモデル化について検討している。せん断補強筋の定着不良を模擬するため、せん断補強筋端部近傍の定着を効かなくした梁に対する実験を行い、その実験の再現として、せん断補強筋の定着不良部を鉄筋無効区間として要素内鉄筋比をゼロとした材料非線形解析を行うことで、実験のせん断耐力を評価することが可能であることを示している。

2.1.2 モデル化方法

構造部材は、平面応力要素にてモデル化する。モデル化は、原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（以下「土木学会マニュアル」という。）を参考に、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋領域としてモデル化する。

CCb のモデル化は、CCb 先端の領域では定着が十分ではない可能性があるため、せん断補強筋が機能しない（無効区間）ものとして、せん断補強鉄筋比をゼロとしてモデル化する（添付 2-2 図参照）。検討は、添付 2-4 表に示すとおり、CCb 先端側の主筋領域（かぶりの 2 倍）の鉄筋比をゼロとする Ccb1 と CCb 先端側の主筋軸心から必要定着長 $5D$ (D : 鉄筋径) の鉄筋比をゼロとする Ccb2 の 2 パターン行う。2 パターンの結果から、CCb の再現性が高い条件を用いて、今後の検討を行うものとする。



添付 2-2 図 Ccb のモデル化概念図

添付 2-4 表 CCb のモデル化方法

解析パターン	CCbのモデル化方法
CCb1	<ul style="list-style-type: none"> CCb先端側の主筋領域（かぶりの2倍）の鉄筋比をゼロ シリーズ1（試験体No.1-3）：無効区間 95mm×2=190mm シリーズ3（試験体No.3-3）：無効区間 70mm×2=140mm
CCb2	<ul style="list-style-type: none"> CCb先端側の主筋軸心から必要定着長5D（D：鉄筋径）の鉄筋比をゼロ シリーズ1（試験体No.1-3）：無効区間 95mm+5×22mm=205mm シリーズ3（試験体No.3-3）：無効区間 70mm+5×16mm=150mm

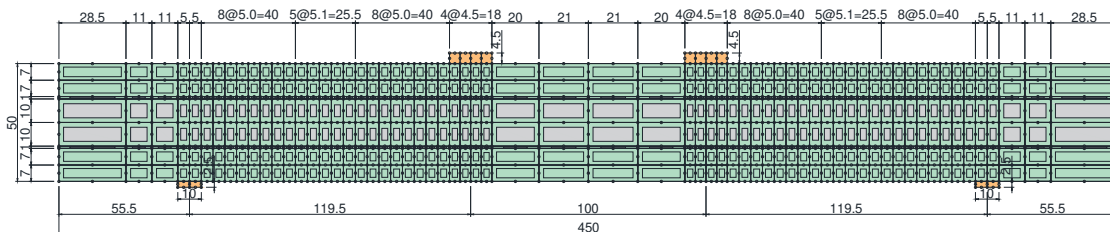
また、解析の入力データとなるコンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を、添付 2-5 表及び添付 2-6 表に示す。これらの条件により設定した解析モデル図を添付 2-3 図に示す。

添付 2-5 表 コンクリートの材料特性

項目	設定値	
	シリーズ 1	シリーズ 3
圧縮強度 f'_c	33.9 N/mm ²	42.4 N/mm ²
引張強度 f_t	2.41 N/mm ²	2.80 N/mm ²
ヤング係数 E_c	WCOMD で自動計算	

添付 2-6 表 鉄筋の材料特性

項目	設定値			
	シリーズ 1		シリーズ 3	
主鉄筋のヤング係数	200.0	kN/mm ²	196.4	kN/mm ²
CCb 鉄筋・せん断補強鉄筋のヤング係数	192.7	kN/mm ²	197.5	kN/mm ²
主鉄筋の降伏強度	534.0	N/mm ²	515.9	N/mm ²
CCb 鉄筋・せん断補強鉄筋の降伏強度	406.8	N/mm ²	388.9	N/mm ²



(単位 : cm)

添付 2-3 図 解析モデル図 (試験体 No. 3-3 の例)

2.1.3 荷重条件

材料非線形解析にて考慮する荷重は、建設技術審査証明報告書の実験における載荷条件を模して、変位を作用位置に強制的に与える。また、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、十分小さい値を漸増載荷する。耐力の評価を主目的とするため、単調載荷とするが、実験条件である交番載荷の影響についても確認することとする。

2.1.4 破壊判定基準

材料非線形解析における構造部材の破壊判定は、荷重が減少した場合とし、その直前の最大荷重をせん断耐力とする。

2.1.5 妥当性の確認

定着効果のモデル化の妥当性は、建設技術審査証明報告書の梁試験の結果から得られるせん断耐力と材料非線形解析より得られるせん断耐力を比較し、試験のせん断耐力を再現できているかにより確認を行う。

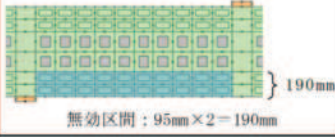
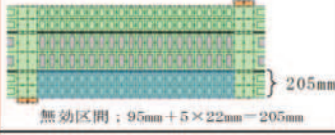
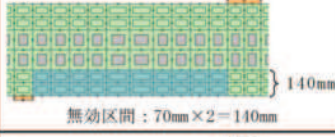

添付 2-7 表に各解析パターンの結果を示す。添付 2-7 表に示すとおり、シリーズ 1・3 共に実験から得られたせん断耐力に対して、CCb1 のせん断耐力が CCb2 のせん断耐力より大きいという傾向が確認された。

また、シリーズ 1 では CCb1 と CCb2 でせん断耐力の再現性(実験結果との解離)は同程度であり、シリーズ 3 では CCb2 が再現性が良く、両シリーズにおいて CCb2 のせん断耐力がやや保守的な評価となる。

これらより、材料非線形解析による CCb のモデル化を CCb2 の方法で行うことで、試験のせん断耐力を良好に再現できると共に、保守的な評価が可能であることを確認された。

よって、CCb を材料非線形解析でモデル化する際は、CCb2 (CCb 先端側の主筋軸心から必要定着長 $5D$ (D : 鉄筋径) の鉄筋比をゼロ) の方法でモデル化することとする。

添付 2-7 表 各解析パターンの確認結果

解析パターン		CCbのモデル化	実験のせん断耐力 (kN)	解析によるせん断耐力 (kN)	再現性
シリーズ1 No. 1-3試験体	CCb1	 無効区間：95mm×2＝190mm	1050	1123 (<u>実験値の107%</u>)	△ (再現性は CCb2と同程度)
	CCb2	 無効区間：95mm＋5×22mm＝205mm		965 (<u>実験値の92%</u>)	△ (再現性は CCb1と同程度)
シリーズ3 No. 3-3試験体	CCb1	 無効区間：70mm×2＝140mm	563	676 (<u>実験値の120%</u>)	× (再現性が 低い)
	CCb2	 無効区間：70mm＋5×16mm＝150mm		550 (<u>実験値の98%</u>)	○ (再現性が 高い)

2. 1. 6 解析パターン (CCb1・CCb2) の違いによるせん断耐力への影響確認

2. 1. 5 に示したとおり、CCb のモデル化は CCb2 の方法で行うことが妥当であることを確認しているが、解析パターンの違いによるせん断耐力への影響について、建設技術審査証明報告書の実験結果に着目し確認する。

また、CCb1 と比べ CCb2 は要素のアスペクト比の関係からメッシュ分割が細かくなっているため、メッシュサイズの違いによる解析結果への影響についても併せて確認する。

(1) 建設技術審査証明報告書の実験結果より確認

CCb の先端位置をパラメータとして影響検討を行った、シリーズ 3 の梁試験結果について整理する。シリーズ 3 の梁試験では、CCb の先端位置を「主鉄筋位置 (No.3-3)」、「主鉄筋の表面より 5mm 手前 (No.3-4・3-5)」、「配力鉄筋の表面より 5mm 手前 (No.3-6)」とした 3 ケースの検討を行い、せん断耐力を算出しており、各ケースのせん断耐力は添付 2-8 表に示すとおりとなる。

添付 2-8 表に示すとおり、CCb の先端位置が主鉄筋位置より離れるに従って、せん断耐力が低下していることがわかる。これは、前川らの論文に示されている傾向と同様であり、せん断補強筋が主鉄筋から離れるに従い、トラス機構の形成が弱まり、せん断耐力が低下したものであり、CCb1 と比較して無効区間が大きい CCb2 のせん断耐力が小さくなったと考えられる。

添付 2-8 表 建設技術審査証明報告書の実験結果 (シリーズ 3)

項目	試験体No. 3-3	試験体No. 3-4・3-5	試験体No. 3-6
CCbの先端位置			
せん断耐力 (kN)	563	515 (No. 3-4), 531 (No. 3-5)	497

(2) メッシュサイズの影響について

CCb の解析上のモデル化方法を検討するにあたり、せん断補強筋の無効区間をパラメータとしているため、CCb1 と CCb2 ではメッシュ分割が異なる。メッシュ分割を行うにあたり、CCb2 では無効区間の設定において小さな要素が存在するため要素のアスペクト比の関係から CCb1 と比べてメッシュ分割が細かくなっていることから、メッシュサイズの違いが、せん断耐力等に与える影響について確認する。確認はシリーズ 3 の試験体を対象とし、CCb2 の解析モデルで CCb1 の無効区間(必要定着長 $2C=140\text{mm}$ の鉄筋比をゼロ)を反映した材料非線形解析(CCb1' とする)により行う。CCb1 及び CCb1' の材料非線形解析の結果を添付 2-9 表に示す。

添付 2-9 表に示すとおり、CCb1 と CCb1' のせん断耐力はほぼ同一となり、ひび割れ状況についても大きな差がないことを確認した。

よって、メッシュサイズの違いによるせん断耐力及びひび割れの発生状況への影響がないことを確認した。

2.1.7 従来工法とCCb工法の材料非線形解析の比較

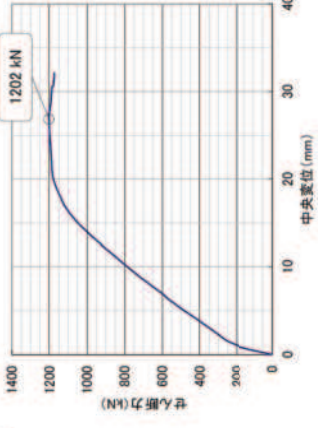
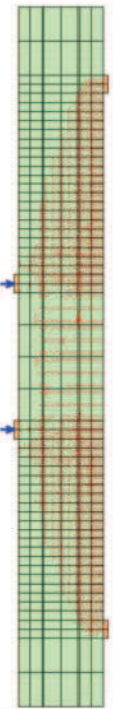
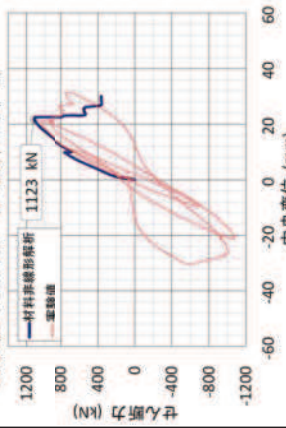
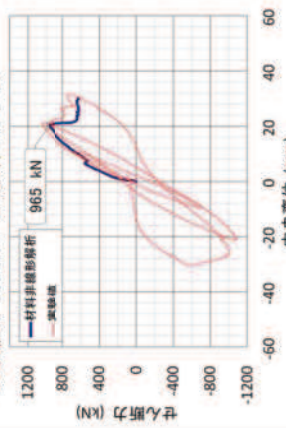
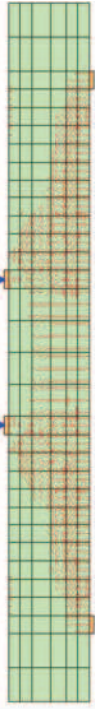

従来工法（先施工）とCCb工法の材料非線形解析の比較を行う。シリーズ1及びシリーズ3の解析結果を添付2-10表及び添付2-11表に、シリーズ1及びシリーズ3の実験結果を添付2-4図及び添付2-5図に示す。

シリーズ1・3共に実験値（No. 1-3：1050kN，No. 3-3：563kN）に対して、従来工法はCCbの定着不良領域（無効区間）を設定していないことから、せん断耐力がCCbの実験値を上回っていることが確認できる。また、CCb工法のうちCCb2（無効区間C+5D）の方法では2.1.5に示したとおり、せん断耐力は実験をおおむね再現できていることがわかる。

次に、ひび割れ状況を従来工法とCCb工法で比較すると、CCb工法はひび割れの分散性が若干低下しているが、これは無効区間の設定方法について参考とした前川らの論文においても同様の傾向が確認できており、CCbの定着不良域（無効区間）を適切にモデル化できている。CCb工法のうちCCb1とCCb2のひび割れ状況を比較すると、CCb1の方がCCb2よりもひび割れの分散性が良く、せん断耐力も大きい値となるが、ひび割れ分散性の差異が軽微であることと、2.1.5にて示したとおり、せん断耐力を保守的に評価する観点からCCb2の方法でモデル化することが妥当である。

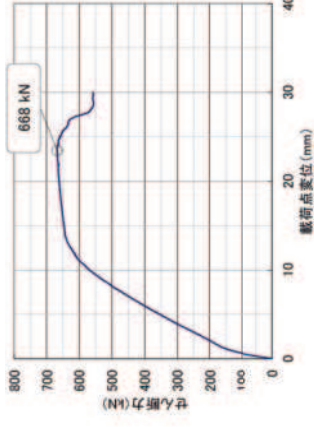
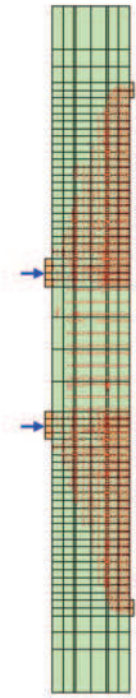
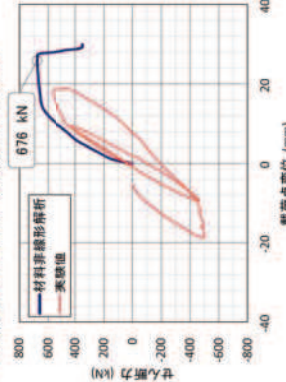
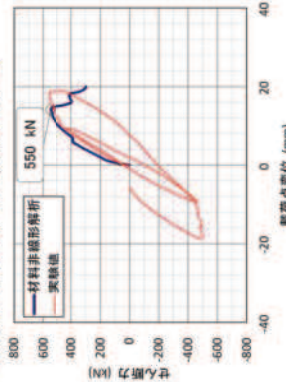


また、建設技術審査証明報告書の実験では交番载荷が行われていることから、参考としてシリーズ3の試験体（No. 3-3）に対して交番载荷を行った解析結果（CCbのモデル化はCCb2の方法）を添付2-6図に示す。添付2-6図に示すように、ひび割れ状況は部材全体にひび割れが分散しており、特異な状況は確認されなかった。なお、荷重の再現性は添付2-10表及び添付2-11表に示すように単調载荷により確認されており、せん断耐力は良好に再現されている。

添付 2-10 表 従来工法と Ccb 工法の材料非線形解析結果 (シリーズ 1)

解析ケース	荷重-変位関係	ひび割れ状況※
従来工法	<p>● 最大荷重：1202kN</p> 	
シリーズ1	<p>【CCb1：無効区間2C】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 最大荷重：1123kN (実験値の107%) ● 実験値：1050kN (試験体No. 1-3)  <p>【CCb2：無効区間C+5D】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 最大荷重：965kN (実験値の92%) ● 実験値：1050kN (試験体No. 1-3) 	<p>【CCb1：無効区間2C】</p>  <p>【CCb2：無効区間C+5D】</p> 

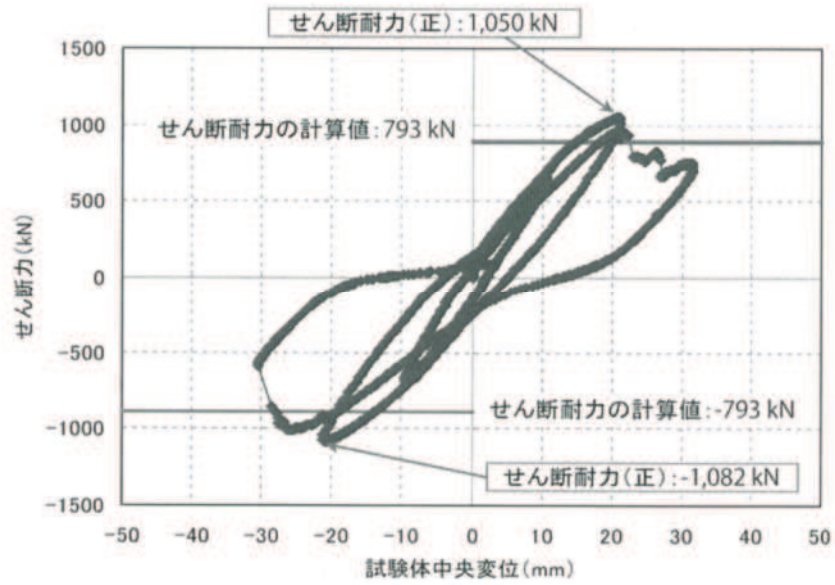
※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

添付 2-11 表 従来工法と Ccb 工法の材料非線形解析結果 (シリーズ 3)

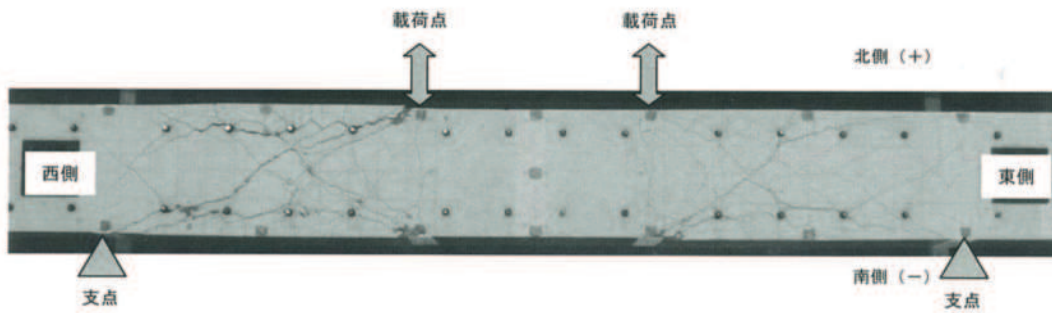
解析ケース	荷重-変位関係	ひび割れ状況※
従来工法	<ul style="list-style-type: none"> 最大荷重：668kN 	
Ccb工法	<p>【CCb1：無効区間2C】</p> <ul style="list-style-type: none"> 最大荷重：676kN (実験値の120%) 実験値：563kN (試験体No. 3-3)  <p>【CCb2：無効区間C+5D】</p> <ul style="list-style-type: none"> 最大荷重：550kN (実験値の98%) 実験値：563kN (試験体No. 3-3) 	<p>【CCb1：無効区間2C】</p>  <p>【CCb2：無効区間C+5D】</p> 

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

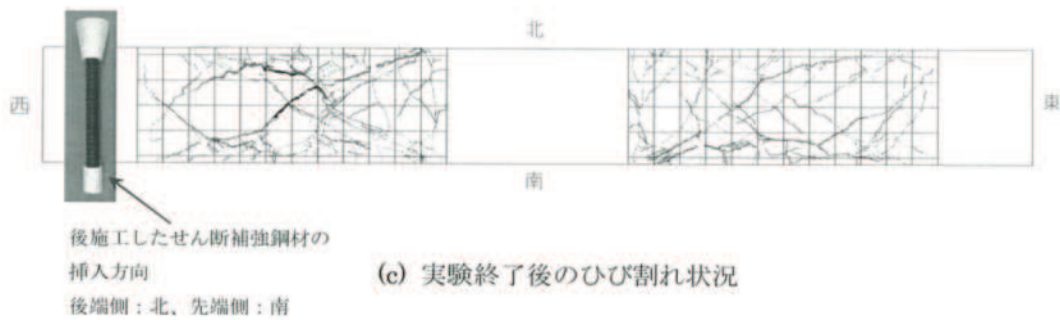
● No.1-3 試験体



(a) せん断力-変位関係



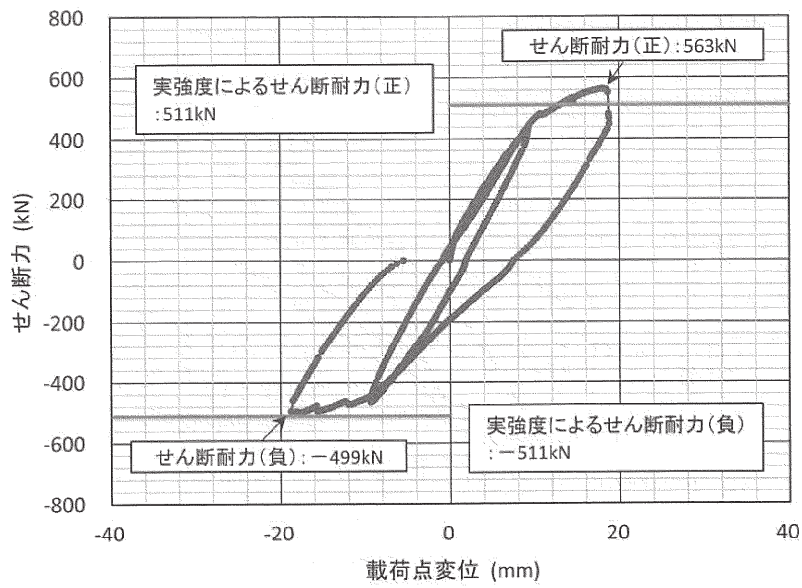
(b) 実験終了後の試験体の状況



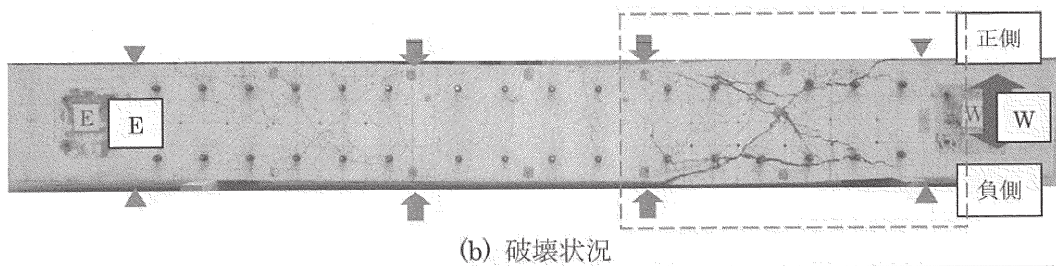
(c) 実験終了後のひび割れ状況

添付 2-4 図 構造実験 (No. 1-3) の荷重 - 変位関係とひび割れ状況
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

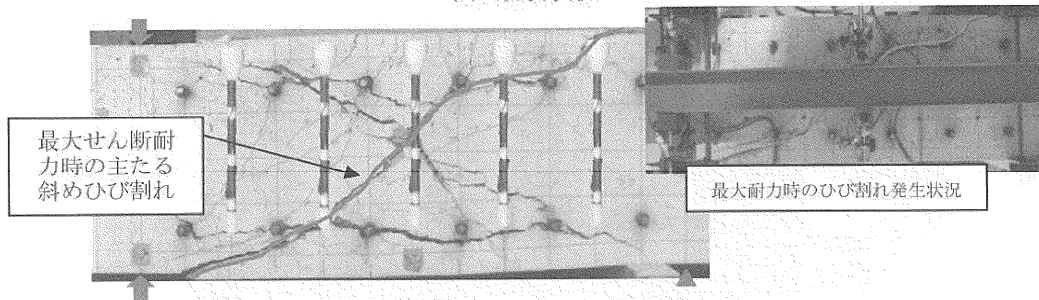
●No.3-3 試験体



(a) せん断力-変位関係



(b) 破壊状況



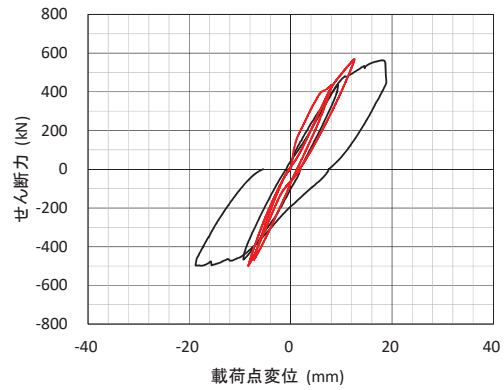
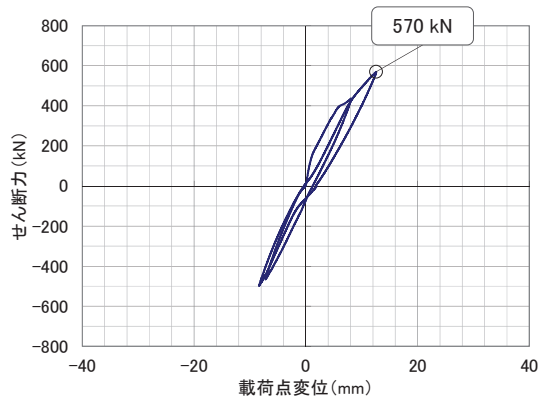
※CCbは合成により設置位置を明示

(c) 破壊状況 - 近景 (西側) -

添付 2-5 図 構造実験 (No. 3-3) の荷重 - 変位関係とひび割れ状況
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

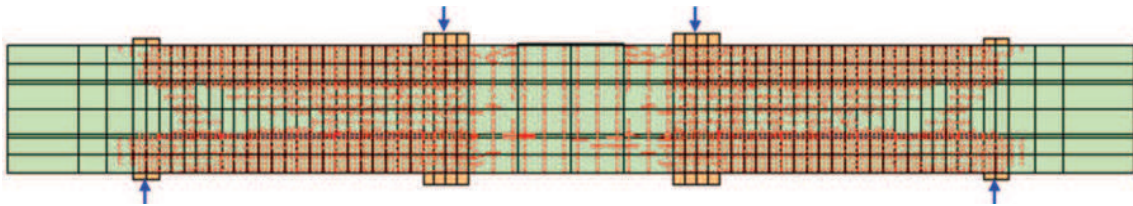
【参考】

- ・ 荷重方法：交番荷重
- ・ Ccb のモデル化：Ccb2 の方法
- ・ 最大荷重：570kN（実験値の 101%）
- ・ 実験値：563kN（試験体 No. 3-3）



(赤：材料非線形解析 黒：実験値)

荷重 - 変位関係



ひび割れ状況※

添付 2-6 図 試験体 No. 3-3（交番荷重）の荷重-変位関係とひび割れ状況【参考】

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

2.2 Ccb の付着効果のモデル化

2.1 と同様に、CCb とコンクリート間の付着効果の妥当性の確認を行う。付着効果の妥当性の確認は、建設技術審査証明報告書の実験結果と実験を模擬した材料非線形解析の結果のひび割れ状況の比較により行うこととし、材料非線形解析における Ccb のモデル化は再現性が良く保守的評価が可能な Ccb2 の方法とする。

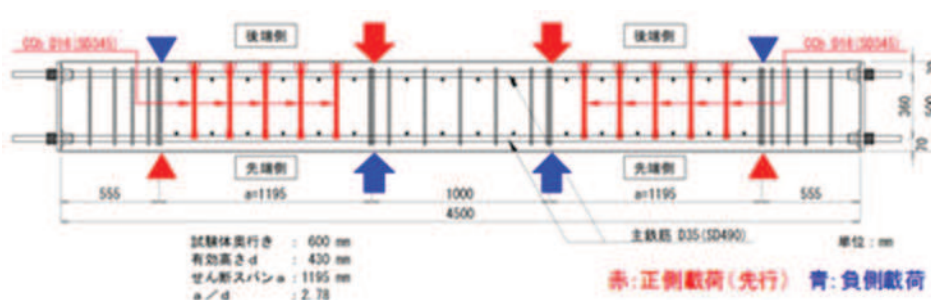
2.2.1 モデル化方法

CCb のせん断補強効果を確認するための材料非線形解析による数値実験において、CCb の付着が有効な領域は鉄筋コンクリート要素にて、CCb とコンクリートが完全付着であるものとしてモデル化しており、付着の影響が及ばない領域は無筋コンクリート領域としてモデル化している。また、セラミック定着体の強度はコンクリートより強いこと、かつ定着部の強度試験より、セラミック定着体とコンクリート間で破壊は生じないことから、鉄筋コンクリートの分散ひび割れモデルにおいて、ひび割れの影響は鉄筋コンクリート要素の剛性を低下させることにより考慮している。

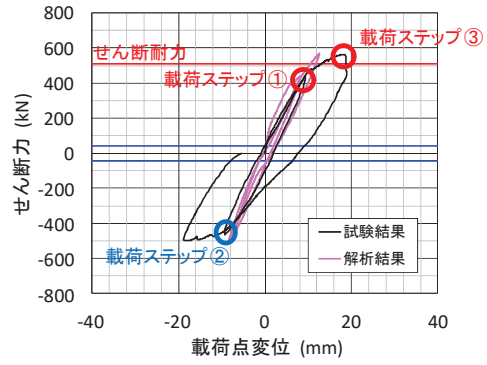
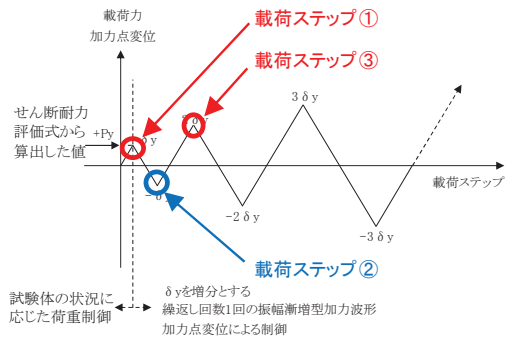
2.2.2 妥当性の確認

付着効果のモデル化の妥当性の確認は、建設技術審査証明報告書のシリーズ 3 (試験体No.3-3) を例に交番載荷試験の結果と材料非線形解析による Ccb の無効区間を考慮した試験の再現解析結果の比較により行う。試験体の概要図及び載荷方法を、それぞれ添付 2-7 図及び添付 2-8 図に示す。また、交番載荷試験と材料非線形解析の各載荷ステップにおけるひび割れ状況の比較結果を添付 2-12 表に示す。

添付 2-12 表に示すように、CCb とコンクリートが付着していると仮定した解析結果は、各載荷ステップで発生するひび割れ状況を良好に再現できていることが確認できる。



添付 2-7 図 試験体概要



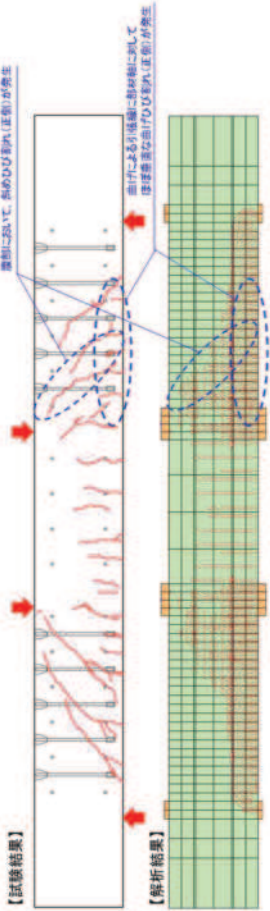
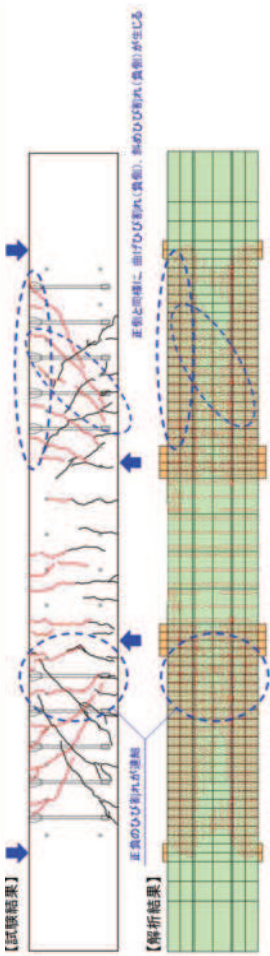
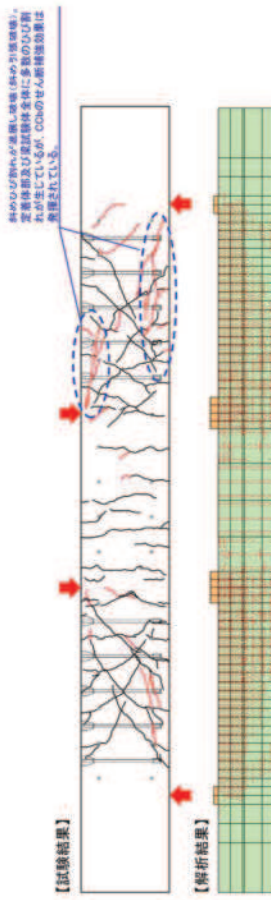
※：図中の赤線は以下の条件で算出した試験体のせん断耐力

- ・コンクリート強度：実強度
- ・補強筋の降伏強度：実強度
- ・有効係数 β_{av} ：建設技術審査証明報告書に従う
- ・安全係数(材料係数、部材係数)は全て1.0とした

※：図中の青線は支間中央における曲げひび割れ発生荷重を示す

添付 2-8 図 荷荷方法

添付 2-12 表 各載荷ステップにおける試験結果（試験体 No. 3-3）と解析結果のひび割れ状況の比較

載荷方法	試験結果と解析結果の比較	
<p>載荷 ステップ①</p>	 <p>【試験結果】</p> <p>【解析結果】</p> <p>※図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れ発生ひずみに達したことを示す。</p>	
<p>載荷 ステップ②</p>	 <p>【試験結果】</p> <p>【解析結果】</p> <p>※図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れ発生ひずみに達したことを示す。</p>	
<p>載荷 ステップ③</p>	 <p>【試験結果】</p> <p>【解析結果】</p> <p>※図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れ発生ひずみに達したことを示す。</p>	

2.2.3 Ccb の解析上のモデル化方法のまとめ

CCb の解析上のモデル化方法について、CCb の定着効果及び付着効果を材料非線形解析によるせん断耐力の再現や実験と解析のひび割れ状況の整合性の観点から確認を行った。

定着体部のモデル化範囲を変えた 2 パターンのモデル化方法について検討を行い、CCb2 (CCb 先端側主筋軸心から必要定着長 $5D$ (D : 鉄筋径) の鉄筋比をゼロ) の方法によりモデル化を行うことで、実験のせん断耐力やひび割れ発生状況を良好に再現でき、もう一方のモデル化方法 (CCb1: Ccb 先端側主筋領域 (かぶりの 2 倍) の鉄筋比をゼロ) よりもせん断耐力をやや保守的に評価できることを確認できた。ここで採用した材料非線形解析では分散ひび割れモデルを用いており、CCb に発生したひび割れによる付着性能の低下を完全に模擬することはできないが、今回採用したモデル化により実験のせん断耐力やひび割れ状況を十分に再現できており、CCb の定着効果及び付着効果を間接的に表現し得ることが確認できた。

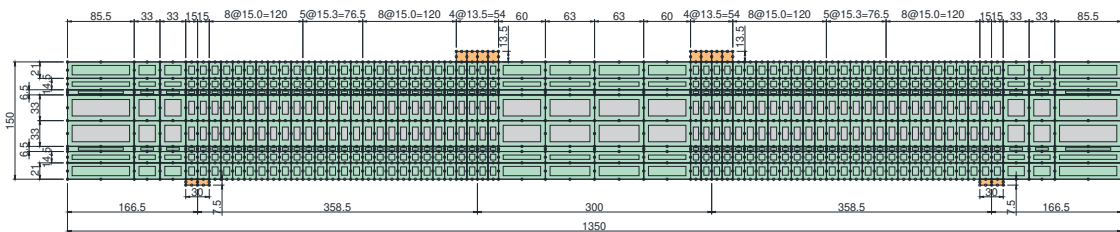
なお、今回採用した解析モデル・解析コードは、美浜 3 号機 (PHb 工法) の工事計画認可申請において適用性を確認した際のものと同様である。

3. ステップ②：大きな部材厚に対する適用性確認

3.1 モデル化について

建設技術審査証明報告書の実験よりも大きな部材厚に対する適用性の確認を目的に、女川2号機においてCCb工法を適用した構造物のうち最も部材厚が大きい軽油タンク室底版 ($t=1500\text{mm}$) を想定し、せん断スパン比 (a/d) がステップ①と同等となるような部材寸法 (ステップ①の躯体の相似形) の解析モデルにより材料非線形解析を行う。配筋は、主鉄筋及びせん断補強筋共に鉄筋比が一定となるように、2.1.2 に準じて設定する。

CCb のモデル化は、ステップ①で再現性の良いCCb2の方法とし、シリーズ3 (梁試験体No.3-3) を例に従来工法とCCb工法の材料非線形解析の結果の比較を行う。なお、材料物性については、構造実験と同一とする。解析モデル図を添付2-9図に示す。



(単位：cm)

添付 2-9 図 解析モデル図

3.2 荷重条件

2.1.3 に準じて設定する。

3.3 破壊判定基準

2.1.4 に準じて設定する。

3.4 検討ケース

検討ケースは、添付 2-13 表に示すとおり 3 ケース行う。従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース② - A、CCb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース② - Bとし、参考ケースとして交番载荷としたケースをケース② - Cとする。

添付 2-13 表 検討ケース一覧

ケース	荷重載荷方法
② - A 従来工法	単調載荷
② - B CCb 工法	単調載荷
② - C 同上	交番載荷【参考】

3.5 確認結果

各ケースの解析結果を添付 2-10 図～添付 2-12 図に示す。併せて、ステップ①及び②のせん断耐力の一覧を、添付 2-14 表に示す。

添付 2-14 表の一覧より、せん断耐力の有効割合を比較するとステップ① (0.82) よりもステップ② (0.93) の方が小さいことが確認できる。これは、建設技術審査証明報告書のせん断耐力算出時における有効係数 β_{aw} (CCb のせん断耐力の補強効果を示す有効係数) を算出する際の理論と同様の傾向であり、部材厚が大きい程、従来工法に対する CCb 工法によるせん断耐力の有効割合は小さくなることが確認でき、CCb 工法の特徴を良く再現できている。

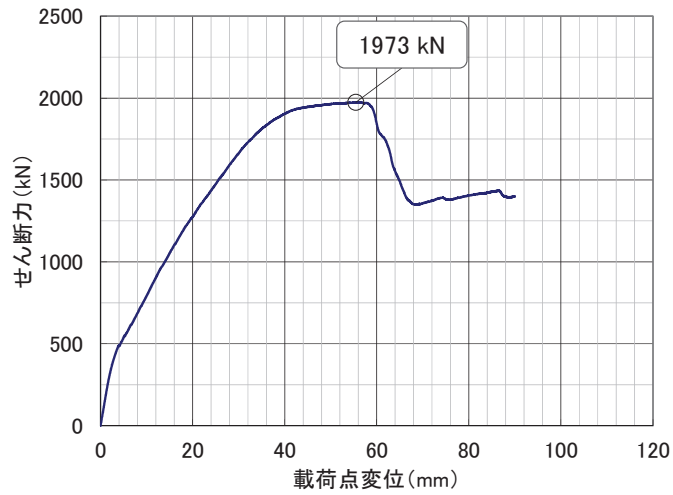
また、ひび割れ状況についても全体的にひび割れが分散しており、従来工法と顕著な差は見られなかった。ステップ②では、部材厚が大きくなることで CCb 端部定着の影響が小さくなったと考えられる。参考に、ケース② - A 及びケース② - B の解析について、各損傷状況における変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況を添付 2-15 表及び添付 2-16 表に示す。添付 2-15 表及び添付 2-16 表に示すとおり、各損傷状況において、従来工法と CCb 工法の間で CCb によるせん断補強効果に影響を与えるような顕著な差は確認されなかった。

以上より、CCb 工法によるせん断ひび割れ抑制効果についても従来工法と CCb 工法で顕著な差は確認されず、実験よりも大きな部材厚に対する適用性を確認できた。

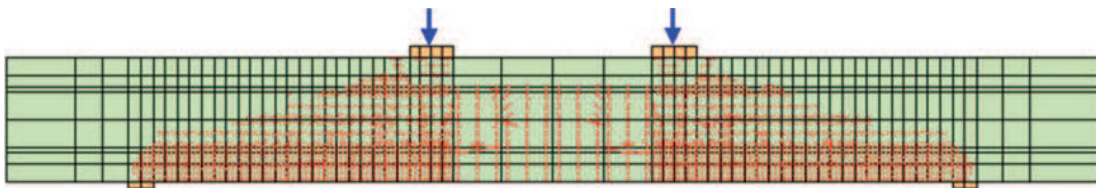
なお、参考ケースのケース② - C の交番載荷のケースにおけるせん断耐力は 1950kN であり、せん断耐力の有効割合は約 0.99 となった。ひび割れ状況についても、部材全体にひび割れが分散しており、特異な状況は確認されなかった。

【ケース② - A】

- ・ 荷重方法：単調荷重
- ・ 最大荷重：1973kN



荷重 - 変位関係



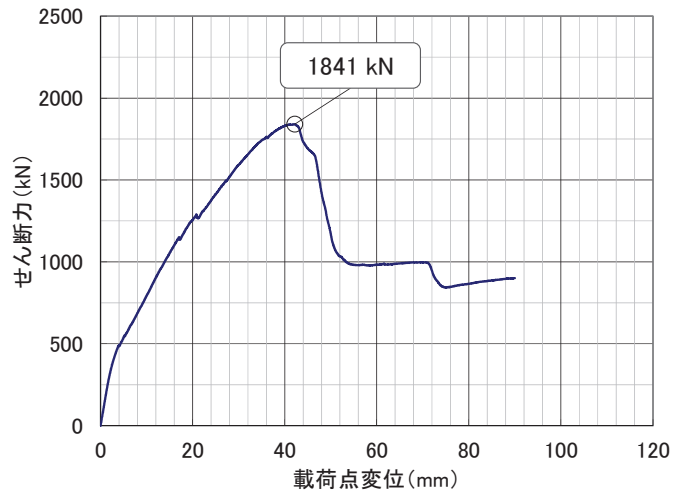
ひび割れ状況※

添付 2-10 図 ケース② - Aの荷重-変位関係とひび割れ状況

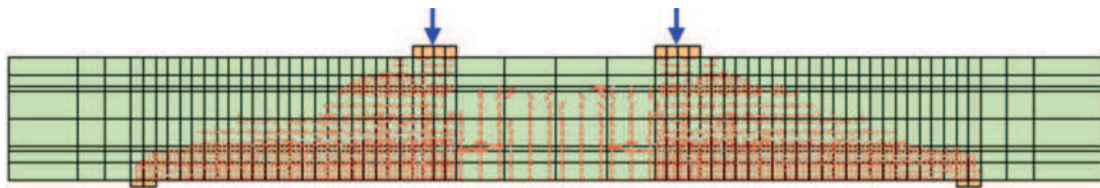
※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

【ケース② - B】

- ・ 荷重方法：単調荷重
- ・ 最大荷重：1841kN



荷重 - 変位関係



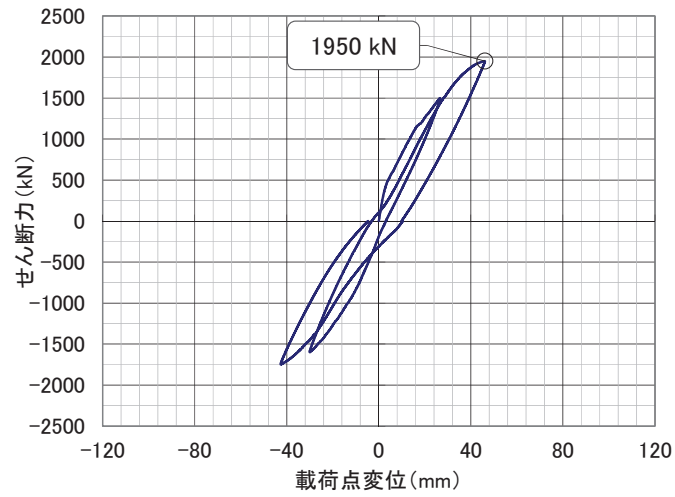
ひび割れ状況※

添付 2-11 図 ケース② - B の荷重-変位関係とひび割れ状況

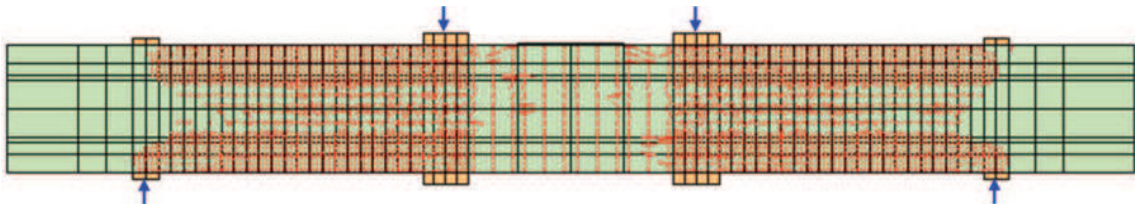
※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

【参考：ケース② - C】

- ・ 荷重方法：交番荷重
- ・ 最大荷重：1950kN



荷重 - 変位関係



添付 2-12 図 ケース② - C の荷重-変位関係とひび割れ状況【参考】

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

添付 2-14 表 各ケースのせん断耐力一覧

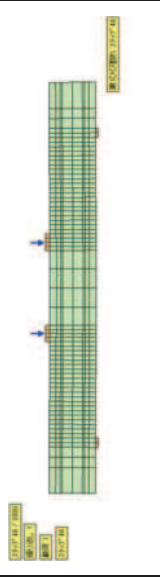
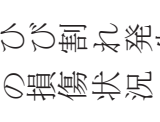
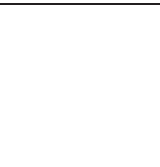
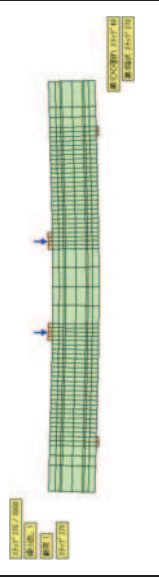
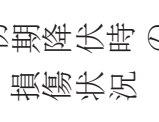
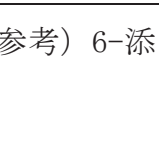
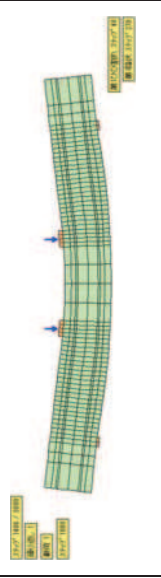
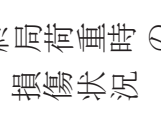
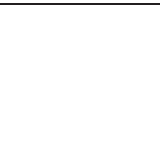
ケース		せん断耐力 (kN)	従来工法と Ccb 工法のせん断耐力の比率
ステップ①	従来工法・単調載荷	668	—
	Ccb 工法・単調載荷	550	0.82
ステップ① 【参考】	Ccb 工法・交番載荷	570	0.85
ステップ②	従来工法・単調載荷 (ケース② - A)	1973	—
	Ccb 工法・単調載荷 (ケース② - B)	1841	0.93
ステップ② 【参考】	Ccb 工法・交番載荷 (ケース② - C)	1950	0.99

添付 2-15 表 ケース② - A (従来工法) の解析結果

	変形状況 (変形倍率 10 倍)	ひび割れ状況※	鉄筋降伏状況
初期ひび割れ発生時の損傷状況			
初期降伏時の損傷状況			
終局荷重時の損傷状況			

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れ発生ひび割れに達したことを示す。

添付 2-16 表 ケース② - B (CCb 工法) の解析結果

	変形状況 (変形倍率 10 倍)	ひび割れ状況※	鉄筋降伏状況
初期ひび割れ発生時の損傷状況			
初期降伏時の損傷状況			
終局荷重時の損傷状況			

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れ発生ひび割れ幅に達したことを示す。

4. ステップ③：実施工部材の応答性状の確認

実施工部材に対するCCb工法の適用性を確認することを目的に、荷重形態及び破壊形態（せん断スパン比）の違いに着目して選定した部材に対する材料非線形解析を行う。荷重形態及び破壊形態は、建設技術審査証明報告書の梁試験がせん断破壊を対象としており、曲げ破壊先行とならないように主鉄筋比を大きく設定していることを踏まえ、CCbのせん断補強効果に大きく影響を与える可能性があることから着目している。対象部材は、集中荷重及び分布荷重が作用する構造物のうち部材厚に着目し選定している。添付2-17表にステップ③における検討ケース概要を示す。

添付 2-17 表 検討ケースの概要

検討ケース	対象部材	荷重形態	作用荷重	破壊形態
ケース③-1	取水路（漸拡部）隔壁	集中荷重系	構造物-地盤連成の二次元有限要素解析による地震応答解析（基準地震動Ss-D2）から得られる応答断面力を再現できる荷重。	棒部材的な破壊（斜め引張破壊）
ケース③-2-1	軽油タンク室側壁	分布荷重系	同上	ディーブビーム的な破壊（せん断圧縮破壊）
ケース③-2-2	同上	同上	等分布荷重	棒部材的な破壊（斜め引張破壊）

4.1 ケース③ - 1（集中荷重系）の材料非線形解析

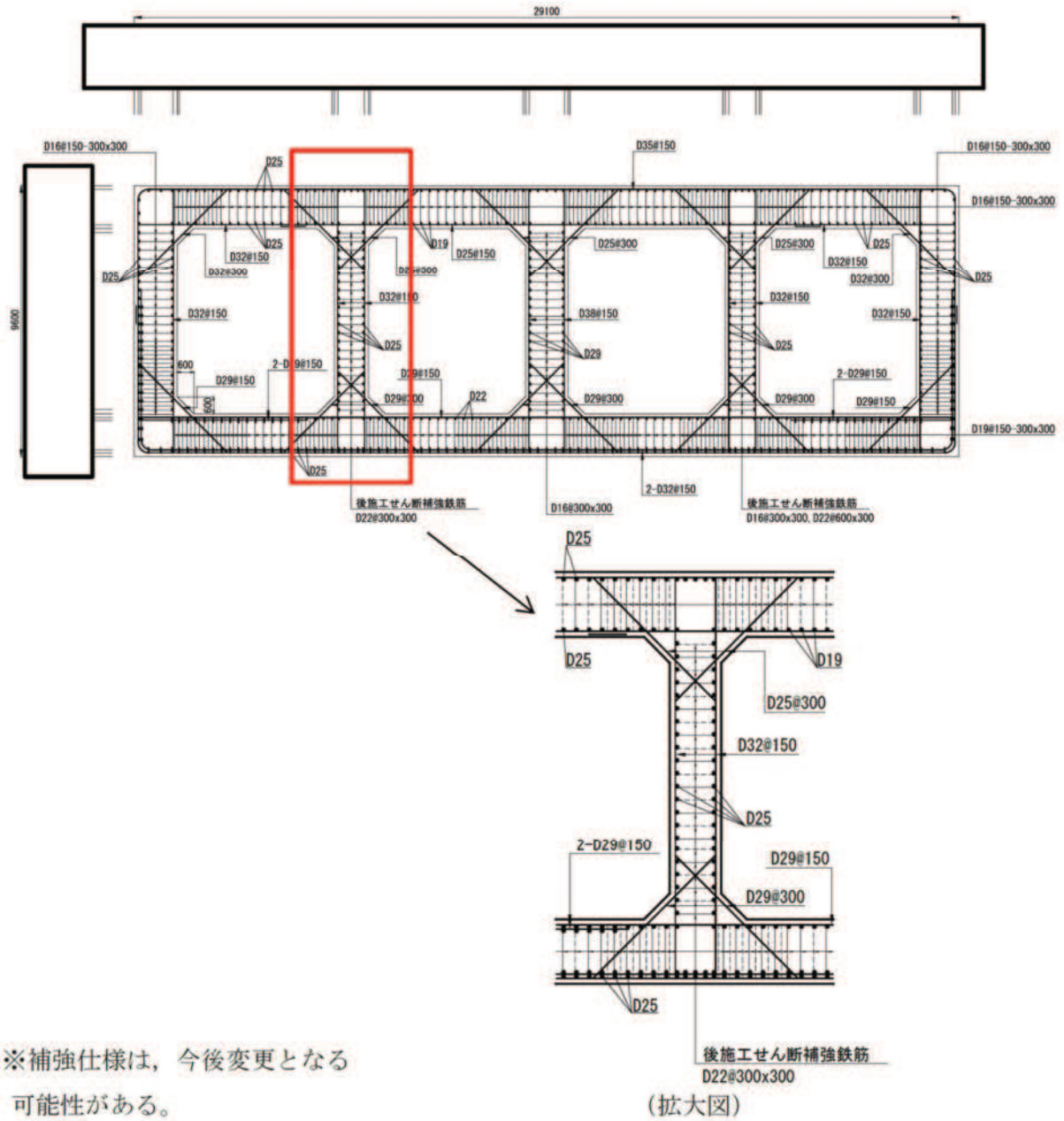
4.1.1 モデル化について

2.1.2 に準じて設定する。

対象とする部材は、多連ボックスカルバートの隔壁のように主な荷重が頂版から受ける集中荷重となる構造物のうち、部材厚が最大である取水路（漸拡部）隔壁とし、添付2-13図に示す左隔壁とする。

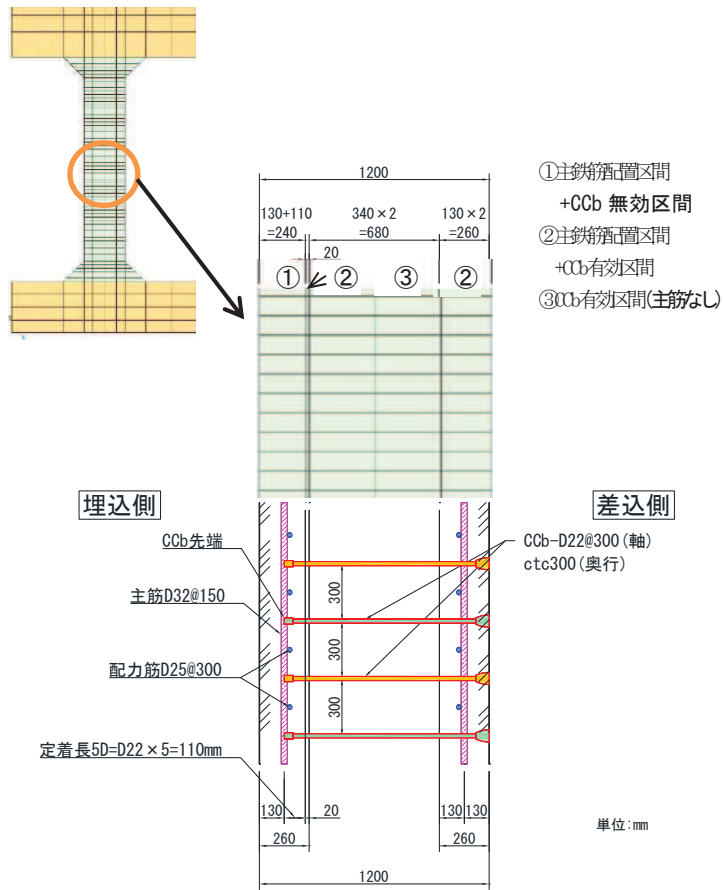
解析モデルは、主鉄筋位置やCCbの鉄筋無効区間のモデル化を考慮して要素分割を検討する。奥行き方向の厚さは100cmとし、梁部材の高さ方向の分割については添付2-14図に示すとおりとする。主鉄筋芯かぶりは130mmであるので、260mm(=130+130)を主鉄筋が配置される要素の高さとする。CCbの無効区間は、主鉄筋芯かぶり+CCb定着長分(130+5D=130+5×22=240mm)とする。主鉄筋が配置され、かつCCbが有効な区間は20mm(=260-240)とする。左側主鉄筋領域と右側主鉄筋領域の間の領域を2分割して、合計5分割としている。

梁部材の軸方向は、地震応答解析モデルでの梁要素の節点位置を考慮して分割を行うものとする。解析モデル図を添付2-15図に示す。

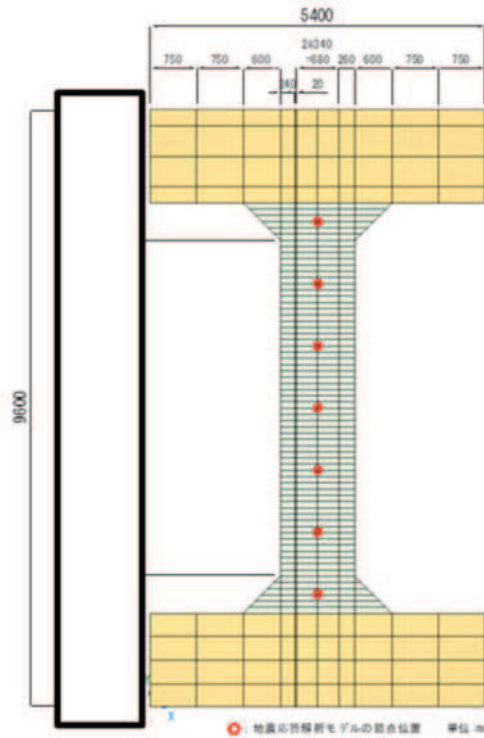


添付 2-13 図 評価対象部材

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



添付 2-14 図 要素分割の考え方



添付 2-15 図 解析モデル図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

解析の入力データとなるコンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を、添付 2-18 表及び添付 2-19 表に示す。

また、ステップ②の解析モデルとケース③ - 1 の解析モデルの違いを、添付 2-20 表に示す。添付 2-20 表に示すとおり、各項目において差異があり、これらが解析により応答性状及びせん断補強効果にどの程度影響するかを確認する。

添付 2-18 表 コンクリートの材料特性

項目	設定値
設計基準強度 f_{ck}	20.5 N/mm ²
引張強度 f_t	1.72 N/mm ²
ヤング係数 E_c	解析プログラム内で自動計算

添付 2-19 表 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200 kN/mm ²
主鉄筋の降伏強度	3450 N/mm ²
CCb 鉄筋の降伏強度	345 N/mm ²

添付 2-20 表 解析モデルの違い

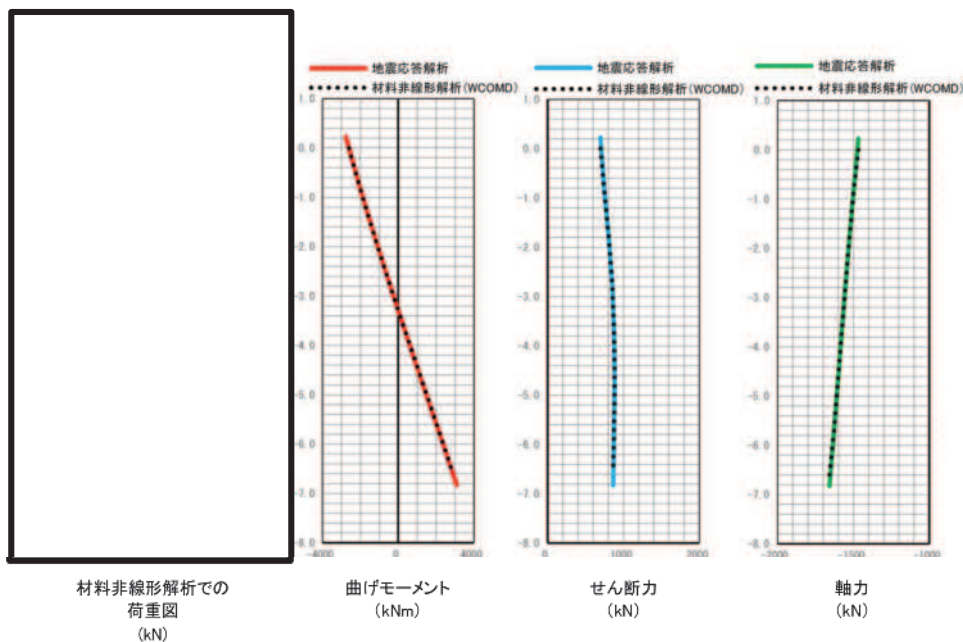
項目	ステップ②	ケース③ - 1
部材厚	1500 mm	1200 mm
せん断スパン比	2.78	6.17
主鉄筋比	1.28 %	0.44 %
コンクリート強度	42.4 N/mm ²	20.5 N/mm ²
載荷方法	強制変位 (集中荷重系)	断面力に基づく節 点力 (集中荷重系)

4.1.2 荷重条件

荷重は、構造物 - 地盤連成の二次元有限要素解析による地震応答解析から得られる応答断面力を用いる。具体的には、取水路（漸拡部）をモデル化した地震応答解析から得られる断面力分布（曲げモーメント、軸力、せん断力）を再現できる荷重を材料非線形解析モデルに作用させる。添付 2-16 図に示す断面力分布より、材料非線形解析に作用させる荷重が地震応答解析の応答断面力を良好に再現できていることがわかる。

材料非線形解析では、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、荷重を 1/100 にしたものを漸増载荷する。

荷重ケースについては、CCb を考慮したせん断耐力評価式による照査値が最も厳しくなる Ss-D2 を対象とする。取水路（漸拡部）の Ss-D2 のせん断耐力評価式による照査結果を、添付 2-21 表に示す。



添付 2-16 図 荷重図及び断面力分布

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

添付 2-21 表 取水路（漸拡部）の照査結果（暫定値）

基準地震動	左隔壁の照査値※
Ss-D1	-
Ss-D2	0.61
Ss-D3	-
Ss-F1	-
Ss-F2	-
Ss-F3	-
Ss-N1	-

※：照査値＝照査用せん断力／せん断耐力

ここで、

照査用せん断力＝発生せん断力×構造解析係数

4.1.3 破壊判定基準

ケース③ - 1の破壊判定基準は、荷重－変位関係において変位が急増した場合とし、その直前の荷重をせん断耐力とする。

4.1.4 解析結果及び従来工法と Ccb 工法の比較

従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③ - 1 - Aとし、Ccb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース③ - 1 - Bとする。解析ケースを添付 2-22 表に示す。

各ケースのせん断耐力及びせん断耐力の有効割合の比較結果を添付 2-23 表に、初期ひび割れ発生時及び地震時荷重時の各損傷状況を添付 2-24 表及び添付 2-25 表に示す。

せん断耐力は、添付 2-23 表に示すとおり Ccb 工法のせん断耐力の有効割合が約 88%となり、従来工法よりもせん断耐力は小さくなっている。これは Ccb の定着機能を考慮したせん断補強筋の無効区間による影響であり、部材厚が大きい程、せん断耐力の有効割合が小さくなるというステップ①・②と整合する結果が得られた。

また、添付 2-24 表及び添付 2-25 表に示すとおり、初期ひび割れ発生時及び地震時荷重時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法と Ccb 工法の間で顕著な差は確認されず、おおむね整合的な結果となった。

以上より、従来工法と Ccb 工法の間で Ccb 工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されず、実施工部材のうち集中荷重系となる荷重形態の部材に対する Ccb 工法の適用性を確認できた。

参考に終局荷重時の状況を添付 2-26 表に示す。ひび割れ状況から従来工法及び Ccb 工法共に隔壁中央部付近において、ひび割れが繋がることで破壊しており、従来工法と Ccb 工法で破壊状況に顕著な差は見られなかった。なお、従来工法と

CCb 工法でひび割れが繋がる位置が異なるのは、CCb 工法の鉄筋無効区間による影響である。

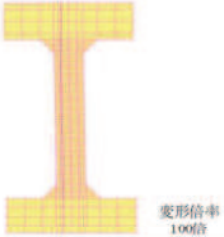
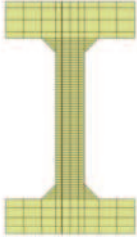
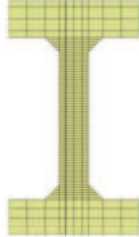


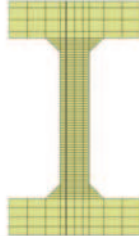
添付 2-22 表 ケース一覧

ケース	地震動	せん断補強筋設置方法
③ - 1 - A	Ss-D2	従来工法（先施工）
③ - 1 - B	Ss-D2	CCb 工法（後施工）

添付 2-23 表 せん断耐力の比較

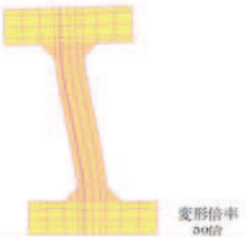
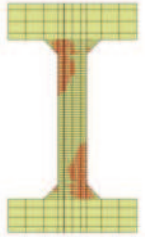

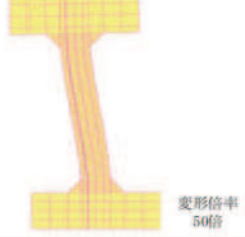
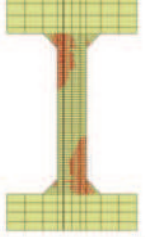
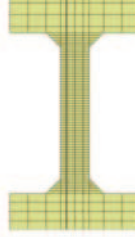
ケース	せん断耐力 (kN)	従来工法と CCb 工法の せん断耐力の比率
従来工法 (③ - 1 - A)	1678	-
CCb 工法 (③ - 1 - B)	1488	0.88

添付 2-24 表 初期ひび割れ発生時の損傷状況

ケース	変形状況	ひび割れ状況*	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-1-A)	 変形倍率 100倍		
CCb工法 (ケース③-1-B)	 変形倍率 100倍		

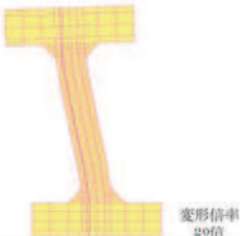
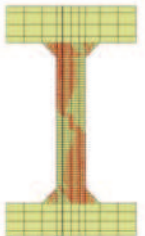

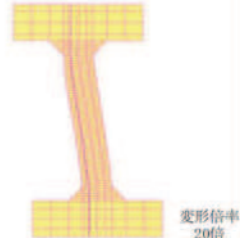


※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

添付 2-25 表 地震時荷重時の損傷状況

ケース	変形状況	ひび割れ状況*	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-1-A)	 変形倍率 200倍		
CCb工法 (ケース③-1-B)	 変形倍率 50倍		

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

添付 2-26 表 終局荷重時の損傷状況【参考】

ケース	変形状況	ひび割れ状況 [※]	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-1-A)	 変形倍率 20倍		
CCb工法 (ケース③-1-B)	 変形倍率 20倍		

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

4.2 ケース③ - 2（分布荷重系）の材料非線形解析

ケース③ - 2では、荷重形態に着目し、以下に示す2ケース（ケース③ - 2 - 1，ケース③ - 2 - 2）の材料非線形解析を行う。

- ・ ケース③ - 2 - 1：二次元有限要素解析による地震応答解析から得られる応答断面力分布を再現できる荷重を作用させる。
- ・ ケース③ - 2 - 2：等分布荷重を作用させる。

ケース③ - 2 - 2は、ケース③ - 2 - 1の解析を実施した結果、等価せん断スパンを考慮した場合のせん断スパン比が小さく、破壊形態がディープビーム的な破壊（せん断圧縮破壊）となり、せん断補強工法の差異が確認できなかったことから、破壊形態が棒部材的な破壊（斜め引張破壊）となるように荷重形態を変更したものである。

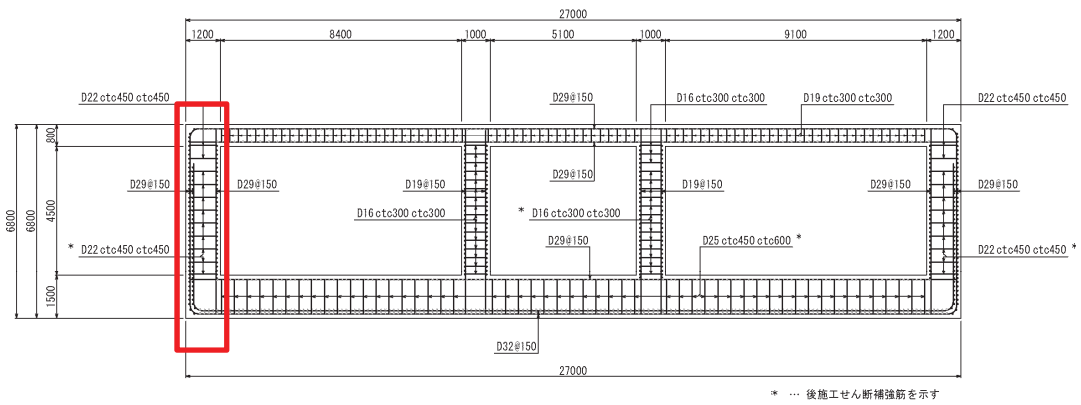
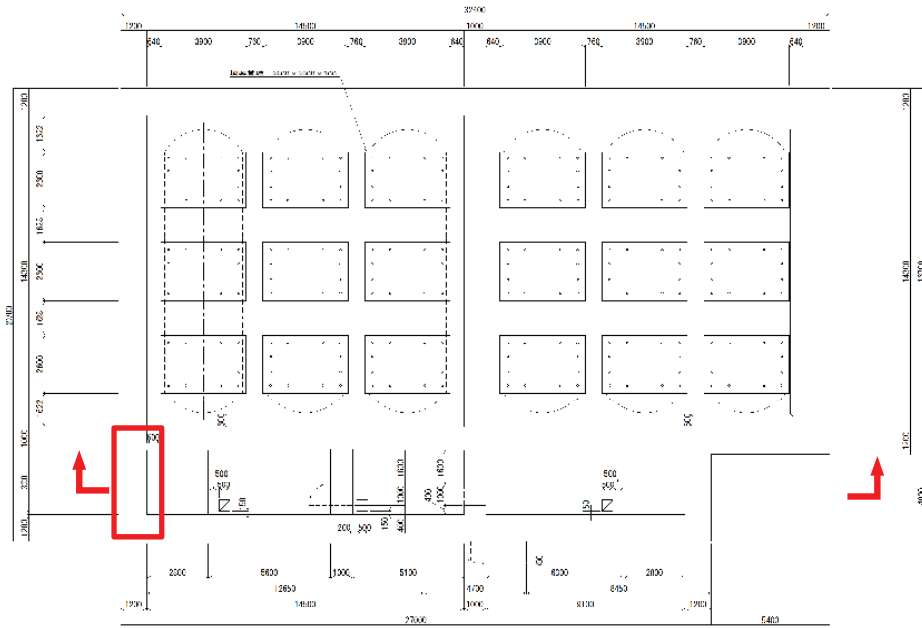
4.2.1 モデル化について

2.1.2 に準じて設定する。

対象とする部材は、ボックスカルバートの側壁のように、主な荷重が地震時増分土圧等の分布荷重となる構造物のうち、部材厚が最大である軽油タンク室の側壁とし、添付 2-17 図に示す壁とする。

解析モデルは、主鉄筋位置や Ccb の鉄筋無効区間のモデル化を考慮して要素分割を検討する。奥行き方向の厚さは 100cm とし、梁部材の高さ方向の分割については、添付 2-18 図に示すとおりとする。主鉄筋芯かぶりは、埋込側（先端側）200mm（1 段目 150mm+2 段目 250mm の中心）、差込側（後端側）150mm であるので、埋込側（先端側）400mm（200+200）、差込側（後端側）300mm（150+150）が、主鉄筋が配置される要素の高さとなる。Ccb の無効区間は、部材外側主鉄筋芯かぶり + Ccb 定着長分（ $200+5D=200+5\times 22=310\text{mm}$ ）とする。主鉄筋が配置され、かつ Ccb が有効な区間は 90mm（400-310）とする。

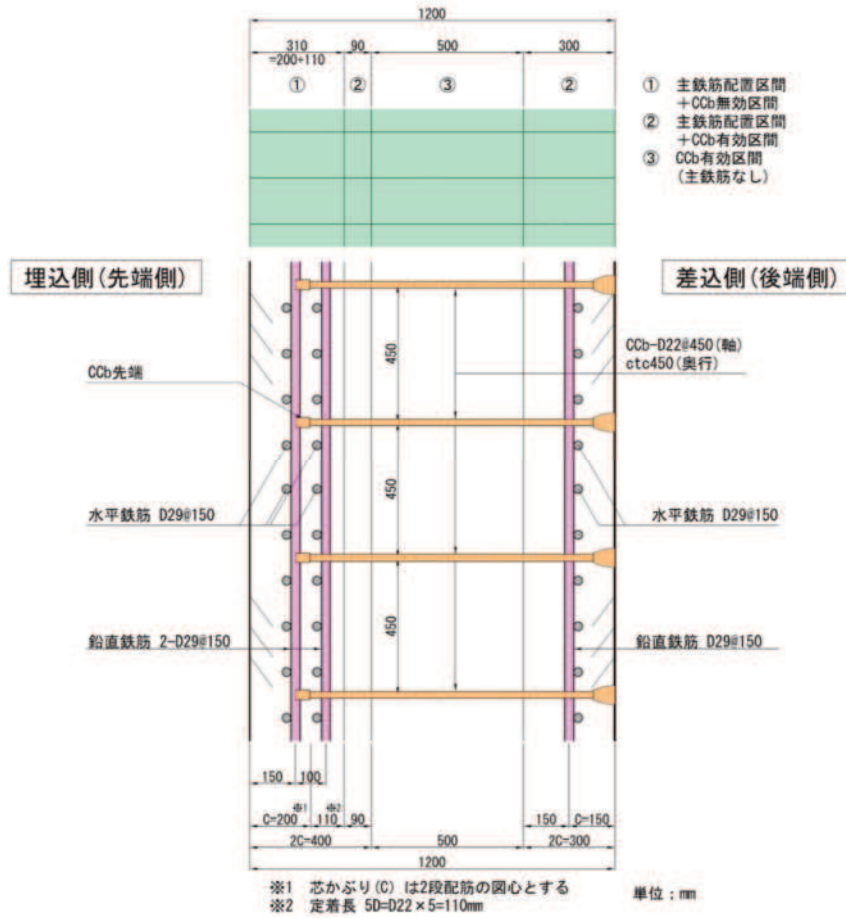
梁部材の軸方向は、地震応答解析モデルでの梁要素の節点位置を考慮して分割を行うものとする。解析モデル図を添付 2-19 図に示す。



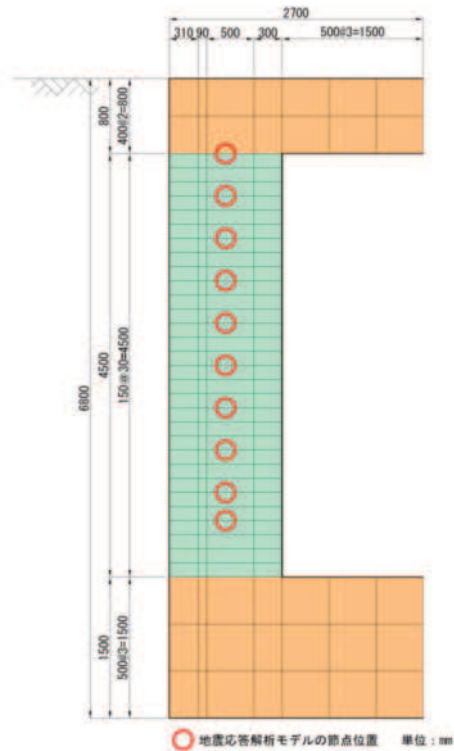
(単位：mm)

□：評価対象部材

添付 2-17 図 評価対象部材



添付 2-18 図 要素分割の考え方



添付 2-19 図 解析モデル図

解析の入力データとなるコンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を添付 2-27 表及び添付 2-28 表に示す。

また、ステップ②の解析モデル及びケース③ - 1 とケース③ - 2 の解析モデルの違いを、添付 2-29 表に示す。添付 2-29 表に示すとおり、各項目において差異があり、これらが解析により応答性状及びせん断補強効果にどの程度影響するか確認する。

添付 2-27 表 コンクリートの材料特性

項目	設定値
設計基準強度 f'_{ck}	20.5 N/mm ²
引張強度 f_t	1.72 N/mm ²
ヤング係数 E_c	解析プログラム内で自動計算

添付 2-28 表 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200 kN/mm ²
主鉄筋の降伏強度	3450 N/mm ²
CCb の降伏強度	345 N/mm ²

添付 2-29 表 解析モデルの違い

項目	ステップ②	ケース③ - 1	ケース③ - 2
部材厚	1500mm	1200mm	1200mm
せん断スパン比	2.78	6.17	4.50
主鉄筋比	1.28%	0.44%	0.71%
コンクリート強度	42.4 N/mm ²	20.5 N/mm ²	20.5 N/mm ²
載荷方法	強制変位 (集中荷重系)	断面力に基づく 節点力 (集中荷重系)	断面力に基づく 節点力 (分布荷重系)

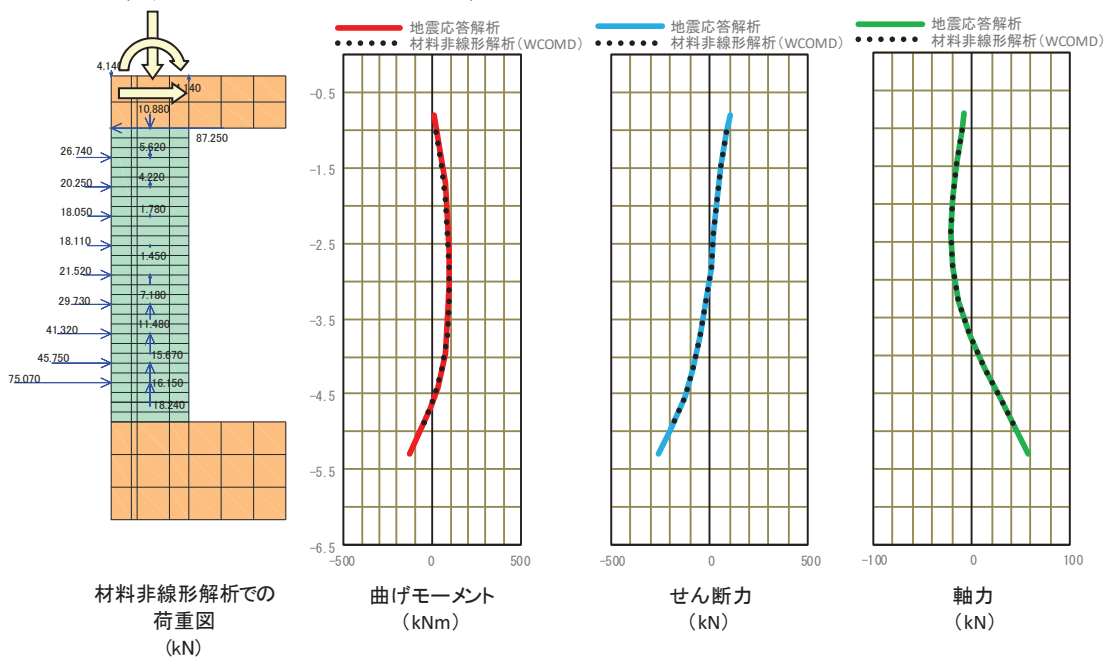
4.2.2 荷重条件

(1) ケース③ - 2 - 1 の荷重条件

荷重は、構造物 - 地盤連成の二次元有限要素解析による地震応答解析から得られる断面力を用いる。具体的には、軽油タンク室をモデル化した地震応答解析から得られる断面力分布（曲げモーメント，軸力，せん断力）を再現できる荷重を材料非線形解析モデルに作用させる。添付 2-20 図に示す断面力分布より，材料非線形解析に作用させる荷重が地震応答解析の応答断面力を良好に再現できていることがわかる。

材料非線形解析では，鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため，荷重を 1/100 にしたものを漸増載荷する。

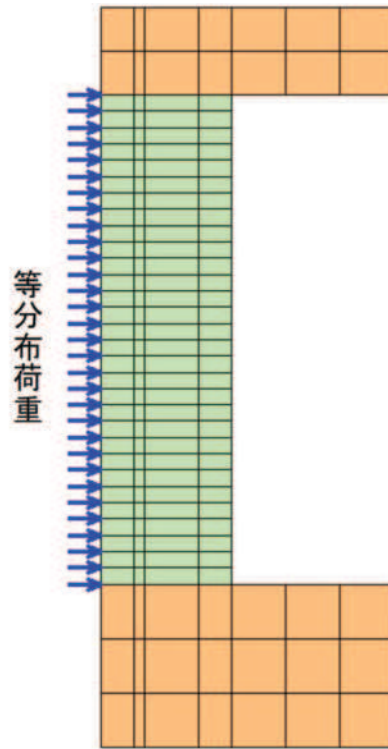
なお，荷重ケースについては，取水路（漸拡部）と同様に Ss-D2 を対象とする。



添付 2-20 図 荷重図及び断面力分布

(2) ケース③ - 2 - 2 の荷重条件

破壊形態が斜め引張破壊となるように、等分布荷重を材料非線形解析モデルの各節点に作用させるものとする。載荷図を添付 2-21 図に示す。



添付 2-21 図 載荷図

4.2.3 破壊判定基準

4.1.3 に準じて設定する。

4.2.4 解析結果

(1) ケース③ - 2 - 1 の解析結果及び従来工法と CCb 工法の比較

従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③ - 2 - 1 - Aとし、CCb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース③ - 2 - 1 - Bとする。解析ケースを添付 2-30 表に示す。

各ケースのせん断耐力及びせん断耐力の有効割合の比較結果を添付 2-31 表に、初期ひび割れ発生時及び地震時荷重時の各損傷状況を添付 2-32 表及び添付 2-33 表に示す。

せん断耐力は、添付 2-31 表に示すとおり CCb 工法のせん断耐力の有効割合が約 99%となった。これは、添付 2-22 図に示すとおり、等価せん断スパンを考慮したせん断スパン比 ($a/d=0.66$) が小さく、破壊形態がディープビーム的な破壊※（せん断圧縮破壊）であるため、せん断耐力はコンクリートの圧縮強度の影響が支配的であり、従来工法と CCb 工法の差異である定着体部の影響が現れなかったためである。

また、添付 2-32 表及び添付 2-33 表に示すとおり、初期ひび割れ発生時及び地震時荷重時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法と CCb 工法の間で顕著な差は確認されず、おおむね整合的な結果となった。

以上より、従来工法と CCb 工法の間で CCb 工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されず、数値解析実験上は実施工部材のうち分布荷重が作用し破壊形態がディープビーム的な破壊となる部材に対する CCb 工法の適用性を確認できた。

参考に終局荷重時の状況を添付 2-34 表に示す。ひび割れ状況と鉄筋降伏状況から、ひび割れが部材の広範囲に渡って発生しているのに対し、せん断補強筋の降伏は局所的であり、ディープビーム的な破壊形態（せん断圧縮破壊）となっていることがわかる。

※：ディープビーム的な破壊は、添付 2-23 図に示すように、支点と載荷点を結ぶ直線付近に斜めひび割れが発生し、ウェブコンクリートの圧縮破壊により生じる。

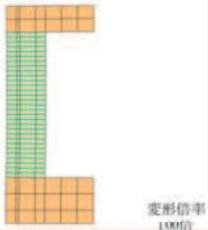
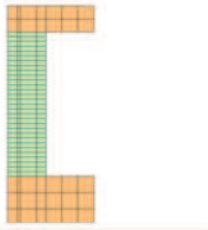
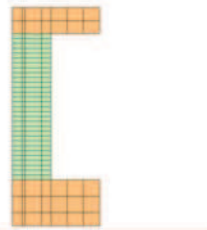
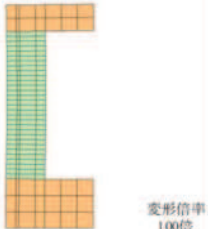
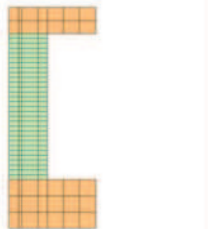
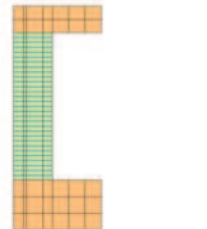
添付 2-30 表 ケース一覧

ケース	地震動	せん断補強筋設置方法
③ - 2 - 1 - A	Ss-D2	従来工法（先施工）
③ - 2 - 1 - B	Ss-D2	CCb 工法（後施工）

添付 2-31 表 せん断耐力の比較

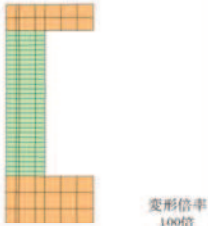
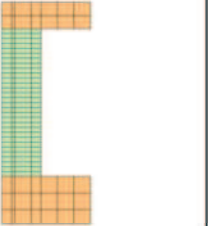
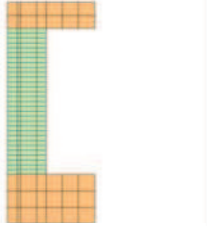
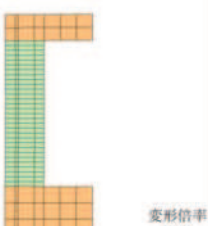
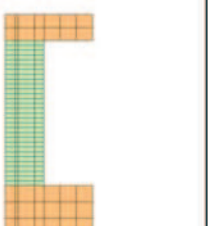
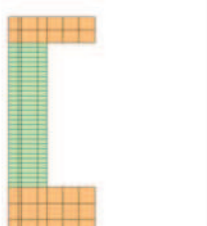
ケース	せん断耐力 (kN)	従来工法と CCb 工法のせん断耐力の比率
従来工法 (③ - 2 - 1 - A)	2635	—
CCb 工法 (③ - 2 - 1 - B)	2610	0.99

添付 2-32 表 初期ひび割れ発生時の損傷状況

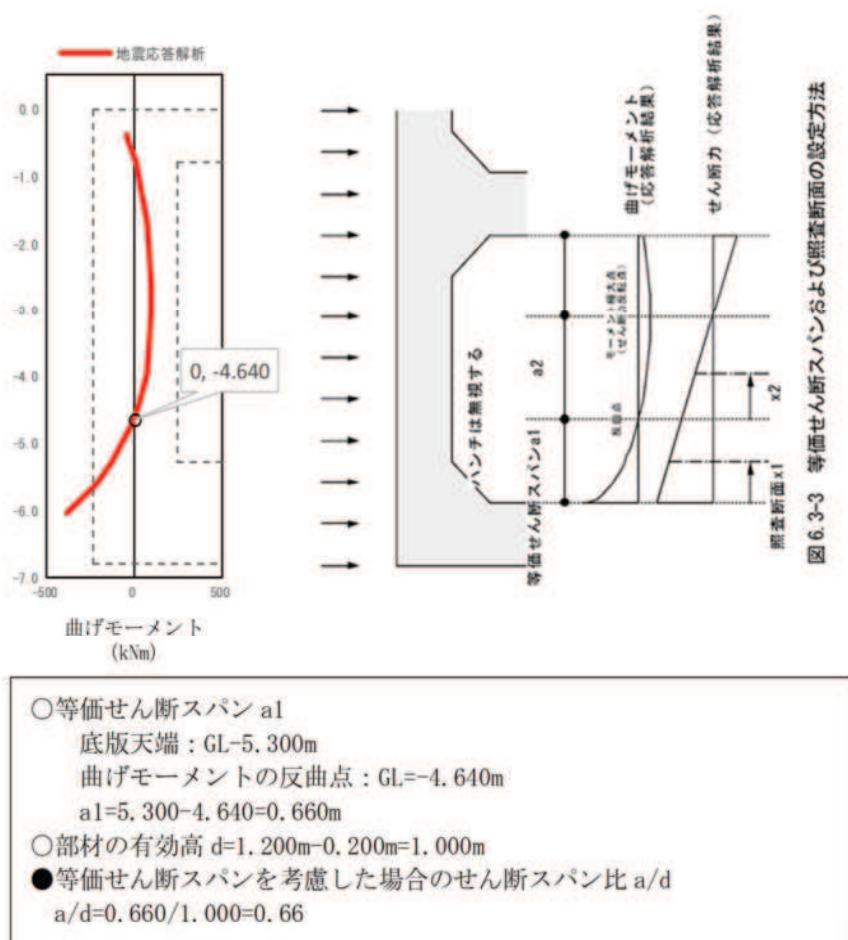
ケース	変形状況	ひび割れ状況 [※]	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-2-1-A)			
CCb 工法 (ケース③-2-1-B)			

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

添付 2-33 表 地震時荷重時の損傷状況

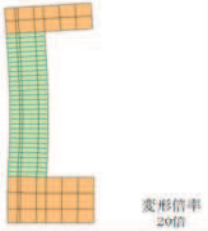
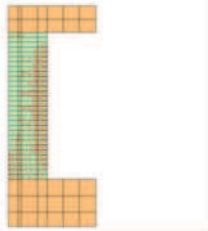
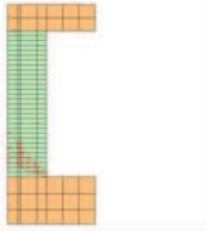
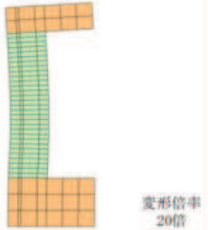
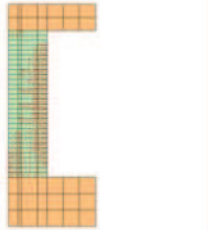
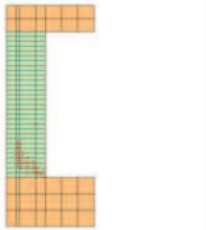
ケース	変形状況	ひび割れ状況*	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-2-1-A)			
CC工法 (ケース③-2-1-B)			

※：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

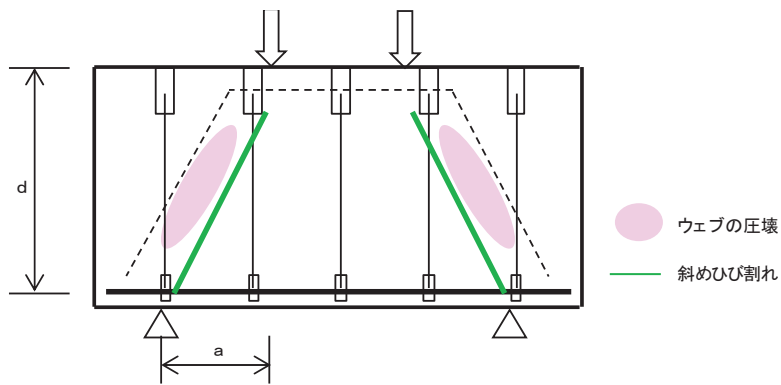


添付 2-22 図 等価せん断スパンを考慮した場合のせん断スパン比
(土木学会マニュアル準拠)

添付 2-34 表 終局荷重時の損傷状況【参考】

ケース	変形状況	ひび割れ状況 [*]	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-2-1-A)			
CCb工法 (ケース③-2-1-B)			

※: 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。



添付 2-23 図 ディープビーム型の破壊形態

(2) ケース③ - 2 - 2の解析結果及び従来工法とCCb工法の比較

従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③ - 2 - 2 - Aとし、CCb工法によるせん断補強を想定したケースをケース③ - 2 - 2 - Bとする。解析ケースを添付 2-35 表に示す。

各ケースのせん断耐力及びせん断耐力の有効割合の比較結果を添付 2-36 表に、ケース③ - 1（取水路（漸拡部））の結果と併せて示す。初期ひび割れ発生時の各損傷状況を添付 2-37 表に示す。

せん断耐力については、添付 2-36 表に示すとおり CCb 工法のせん断耐力の有効割合が約 91%となった。これは、取水路（漸拡部）隔壁（ケース③ - 1）と同等の比率となっており、分布荷重が作用する場合であっても、集中荷重が作用する場合と同様のせん断補強効果が得られることが確認された。取水路（漸拡部）隔壁（ケース③ - 1）の結果の比較から、荷重形態の違いによる従来工法とCCb工法の間でCCb工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されなかった。

また、添付 2-37 表に示すとおり、初期ひび割れ発生時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法とCCb工法の間で顕著な差は確認されず、おおむね整合的な結果となった。

以上より、実施工部材のうち分布荷重が作用し破壊形態が棒部材的な破壊（斜め引張破壊）となる部材に対するCCb工法の適用性を確認できた。

参考に終局荷重時の状況を添付 2-38 表に示す。ひび割れ状況と鉄筋降伏状況から、ひび割れ及びせん断補強筋の降伏が広範囲に渡っており、ケース③ - 2 - 1のディープビーム的な破壊形態とは異なる棒部材的な破壊（斜め引張破壊）となる破壊形態となっていることが確認できる。

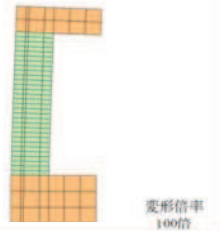
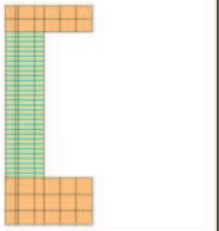
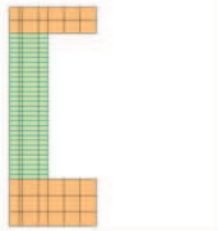
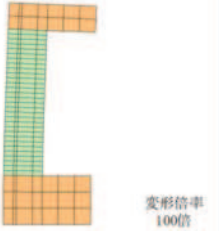
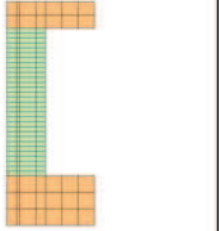
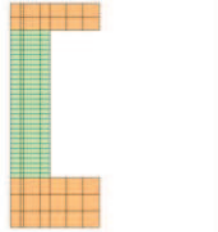
添付 2-35 表 ケース一覧

ケース		せん断補強鉄筋設置方法
③ - 2 - 2 - A	等分布荷重	従来工法（先施工）
③ - 2 - 2 - B		CCb 工法（後施工）

添付 2-36 表 せん断耐力結果一覧

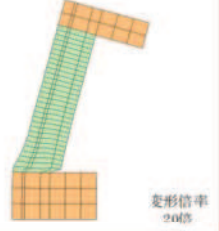
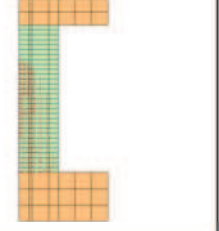
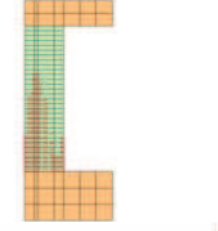
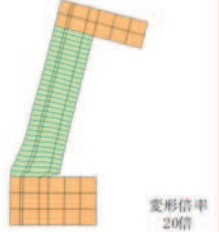
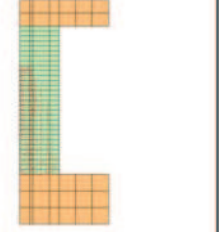
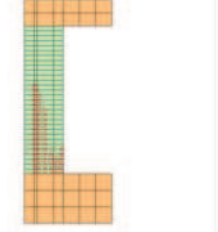
ケース		せん断耐力 (kN)	従来工法と Ccb 工法の せん断耐力の比率
軽油 タンク室	従来工法 (③ - 2 - 2 - A)	2449	-
	Ccb 工法 (③ - 2 - 2 - B)	2232	0.91
取水路 (漸拡部)	従来工法 (③ - 1 - A)	1678	-
	Ccb 工法 (③ - 1 - B)	1488	0.88

添付 2-37 表 初期ひび割れ発生時の損傷状況

ケース	変形状況	ひび割れ状況*	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-2-2-A)			
Ccb 工法 (ケース③-2-2-B)			

※: 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

添付 2-38 表 終局荷重時の損傷状況【参考】

ケース	変形状況	ひび割れ状況*	鉄筋降伏状況
従来工法 (ケース③-2-2-A)			
Ccb 工法 (ケース③-2-2-B)			

※: 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

5. まとめ

女川2号機においてCCb工法を適用した構造物と建設技術審査証明報告書に記載の各種実験条件（部材諸元(部材厚, せん断スパン比, 主鉄筋比)及び载荷方法等）と異なっても, CCb工法によるせん断ひび割れ抑制効果が期待できることを材料非線形解析を用いた数値実験により確認した。検討ステップ①～③により, CCb工法の適用性を確認した内容は以下のとおりである。

- ・ 建設技術審査証明報告書の実験を上回る部材厚においても, せん断ひび割れ抑制効果を確認できており, CCb工法が適用できることを確認した。【ステップ①, ②により確認】
- ・ 建設技術審査証明報告書の実験と実施工部材では部材諸元及び载荷方法（設計荷重）等が異なるが, 女川2号機でCCbにより耐震補強を行っている構造物の部材諸元においても, せん断ひび割れ抑制効果を確認できており, CCb工法が適用できることを確認した。【ステップ③により確認】
- ・ 建設技術審査証明報告書に記載の梁試験体ではディープビームを対象とした試験を実施していないが, ディープビーム的な破壊となる部材に対しても, CCb工法が適用できることを確認した。【ステップ③により確認】
なお, ディープビームとなる部材に発生する高角度なひび割れが生じた際の定着性能及び女川2号機にてディープビームとなる部材へのせん断耐力評価上における保守性については, 添付資料3及び添付資料5にて別途確認する。

女川 2 号機におけるひび割れに対する定着機能保持の検討

1. はじめに

先施工されたせん断補強筋は主鉄筋又は配力筋にフックを掛けて定着しているが、CCb はせん断補強筋端部の定着体とコンクリートにより定着している。そのため、せん断補強筋としての機能を発揮するためには定着体部の定着機能が保持されている必要があり、定着体部にひび割れが生じると、定着体部の定着機能を阻害するおそれがある。

よって、女川 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れ（曲げひび割れ、面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びディープビームに生じる 45 度を超える高角度の斜めひび割れ）が、CCb の定着体部に生じても定着機能が保持され、所要のせん断補強効果を発揮できていることを確認する。併せて、女川 2 号機における CCb 工法の適用範囲を設定する。

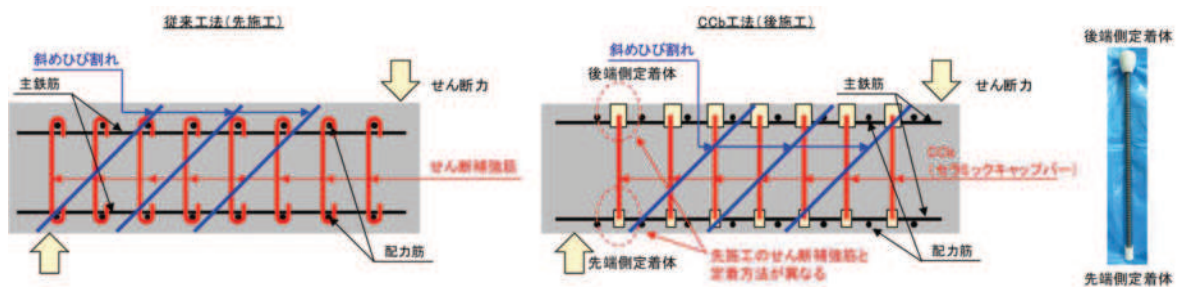
せん断補強効果の確認及び CCb 工法の適用範囲の設定においては、建設技術審査証明報告書に記載の梁試験結果を参考に行う。

2. CCb の定着機構

CCb 工法における後施工せん断補強筋の効果は、先施工されたせん断補強筋と同様に、コンクリート標準示方書をはじめとする規準類に示されるトラス理論により評価される。

CCb と先施工のせん断補強筋の差異は、せん断補強筋端部の定着機構であり、先施工されたせん断補強筋が主鉄筋または配力筋にフックを掛けて定着していることに対して、CCb はセラミック定着体とコンクリート間の支圧と、セラミック定着体及びせん断補強筋とコンクリート間の付着により定着している（添付 3-1 図参照）。

また、斜めひび割れ位置でせん断補強筋が設計で期待する降伏強度に相当する引張力に抵抗するために、CCb 工法の定着体部では、せん断補強筋の降伏強度に相当する引張力に対する定着強度を確保していることを建設技術審査証明報告書にて確認している。



添付 3-1 図 従来工法と CCb 工法の差異

3. 定着機能に影響を与える可能性のあるひび割れ状況下での定着機能の保持

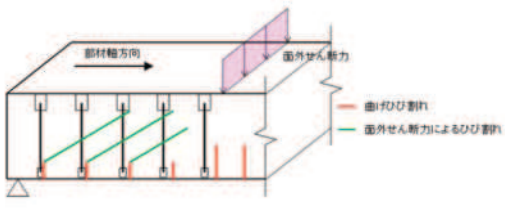
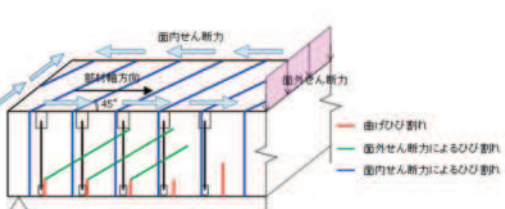
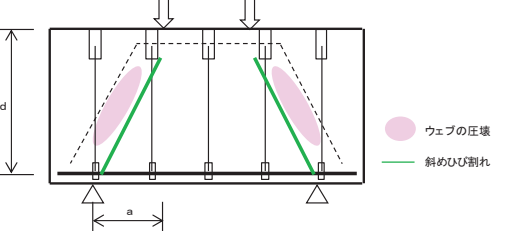
CCb 工法を適用しせん断耐力を向上させることにより、部材はせん断破壊先行型の形態から曲げ破壊先行型の形態に移行する。曲げ破壊先行型の形態に移行することにより、曲げひび割れが生じた状態でも CCb の定着機能が保持されている必要がある。同様に、面内せん断力を受ける壁（側壁、底版）に発生する面内せん断力によるひび割れやディープビームに発生する斜めひび割れが生じた状態においても CCb の定着機能が保持されている必要がある。

添付 3-1 表のとおり、曲げひび割れ及び面内せん断力によるひび割れが、CCb の定着体部付近において CCb とほぼ平行な高角度に発生することや、せん断スパン比が小さいディープビーム ($a/d \leq 1.0$) では、斜めひび割れの角度が 45 度を超え、CCb の定着体部付近に高角度なひび割れが発生することが予想されることから、その状況下においても所要のせん断補強効果を保持していることを確認する。

なお、曲げひび割れ、面内せん断力によるひび割れ及びディープビームへのひび割れが発生した状況下において、定着体部以外は先施工と CCb 工法で差異はない。

CCb のせん断補強効果は、建設技術審査証明報告書の梁試験体の正負交番載荷試験により確認していることから、試験時のひび割れ状況を整理し、部材（特に定着体部）のひび割れが CCb の定着機能に与える影響を確認するとともに、女川 2 号機における CCb 工法の適用範囲について検討する。

添付 3-1 表 ひび割れの特徴

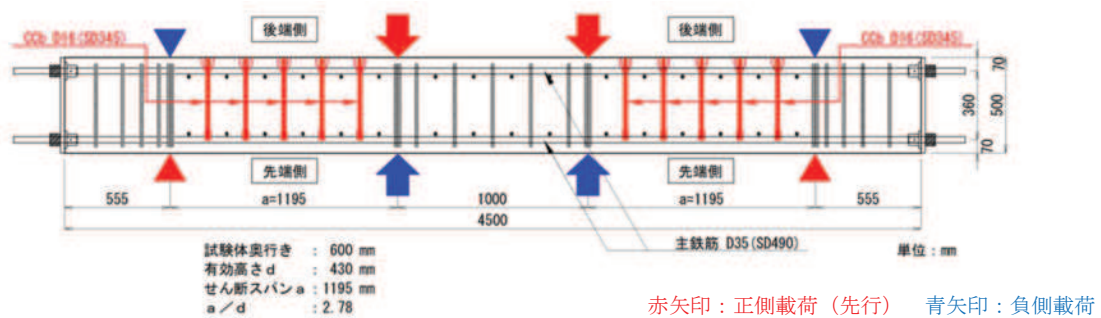
曲げひび割れの特徴	
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 曲げによる引張縁に部材軸方向に対してほぼ垂直に発生する。 ・ ひび割れの幅，分布は引張鉄筋(軸方向鉄筋)により制御される。 ・ CCb の定着体部付近に高角度で生じるため，定着機能に影響を与える可能性がある。
面内せん断力によるひび割れの特徴	
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 面内せん断力により部材軸方向に対して平面的に45度の方向に発生する。 ・ 部材断面を貫通するひび割れである。 ・ ひび割れの幅，分布は軸方向鉄筋及び配力筋(上縁・下縁)により制御される。 ・ CCb の定着体部付近を含む断面全体に高角度で生じるため，定着機能に影響を与える可能性がある。
ディープビームに発生するひび割れの特徴	
	<ul style="list-style-type: none"> ・ せん断スパン比が小さいディープビーム ($a/d \leq 1.0$) では，角度が45度を超える斜めひび割れが発生する。 ・ CCb の定着体部付近を含む断面全体に45度を超える高角度で生じるため，定着機能に影響を与える可能性がある。

4. Ccb のせん断補強効果の確認

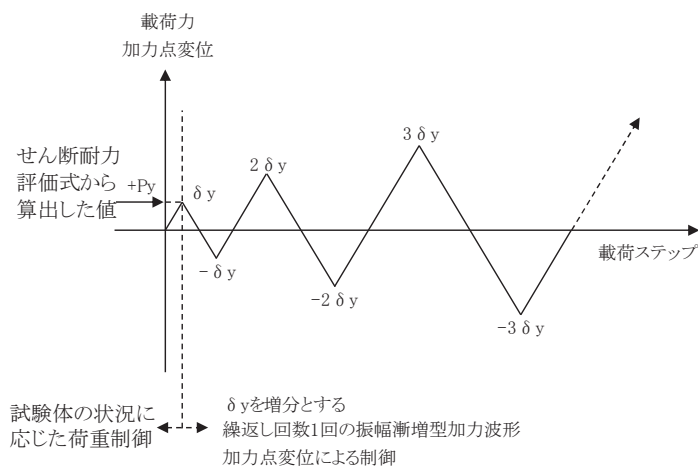
4.1 確認方法

ひび割れ状況下における Ccb のせん断補強効果の確認は、建設技術審査証明報告書の梁試験体による交番载荷試験におけるひび割れ状況とせん断耐力を対比することにより行う。試験の概要は以下のとおりである（添付 3-2 図及び添付 3-3 図参照）。

- ・ 女川 2 号機で Ccb を施工した条件と同じ、Ccb の先端位置が主鉄筋の図心位置となる試験体 (No. 3-3) を対象とする。
- ・ 対象とする試験ではせん断耐力を確認するため、曲げ降伏させないよう主鉄筋には高強度の鉄筋を使用している。
- ・ 正負交番载荷により、Ccb によるせん断補強効果を確認した試験である。
- ・ 正負交番载荷は、先端側定着体側に曲げひび割れが生じる载荷方向を正側としている。



添付 3-2 図 試験体概要図



添付 3-3 図 試験体への载荷方法

せん断補強効果の確認は、定着体部（先端・後端）に曲げによる垂直に近い高角度のひび割れが生じた状態においても、試験体が建設技術審査証明報告書に従い算

出した有効係数 (β_{aw}) を考慮したせん断耐力を有していることを確認する。

さらに、試験体のひび割れ状況を整理するとともに、CCb によるせん断補強筋の定着機能はひび割れによらず保持されていると仮定した再現解析(添付資料 2「2. ステップ①: CCb の解析上のモデル化方法」)の結果を参考に、試験体に生じたひび割れ性状と解析によるひび割れ性状の比較を行い、定着体部の定着機能を確認する。

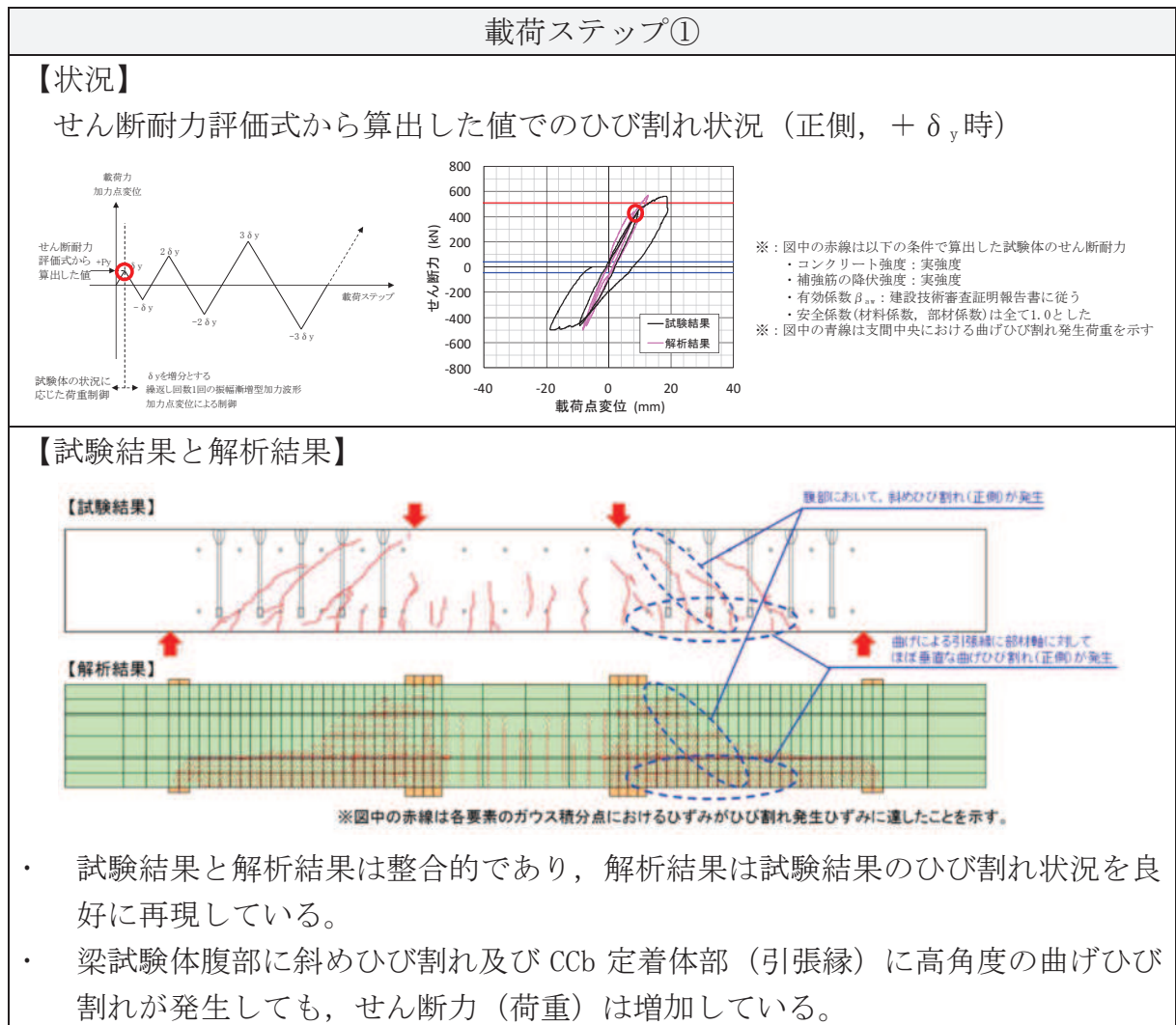
4.2 確認結果

添付 3-2 表～添付 3-4 表に各載荷ステップにおける試験結果と解析結果のひび割れ状況の比較を、添付 3-5 表に載荷ステップ③(試験最大荷重時(試験体のせん断破壊時))におけるひび割れと各ひび割れ状況(曲げひび割れ, 面内せん断力によるひび割れ及びディープビームによるひび割れ)との比較結果を示す。

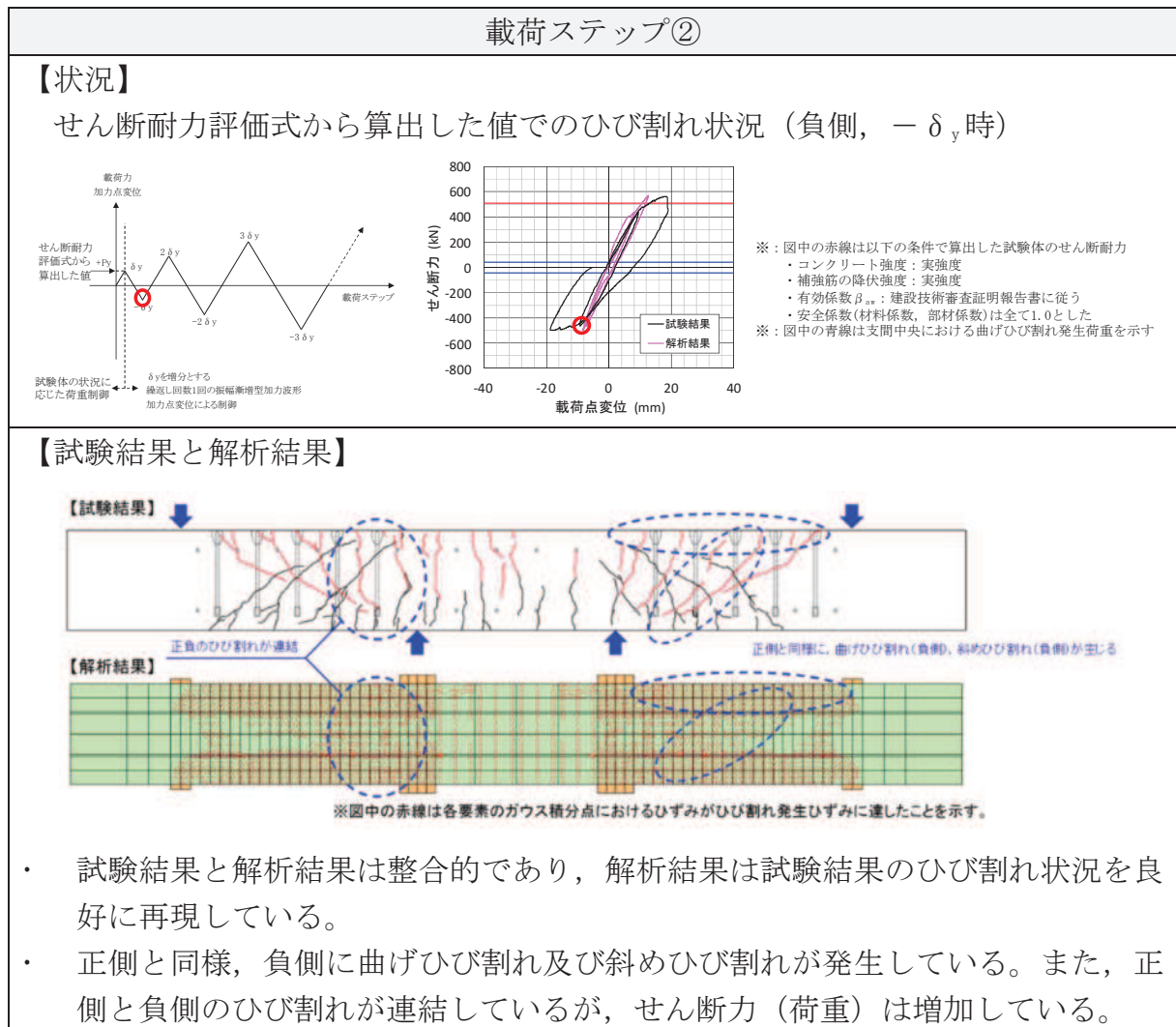
添付 3-2 表～添付 3-4 表に示すとおり、試験結果と CCb の無効区間を 5D とした解析結果は整合的であり、解析結果は試験結果のひび割れ状況を良好に再現している。また、CCb とコンクリートが付着しているとした解析結果が実験結果を良好に再現されていることを踏まえると、試験体に載荷された最大荷重(試験体のせん断破壊時)の範囲では、CCb とコンクリートの付着は保持されていると考えられる。

また、添付 3-5 表に示すとおり、試験結果と各ひび割れ状況の比較から、女川 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れが、定着体部やその周囲に生じても定着機能が保持され、所要のせん断補強効果を発揮できていることを確認した。

添付 3-2 表 荷重ステップ①におけるひび割れ状況



添付 3-3 表 载荷ステップ②におけるひび割れ状況

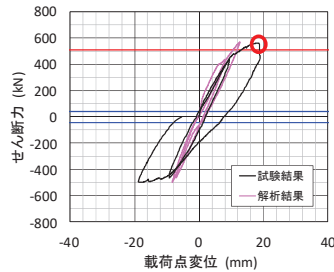
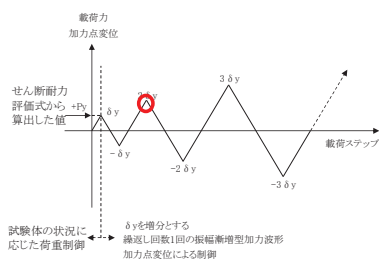


添付 3-4 表 載荷ステップ③におけるひび割れ状況

載荷ステップ③

【状況】

試験最大荷重時（試験体のせん断破壊時）のひび割れ状況（正側）

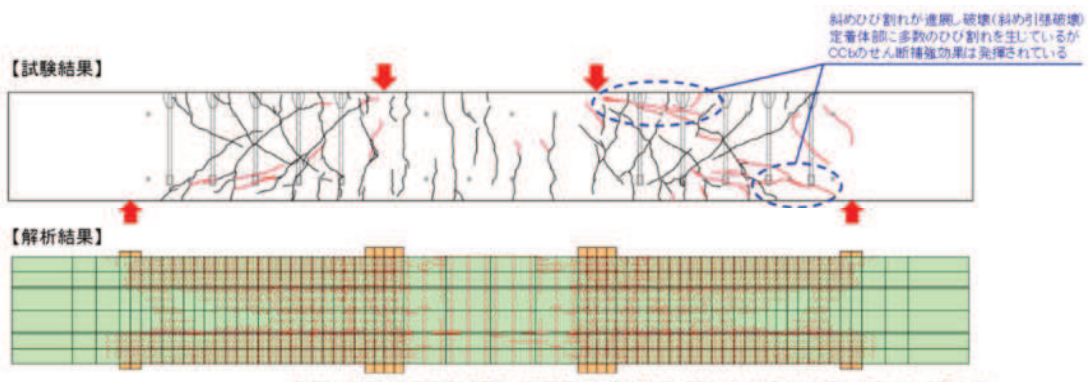


※：図中の赤線は以下の条件で算出した試験体のせん断耐力

- ・コンクリート強度：実強度
- ・補強筋の降伏強度：実強度
- ・有効係数 β_{ss} ：建設技術審査証明報告書に従う
- ・安全係数（材料係数、部材係数）は全て1.0とした

※：図中の青線は支間中央における曲げひび割れ発生荷重を示す

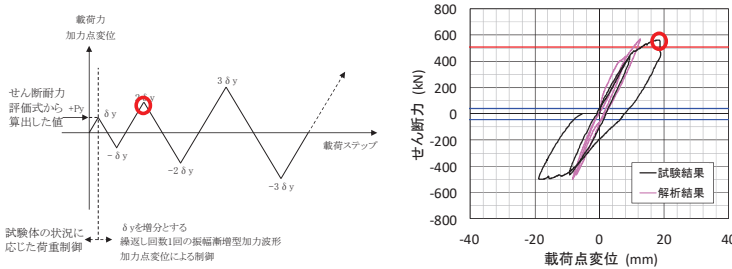
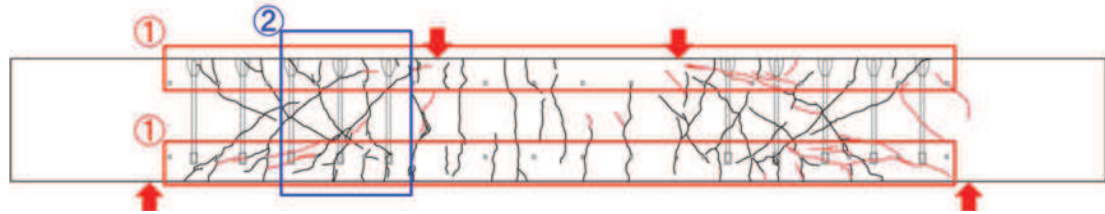
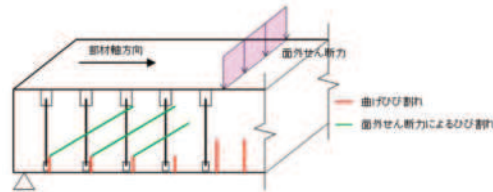
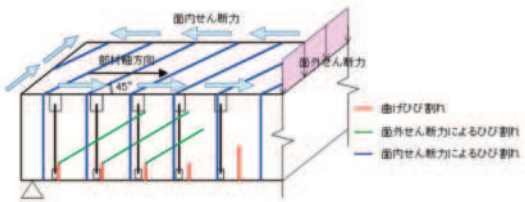
【試験結果と解析結果】



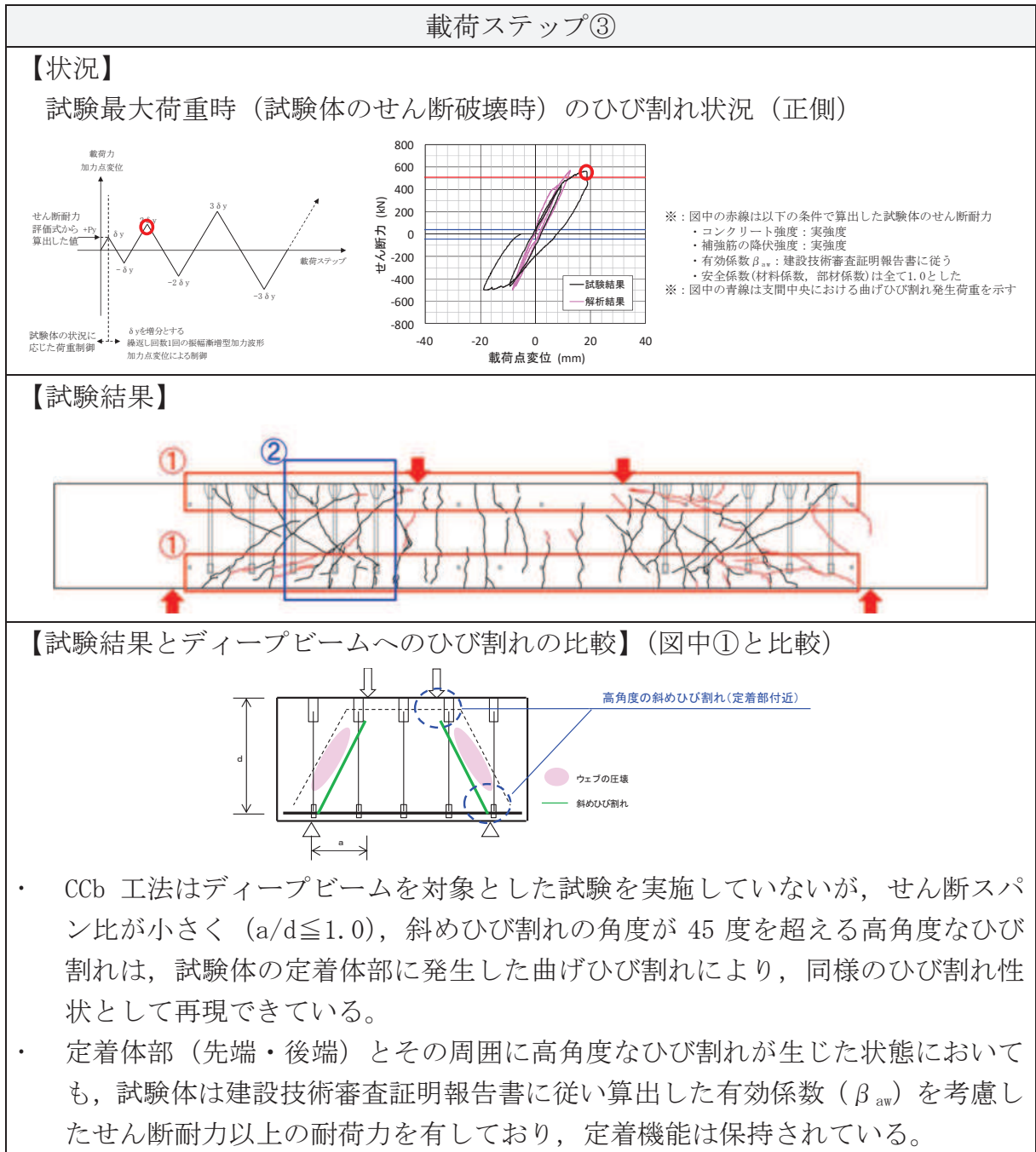
※図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみがひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

- ・ 試験結果と解析結果は整合的であり、解析結果は試験結果のひび割れ状況を良好に再現している。
- ・ 斜めひび割れが進展したことにより破壊。
- ・ CCb の定着体部及び梁試験体全体に多数のひび割れが生じているが、せん断耐力評価式から算出した値よりも大きなせん断耐力が確認されており、CCb のせん断補強効果は発揮されていることがわかる。

添付 3-5 表 載荷ステップ③におけるひび割れ状況の比較 (1/2)

載荷ステップ③	
<p>【状況】</p> <p>試験最大荷重時（試験体のせん断破壊時）のひび割れ状況（正側）</p>  <p>※：図中の赤線は以下の条件で算出した試験体のせん断耐力 ・コンクリート強度：実強度 ・補強筋の降伏強度：実強度 ・有効係数 β_{aw}：建設技術審査証明報告書に従う ・安全係数(材料係数, 部材係数)は全て1.0とした ※：図中の青線は支間中央における曲げひび割れ発生荷重を示す</p>	
<p>【試験結果】</p> 	
<p>【試験結果と曲げひび割れの比較】（図中①との比較）</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・ 定着体部（先端・後端）とその周囲に高角度な曲げひび割れが生じた状態においても，試験体は建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数（β_{aw}）を考慮したせん断耐力以上の耐荷力を有しており，定着機能は保持されている。 	
<p>【試験結果と面内せん断力によるひび割れの比較】（図中②との比較）</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・ 面内せん断力により発生する貫通ひび割れは，正負交番載荷試験の正側の曲げひび割れと負側の曲げひび割れが連結したことにより，同様のひび割れ性状として再現できている。 ・ また，曲げひび割れ同様，定着体部（先端・後端）とその周囲に高角度なひび割れが生じた状態においても，試験体は建設技術審査証明報告書に従い算出した有効係数（β_{aw}）を考慮したせん断耐力以上の耐荷力を有しており，定着機能は保持されている。 	

添付 3-5 表 荷重ステップ③におけるひび割れ状況の比較 (2/2)



4.3 梁試験体の鉄筋ひずみの整理

梁試験体のせん断破壊時における主鉄筋のひずみを確認し、女川2号機においてCCb工法を適用するにあたっての適用範囲を設定する。

前述のとおり建設技術審査証明報告書の梁試験体は、せん断耐力を確認するための試験であることから、曲げ降伏させないよう主鉄筋に高強度の鉄筋を使用しており、せん断破壊時における主鉄筋のひずみは、添付3-6表に示すとおり降伏ひずみ未満の 2363μ まで確認されている。

よって、主鉄筋にSD345を用いている女川2号機においてCCbにより耐震補強を行った構造物については、応答値として主鉄筋のひずみが降伏ひずみ(1725μ)未満または応力が降伏強度($345\text{N}/\text{mm}^2$)未満であることを確認する。

添付3-6表 梁試験体に生じた鉄筋ひずみ

項 目		備 考
鉄筋ひずみ	2363μ ※	降伏ひずみ： 2450μ (SD490)

※：コンクリートの引張応力を無視し、縦ひずみは断面の中立軸からの距離に比例するものとして算出した。

5. Ccb の梁試験体のひび割れ状況下での定着機能についてのまとめ

建設技術審査証明報告書の梁試験結果及び試験を再現した材料非線形解析による数値解析結果から、Ccb は定着体部やその周囲にひび割れが発生した状態においても、定着機能が保持されており、せん断補強効果が発揮されることが確認できた。建設技術審査証明報告書の梁試験の内容を踏まえ、女川 2 号機における Ccb 工法の適用範囲を以下のとおりとする。

- ・ 高角度の曲げひび割れ，面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びせん断スパン比が小さい ($a/d \leq 1.0$) ディープビームに生じる 45 度を超える高角度なひび割れが発生する可能性のある部材に対しても Ccb 工法の適用を可能とする。
- ・ ただし，曲げ降伏後のひび割れ幅が大きく進展したときのように定着部のひび割れ幅が大きい場合，Ccb の定着性能を含めた所要のせん断補強効果が発揮できることは確認できていない。また，建設技術審査証明報告書に記載の梁試験にて発生している鉄筋ひずみ以内でせん断補強効果を確認していることを踏まえ，曲げによる主鉄筋の応力が降伏強度以下である範囲においてのみ，せん断補強として Ccb 工法の適用を可能とする。
- ・ 同様に面内せん断力と面外力（曲げ，せん断等）の両方に対して耐震要素として期待する壁（側壁，底版）に対しては，面内せん断力と面外力の合力による鉄筋の応力が降伏強度以下である範囲，もしくは面内せん断力に対して，コンクリートのみで抵抗可能な部材において Ccb 工法の適用を可能とする。

女川 2 号機におけるコンクリートの健全性の検討

1. はじめに

女川原子力発電所は、東北地方太平洋沖地震（2011 年 3 月 11 日）及び宮城県沖の地震（2011 年 4 月 7 日）により、建設時の基準地震動を一部周期帯で超過する地震動を経験していることを踏まえ、CCb を適用した部材のコンクリートにおいて CCb のせん断補強効果を阻害するひび割れがなく、構造物が健全であることを確認する。

また、CCb の施工箇所地震起因以外によるひび割れとして、乾燥収縮によるひび割れやコンクリートの劣化によるひび割れ（アルカリ骨材反応、凍結融解作用、中性化、塩害）等についても抽出し、CCb のせん断補強効果を阻害するひび割れがないことを確認する。

なお、健全性はコンクリートのひび割れ状況及び圧縮強度試験結果より判断する。

2. ひび割れ状況の確認

ひび割れ状況を地震起因によるひび割れと地震起因以外によるひび割れに着目し確認を行う。ひび割れの確認結果を、添付 4-1 表に示す。

2.1 地震起因によるひび割れの確認

添付 4-1 表に示すとおり、東北地方太平洋沖地震（2011 年 3 月 11 日）及び宮城県沖の地震（2011 年 4 月 7 日）以降に実施しているひび割れ調査（平成 23 年度に実施）により、地震の影響を否定できないひび割れについて、耐震性能に影響するひび割れ（評価基準値：ひび割れ幅 1.0mm^{*}）がないことを確認している。

※：Guidelines for Nuclear Plant Response to an Earthquake (EPRI NP-6695) に示すひび割れ幅約 1.5mm を参考に安全側に 1.0mm として設定している。

2.2 地震起因以外によるひび割れの確認

CCb の施工箇所に生じている地震起因以外によるひび割れは添付 4-1 表のとおりであり、これらは主に温度応力に伴う外部拘束によるひび割れであることから、構造物の耐力に影響を与えるものではない。

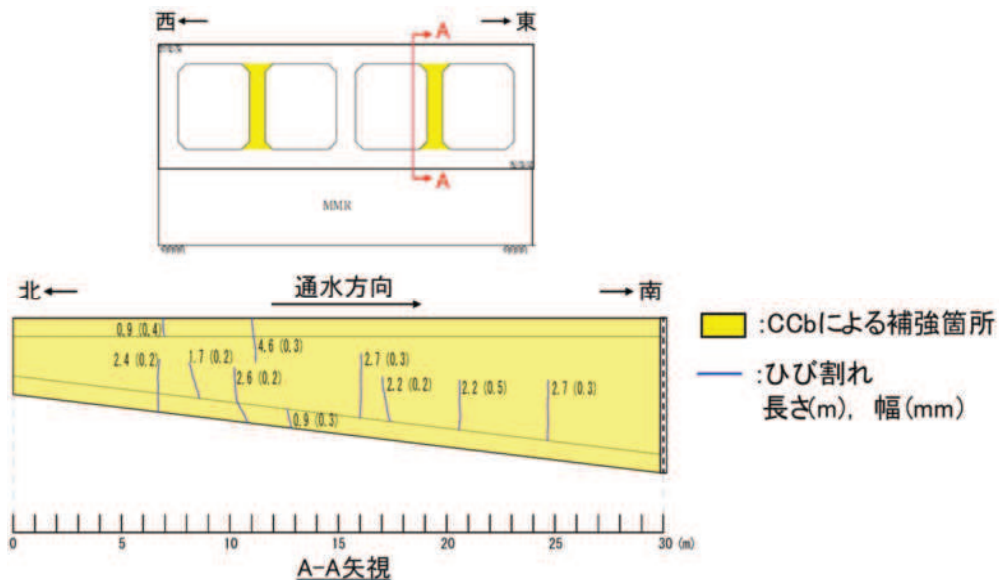
また、添付 4-1 表及び添付 4-1 図に示すとおり、ひび割れ幅は大多数が 0.2mm 程度であり一部 0.5mm 程度のひび割れが存在する箇所があるが、部材の一部に集中しているものではなく、数mに 1 本程度の頻度であり、社内基準に基づき補修することとしている。補修は、エポキシ樹脂の注入等を行うことで、更なる劣化（鉄筋腐食等）が起こることを防止しており、今後ひび割れが CCb の付着性能低下に影響を与えることはない。

よって、地震起因以外によるひび割れにおいては、CCb のせん断補強効果に影響を与えるひび割れではないことを確認できた。

なお、これらのひび割れについては、ただちに部材の耐力やCCbの付着性能に影響を与えるものではないことから、継続監視のもと計画的に補修を実施していく。

添付 4-1 表 ひび割れ確認結果

CCbを適用した構造物	地震の影響を否定できないひび割れの幅[mm]	地震起因以外によるひび割れの幅[mm]
取水路（漸拡部）	耐震性能に影響するひび割れなし	0.2～0.5 (確認時期：H29.6, H29.8)
原子炉機器冷却海水配管ダクト	同上	ひび割れなし (確認時期：H30.1)
軽油タンク室	同上	0.1～0.4 (確認時期：H30.2)
復水貯蔵タンク基礎	同上	0.2～0.4 (確認時期：H30.1)



添付 4-1 図 CCbによる補強箇所とひび割れ位置の関係
(取水路(漸拡部)の例)

3. コンクリートの圧縮強度試験結果の確認

添付 4-2 表に CCb により耐震補強を行った構造物からコンクリートコアを採取し実施した圧縮強度試験の結果を示す。

圧縮強度の最低値は、全ての構造物において設計基準強度 (20.5N/mm²) 以上であることを確認している。

添付 4-2 表 圧縮強度試験結果

CCbを適用した構造物	設計基準強度 [N/mm ²]	圧縮強度 (最低値) [N/mm ²]
取水路 (漸拡部)	20.5	45.4 (確認時期: H23. 9)
原子炉機器冷却海水配管ダクト		36.3 (確認時期: H30. 2)
軽油タンク室		43.0 (確認時期: H30. 2)
復水貯蔵タンク基礎		32.4 (確認時期: H30. 2)

4. CCb を適用した部材のコンクリートの健全性確認のまとめ

コンクリートのひび割れ状況より、CCb により耐震補強を行った構造物に CCb のせん断補強効果に影響を与えるひび割れがないことを確認した。

また、構造物から採取したコンクリートコアの圧縮強度が、設計基準強度 (20.5N/mm²) 以上であり、CCb のせん断補強効果に悪影響を及ぼす状態にないことを確認した。

以上より、女川 2 号機の CCb により耐震補強を行った構造物の既設コンクリートの状態が、CCb のせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認できた。

ディープビーム的な破壊に対する Ccb 工法の適用性の検討

1. はじめに

CCb 工法は建設技術審査証明報告書において、梁試験体による正負交番載荷試験により性能確認を行っており、その試験体は棒部材 ($a/d^* = 2.78$) を対象としており、ディープビームを対象とした実験は行われていない。

一般に、ディープビーム的な破壊形態が想定される場合のせん断耐力は、棒部材的な破壊形態が想定される場合のせん断耐力よりも大きい。

これらのことから、女川 2 号機において Ccb によりせん断補強を行う部材については、棒部材式によるせん断耐力により照査を行うとともに、照査値は 0.8 程度を目標として Ccb によるせん断補強鉄筋量を算定することにより安全側の配慮をしている。

ここでは、一般的なトラス理論に基づくせん断補強筋の役割や、建設技術審査証明報告書における実験を考察することにより、ディープビーム的な破壊形態に対する Ccb 工法の適用性について検討した。

更に、ディープビームを対象とした模型実験を実施し、女川 2 号機的设计で用いる棒部材式による照査により保守性が確保されることを確認した。

※： a/d ：せん断スパン比

a ：せん断スパン

d ：部材の有効高さ

2. ディープビーム的な破壊に対する Ccb 工法の適用性

ディープビーム的な破壊に対する Ccb 工法の適用性は、「応力の負担機構」、「設計における保守性」及び「ひび割れの影響」の観点に着目し適用性を確認する。

2.1 各破壊形態におけるコンクリート及びせん断補強筋の応力の負担機構

せん断破壊は、せん断スパン比 (a/d) により、斜めひび割れが発生する角度が変わることで「棒部材式で想定する破壊形態」と「ディープビーム式で想定する破壊形態」に分けられる。添付 5-1 表に各破壊形態における応力の負担機構を示す。

ここに、部材のせん断耐力 V_{yd} は、せん断補強筋によるせん断耐力 V_{sd} とコンクリート負担分のせん断耐力 V_{cd} の和で表現される (式 (1))。

$$V_{yd} = V_{sd} + V_{cd} \quad \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

添付 5-1 表に示すとおり、せん断補強筋は、棒部材式で想定する破壊形態、ディープビーム式で想定する破壊形態のいずれもひび割れ面と直交する方向に作用する引張応力に対して抵抗することによりせん断力を負担する (V_{sd}) ものであり、ひび割れ角度によりその効果に差はあるが、せん断力の負担機構は変わらない。

また、コンクリートは、棒部材式で想定する破壊形態の場合は、ひび割れ発生面の骨材のかみ合い作用 V_a 、主鉄筋のダウエル作用 V_d 、圧縮部のせん断力 V_{cz} により

せん断力を負担する。ディープビーム式で想定する破壊形態の場合は、形成されるタイドストラット部（またはタイドアーチ部）のコンクリートの圧縮力 V_{cdd} によりせん断力を負担する。

添付 5-1 表 各破壊形態における応力の負担機構

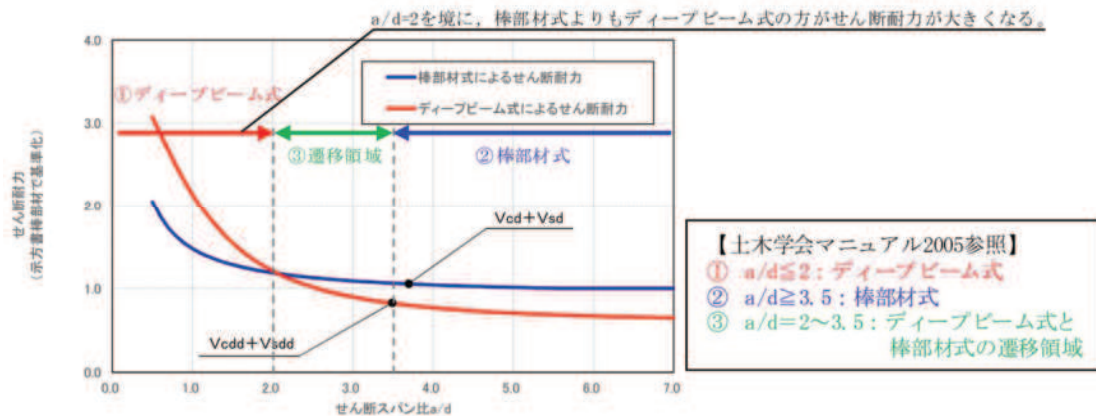
	応力状態	
	棒部材式で想定する破壊形態 (a/d が大きい場合)	ディープビーム式で想定する破壊形態 (a/d が小さい場合)
せん断補強筋が負担するせん断耐力 (V_{sd})		
コンクリートが負担するせん断耐力 (V_{cd})		

2.2 設計における保守性

ここまで述べたように、ディープビーム式におけるコンクリート分のせん断耐力は主に圧縮によりせん断力に抵抗するものであり、棒部材式におけるコンクリート分のせん断力負担分（せん断耐力）よりも大きいことから、せん断スパン比 (a/d) の範囲によって破壊形態とせん断耐力は添付 5-1 図のように分けられ、ディープビーム型の破壊形態が想定される a/d の範囲 ($a/d \leq 2$) において棒部材式により評価を行うことは安全側の評価となる。

また、添付 5-2 表に示す添付資料 2 にて実施した、ディープビーム型の破壊形態となる部材のせん断耐力評価においても、棒部材式よりもディープビーム式のせん断耐力が大きく、棒部材式によりせん断耐力を評価することが安全側の設計であることが確認でき、材料非線形解析の結果も棒部材式よりも大きなせん断耐力となることが確認できる。

女川 2 号機において CCB によりせん断補強を行う部材の設計に当たっては、 a/d がディープビーム式で想定する破壊形態の範囲であっても棒部材式により評価を行うとともに、設計上の配慮として照査値を 0.8 程度とする方針であり、更に裕度が大いものと考えられる。



添付 5-1 図 せん断スパン比とせん断耐力の関係

添付 5-2 表 せん断耐力の比較例 (軽油タンク室)

ケース		せん断耐力 (kN)		
軽油 タンク室	③ - 2 - 1 - B (CCb工法)	せん断耐 力評価式	棒部材式	775
			ディープビーム式	2407
		材料非線形解析		

2.3 ディープビーム的な破壊により発生するひび割れの影響

ディープビーム的な破壊形態のせん断力によるひび割れ角度は、棒部材的な破壊形態において想定するひび割れ角度 (45 度) より大きくなる場合がある。この高角度のひび割れにより、CCb の定着性能に影響を与える可能性があるが、添付資料 3 に示すとおり建設技術審査証明報告書の梁試験から高角度のひび割れが発生している状態においても所要のせん断補強効果が確認できている。

2.1~2.3 に示したとおり、女川 2 号機において CCb を用いる部材については棒部材式を用いてせん断力に対する評価を行うことに加え、照査値を 0.8 程度に抑える設計上の配慮を行うこと及びディープビーム的な破壊形態において発生する可能性のある高角度のひび割れについても実験により CCb の補強効果が発揮されることが確認されていることから、ディープビーム的な破壊形態が想定される部材への適用性は問題ないと考えられる。

3. ディープビーム的な破壊形態に対する CCb のせん断補強効果の確認実験

ディープビーム的な破壊が発生する可能性のある部材への CCb 工法の適用性は、2.2 及び 2.3 に示すとおり問題ないと考えられるが、ディープビーム ($a/d=1.00$ 及び 1.44) を対象とした模型実験を実施し、ディープビームにおいても CCb 工法によりせん断補強効果が発揮され、棒部材式*で算定されるせん断耐力よりも大きなせん断耐力が得られることを確認する。

注記*：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会 2005 年）（以下「土木学会マニュアル 2005」という。）

4. 模型実験

4.1 検討ケース

ディープビームとなる部材への CCb 工法の適用性を確認するため、実験はディープビームの設計式の算定を行った実験諸元*等を参照し、せん断スパン比 (a/d) を 1.44 、せん断補強鉄筋比 (p_w) を 0.20% とするケースを基本ケース (CASE1) とした。

また、せん断スパン比 (a/d) を変更したケース (CASE2)、せん断補強鉄筋比 (p_w) を変更したケース (CASE3)、せん断補強鉄筋の種類 (先施工) を変更したケース (CASE4) 及びせん断補強鉄筋を配置しないケース (CASE5) を実施した。実験ケースの概要及び検討の目的を添付 5-3 表に示す。

注記*：2012 年制定コンクリート標準示方書改訂資料 基本原則編・設計編・施工編 コンクリートライブラリー138 号（土木学会，2013 年）

添付 5-3 表 実験ケースの概要及び検討の目的

	ケースの概要	せん断補強鉄筋の種類	せん断スパン比 (a/d)	せん断補強鉄筋比 (p_w)	検討目的
CASE1	基本ケース	CCb	1.44	0.20	CCb によりせん断補強を行った構造物のうちディーブームとなる部材の適用性を確認
CASE2	せん断スパン比 (a/d) の違い	CCb	<u>1.00</u>	0.20	CASE1 (a/d=1.44) との比較により、せん断スパン比の違いによる CCb のせん断補強効果を確認
CASE3	せん断補強鉄筋比 (p_w) の違い	CCb	1.44	<u>0.55</u>	CASE1 ($p_w=0.20\%$) との比較により、せん断補強鉄筋比の違いによる CCb のせん断補強効果を確認
CASE4	せん断補強鉄筋の種類の違い	先施工 (<u>両端フック</u>)	1.44	0.20	CASE1 との比較により、CCb 工法と先施工(両端フック)との差異を確認
CASE5	せん断補強鉄筋の有無	<u>なし</u>	1.44	0.20	CASE1 との比較により、CCb によるせん断補強効果を確認

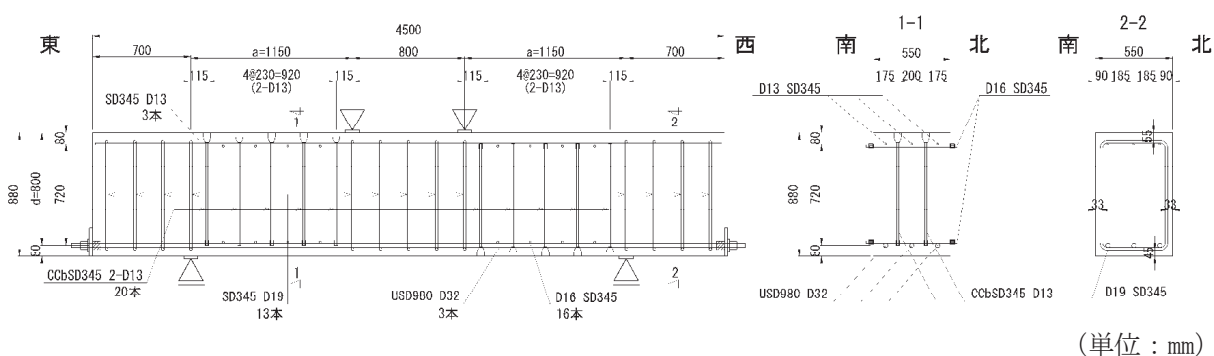
注記：下線は、CASE1（基本ケース）との違いを示す。

4.2 実験概要

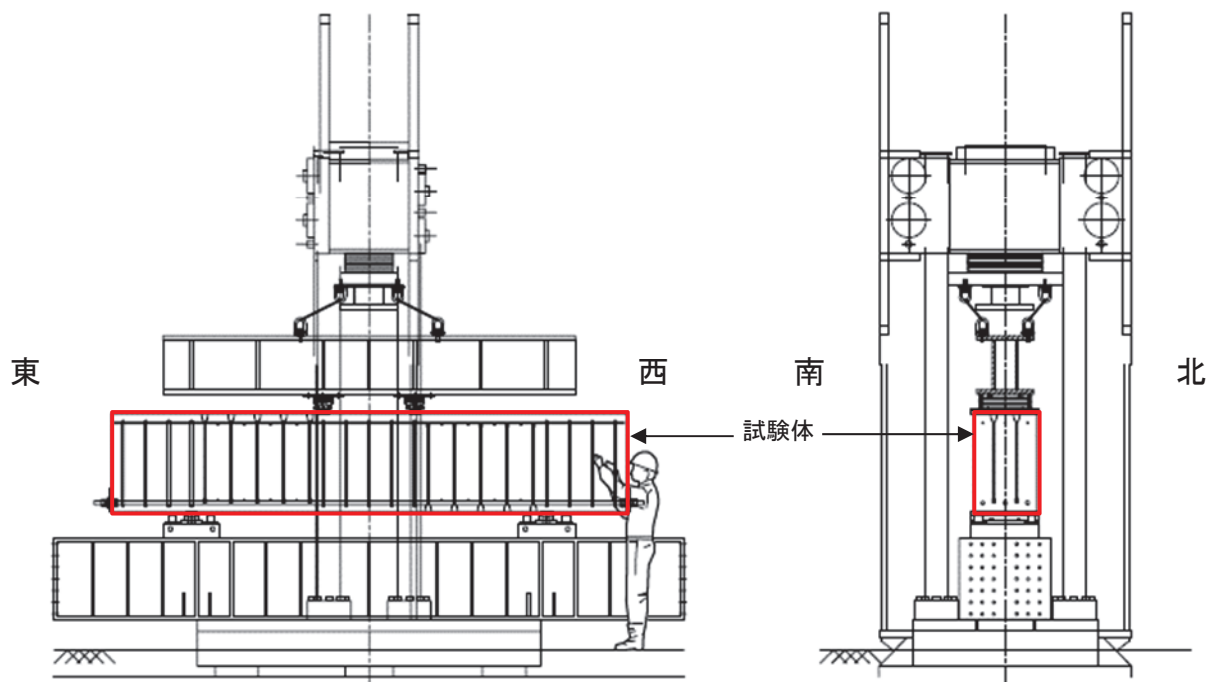
各実験ケースの試験体諸元を添付 5-4 表に、試験体の一例（CASE 1 : No. 1 試験体）を添付 5-2 図に示す。載荷実験は添付 5-3 図に示す 5000kN 圧縮試験機を用いて実施した。載荷は、終局まで漸増載荷を実施し、試験体のひび割れ状況を観察した。

添付 5-4 表 試験体諸元

諸元		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	
試験体	幅	mm	550				
	高さ	mm	880				
	かぶり	mm	80				
	有効高さ	mm	800				
	せん断スパン比		1.44	1.00	1.44	1.44	1.44
主鉄筋	鉄筋径	mm	D32				
	規格降伏強度	N/mm ²	980				
	本数	本	3				
	鉄筋比	%	0.54				
せん断補強鉄筋	種類	—	CCb	CCb	CCb	先施工 (両端フック)	なし
	鉄筋径	mm	D13	D13	D19	D13	—
	規格降伏強度	N/mm ²	345				—
	間隔	mm	230	230	190	230	—
	本数	本	2				—
	鉄筋比	%	0.20	0.20	0.55	0.20	—
コンクリートの設計基準強度		N/mm ²	24				



添付 5-2 図 試験体概要 (CASE1 : No. 1 試験体)

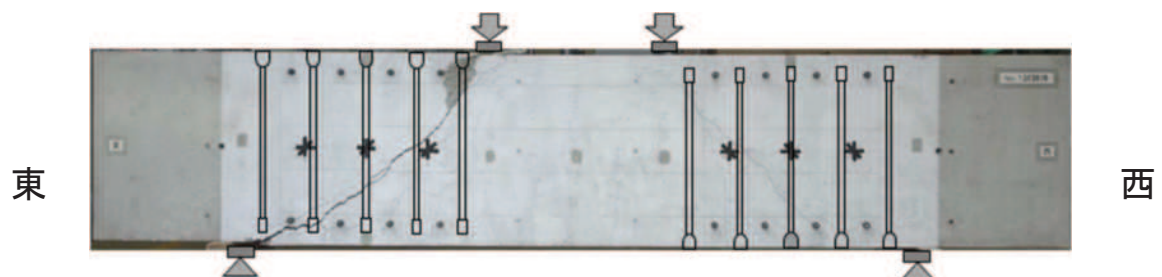


添付 5-3 図 載荷装置概要〔左：正面図（北面），右：側面図（東面）〕

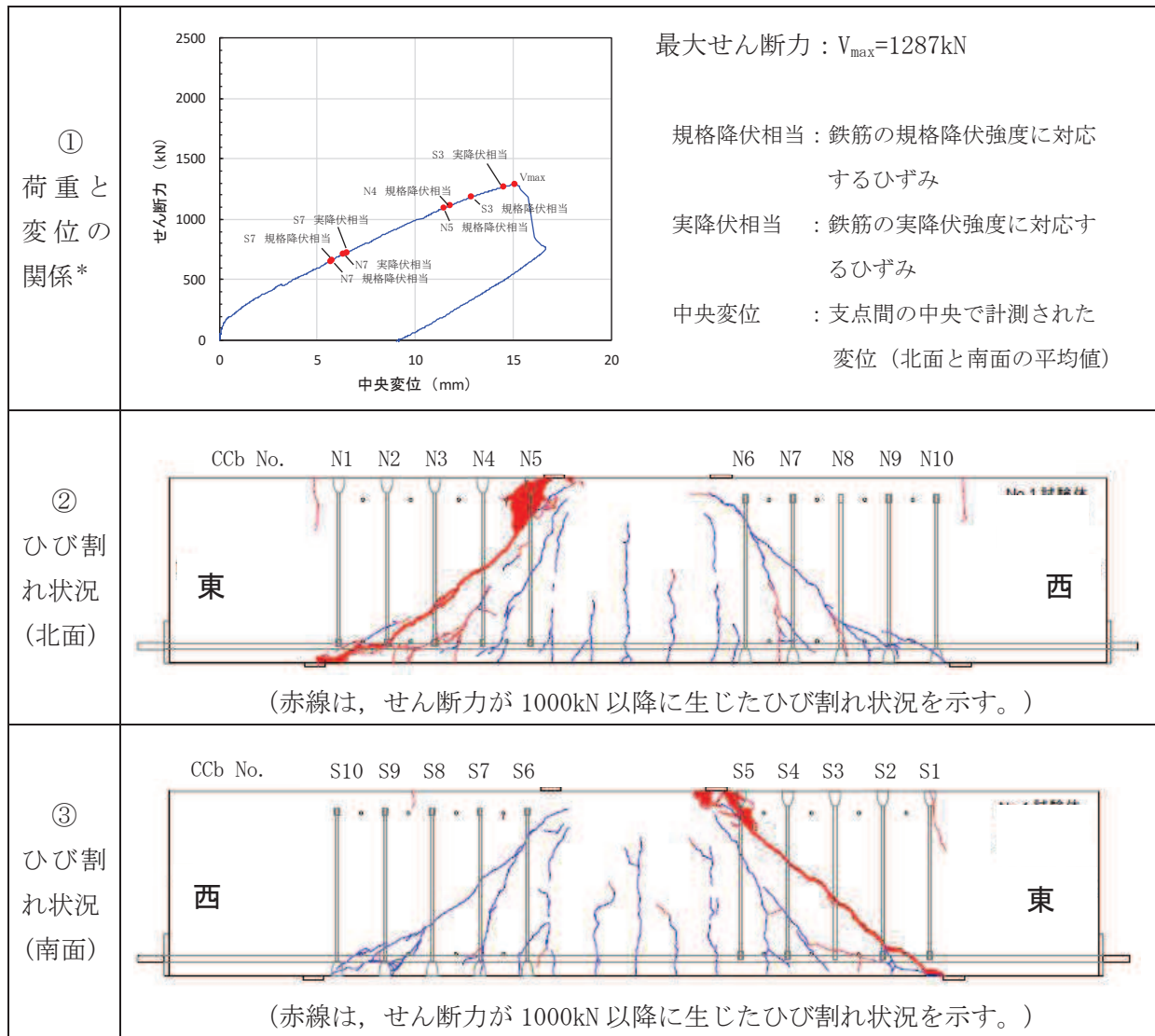
4.3 実験結果

実験終了時のひび割れ発生状況の一例として CASE1（北面）の場合を添付 5-4 図に示す。

また、各ケースの荷重－変位との関係及び実験終了時のひび割れ状況（スケッチ図）を添付 5-5 図～添付 5-9 図に示すとともに、各ケースの破壊性状及びせん断スパン比 (a/d)、せん断補強鉄筋比 (p_w)、せん断補強鉄筋の種類、せん断補強鉄筋の有無による影響を以下に示す。

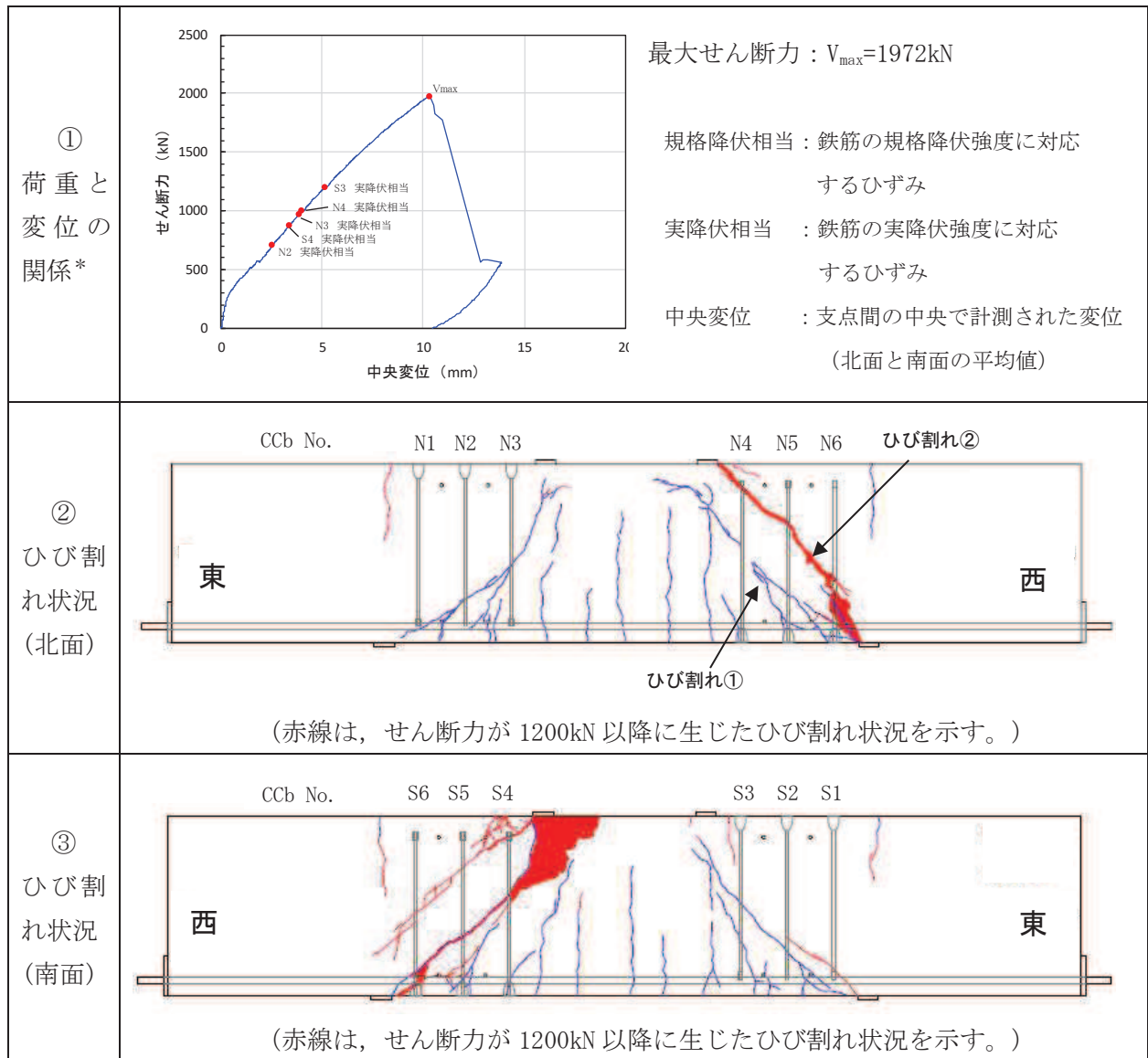


添付 5-4 図 実験終了時のひび割れ発生状況（CASE1：北面）
 (写真中の CCb は、ひび割れ発生位置と比較するため試験体側面に図示したもの)



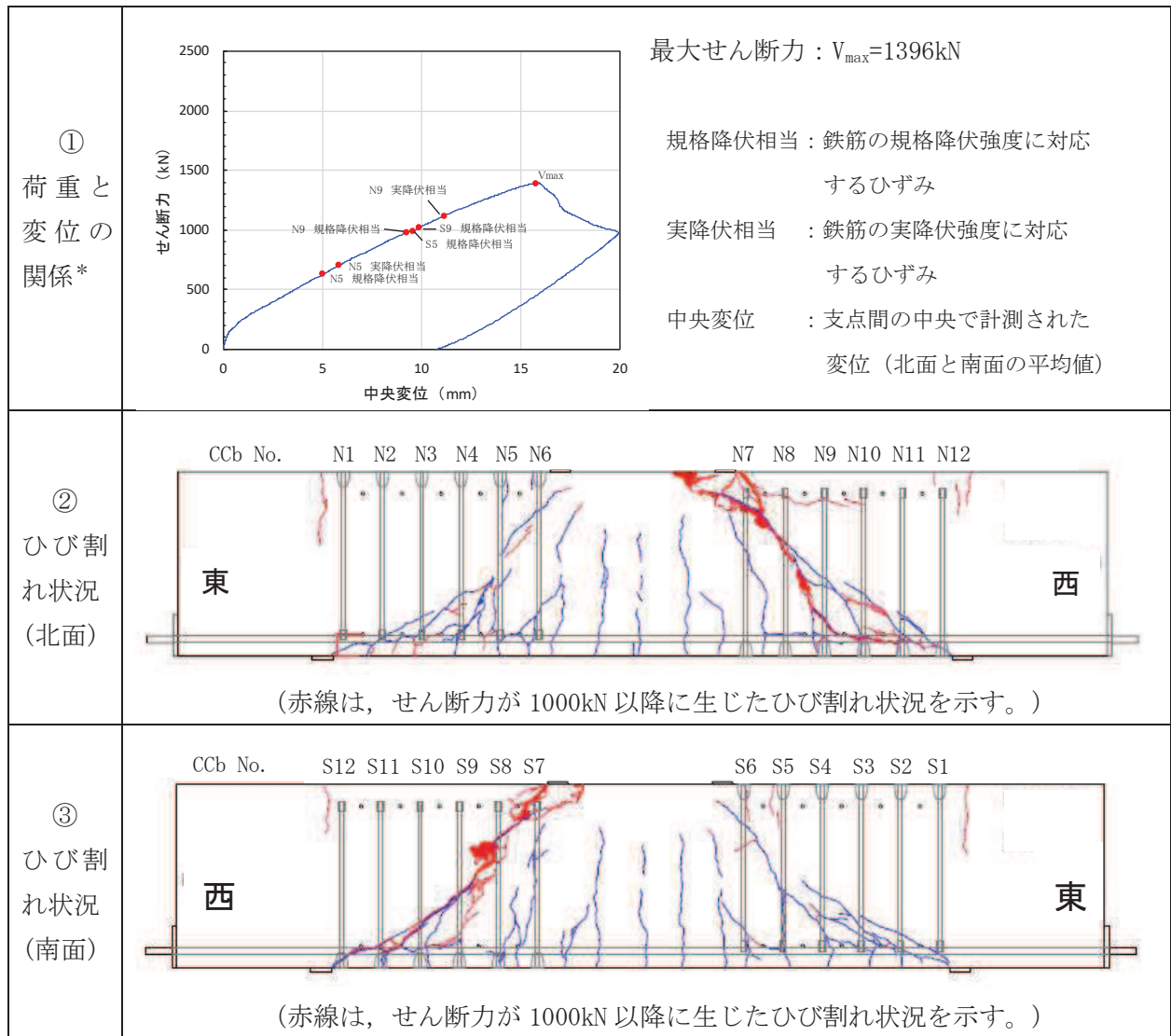
注記*：グラフ中の記号及び番号（N7，S3等）は、ひび割れ状況（②・③）に示す北面及び南面それぞれのCCbのNo.を表す。

添付5-5図 CASE1 (CCb, $a/d=1.44$, $p_w=0.20\%$)
(荷重-変位の関係及び実験終了時のひび割れ状況)



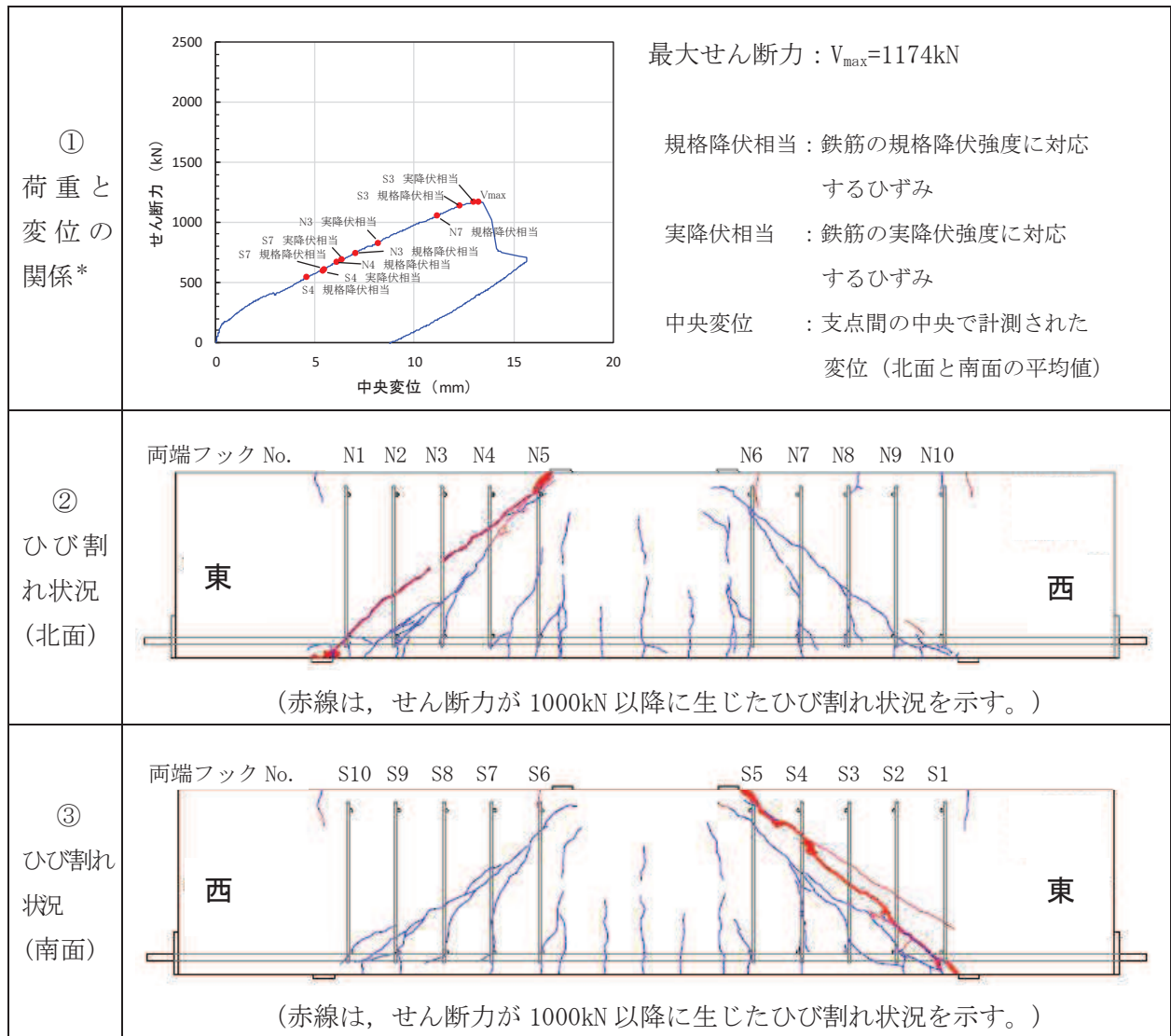
注記*：グラフ中の記号及び番号 (N2, S3 等) は、ひび割れ状況 (②・③) に示す北面及び南面それぞれの CCb の No. を表す。

添付 5-6 図 CASE2 (CCb, $a/d=1.00$, $p_w=0.20\%$)
(荷重-変位の関係及び実験終了時のひび割れ状況)



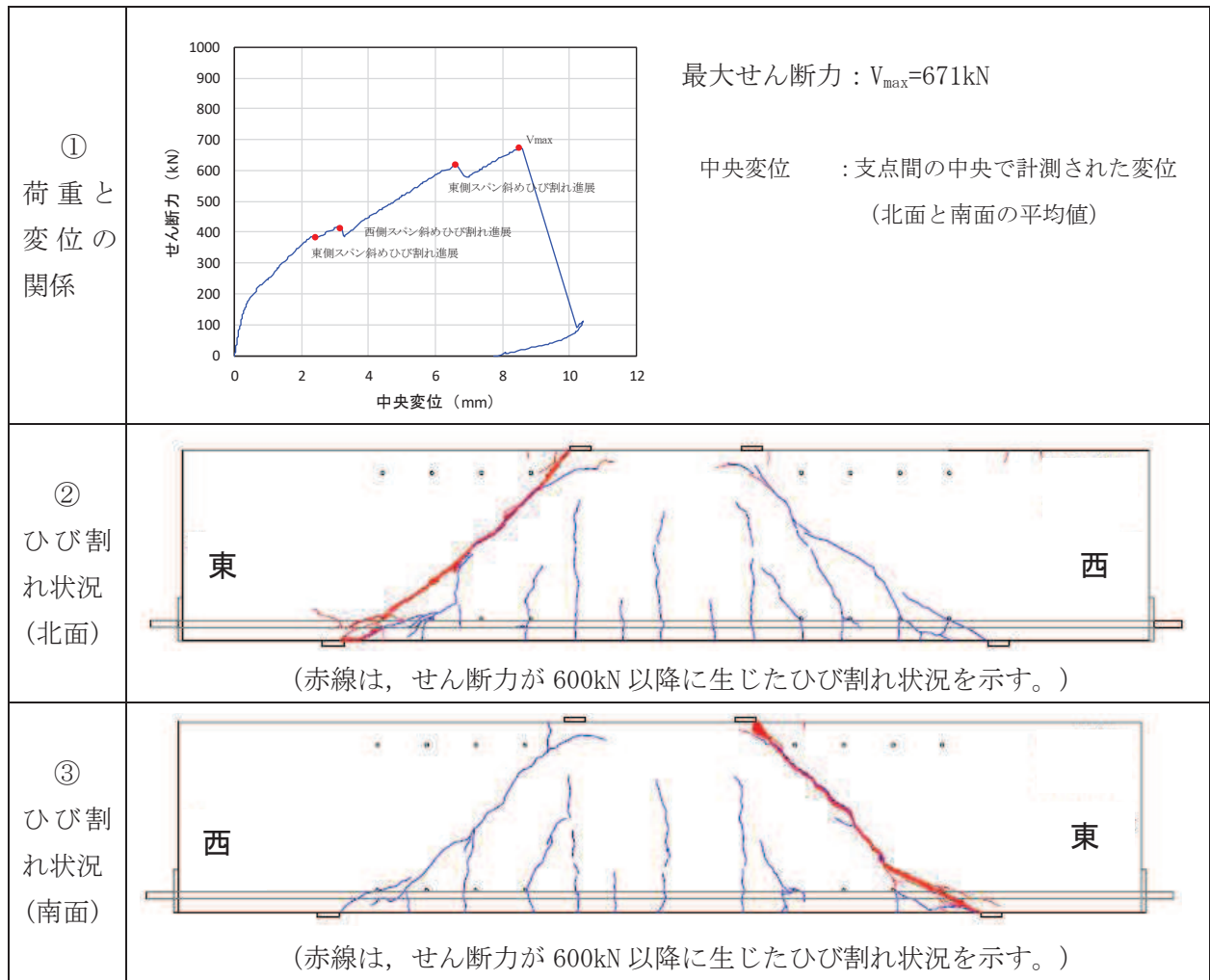
注記*：グラフ中の記号及び番号（N5，S9 等）は、ひび割れ状況（②・③）に示す北面及び南面それぞれの Ccb の No. を表す。

添付 5-7 図 CASE3 (Ccb, $a/d=1.44$, $p_w=0.55\%$)
(荷重－変位の関係及び実験終了時のひび割れ状況)



注記*：グラフ中の記号及び番号 (N7, S4 等) は、ひび割れ状況 (②・③) に示す北面及び南面それぞれのせん断補強筋 (先施工 (両端フック) の No. を表す。

添付 5-8 図 CASE4 (先施工 (両端フック), $a/d=1.44$, $p_w=0.20\%$)
(荷重-変位の関係及び実験終了時のひび割れ状況)



添付 5-9 図 CASE5 (せん断補強鉄筋なし, $a/d=1.44$)
(荷重-変位の関係及び実験終了時のひび割れ状況)

(1) 基本ケース (CASE1)

CASE1 については、東側スパンに斜めひび割れが進展し、その後安定してせん断力が上昇し、最大せん断力 1287kN で東側スパンの斜めひび割れが載荷点端部に向かって進展し、急激に耐力が低下した。また、載荷点近傍には、コンクリートの圧壊も確認された。両せん断スパンのいずれの CCb のひずみも、荷重の増加とともに規格降伏相当のひずみ（鉄筋の規格強度に対応するひずみ）に達しており、CCb がせん断力を負担し補強効果を発揮している。

なお、ディープビームに発生する斜めひび割れは、一般に、載荷点と支点を結ぶ圧縮ストラットの下方に発生するが、実験で発生した斜めひび割れの位置からも、ディープビームの破壊機構が生じていることが推察される。

(2) せん断スパン比 (a/d) の影響 (CASE2)

CASE2 は CASE1 よりもせん断スパン比が小さいケースである (CASE1 : $a/d=1.44$, CASE2 : $a/d=1.00$)。CASE2 において西側スパンのひび割れの進展（北面）は、添付 5-6 図のひび割れ①が主たる斜めひび割れとして進展し、最大せん断力 1972kN に達した後、ひび割れ②が急激に進展することで耐力が低下した。また、南面に着目すれば、西側スパンの載荷点近傍でコンクリートの圧壊が確認された。両せん断スパンの載荷点近傍に配置した CCb は、いずれも実降伏相当のひずみ（鉄筋の実降伏強度に対応するひずみ）に達しており、CCb がせん断力を負担し補強効果を発揮している。

なお、CASE2 はせん断スパン比が小さいため、CASE1 と比較して、コンクリートの圧縮応力が卓越していると考えられ、実験でも、西側せん断スパンの載荷点近傍ではコンクリートの圧壊が確認されており、圧壊により終局を迎えている。

(3) せん断補強鉄筋比 (p_w) の影響 (CASE3)

CASE3 は CASE1 よりもせん断補強鉄筋比 (p_w) が大きいケースである (CASE1 : $p_w=0.20\%$, CASE3 : $p_w=0.55\%$)。CASE3 については、安定してせん断力が上昇したが、最大せん断力 1396kN に達し、西側スパンの載荷点近傍でコンクリートが圧壊し、耐力が低下した。せん断力が 600kN を超えた段階から CCb は、荷重の増加とともに規格降伏相当のひずみ、実降伏相当のひずみに順次達しており、CCb がせん断力を負担し補強効果を発揮している。

なお、せん断補強鉄筋が多く配置されたことによりコンクリートの局所的な破壊が抑制され、CASE2 と同様に、コンクリートの圧壊が終局の主要因となり、西側せん断スパンの載荷点近傍の圧壊により終局を迎えている。

(4) せん断補強鉄筋の種類の影響 (CASE4)

CASE1 は Ccb を用いているのに対し、CASE4 は先施工（両端フック）のせん断補強鉄筋を配置したケースである。

CASE4 については、東側スパンに斜めひび割れが進展し、その後安定してせん断力が上昇し、最大せん断力 1174kN で東側スパンの斜めひび割れが載荷点端部に向かって進展することで耐力が低下した。また、載荷点近傍には、コンクリートの圧壊も確認された。CASE1 と CASE4 では、斜めひび割れ発生の荷重レベルや、ひび割れ発生状況に大きな違いは見られなかった。また、最大荷重を比較すれば、ほぼ同程度の補強効果が得られており、せん断挙動に大きな違いは見られなかった。

(5) せん断補強鉄筋の有無の影響 (CASE5)

CASE1 はせん断補強鉄筋（Ccb）を用いているのに対し、CASE5 はせん断補強鉄筋を配置しないケースである。

CASE5 については、せん断力が 400kN 前後で斜めひび割れの発生により荷重が一時低下した。その後、安定してせん断力が上昇したが、せん断力が約 600kN で斜めひび割れが更に進展することで再び荷重が低下し、最大せん断力 671kN に達した後、ひび割れが載荷点端部に向かって進展することにより耐力が低下した。

CASE5 に対して、CASE1 の最大荷重は約 1.9 倍となっており、せん断補強鉄筋による補強効果が確認できる。

また、せん断補強鉄筋を配置したケース（CASE1～CASE3 は Ccb、CASE4 は両端フック）は、斜めひび割れが発生した後も、せん断力が安定して上昇しており、せん断補強鉄筋がせん断力を負担して補強効果を発揮しているのに対し、CASE5 は、斜めひび割れが進展するたびに荷重低下が起きている。

以上、CASE1～CASE4 については、いずれの試験体も斜めひび割れの発生後もせん断力の上昇が確認され、載荷点近傍においてディープビーム的な破壊形態であるコンクリートの圧壊により耐力の低下が確認された。また、斜めひび割れの発生位置は圧縮ストラットの下方で卓越していた。

5. 土木学会マニュアル 2005 のせん断耐力式との比較

せん断破壊の形態として、棒部材の場合は斜め引張破壊（せん断力の卓越する箇所に発生する、斜め引張力に伴う斜めひび割れの進展により破壊する形態）を示すのに対し、ディープビームとなる部材の場合はせん断圧縮破壊（支点と載荷点を結ぶ直線付近に斜めひび割れが発生し、コンクリートが圧縮破壊する破壊形態）を示す。

せん断圧縮破壊（ディープビーム的な破壊形態）が想定される場合のせん断耐力は、斜め引張破壊（棒部材的な破壊形態）が想定される場合のせん断耐力より、一般に大きいことから、女川 2 号機において、CCb によりせん断補強を行う部材に関しては、安全側への配慮として、せん断スパン比 (a/d) がディープビーム式で想定する破壊形態の範囲内でも棒部材式により照査を行うこととしている。

ここでは、ディープビームにおける CCb のせん断補強効果を確認するため、土木学会マニュアル 2005 のせん断耐力評価式（棒部材式）に基づくせん断耐力と本実験による最大荷重の比較を行った。また、実験結果とせん断耐力評価式（ディープビーム式）との比較を行い、CCb を用いた場合のディープビーム式による評価の可能性について検討した。

添付 5-5 表に CCb を用いてせん断補強を行った場合の実験ケース（CASE1～CASE3）によるせん断耐力とせん断耐力評価式との比較を示す。いずれのケースについても、実験値は棒部材式に基づく耐力値を上回る結果となった。また、ディープビーム式との比較については、せん断スパン比やせん断補強鉄筋比の違いにより裕度に差があるものの、実験値はディープビーム式に基づく耐力値と同等かそれ以上の結果となった。

添付 5-5 表 土木学会マニュアル 2005 のせん断耐力評価式と実験結果の比較

No	ケースの概要	せん断スパン比 (a/d)	せん断補強鉄筋比 (p_w)	せん断耐力 (kN)		
				実験	せん断耐力評価式*1	
					棒部材式*2	ディープビーム式*2
CASE1	基本ケース	1.44	0.20	1287	744 (1.73)	1051 (1.22)
CASE2	せん断スパン比 (a/d) の違い	1.00	0.20	1972	857 (2.30)	1461 (1.35)
CASE3	せん断補強鉄筋比 (p_w) の違い	1.44	0.55	1396	1226 (1.14)	1433 (0.97)

注記*1：土木学会マニュアル 2005 による評価式

*2：各ケースの括弧内の数値は、せん断耐力評価式によるせん断耐力に対する実験値の比率を示す。

6. ディープビームにおけるCCb工法の適用性

本実験により、ディープビームについてもCCbにより十分なせん断補強効果が得られることが確認できた。

また、実験値から得られたせん断耐力は、棒部材式で算定されるせん断耐力を上回り、せん断スパン比 (a/d) がディープビーム式で想定する破壊形態の範囲内でも、棒部材式を用いることの保守性を確認することができた。

面内荷重と面外荷重が作用する部材への Ccb 工法の適用性の検討

1. はじめに

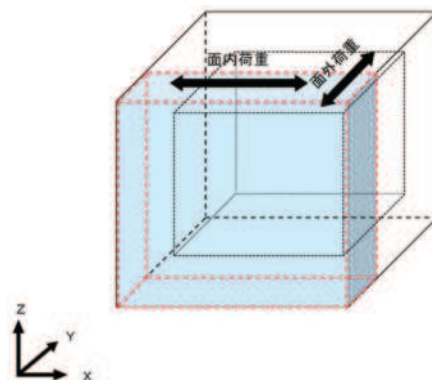
女川 2 号機において Ccb によりせん断補強を行った部材には、面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材があることから、荷重が同時に作用する場合でも Ccb のせん断補強効果が損なわれないことを確認する。三次元ソリッド要素で面部材をモデル化し、面外荷重として等分布荷重を作用させた場合の Ccb の状態が、更に面内せん断変形を作用させた時においても変化が生じず、面内荷重は Ccb には影響のないことを数値解析により確認した。

2. 面内荷重と面外荷重が作用する部材への Ccb 工法の適用性

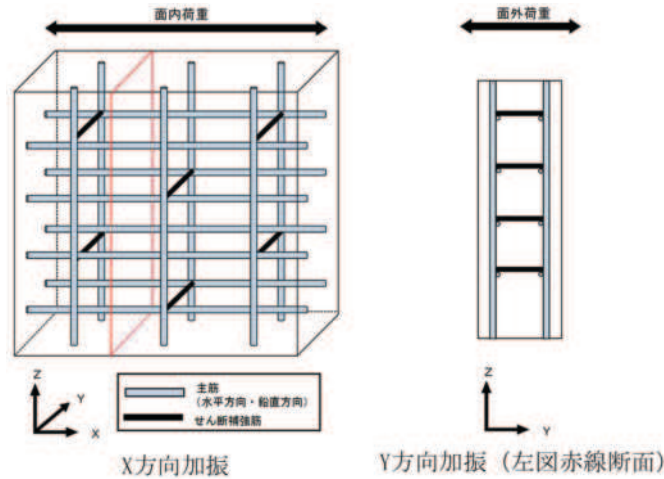
面内荷重と面外荷重が作用する部材への Ccb 工法の適用性については、「設計の考え方」及び「ひび割れの影響」の観点に着目し適用性を確認する。

2.1 面内荷重及び面外荷重に対する設計の考え方

女川 2 号機において Ccb を適用する構造物のうち面内荷重と面外荷重を同時に受ける部材の設計に当たっては、面内荷重は主筋及びコンクリートで負担し、面外荷重は主筋、せん断補強筋及びコンクリートで負担する設計としている。そのため、部材に面内荷重と面外荷重が同時に作用しても Ccb は面内荷重を負担させない設計としていることから、Ccb への影響はなく負担する荷重の観点からは適用性に問題はない（添付 6-1 図、添付 6-2 図及び添付 6-1 表参照）。



添付 6-1 図 三次元モデルへ作用する荷重の概念図



添付 6-2 図 X 方向・Y 方向の壁部材の概要配筋状況

添付 6-1 表 面内荷重・面外荷重に対する設計の考え方

	面内荷重 (X方向加振)	面外荷重 (Y方向加振)
主筋※	○	○
せん断補強筋	×	○

○：荷重を負担する

×：荷重を負担しない

※：主筋は降伏ひずみ以下の範囲で使用する。

2.2 面内荷重により発生するひび割れの影響

面内荷重が作用することにより、部材を貫通するひび割れ（面内せん断力によるひび割れ）が発生する可能性があるが、女川 2 号機においては Ccb を採用する面部材については、面内せん断ひずみを $2,000\mu$ 以下とすることや、主筋のひずみが降伏ひずみ以下で用いることなどの使用制限を設けることとしており、ひび割れの発生が限定的な範囲で発生することとしている。

なお、面内せん断力によるひび割れにより、Ccb の定着性能に影響を与える可能性があるが、添付資料 3 に示すとおり建設技術審査証明報告書の梁試験より、同等のひび割れ状態においてもせん断補強効果を確認していることから、Ccb 工法の適用性に問題はない。

3. 面内荷重と面外荷重が作用する部材への Ccb 工法の適用性に関する数値解析による検討

面内荷重と面外荷重が作用する部材への Ccb 工法の適用性は、2.1 及び 2.2 より Ccb への悪影響はなく問題ないと考えられるが、面内荷重と面外荷重が作用する面部材を対象とした数値解析（三次元静的材料非線形解析（解析コード：COM3））により、Ccb への影響を確認する。

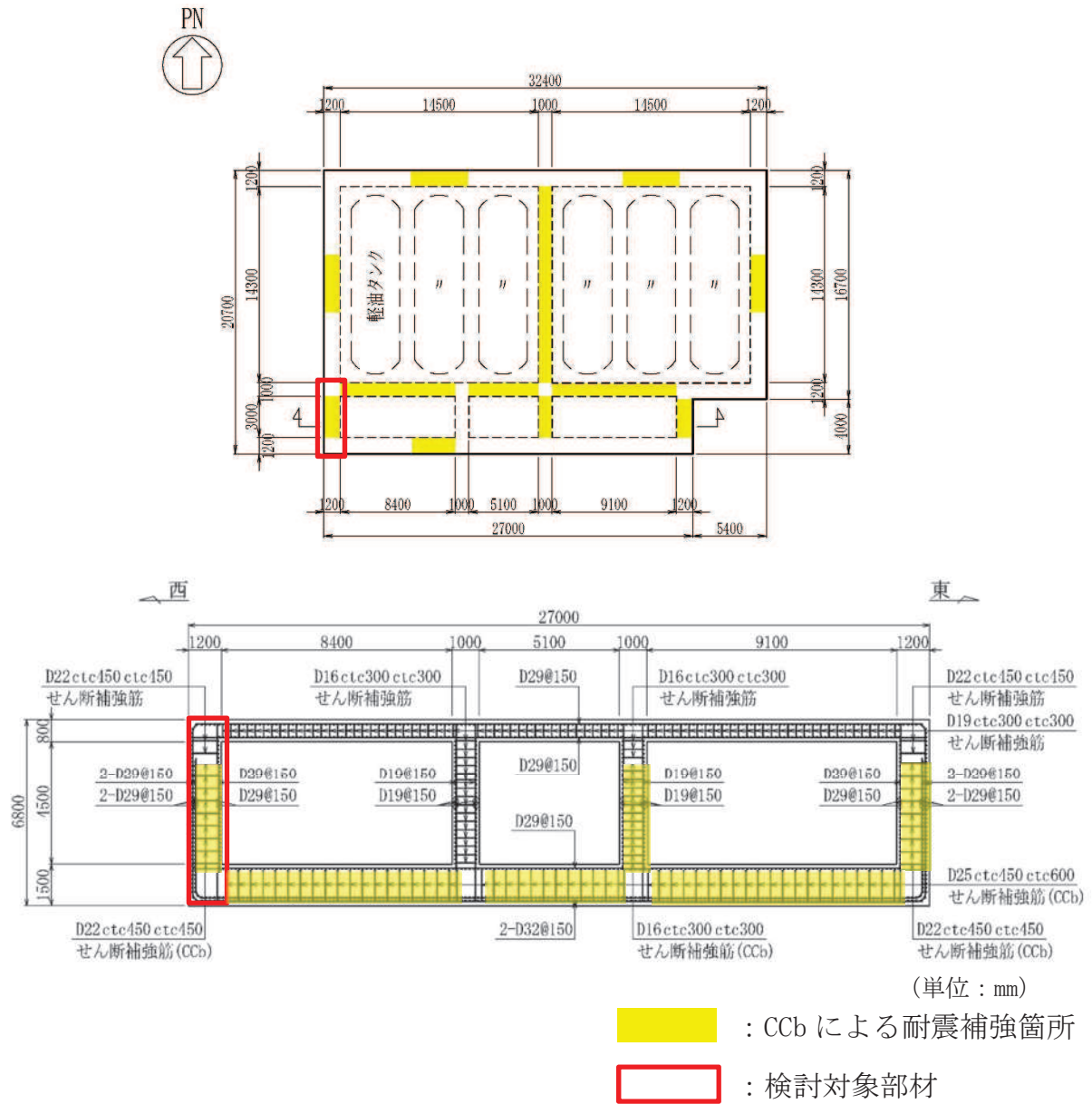
4. 検討概要

検討対象とする面部材は、箱形構造物において、面外荷重として地震時土圧が作用する側壁のうち、Ccb のみ（先施工せん断補強筋がない）でせん断補強を行う軽油タンク室の側壁とした。

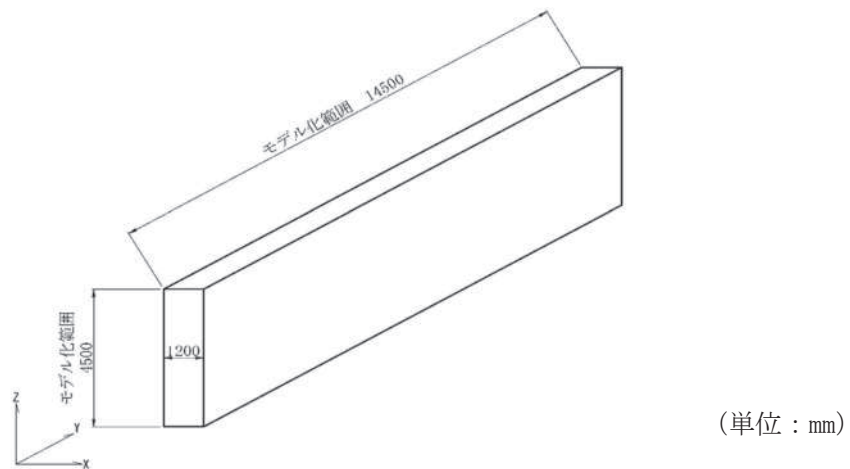
軽油タンク室の平面図及び断面図（検討対象部材）を添付 6-3 図に、モデル概念図を添付 6-4 図に示す。対象とする面部材は、幅 3m、高さ 4.5m、厚さ 1.2m であり、D22 の Ccb が施工されている壁部材である。

本検討は、等分布の面外荷重が作用している面部材に対し、面内荷重を作用させた場合に、Ccb に生じる軸ひずみや、面内せん断ひび割れの影響を確認することにより行う。

また、先施工のケースについても同様の数値解析を実施し、Ccb 工法との比較を行う。



添付 6-3 図 軽油タンク室の平面図及び断面図



添付 6-4 図 モデル概念図

(参考) 6-添 6-4

5. 解析モデル及び荷重条件

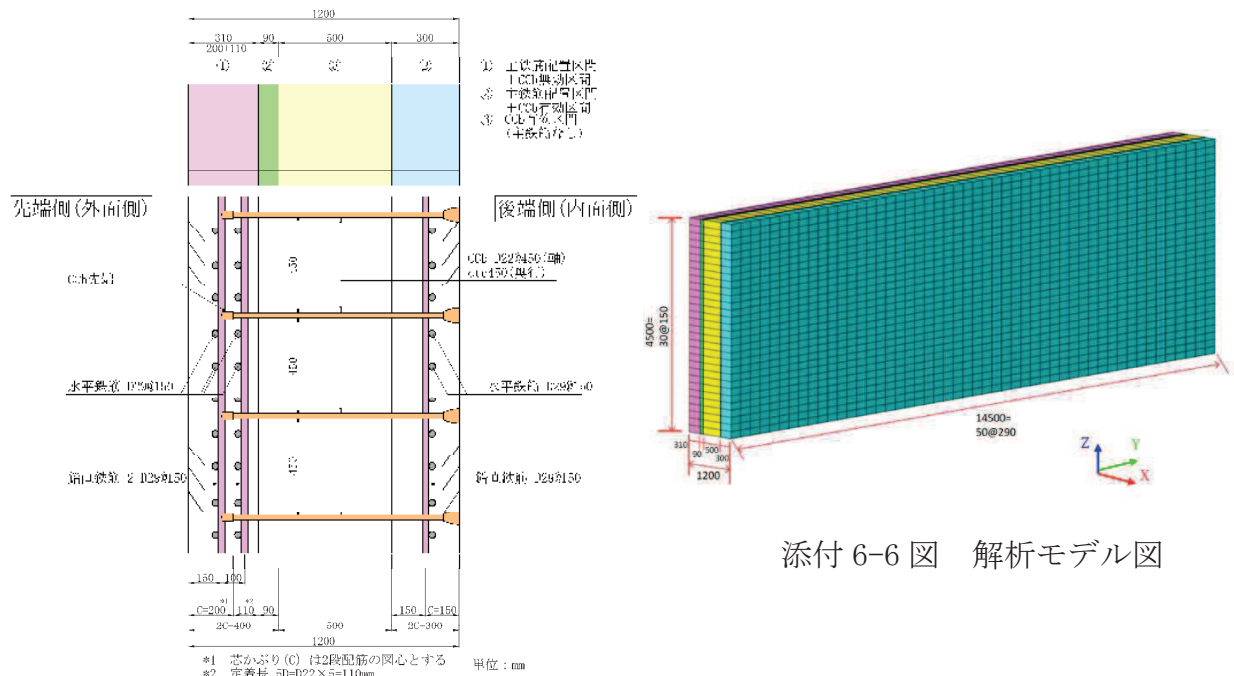
5.1 解析モデル

解析対象部材の断面図（配筋モデル概要図）を添付 6-5 図に、解析モデル図を添付 6-6 図に示す。厚さ方向（X 方向）のモデル化は、主鉄筋位置や Ccb の鉄筋無効区間のモデル化を考慮して要素分割を行った。具体的には、Ccb 後端側（内面側）の主鉄筋の芯かぶりは 150 mm であり、芯かぶりの 2 倍の 300 mm を主鉄筋が配置される要素高さとした。Ccb 先端側（外面側）の主鉄筋は、1 段目が芯かぶり 150 mm、2 段目が芯かぶり 250 mm の 2 段配筋となっており、図心位置かぶり $[200 \text{ mm} = (150 \text{ mm} + 250 \text{ mm}) / 2]$ の 2 倍の 400 mm を主鉄筋が配置される要素高さとした。このうち、Ccb 先端側の無効区間は、主鉄筋かぶり（200 mm）と Ccb 必要定着長（ $5D = 5 \times 22 \text{ mm} = 110 \text{ mm}$ ）の合計（310 mm）として設定した。

以上のとおり、厚さ方向（X 方向）に対しては、外面側から内面側に向かい、「①主鉄筋配置区間+Ccb 無効区間」、「②主鉄筋配置区間+Ccb 有効区間」、「③主鉄筋なし+Ccb 有効区間」、「④主鉄筋配置区間+Ccb 有効区間」の合計 4 分割とした。

幅方向（Y 方向）のモデル化は、面内荷重を載荷させる際に部材全体に面内せん断変形が作用し、均一に斜め 45 度のひび割れを発生させることを目的に部材を幅方向に延長している。幅方向のモデル長として、軽油タンク室の水平方向の最大支間長である 14.5m を採用した。

先施工のせん断補強鉄筋に対するモデル化は、厚さ方向に対して、せん断補強筋の設置区間全体を有効としてモデル化する以外は、Ccb と同様である。



添付 6-5 図 配筋モデル概要図

添付 6-6 図 解析モデル図

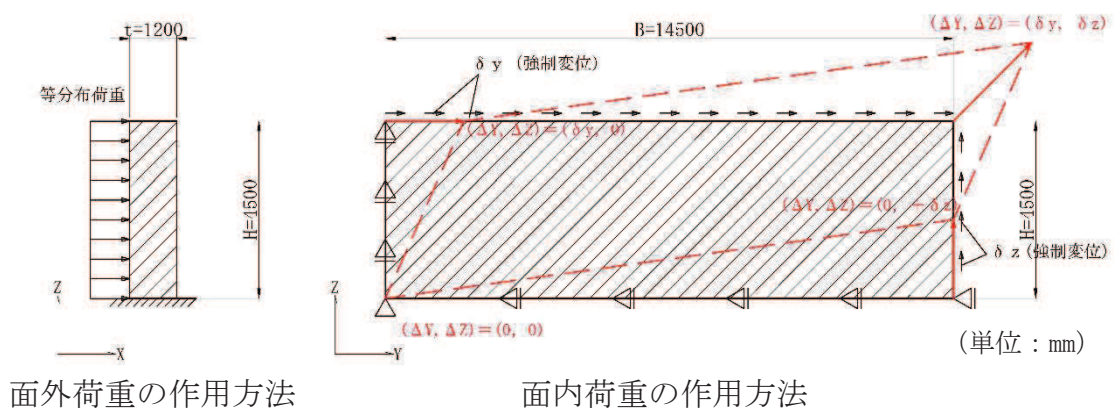
5.2 荷重条件

面外荷重と面内荷重が部材に同時に作用した状況を想定するため、まず、面外荷重のみを作用させた状態を再現し (STEP1), その状態に対して面内荷重を漸増载荷する (STEP2)。荷重の作用概念図を添付 6-7 図に示す。

面外荷重は、底面を固定境界とし外面側から等分布荷重を作用させる。面外荷重は部材が破壊する前かつ面外荷重の効果が表れるように、ピーク時相当荷重*の 0.8 程度に相当する荷重とした。

面内荷重 (面内せん断力) は、解析モデル 4 辺に強制変位を与え、モデル全体に一樣なせん断変形を作用させた。作用させる変形は、女川の Ccb 補強部材で見込まれている設計応答値 (500 μ 程度) に十分な余裕を見込んだ値として 750 μ まで作用させた。

注記* : 荷重漸増解析 (荷重制御) による P- δ 関係から、変位が急増するときの荷重



添付 6-7 図 面外荷重及び面内荷重の作用概念図

6. 解析結果

各荷重状態におけるせん断補強鉄筋の応答を確認するため、せん断補強鉄筋の軸方向のひずみ (ϵ_x) を確認する。

せん断補強鉄筋の軸方向のひずみは、面外荷重に対するせん断補強としての効果が顕著に表れる位置に着目し、整理する。着目位置として、モデル高さ方向 (Z 方向) は面外せん断力の照査位置である解析モデル下端から部材厚の 1/2 (600mm) の位置とし、厚さ方向 (X 方向) については、面外荷重による斜めひび割れを生じる断面中央位置とした。なお、幅方向 (Y 方向) は解析モデル中央とする。着目要素を添付 6-8 図に示す。

各解析ステップにおけるせん断補強鉄筋の軸方向 (X 方向) のひずみの進展状況を添付 6-9 図に示す。

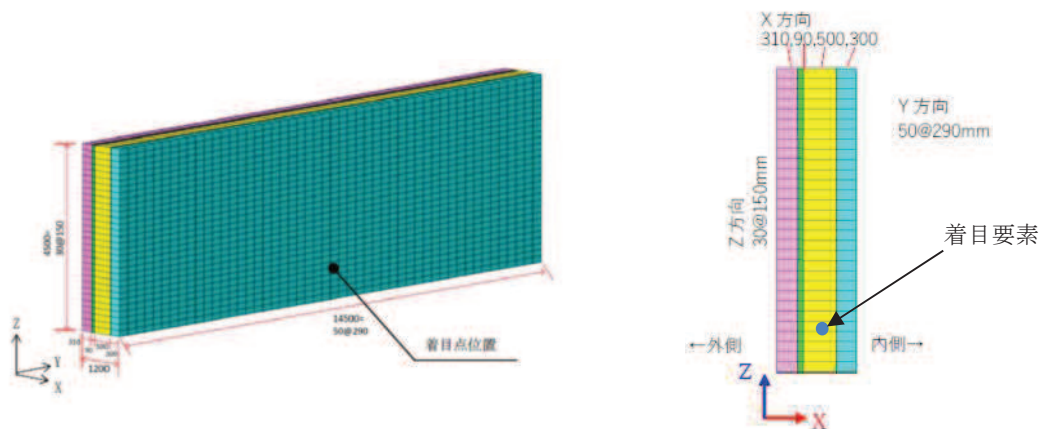
面外荷重作用時の初期段階では、せん断補強鉄筋の軸方向ひずみに変化が見られな

いが、面外荷重の増加に伴い斜めひび割れが生じ、斜めひび割れ発生後は面外荷重の増加とともに単調増加しており、せん断補強鉄筋が面外荷重に対してせん断補強効果を発揮していることが確認できる。

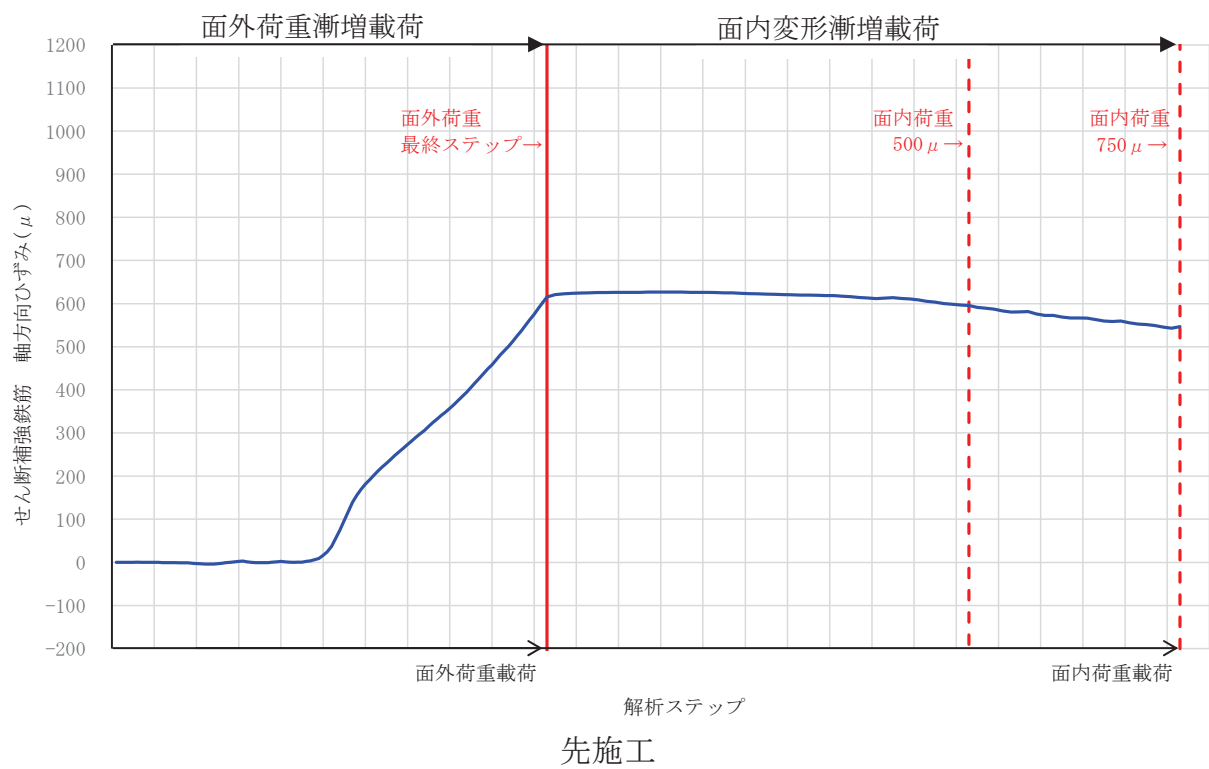
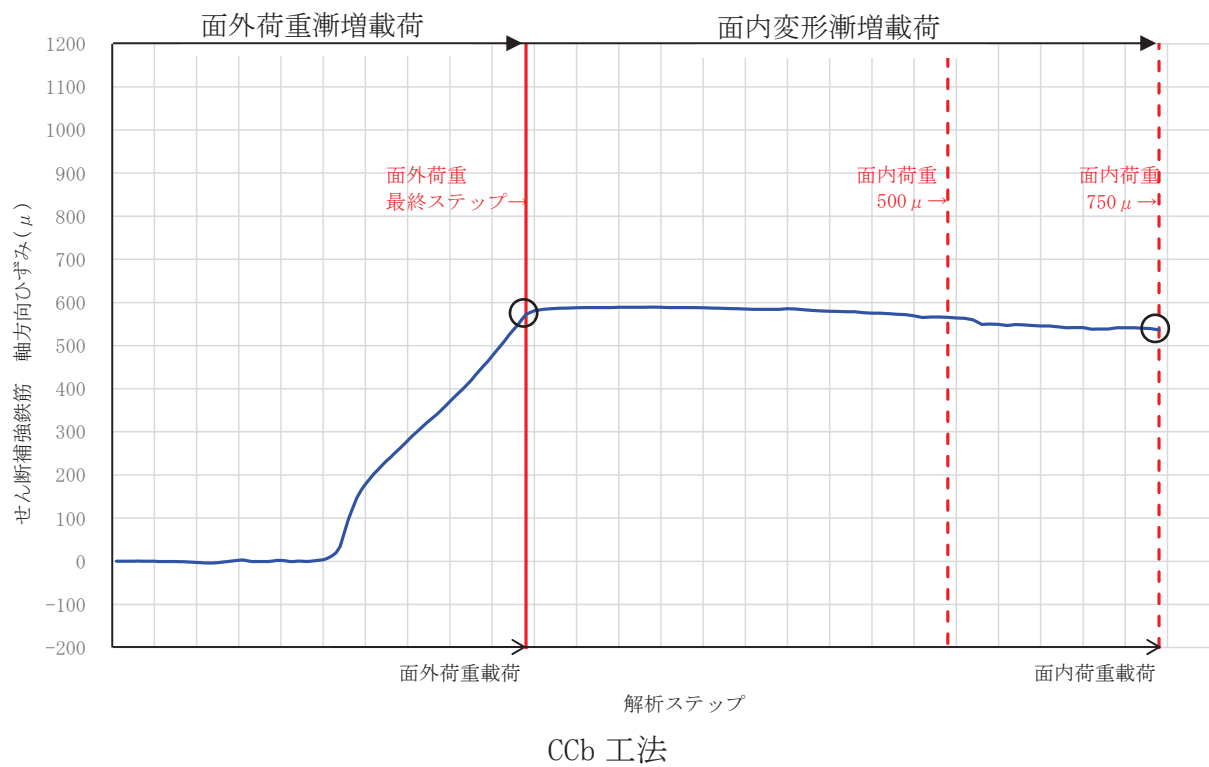
面外荷重の載荷完了時点（面外荷重最終ステップ）では、ひずみレベルは 570μ 程度で、降伏ひずみ (1725μ (SD345)) 以下であり、せん断補強鉄筋の降伏には至っていない状態である。面外荷重の載荷完了時点（面外荷重最終ステップ）でのひび割れ図を添付 6-10 図に示す。添付 6-10 図のとおり、面外荷重が作用する外面側では、曲げひび割れが生じ、断面中央位置では斜めひび割れが確認されている。

その後、面内荷重作用時（面内せん断ひずみ 750μ 程度まで）には、せん断補強鉄筋の軸方向ひずみは、ほぼ一定となり、面内荷重の増加は、せん断補強鉄筋の軸方向ひずみに影響を与えない結果となった。なお、添付 6-11 図の面内荷重作用時における設計荷重に余裕を見込んだ値 (750μ) における段階での面内せん断ひずみ分布図に示すように、せん断ひずみに一部濃淡はあるが、概ね部材全体に一様に面内荷重が作用していることが確認できる。

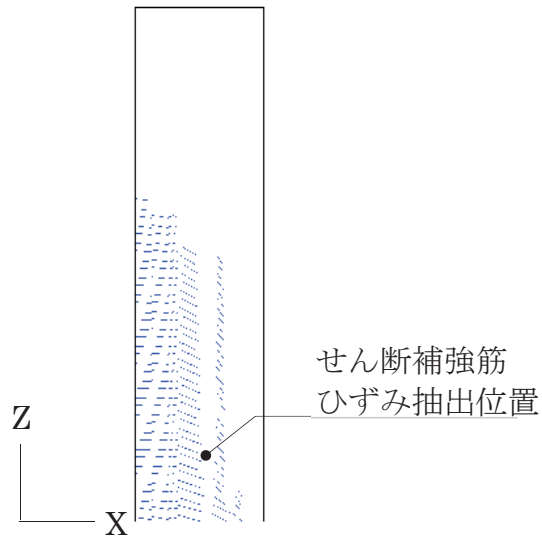
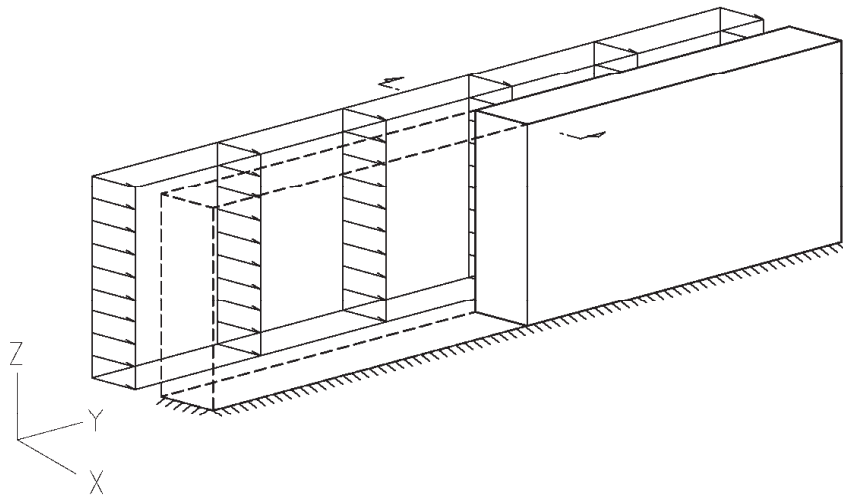
先施工の場合にも、CC b 工法とほぼ同じ結果であることを確認している。



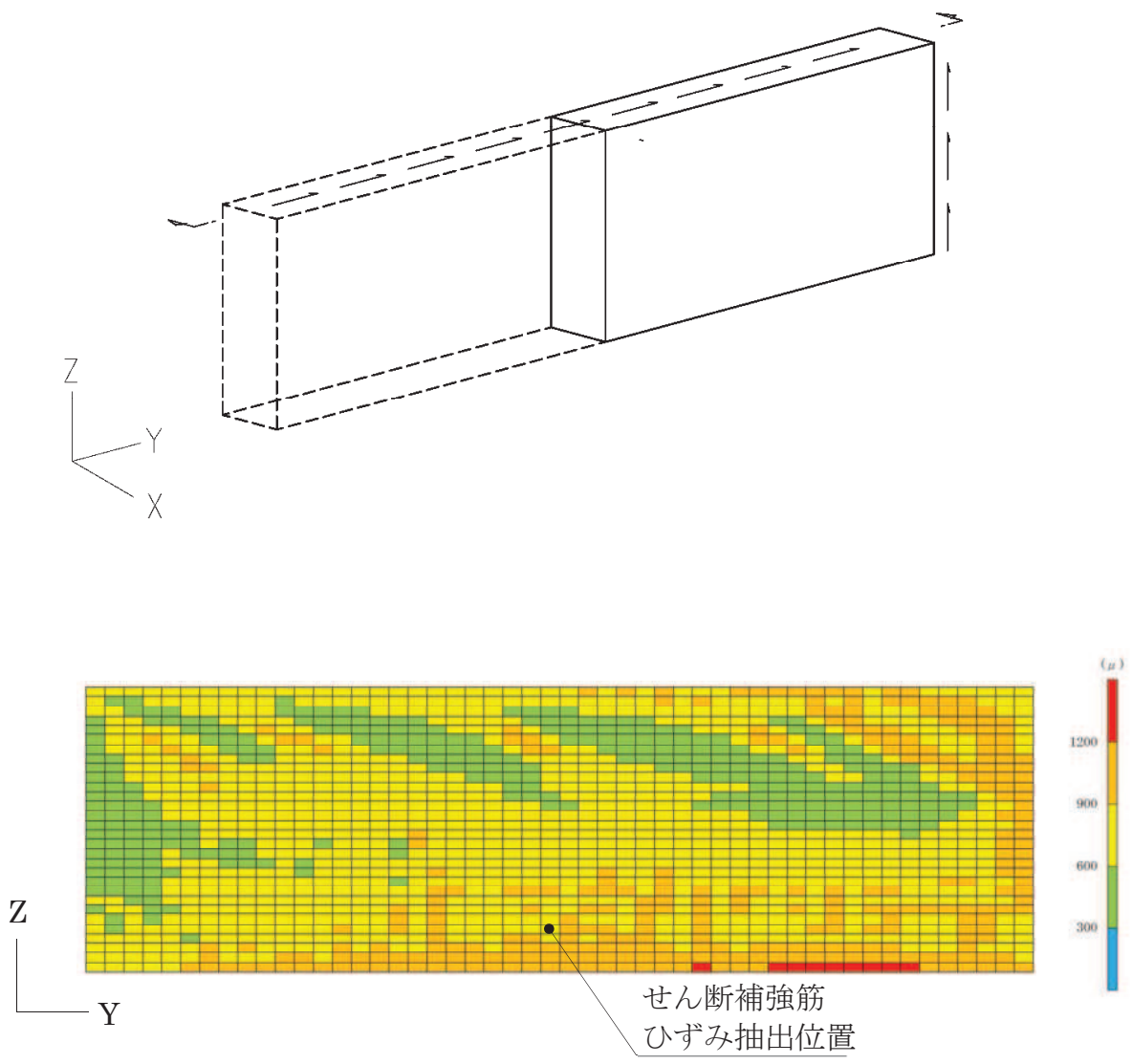
添付 6-8 図 着目点の位置図



添付 6-9 図 せん断補強鉄筋の軸方向ひずみ



添付 6-10 図 確認断面位置とひび割れの状況（面外荷重最終ステップ）



添付 6-11 図 確認断面位置と面内せん断ひずみ分布（面内荷重最終ステップ）

7. 面内荷重及び面外荷重が同時に作用する部材への Ccb 工法の適用性

三次元静的材料非線形解析により、面外荷重と面内荷重が同時に作用する場合の Ccb に生じる軸方向ひずみ等を確認し、面外荷重と面内荷重が同時に作用する状態においても、Ccb に作用する荷重は面外荷重のみの場合と変わらず、面内荷重が作用しても Ccb により十分なせん断補強効果が得られることを確認した。

また、Ccb 工法と先施工のせん断補強鉄筋のひずみ挙動は、Ccb 工法と先施工で同様であり、面外荷重と面内荷重が同時に作用する部材への Ccb 工法の適用性が確認できた。

なお、Ccb を適用した部材のせん断破壊に対する余裕度を 0.8 程度に抑える設計としていることから、今回の数値解析で作用させた面外荷重は、実構造物に作用する荷重と比較して保守的な荷重設定となっている。

増厚補強部における Ccb 工法の適用性の検討

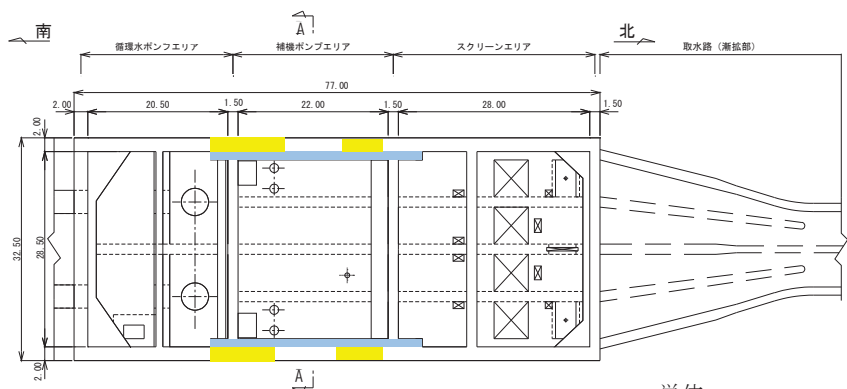
1. はじめに

女川 2 号機の屋外重要土木構造物等のうち海水ポンプ室および第 3 号機海水ポンプ室については、構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する補強としてコンクリートによる増厚補強を行うとともに、既設部材には Ccb 工法によりせん断補強を行っている。既設部材と補強部材を一体壁として考慮する設計は先行プラント実績と同じ「トンネル標準示方書[開削工法編]・同解説（土木学会，2016 年制定）」（以下「トンネル標準示方書」という。）に基づき算定しているものの、先施工せん断補強筋を想定していることから、Ccb 工法のせん断耐力の補強効果を示す有効率 β_{aw} 「以下「有効率 β_{aw} 」という。」の影響を確認した。

本検討では、既設部材へ Ccb による耐震補強を行った後に増厚補強を行った部材を対象に数値解析（材料非線形解析）によりせん断耐力を評価し、トンネル標準示方書で算出されるせん断耐力に有効率 β_{aw} を考慮したせん断耐力を上回ることを確認することにより、トンネル標準示方書に基づく耐震評価に有効率 β_{aw} を考慮することの妥当性及び増厚補強部における Ccb 工法の適用性を確認した。

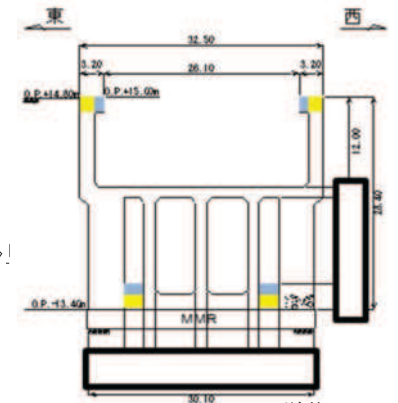
2. 対象部材

本工法を適用する海水ポンプ室及び第 3 号機海水ポンプ室の構造図及び補強対象箇所を添付 7-1 図及び添付 7-2 図に、補強箇所の部材諸元を添付 7-1 表に示す。海水ポンプ室は、底版の増厚補強部及び側壁の増厚補強部（補強梁追加）の既設部材に Ccb 補強を実施する。第 3 号機海水ポンプ室は、導流壁の両側から増厚補強を行い、既設部材に Ccb 補強を実施する。



平面図

単位：m



A-A 断面図

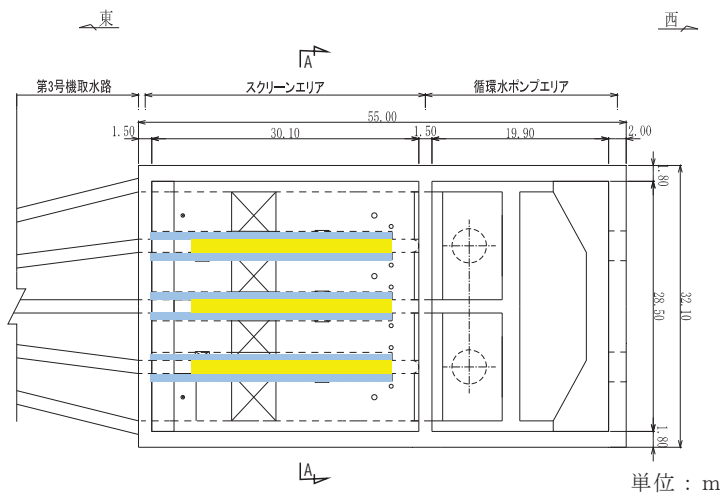
単位：m

凡例

- ：増厚補強箇所
- ：CCb施工箇所*

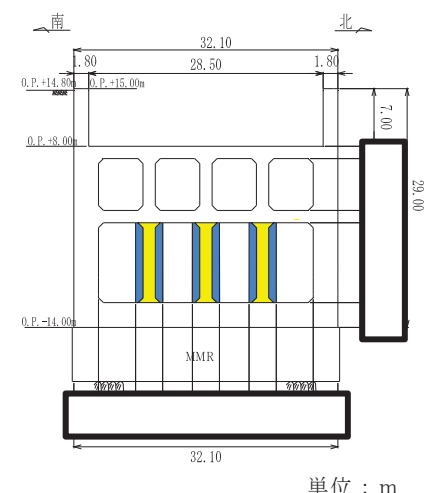
注記*：増厚補強部における CCb 施工箇所のみ明示

添付 7-1 図 海水ポンプ室 構造図



平面図

単位：m



A-A 断面図

単位：m

凡例

- ：増厚補強箇所
- ：CCb施工箇所*

注記*：増厚補強部における CCb 施工箇所のみ明示

添付 7-2 図 第 3 号機海水ポンプ室 構造図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

添付 7-1 表 増厚補強部の既設部材に CCb 補強を行う構造物と部材諸元

		既設部材		補強部材		部材 厚さ 比較	有効高さ d (m)	支間長 a (m)	せん断 スパン a/d
		厚さ h ₁ (m)	CCb径	厚さ h ₂ (m)	先施工 せん断補 強鉄筋径				
海水ポンプ室	底版	2.0	D25	1.50	D29	h ₁ >h ₂	3.27	2.7	0.83
	側壁	2.0	D29～ D32	1.20	D22	h ₁ >h ₂	2.97	23.0	7.74
第3号機 海水ポンプ室	導流壁	1.5	D25～ D32	1.80*	D32	h ₁ >h ₂	3.07	9.7	3.16

注記*：導流壁の補強は両側補強（片側 0.9m×2 箇所）

3. 増厚補強部の設計せん断力

増厚補強部における Ccb 工法の適用性について、「設計の考え方」及び「設計における保守性」の観点から確認を行う。

3.1 せん断耐力の算定の考え方

3.1.1 トンネル標準示方書に基づくせん断耐力の考え方

増厚補強部において既設部材と補強部材を一体壁として考慮する場合におけるせん断補強鋼材が負担するせん断耐力 V_{wd} の算定の考え方を添付 7-3 図に示す。

トンネル標準示方書におけるせん断耐力式は、既設部材と補強部材それぞれのせん断耐力の和になっている。(解 2.12.2) は既設部材 (部材厚 h_1) が補強部材 (部材厚 h_2) より厚い場合の評価式であり、既設部材は通常のせん断耐力を算定し、補強部材は部材厚の比率 (h_2/h_1) で低減させたせん断耐力を算定し、それらの和を部材全体のせん断耐力としている。

コンクリート負担分のせん断耐力 V_{cd} は、既設部材と補強部材との間にジベル鉄筋を配置し、既設部材と補強部材が一体として挙動するため、添付 7-4 図に基づき一体壁として算出する。ジベル鉄筋設計の詳細については、「資料 9 海水ポンプ室の耐震安全性評価」に示す。

また、一体壁を構成するそれぞれの壁に分離してせん断補強鋼材を配置する場合において、せん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力は、次式により算定してよい。

$$h_1 > h_2 \text{ の場合} \quad V_{wd} = \left\{ \frac{A_{w1} f_{wyd} (\sin \theta_1 + \cos \theta_1) z_1}{s_1} + \frac{A_{w2} f_{wyd} (\sin \theta_2 + \cos \theta_2) z_2}{s_2} \cdot \frac{h_2}{h_1} \right\} / \gamma_b \quad (\text{解 2.12.2})$$

$$h_1 = h_2 \text{ の場合} \quad V_{wd} = \left\{ \frac{A_{w1} f_{wyd} (\sin \theta_1 + \cos \theta_1) z_1}{s_1} + \frac{A_{w2} f_{wyd} (\sin \theta_2 + \cos \theta_2) z_2}{s_2} \right\} / \gamma_b \quad (\text{解 2.12.3})$$

$$h_1 < h_2 \text{ の場合} \quad V_{wd} = \left\{ \frac{A_{w1} f_{wyd} (\sin \theta_1 + \cos \theta_1) z_1}{s_1} \cdot \frac{h_1}{h_2} + \frac{A_{w2} f_{wyd} (\sin \theta_2 + \cos \theta_2) z_2}{s_2} \right\} / \gamma_b \quad (\text{解 2.12.4})$$

ここに、 V_{wd} : せん断補強鋼材により受け持たれる部材の設計せん断耐力

A_{w1} , A_{w2} : 各せん断補強鉄筋の総断面積

f_{wyd} : せん断補強鉄筋の設計引張降伏強度で、400N/mm²以下とする。

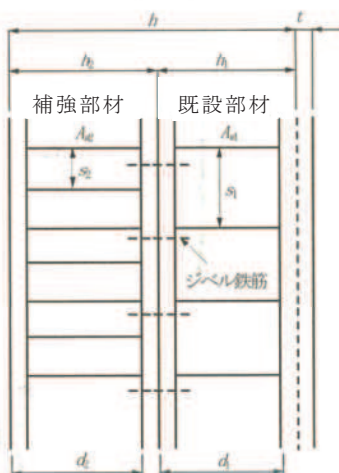
θ_1 , θ_2 : 各せん断補強鉄筋が部材軸となす角度

s_1 , s_2 : 各せん断補強鉄筋の配置間隔

z_1 , z_2 : 各壁の圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材の図心までの距離で、一般に $d_1/1.15$ 、 $d_2/1.15$ としてよい。

h_1 , h_2 : 各壁の有効厚

γ_b : 部材係数で、一般に1.1としてよい。



解説 図 2.12.4 一体化におけるせん断補強鉄筋の配置 (分離して配置した場合)

添付 7-3 図 補強部材と既設部材を一体壁としたせん断耐力の考え方 (鉄筋分)

(トンネル標準示方書より抜粋，一部加筆)

(解 2.6.6)

$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$

ただし、 $p_w f_{yd} / f'_{cd} \leq 0.1$ とするのがよい。

ここに、 V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力で、次式による。

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_b$$

$f_{vcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}}$ (N/mm²) ただし、 $f_{vcd} \leq 0.72$ (N/mm²)
 $\beta_d = \sqrt[3]{1000/d}$ (d : mm) ただし、 $\beta_d > 1.5$ となる場合は1.5とする。
 $\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v}$ ただし、 $\beta_p > 1.5$ となる場合は1.5とする。
 $\beta_n = 1 + 2M_o / M_{ud}$ ($N_d \geq 0$ の場合) ただし、 $\beta_n > 2$ となる場合は2とする。
 $\beta_n = 1 + 4M_o / M_{ud}$ ($N_d < 0$ の場合) ただし、 $\beta_n < 0$ となる場合は0とする。

N'_d : 設計軸方向圧縮力
 M_{ud} : 軸方向力を考慮しない純曲げ耐力
 M_o : 設計曲げモーメント M_d に対する引張縁において、軸方向力によって発生する応力を打消すのに必要な曲げモーメント
 b_w : 腹部の幅(mm)
 d : 有効高さ(mm)
 $p_v = A_s / (b_w \cdot d)$
 A_s : 引張側鋼材の断面積(mm²)
 f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²)
 γ_b : 一般に1.3としてよい
 V_{sd} : せん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力で、次式による。
 $V_{sd} = [A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s] z / \gamma_b$
 A_w : 区間 s_s におけるせん断補強鉄筋の総断面積(mm²)
 f_{wyd} : せん断補強鉄筋の設計降伏強度で、 $25 f'_{cd}$ (N/mm²) と 800 (N/mm²) のいずれか小さい値を上限とする。
 α_s : せん断補強鉄筋が部材軸となす角度
 s_s : せん断補強鉄筋の配置間隔(mm)
 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で、一般に $d/1.15$ としてよい。
 $p_w = A_w / (b_w \cdot s_s)$
 γ_b : 一般に1.1としてよい。

添付 7-4 図 補強部材と既設部材を一体壁としたせん断耐力の考え方
(コンクリート分)
(トンネル標準示方書より抜粋)

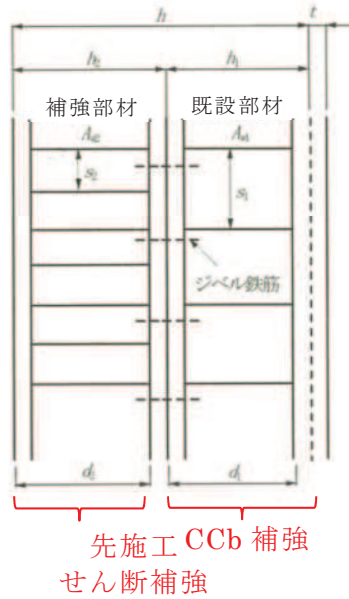
3.1.2 増厚補強部の既設部材に CCb 補強を行う場合の設計せん断耐力の考え方

既設部材には CCb 補強を行うことから、一体壁のせん断耐力のうちせん断補強鋼材が負担する設計せん断耐力 V_{wd} は、添付 7-3 図の (解 2.12.2) に、本文第 3.3-8 図に示す有効率 β_{aw} を考慮し、以下の式 (1) により算定する。

コンクリート負担分 V_{cd} は、添付 7-4 図に基づき、既設部材と補強部材を一体壁として算定する。なお、第 3 号機海水ポンプ室の導流壁は、既設部材の両側から増厚補強するが、トンネル標準示方書では、2 つの部材のせん断耐力の合成式を示していることから、片側の増厚部の補強効果のみを考慮して、せん断補強鉄筋のせん断耐力を算定する。

$$V_{wd} = \left\{ \frac{A_{w1} f_{wyd} (\sin\theta_1 + \cos\theta_1) z_1}{s_1} \cdot \beta_{aw} + \frac{A_{w2} f_{wyd} (\sin\theta_2 + \cos\theta_2) z_2}{s_2} \cdot \frac{h_2}{h_1} \right\} / \gamma_b \quad (\text{式 (1)})$$

- ここに、 V_{wd} : せん断補強鋼材により受け持たれる部材の設計せん断耐力
 A_{w1} , A_{w2} : 各せん断補強鉄筋の総断面積
 f_{wyd} : せん断補強鉄筋の設計引張降伏強度で、400N/mm²以下とする。
 θ_1 , θ_2 : 各せん断補強鉄筋が部材軸となす角度
 s_1 , s_2 : 各せん断補強鉄筋の配置間隔
 z_1 , z_2 : 各壁の圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材の図心までの距離で、一般に $d/1.15$,
 $db/1.15$ としてよい。
 h_1 , h_2 : 各壁の有効厚
 γ_b : 部材係数で、一般に1.1としてよい。
 β_{aw} : Ccbのせん断耐力の補強効果を示す有効率



3.2 設計における保守性

増厚補強部に Ccb を適用した場合の設計に当たっては、トンネル標準示方書に基づき既設部材と補強部材の部材厚の比率に応じて、せん断耐力の低減率を考慮する。また、Ccb によりせん断補強を行う部材の設計と同様に、設計上の配慮として照査値を 0.8 程度とすることとしており、安全側の評価とする。

4. 増厚補強部における CCb 工法の適用性に関する数値解析による検討

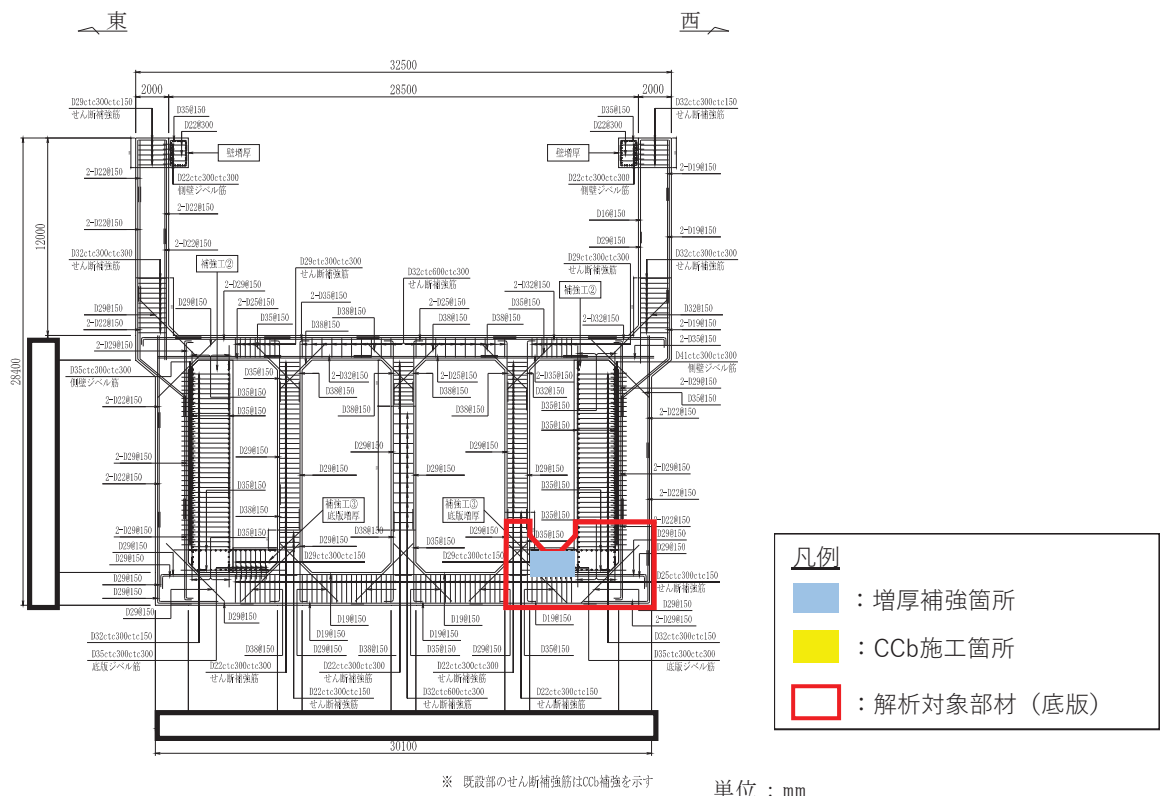
CCb 工法を適用した増厚補強部について、材料非線形解析によりせん断耐力を評価し、トンネル標準示方書に基づく評価式へ有効率 β_{aw} を考慮した設計せん断耐力が保守的であることを確認する。

第 3 号機海水ポンプ室は、両側から増厚補強を実施するが、評価式においては鉄筋が負担するせん断耐力は片側のみを考慮するため、より保守的な設計となる。このため検討対象は海水ポンプ室から選定する。対象部材は、添付 7-1 表に示す部材のうち補強の部材厚が大きく、部材の全面に CCb が配置される海水ポンプ室の底版とした。解析手法は、材料非線形解析（解析コード：WCOMD Studio (Ver. 1.00.02)）とする。

5. 解析モデル及び荷重条件

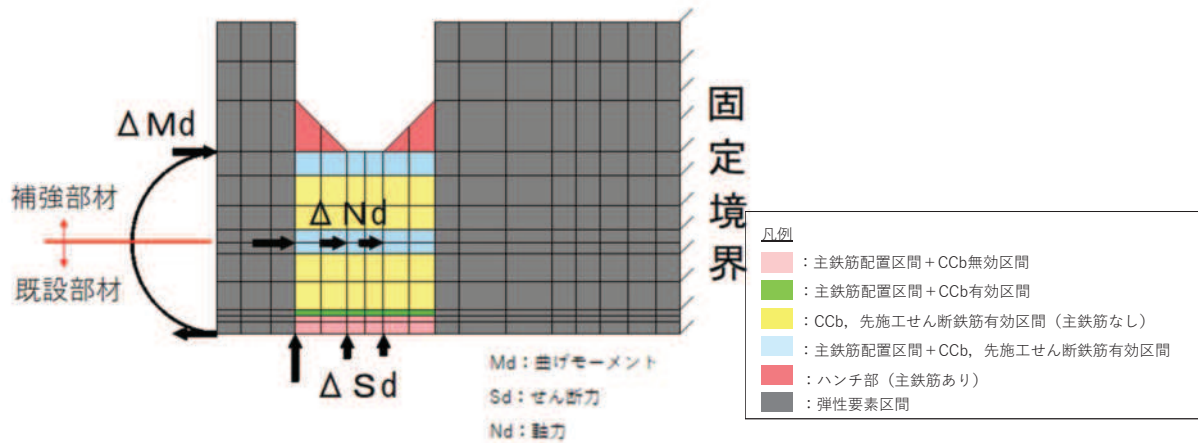
5.1 解析モデル

解析対象である海水ポンプ室の配筋図を添付 7-5 図に、解析モデル及び荷重イメージ図を添付 7-6 図に示す。材料非線形解析に用いる構成則、CCb のモデル化等については、「添付資料 2 女川 2 号機における部材諸元他の適用性の検討」に基づきモデル化する。既設部材と補強部材の接合条件については、ジベル筋等により一体化を図ることから、剛結とする。



添付 7-5 図 海水ポンプ室 配筋図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



添付 7-6 図 解析モデル及び荷重イメージ図

5.2 荷重条件

材料非線形解析にて考慮する荷重は、「資料 9 海水ポンプ室の耐震安全性評価」に示す三次元静的材料非線形解析で得られた断面力を表現できる荷重を与える。また、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、十分小さい値を漸増荷重とする。耐力の評価を主目的とするため、単調荷重とする。

5.3 破壊判定基準

材料非線形解析における構造部材の破壊判定は、荷重—変位曲線において変位が急激に増加した場合とし、その変位が増加する直前の荷重をせん断耐力とする。

5.4 妥当性の確認

材料非線形解析において算出されるせん断耐力が、トンネル標準示方書の評価式に有効率 β_{aw} を考慮した設計せん断耐力を上回ることを確認する。

また、部材に発生するひび割れや変形状態から、特異な状態となっていないことを確認する。

6. 数値解析結果

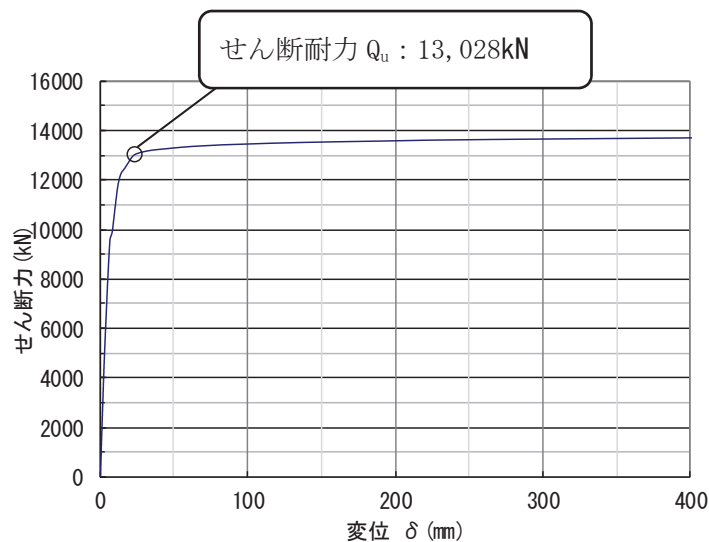
材料非線形解析によるせん断耐力の算定結果を添付 7-2 表に，せん断力－変位関係図を添付 7-7 図に，破壊時のひび割れ変形図を添付 7-8 図に示す。せん断耐力のうち，鉄筋負担分について，材料非線形解析の算定値は 10,568kN であり，トンネル標準示方書の評価式に有効率 β_{aw} を考慮した算定値の 8,410kN を十分上回ることを確認した。せん断力－変位関係図について，せん断力と変位は破壊に至るまで一定の割合で増加しており，増加傾向に特異な点は見られない。また，ひび割れ変形図について，部材の全体にひび割れが分布しており，CCb 補強を行った既設部材に増厚補強を行った場合においても，一体として挙動していることを確認した。

添付 7-2 表 解析結果

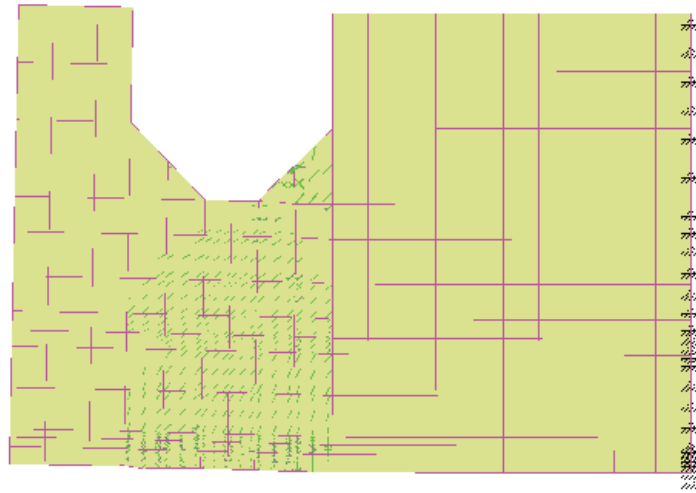
	せん断耐力		
	コンクリート 負担分 V_{cd} (kN)	鉄筋負担分 V_{wd} (kN)	設計せん断 耐力 V_{yd} (kN)
せん断耐力式 (a)	961	8,410	9,371
数値解析 (b)	961	10,568	11,529*
比率 b/a	—	1.25	1.23

注記*：材料非線形解析による設計せん断耐力 $V_{yd} = \text{せん断耐力 } Q_u / \gamma_{b1}$

γ_{b1} ：部材係数 (1.13)



添付 7-7 図 せん断力-変位関係図



添付 7-8 図 ひび割れ変形図

7. 増厚補強部における CCb 工法の適用性

材料非線形解析による設計せん断耐力が，トンネル標準示方書の評価式に有効率 β_{aw} を考慮した設計せん断耐力を上回ることを確認した。また，変形図やひび割れ状態も特異な状態は認められなかった。

以上から，増厚補強を行う部材に CCb を適用した場合において，トンネル標準示方書に基づく耐震評価に有効率 β_{aw} を考慮することの妥当性及び増厚補強部における CCb 工法の適用性を確認した。

なお，設計に当たっては，CCb 補強を行う部材のせん断破壊に対する照査値は，0.8 程度に抑えることとしていることから，設計せん断耐力に対して更なる裕度を確保することとする。

詳細設計を踏まえ Ccb 補強を行う構造物に対する Ccb 工法の適用性の検討

1. はじめに

女川 2 号機における Ccb 補強の対象構造物のうち、取水路（漸拡部）、原子炉機器冷却海水配管ダクト（水平部）、軽油タンク室及び復水貯蔵タンク基礎については、本文「4. 女川 2 号機における Ccb 工法の適用性の確認」において適用性を確認している。

本資料では、詳細設計を踏まえ Ccb 補強の対象となる取水口、取水路（標準部）、海水ポンプ室、原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）及び第 3 号機海水ポンプ室の Ccb 工法の適用性について確認する。

本文「4. 女川 2 号機における Ccb 工法の適用性の確認」に示す内容の確認に加え、詳細設計を踏まえ設置変更許可審査時の内容を補足する項目である「増厚補強を行った部材への適用性（添付資料 7 参照）」についても確認を行い、詳細設計により対象となった構造物に対する Ccb 工法の適用性を確認した。

2. 詳細設計により対象となった構造物に対する Ccb 工法の適用性

詳細設計により対象となった構造物に対する Ccb 工法の適用性は、本文「4. 女川 2 号機における Ccb 工法の適用性の確認」に示すフローに倣い、本文「4.3 ①適用性確認項目の抽出」に示す各項目が適用範囲にあり、Ccb によるせん断補強効果が発揮できることを確認する。添付 8-1 表に適用性確認項目と確認結果を示す。

添付 8-1 表 (1) 詳細設計により対象となった構造物に対する適用性

適用性確認項目	確認結果
<p>I. 使用目的 建設技術審査証明報告書に明記されている目的に該当しているか。</p>	<p>適用性あり (建設技術審査証明報告書より確認) ・ 本文「4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 (1) I. 使用目的」に同じ。</p>
<p>II. 構造形式 建設技術審査証明報告書で想定している構造形式に該当しているか。</p>	<p>適用性あり (建設技術審査証明報告書より確認) ・ 本文「4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 (2) II. 構造形式」に同じ。</p>
<p>III. 構造細目 建設技術審査証明報告書で規定している構造細目に該当しているか。</p>	<p>適用性あり (建設技術審査証明報告書より確認) ・ 本文「4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 (3) III. 構造細目」に同じ。</p>

添付 8-1 表 (2) 詳細設計により対象となった構造物に対する適用性

適用性確認項目	確認結果
<p>IV. 部材諸元</p> <p>建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された部材あるいは実績のある部材厚か。</p> <p>せん断スパン比, 主鉄筋比, コンクリート設計基準強度について, 建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された範囲内であるか, 又は範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。</p>	<p>適用性あり</p> <p>(数値解析により確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文「4.5.2 せん断補強効果の確認 (1) 部材諸元, (2) 載荷方法, (3) せん断ひび割れ抑制効果の確認」に同じ。 ・ 「添付資料 2」で, 建設技術審査証明報告書の実験条件と異なっても, せん断補強効果が発揮されることを数値解析により確認している。 ・ 添付 8-2 表に建設技術審査証明報告書及び建設技術審査証明報告書の実験から確認される適用範囲, 添付 8-3 表に対象構造物の部材諸元等を示す。 ・ 添付 8-3 表のとおり, 詳細設計により対象となった構造物のうち部材厚の最大値は海水ポンプ室側壁の $t=4700\text{mm}$ となるが, 部材厚が大きくなるほど, せん断耐力算出時における有効係数 β_{aw} (CCb のせん断耐力の補強効果を示す有効係数) が大きくなり, 先施工 (従来工法) との差異がなくなることから, 部材厚が大きくなることによる影響はない。 ・ せん断スパン比が小さいことによる影響としてディープビームとなる部材への適用性については, 「添付資料 5」にて確認している。 ・ 以上より, 詳細設計により対象となった構造物に対する適用性を確認できた。

添付 8-1 表 (3) 詳細設計により対象となった構造物に対する適用性

適用性確認項目	確認結果
<p>V. 載荷方法 建設技術審査証明報告書の実験適用性が確認された範囲内であること、又は範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。</p>	<p>適用性あり (数値解析により確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文「4.5.2 せん断補強効果の確認 (1) 部材諸元, (2) 載荷方法, (3) せん断ひび割れ抑制効果の確認」に同じ。 ・ 「添付資料 2」で、建設技術審査証明報告書の実験条件と異なっても、せん断補強効果が発揮されることを数値解析により確認している。 ・ 載荷方法として「集中荷重系」と「分布荷重系」の双方の適用性を確認済みであり、添付 8-3 表に示す載荷パターンを網羅している。 ・ 以上より、詳細設計により対象となった構造物に対する適用性を確認できた。
<p>VI. 使用材料 (せん断補強筋) 建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。せん断補強筋は、JIS G 3112 に準拠した熱間圧延異形棒鋼ネジテツコン (東京鐵鋼株式会社製) で、鉄筋の種類は SD295A, SD295B, SD345 とし、呼び名は D32, D29, D25, D22, D19, D16, D13 とする。</p>	<p>適用性あり (建設技術審査証明報告書より確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文「4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 (5) VI～VIII. 使用材料 (せん断補強, セラミック製定着体, 充てん材)」に同じ。
<p>VII. 使用材料 (セラミック製定着体) 建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。</p>	
<p>VIII. 使用材料 (充てん材) 建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。</p>	
<p>IX. せん断補強鉄筋の定着長 建設技術審査証明報告書で設定している定着長を考慮して設計しているか。</p>	<p>適用性あり (建設技術審査証明報告書より確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文「4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 (6) IX. せん断補強筋の定着長」に同じ。

添付 8-1 表 (4) 詳細設計により対象となった構造物に対する適用性

適用性確認項目	確認結果
<p>X. せん断ひび割れ抑制効果の確認 建設技術審査証明報告書の実験にて確認していない諸元において、せん断ひび割れ抑制効果を確認できるか。</p>	<p>適用性あり (数値解析により確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文「4.5.2 せん断補強効果の確認 (1) 部材諸元, (2) 載荷方法, (3) せん断ひび割れ抑制効果の確認」に同じ。 ・ 「添付資料 2」で、建設技術審査証明報告書の実験条件と異なっても、せん断ひび割れ抑制効果が発揮されることを数値解析により確認している。 ・ 以上より、詳細設計により対象となった構造物に対する適用性を確認できた。
<p>X I. ひび割れに対する定着機能の保持 CCb 工法は、従来工法 (先施工) とせん断補強筋の定着機構が異なることから、せん断補強筋としての機能を発揮するために、定着体部にひび割れが生じても、定着機能が保持されているか。</p>	<p>適用性あり (建設技術審査証明報告書の実験により確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文「4.5.2 せん断補強効果の確認 (4) ひび割れに対する定着機能の保持」に同じ。 ・ 「添付資料 3」で、CCb により耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れが生じても、定着機能が保持されることを確認している。 ・ 詳細設計により対象となった構造物においても、発生するひび割れ形態に差異がないものと考えられるため影響はない。 ・ 以上より、詳細設計により対象となった構造物に対する適用性を確認できた。

添付 8-1 表 (5) 詳細設計により対象となった構造物に対する適用性

適用性確認項目	確認結果
<p>X II. 変形量</p> <p>変形に伴うかぶりコンクリート部の剥落によって、CCb の定着体部の定着機能を阻害するおそれがあることから、建設技術審査証明報告書の実験の変形量を超えていないか。</p>	<p>適用性あり</p> <p>(建設技術審査証明報告書より確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> 本文「4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 (9) X II. 変形量」に同じ。
<p>X III. 使用環境</p> <p>建設技術審査証明報告書で想定している使用環境において使用しているか。</p> <p>また、女川 2 号機では海水環境下にて使用していることから、海水環境下相当での実績があるか。</p>	<p>適用性あり</p> <p>(建設技術審査証明報告書より確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> 本文「4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 (10) X III. 使用環境」に同じ。
<p>X IV. CCb を適用した部材のコンクリートの健全性</p> <p>CCb を適用した部材のコンクリートに CCb のせん断補強効果を阻害するひび割れがなく、構造物が健全であるか。</p>	<p>適用性あり</p> <p>(部材の健全性を目視により確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> 本文「4.5.2 せん断補強効果の確認 (5) CCb を適用した部材のコンクリートの健全性」に同じ。 「添付資料 4」に示す構造物と同様に、詳細設計により対象となった構造物についても、ひび割れ状況及び圧縮強度試験結果を確認し、既設コンクリートの状態が CCb のせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認している。 以上より、詳細設計により対象となった構造物に対する適用性を確認できた。

添付 8-1 表 (6) 詳細設計により対象となった構造物に対する適用性

適用性確認項目	確認結果
<p>X V. PHb 工法 (美浜 3 号機) との差異 PHb 工法及び美浜 3 号機での適用実績と比較を行い, 抽出された差異が建設技術審査証明報告書で規定された適用範囲に収まっているか。</p>	<p>適用性あり (建設技術審査証明報告書の実験, 追加の模型実験及び数値解析により確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文「4.5.2 せん断補強効果の確認 (6) PHb 工法 (美浜 3 号機) との差異」に同じ。 ・ 「添付資料 5」で, ディープビームにおいても Ccb 工法によりせん断補強効果が発揮され, 棒部材式で算定されるせん断耐力を上回るせん断耐力が得られることを確認している。 ・ 「添付資料 6」で, 面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材においても Ccb により十分なせん断補強効果が得られていることを確認している。 ・ 詳細設計により対象となった構造物においてもディープビームとなる部材及び面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材があるが, 「添付資料 5」及び「添付資料 6」で確認していることから適用性を確認できた。
<p>X VI. 増厚補強部への適用性 建設技術審査証明報告書で規定又は建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された範囲内であるか, 又は範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。</p>	<p>適用性あり (数値解析により確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文「4.5.2 せん断補強効果の確認 (7) 増厚補強部への適用性」に同じ。 ・ 詳細設計を踏まえ適用性の確認を補足する項目である。 ・ 「添付資料 7」で, 既設部材に Ccb を施工した部材へ増厚補強を行う場合でも新設した増厚部材と一体となってせん断耐力が得られることを確認し, 詳細設計により対象となった構造物に対する適用性を確認できた。

添付 8-2 表 建設技術審査証明報告書及び建設技術審査証明報告書の試験から確認される適用範囲

III. 構造細目	IV. 部材諸元				V. 載荷方法	
	せん断補強鉄筋比 (%)	最大配置間隔 (mm)	部材厚 (mm)	せん断スパン比		CCbの鉄筋種別
建設技術審査証明報告書で規定されている適用範囲	せん断補強鉄筋比	最大配置間隔	—	—	D13~D32	—
	≥0.15%以上	≤部材の有効高さの1/2				
建設技術審査証明報告書の試験から確認した範囲	—	—	500~800	2.78 (棒部材的な破壊)	—	1.05~1.48

添付 8-3 表 (1) 対象構造物の部材諸元等

構造物名称	部材	III. 構造細目			IV. 部材諸元				V. 載荷方法
		せん断補強鉄筋比 (%)	最大配置間隔 (mm)	有効高さ (mm)	部材厚 (mm)	せん断スパン比 ^{※1,2}	CCbの鉄筋種別	主鉄筋比 (%)	
取水口	頂版	0.221~0.563	300	870	1,000	1.15~12.03	D16 D19 D22 D25	0.220~0.388	分布荷重
					1,500~3,200				
					600				
1,370~3,070									
底版	0.441~0.714	450	1,070~1,370	1,200~1,500	2.80~7.64	D22 D29	0.208~0.247	分布荷重	
				1,500~1,500					
側壁	0.375~0.714	300~450	870~1,070	1,000~1,200	2.80~9.35	D19 D22 D29	0.241~0.316	分布荷重	
				1,200~1,500					
導流壁	0.375~0.714	300	1,370	1,500	2.92~3.65	D22	0.241~0.495	集中荷重	
				1,370					
養壁	0.430	300	1,370	1,500	2.92~3.65	D22	0.247	分布荷重	
				1,370					

■ : フロー②(建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認)より確認できた範囲 ■ : フロー③(せん断補強効果の確認)より確認する範囲

※1: せん断スパン比 a/d (a: 支間長, d: 有効高さ)

※2: せん断スパン比 (a/d) が 3.5 以上 (土木学会マニュアル 2005 参照) かつ荷重形態が集中荷重の場合は棒部材と判断して「フロー②より確認できる範囲」とし, a/d が 3.5 以上であっても荷重形態が分布荷重の場合は等価せん断スパン比を考慮すると, ディープビーム的なせん断スパン比となる可能性があることから「フロー③より確認する範囲」として整理している。

添付 8-3 表 (2) 対象構造物の部材諸元等

構造物名称	部 材	III. 構造細目		IV. 部材諸元					V. 載荷方法
		せん断補強 鉄筋比 (%)	最大配置間隔 (mm) 有効高さ (mm)	部材厚 (mm)	せん断 スパン比 ^{※2,3}	CCbの 鉄筋径	CCbの 鉄筋種別	主鉄筋比 (%)	
取水路 (標準部) ^{※1}	頂版	1.126	300	1,000	5.75	D25	SD345	0.492	分布荷重
			870						
	底板	0.860	300	1,500	3.79	D22		0.649	分布荷重
			1,320						
	隔壁	0.563	300	1,000	3.45	D25		0.492	集中荷重
			870						
海水ポンプ室 ^{※1}	底板	0.430~1.126	600	2,000~3,500	0.83~35.59	D16	0.054~1.288	分布荷重	
			1,770~3,270			D22			
	側壁	0.430~1.765	600	2,000~4,700	1.86~35.59	D25	0.075~1.288	分布荷重	
			1,770~4,470			D29			
隔壁	0.441~1.765	600	1,000~1,500	1.02~37.01	D32	0.301~1.506	集中荷重		
		1,270~1,770			D22				

□ : フロー②(建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認)より確認できた範囲 □ : フロー③(せん断補強効果の確認)より確認する範囲

※1: 変更の可能性あり。

※2: せん断スパン比 a/d (a: 支間長, d: 有効高さ)

※3: せん断スパン比 a/d が3.5以上(土木学会マニュアル2005参照)かつ荷重形態が集中荷重の場合は棒部材と判断して「フロー②より確認できる範囲」とし, a/d が3.5以上であっても荷重形態が分布荷重の場合は等価せん断スパン比を考慮すると, ディープビーム的なせん断スパン比となる可能性があることから「フロー③より確認する範囲」として整理している。

添付 8-3 表 (3) 対象構造物の部材諸元等

構造物名称	部 材	III. 構造細目		IV. 部材諸元					V. 載荷方法				
		せん断補強鉄筋比 (%)	最大配置間隔 (mm) 有効高さ (mm)	部材厚 (mm)	せん断スパン比 ^{※2,3}	CCbの鉄筋径	CCbの鉄筋種別	主鉄筋比 (%)	荷重形態				
海水ポンプ室 ^{※1}	妻壁	0.441~1.765	600	1,500	3.54~22.44	D22	SD345	0.150~0.834	分布荷重				
			1,270			D25							
	導流壁	0.430~1.428	600	1,500	3.54~49.61	D29							
			1,270			D32							
			中床版			0.430~1.765				300~600	1,000~1,500	3.51~17.32	D22
										770~1,270			D25
側壁	0.221	300	1,500	1.52	D29	0.075~1.197	集中荷重						
		1,380			D32								

□ : フロー② (せん断補強効果の確認)より確認できた範囲 □ : フロー③ (せん断補強効果の確認)より確認する範囲

※1: 変更の可能性あり。

※2: せん断スパン比 a/d (a: 支間長, d: 有効高さ)

※3: せん断スパン比 (a/d) が3.5以上 (土木学会マニュアル2005参照) かつ荷重形態が集中荷重の場合は棒部材と判断して「フロー②より確認できる範囲」とし、 a/d が3.5以上であっても荷重形態が分布荷重の場合は等価せん断スパン比を考慮すると、ディープビーム的せん断スパン比となる可能性があることから「フロー③より確認する範囲」として整理している。

添付 8-3 表 (4) 対象構造物の部材諸元等

構造物名称	部 材	III. 構造細目		IV. 部材諸元				主鉄筋比 (%)	V. 載荷方法 荷重形態
		せん断補強鉄筋比 (%)	せん断補強 最大配置間隔 (mm) 有効高さ (mm)	部材厚 (mm)	せん断 スパン比 ^{※2,3}	CCbの 鉄筋径	CCbの 鉄筋種別		
第3号機 海水ポンプ室 ^{※1}	底板	0.422~1.324	400	3,000	1.30~14.80	D25	SD345	0.073~0.860	分布荷重
			2,770			D29			
	D32								
	側壁	0.422~1.324	400	1,800~3,000	2.65~19.17	D25	SD345	0.091~0.779	分布荷重
			1,570~2,770			D29			
	D32								
	隔壁	0.441	600	1,500~2,000	4.12~22.44	D32	SD345	0.203~1.219	集中荷重
			1,270~1,770			D25			
	D29								
	妻壁	0.441~0.882	600	1,500~2,000	2.83~16.10	D29	SD345	0.177~0.849	分布荷重
			1,270~1,770			D32			
	D25								
導流壁	0.422~1.324	400	1,500~3,300	1.34~13.36	D29	SD345	0.113~0.942	集中荷重	
		1,270~3,070			D32				
D25									
中床版	0.422~1.324	400	1,500	2.83~12.68	D29	SD345	0.078~1.795	集中荷重	
		1,270			D32				
D25									

□ : フロー②(建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認)より確認できた範囲 □ : フロー③(せん断補強効果の確認)より確認する範囲

※1: 変更の可能性あり。

※2: せん断スパン比 a/d (a: 支間長, d: 有効高さ)

※3: せん断スパン比 a/d が3.5以上(土木学会マニュアル2005参照)かつ荷重形態が集中荷重の場合は棒部材と判断して「フロー②より確認できる範囲」とし、 a/d が3.5以上であっても荷重形態が分布荷重の場合は等価せん断スパン比を考慮すると、ディープビーム的なせん断スパン比となる可能性があることから「フロー③より確認する範囲」として整理している。

3. まとめ

詳細設計を踏まえ Ccb 補強の対象となる取水口，取水路（標準部），海水ポンプ室，原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）及び第 3 号機海水ポンプ室について Ccb 工法の適用性について確認を行った。

各適用性確認項目について，建設技術審査証明報告書の適用範囲内であること又は適用範囲から確認できなかった項目がある場合は，数値解析，模型実験等により適用性があることを確認し，詳細設計により対象となった構造物に対しても適用性があることを確認できた。

また，詳細設計を踏まえ適用性の確認を補足する項目である「増厚補強部への適用性」についても，添付資料 7 により適用性を確認することができた。

以上より，詳細設計により対象となった構造物に対する Ccb 工法の適用性を確認することができた。