

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-027-2 改4
提出年月日	2020年5月21日

資料2 軽油タンク基礎の耐震安全性評価

2020年5月

東京電力ホールディングス株式会社

: 今回説明範囲

目 次

1. 軽油タンク基礎の耐震安全性評価	1-1
2. 軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震安全性評価	2-1

2. 軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震安全性評価

目 次

1. 評価方法	1
2. 評価条件	1
2.1 構造概要	1
2.2 評価対象構造物	10
2.3 評価対象断面の方向	10
2.4 評価対象断面の選定	10
2.5 使用材料及び材料定数	11
2.6 地盤物性値	11
2.7 評価構造物諸元	14
2.8 地下水位	16
2.9 耐震評価フロー	16
2.10 適用規格	18
3. 地震応答解析	20
3.1 地震応答解析手法	20
3.2 地震応答解析モデルの設定	21
3.2.1 解析モデル領域	21
3.2.2 境界条件	25
3.2.3 解析奥行幅	28
3.2.4 構造物のモデル化	29
3.2.5 地盤改良体のモデル化	29
3.2.6 ジョイント要素の設定	30
3.2.7 杭-地盤相互作用ばねの設定	34
3.2.8 杭先端ばねの設定	36
3.2.9 材料特性の設定	38
3.3 減衰定数	40
3.4 荷重の組合せ	40
3.4.1 機器・配管荷重	41
3.4.2 外水圧	45
3.4.3 雪荷重	45
3.5 地震応答解析の解析ケース	46
3.5.1 耐震評価における解析ケース	46
3.5.2 機器・配管系に対する加速度応答抽出のための解析ケース	49
4. 基礎版の解析	50
4.1 解析手法	50

4.2	解析モデルの設定	51
4.2.1	基礎版のモデル化	51
4.2.2	材料の非線形特性	52
4.2.3	杭頭ばね要素の設定	56
4.3	照査時刻の選定	58
4.4	入力荷重	59
4.4.1	軽油タンクによる荷重	61
4.4.2	張出しダクト及び張出し基礎による荷重	65
4.4.3	油分離槽の慣性力	68
4.4.4	防油堤の慣性力	69
4.4.5	基礎版の慣性力	70
4.4.6	リングコンクリート及び乾燥砂の慣性力	71
4.4.7	積雪の慣性力	72
4.4.8	土圧及び水圧	73
5.	評価内容	74
5.1	入力地震動の設定	74
5.2	許容限界の設定	101
5.2.1	曲げに対する許容限界	101
5.2.2	せん断に対する許容限界	105
5.2.3	鋼管杭	110
5.2.4	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	111
6.	評価結果	115
6.1	地震応答解析結果	115
6.1.1	解析ケースと照査値	116
6.1.2	ひずみ分布図（鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査）	122
6.1.3	断面力分布（鉄筋コンクリート部材のせん断力照査）	124
6.1.4	曲率分布（鋼管杭の曲げ軸力照査）	127
6.1.5	せん断力分布（鋼管杭のせん断力照査）	131
6.1.6	最大せん断ひずみ分布	135
6.1.7	過剰間隙水圧比分布	143
6.2	鉄筋コンクリート部材の耐震評価	151
6.2.1	鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力に対する評価結果	151
6.2.2	鉄筋コンクリート部材のせん断力に対する評価結果	153
6.3	鋼管杭の耐震評価	154
6.3.1	鋼管杭の曲げ軸力に対する評価結果	154
6.3.2	鋼管杭のせん断力に対する評価結果	158

6.4 基礎地盤の支持性能に対する支持力評価.....	161
6.4.1 基礎地盤の押込みに対する支持性能評価.....	161
6.4.2 基礎地盤の引抜きに対する支持性能評価.....	164
7. まとめ	167

参考資料

(参考資料 2-1) 杭頭部の耐震評価	(参考)2-1-1
(参考資料 2-2) 地盤改良体の安定性について	(参考)2-2-1

1. 評価方法

軽油タンク基礎（6号機設備）は、常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備である軽油タンク（6号機設備）を間接支持する機能を求められる土木構造物である。軽油タンク基礎（6号機設備）について基準地震動 S_s による耐震評価として、構造部材の曲げ、せん断評価及び地盤の支持性能評価を実施する。

軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答解析においては、地震時の地盤の有効応力の変化に応じた影響を考慮できる有効応力解析を実施する。

有効応力解析に用いる液状化強度特性は、代表性及び網羅性を踏まえた上で、保守性を考慮して設定する。

屋外重要土木構造物及び機器・配管系への加速度応答に対する保守的な配慮として、地盤の非液状化の影響を考慮した解析ケースを設定する。

構造部材の健全性評価については、構造部材のコンクリートひずみ、曲率及びせん断力が要求性能に応じた許容限界以下であることを確認する。基礎地盤の支持性能評価については、杭頭に生じる鉛直力が極限支持力及び極限引抜き力に基づく許容限界以下であることを確認する。

2. 評価条件

2.1 構造概要

軽油タンク基礎（6号機設備）の位置図を図 2-1 に、平面図を図 2-2 に、断面図を図 2-3 及び図 2-4 に、概略配筋図を図 2-5 に、鋼管杭配置図を図 2-6 に示す。軽油タンク基礎（6号機設備）は、幅約 35m（東西方向）×約 18m（南北方向）、高さ約 1.4m の、鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、等間隔に配置した杭を介して十分な支持性能を有する西山層に支持される。また、基礎版及び杭の周辺には地盤改良を実施している。

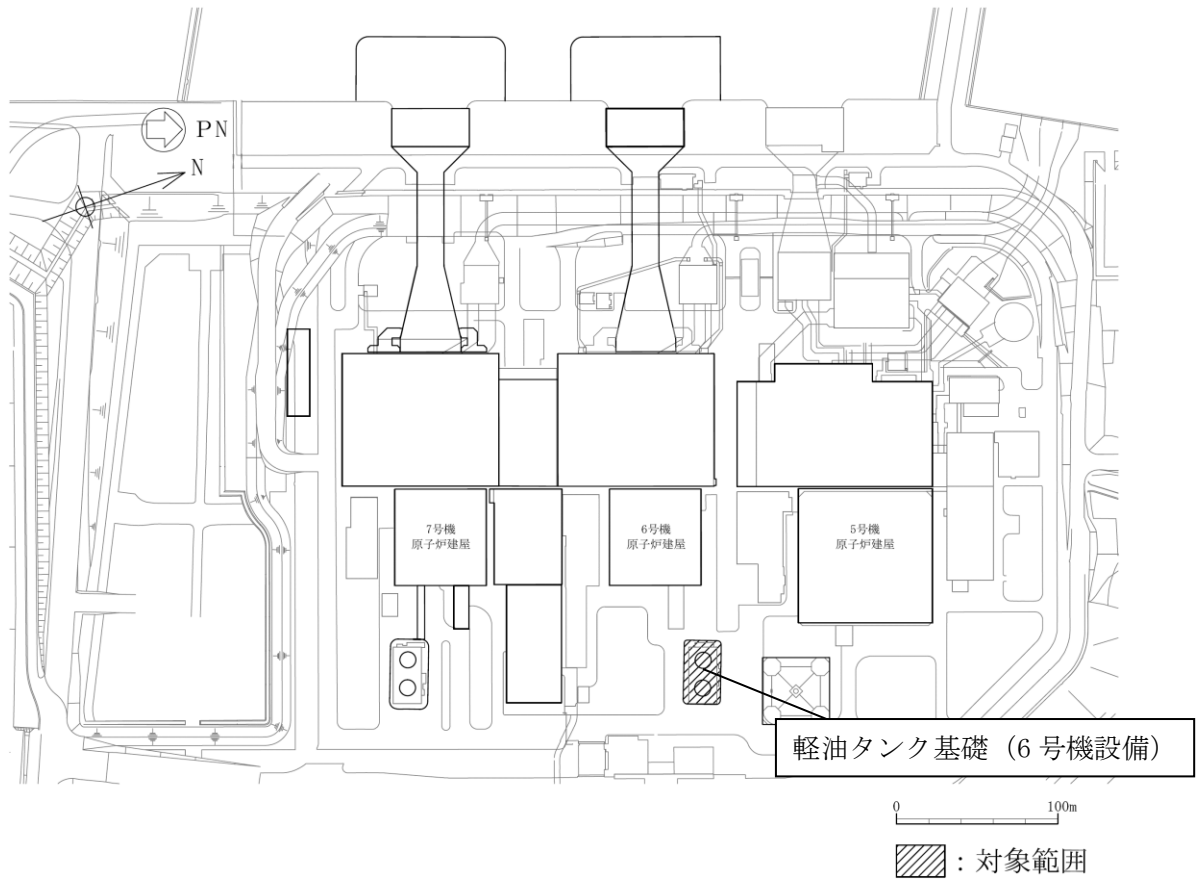
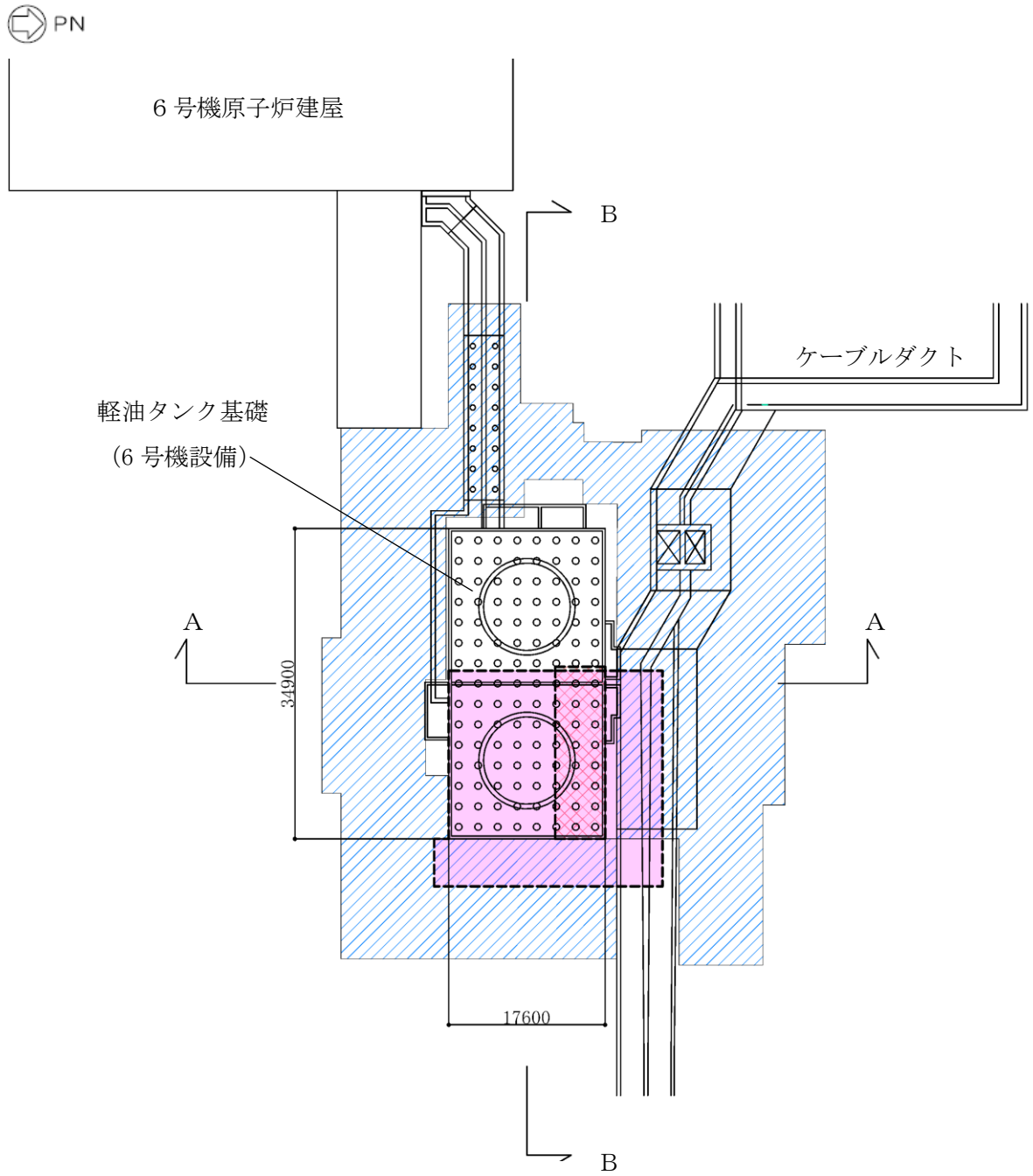


図 2-1 軽油タンク基礎 (6号機設備) の位置図



(単位：mm)

既設／新設	凡例	地盤改良工法
既設地盤改良体		置換 (CD掘削)
新設地盤改良体		置換 (開削)
		高圧噴射

注：置換工法 (CD掘削) の施工範囲の内、地上構造物及び埋設構造物がある箇所では、高圧噴射を適用

図 2-2 軽油タンク基礎 (6号機設備) の平面図

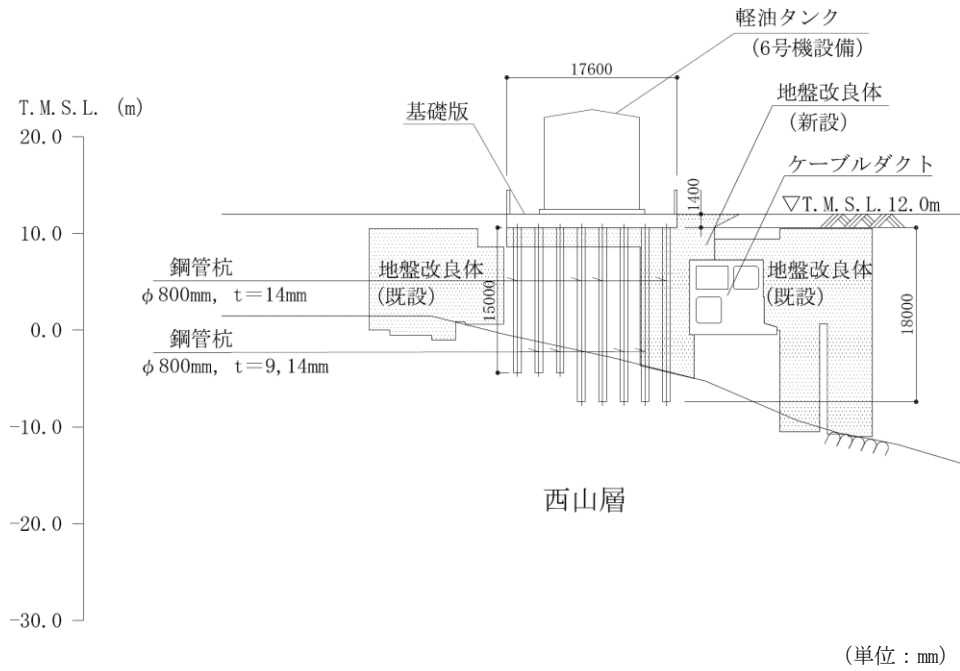


図 2-3 軽油タンク基礎 (6号機設備) 断面図 (A-A断面)

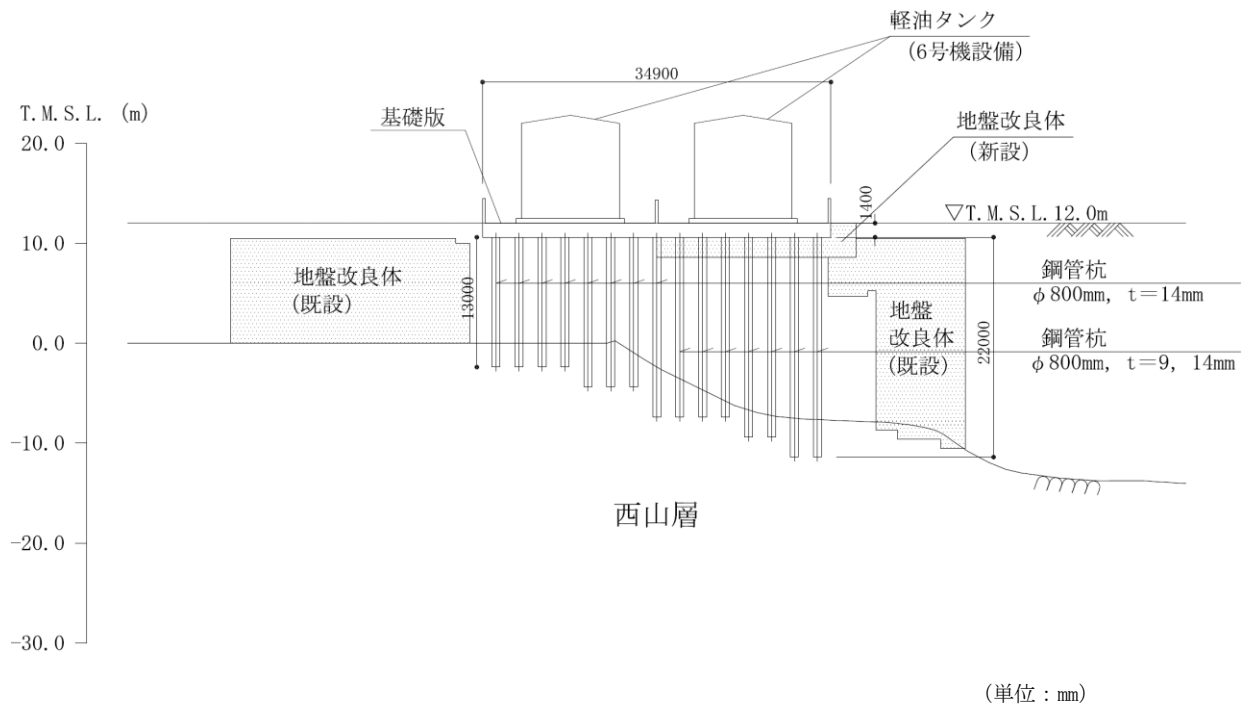


図 2-4 軽油タンク基礎 (6号機設備) 断面図 (B-B断面)

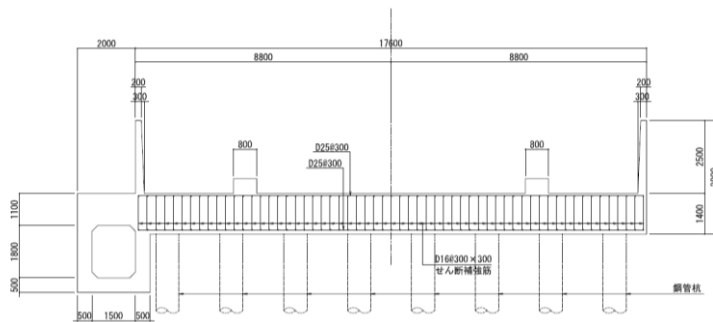


図 2-5 (1) 軽油タンク基礎 (6号機設備) の概略配筋図 (A-A断面)

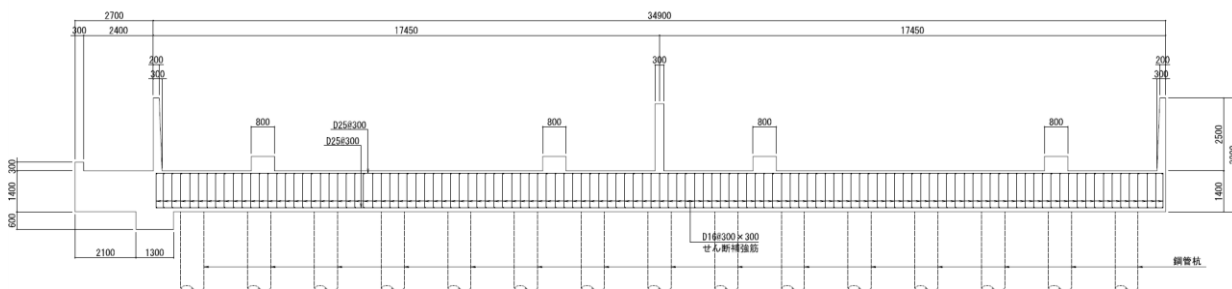
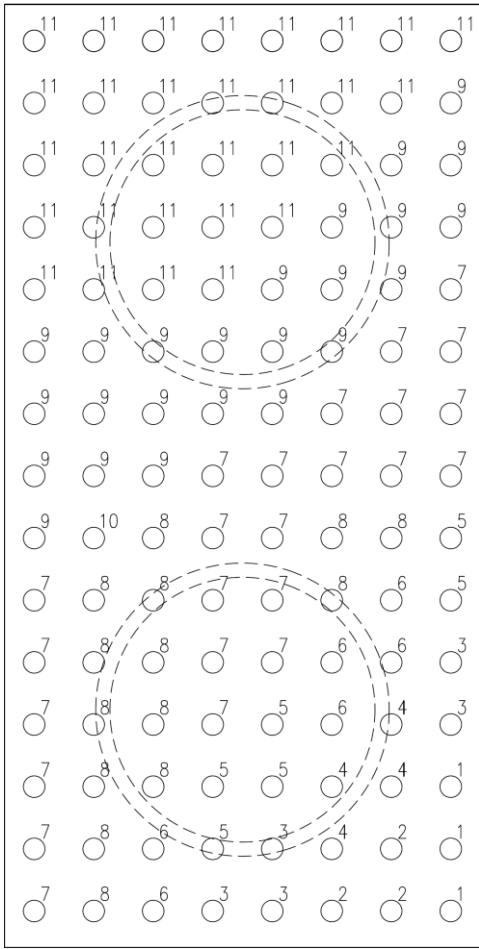


図 2-5 (2) 軽油タンク基礎 (6号機設備) の概略配筋図 (B-B断面)



杭位置	仕様		
	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭長 (m)
1	800	14	24.0
2		9	24.0
3		14	22.0
4		9	22.0
5		14	20.0
6		9	20.0
7		14	18.0
8		9	18.0
9		14	15.0
10		9	15.0
11		14	13.0

図 2-6 鋼管杭配置図

軽油タンク基礎（6号機設備）には、基礎版と剛結された付帯設備が設置されている。付帯設備の配置図を図 2-7 に、各付帯設備の概要を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

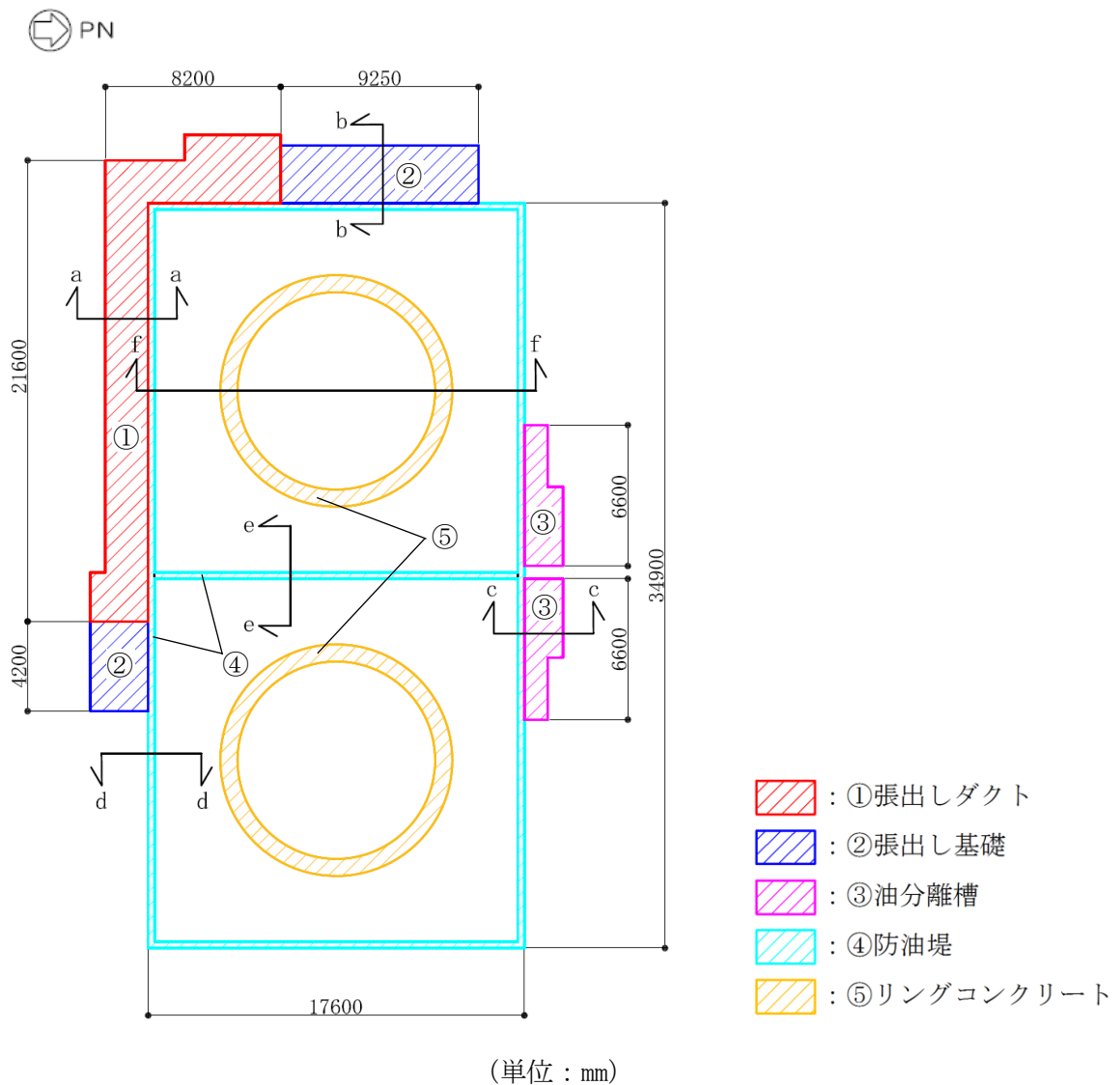


図 2-7 付帯設備の配置図

表 2-1 付帯設備の概要 (1/2)

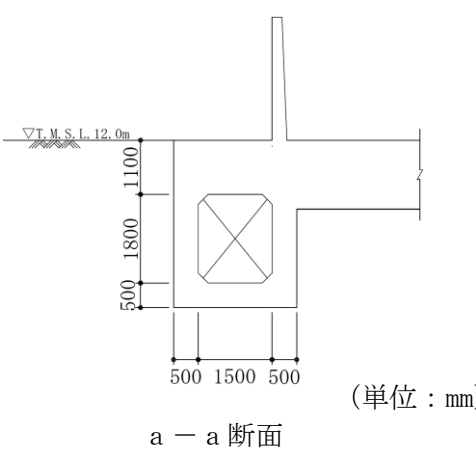
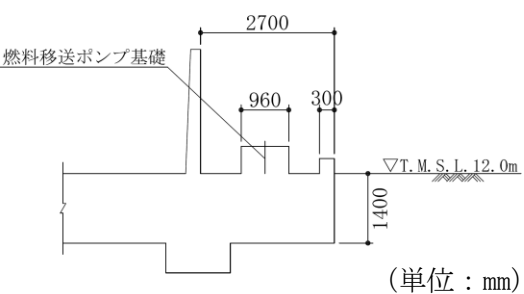
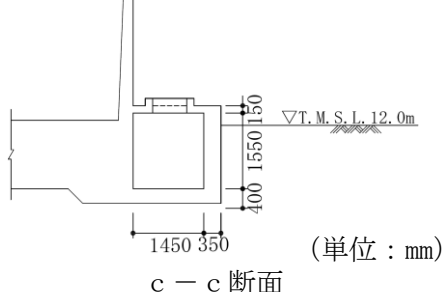
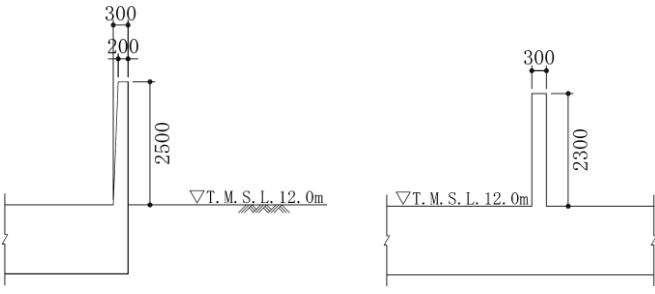
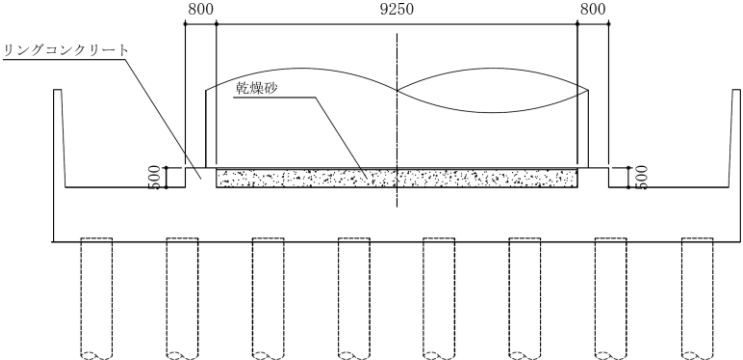
設備名称	概要
①張出しダクト	<ul style="list-style-type: none"> ・ 6号機のSクラス施設である燃料移送系配管（6号機設備）を間接支持する構造物である。 ・ 7号機申請にて、張出しダクトに間接支持されるSA施設はない。 ・ 張出しダクト頂版は軽油タンク基礎（6号機設備）と剛結されている。 <div style="text-align: center;">  <p>a - a 断面 (単位：mm)</p> </div>
②張出し基礎	<ul style="list-style-type: none"> ・ 6号機のSクラス施設である燃料移送ポンプ（6号機設備）を間接支持する構造物である。 ・ 7号機申請にて、張出し基礎に間接支持されるSA施設はない。 ・ 軽油タンク基礎（6号機設備）と剛結されている。 ・ 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板（6号機設備）が設置されている。 <div style="text-align: center;">  <p>b - b 断面 (単位：mm)</p> </div>

表 2-2 付帯設備の概要 (2/2)

設備名称	概要
③油分離槽	<ul style="list-style-type: none"> 油分離槽に間接支持されるSA施設はない。 軽油タンク基礎（6号機設備）と剛結されている。  <p style="text-align: center;">c - c 断面 (単位: mm)</p>
④防油堤	<ul style="list-style-type: none"> 防油堤の一部が6号機のSクラス施設である燃料移送系配管（6号機設備）を間接支持する構造物である。 7号機申請にて、防油堤に間接支持されるSA施設はない。 軽油タンク基礎（6号機設備）と剛結されている。  <p style="text-align: center;">d - d 断面 e - e 断面 (単位: mm)</p> <p>注1：防油堤はアクセスルートに対する影響範囲外に位置するため、アクセスルートの観点から防油堤に要求される機能はない。</p> <p>注2：火災防護の観点から、防油堤に要求される機能はない。</p>
⑤リングコンクリート	<ul style="list-style-type: none"> SA施設である軽油タンク（6号機設備）を間接支持する構造物である。 リングコンクリートは軽油タンク基礎（6号機設備）と剛結されている。 リングコンクリートの内側には乾燥砂が設置されている。  <p style="text-align: center;">f - f 断面 (単位: mm)</p>

2.2 評価対象構造物

軽油タンク基礎（6号機設備）の付帯設備は、7号機申請にて間接支持するSA施設が無いことから、軽油タンク基礎（6号機設備）本体のみを評価対象構造物とする。

2.3 評価対象断面の方向

軽油タンク基礎（6号機設備）は、「2.1 構造概要」で示したとおり、基礎版を等間隔に配置した杭で支持する比較的単純な構造物であり、東西方向及び南北方向に一様な構造となっている。また、基礎版及び杭の周辺には地盤改良を実施しているため、周辺の地盤が構造物に与える影響はどの断面も大きな差はないと考えられることから、軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価では東西方向、南北方向の2断面を評価対象断面とする。

2.4 評価対象断面の選定

評価対象断面は、KK7 補足-027-1「資料1 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「4.10 軽油タンク基礎（6号機設備）の断面選定の考え方」で記載したとおり、構造物の中心を通るA-A断面及びB-B断面を代表として耐震評価を実施する。

2.5 使用材料及び材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、建設時の設計値に基づき設定する。構造物の使用材料を表 2-3 に、材料物性値を表 2-4 に示す。

表 2-3 構造物の使用材料

諸元	
コンクリート	設計基準強度 23.5 N/mm ²
鉄筋	SD35 (SD345 相当)
鋼管杭	SKK400 (SKK41 相当)

表 2-4 構造物の材料物性値

材料	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
鉄筋コンクリート	23.5*	2.45×10 ⁴ *	0.2*
鋼管杭	77*	2.06×10 ⁵ *	0.3*

注記* : 建設時の設計値に基づく

2.6 地盤物性値

地盤及び地盤改良体の諸定数は、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤の物性値を表 2-5～表 2-7 に、地盤改良体の物性値を表 2-8 に示す。

表 2-5 地盤の解析用物性値一覧（液状化検討対象層）

パラメータ		埋戻土	古安田層		
			A2s 層	A3s 層	
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.94	1.91	1.91	
	間隙率 n	0.45	0.45	0.45	
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	1.04×10 ⁵	2.14×10 ⁵	2.14×10 ⁵	
	基準平均有効拘束圧 σ_{ma}' (kN/m ²)	98.0	200.0	200.0	
	ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33	
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.225	0.157	0.157	
強度特性	粘着力 c' (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	
	内部摩擦角 ϕ' (°)	35.9	36.6	36.6	
液状化特性	変相角 ϕ_p (°)	32.0	32.0	32.0	
	液状化パラメータ	S_1	0.005	0.005	0.005
		w_1	5.50	25.00	25.0
		p_1	0.50	0.50	0.50
		p_2	1.00	0.80	0.80
		c_1	1.69	8.75	8.75

表 2-6 地盤の解析用物性値一覧（非液状化層）

パラメータ		埋戻土 II	古安田層				
			A3c 層	A3a1 層	A2c 層	A2a1 層	A2g 層 (シルト質)
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.71	1.70	1.81	1.80	1.88	1.80
	間隙率 n	0.58	0.57	0.52	0.52	0.48	0.52
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	7.33×10 ⁴	1.09×10 ⁵	9.57×10 ⁴	1.39×10 ⁵	1.61×10 ⁵	1.39×10 ⁵
	基準平均有効拘束圧 σ_{ma}' (kN/m ²)	41.0	60.0	94.0	140.0	170.0	140.0
	ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.152	0.114	0.162	0.110	0.147	0.110
強度特性	粘着力 c' (kN/m ²)	7.4	99.6	29.2	113.0	82.8	113.0
	内部摩擦角 ϕ' (°)	31.7	26.8	34.2	27.9	28.7	27.9

表 2-7 地盤の解析用物性値一覧（西山層）

パラメータ		西山層	
		T. M. S. L. -33.0m 以浅	T. M. S. L. -33.0m~-90.0m
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.73	1.69
	間隙率 n	0.56	0.56
変形特性	動せん断弾性係数 G_{max} (kN/m ²)	4.16×10^5	4.75×10^5
	基準平均有効拘束圧 σ_{vm}' (kN/m ²)	98.0	98.0
	ポアソン比 ν	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.257	0.257
強度特性	粘着力 c (kN/m ²)	1370-5.04Z*	1370-5.04Z*
	内部摩擦角 ϕ (°)	0.0	0.0

注記* : Zは、標高 (m) を示す

表 2-8 地盤の解析用物性値一覧（地盤改良体（セメント改良））

パラメータ		高圧噴射工法			置換工法	
		既設・砂質土	既設・粘性土	新設・粘性土	既設	新設
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.87	1.57	1.91	1.85	1.85
	間隙率 n	0.47	0.64	0.64	0.47	0.48
変形特性	動せん断弾性係数 G_{max} (kN/m ²)	2.42×10^6	8.97×10^5	1.22×10^6	3.40×10^6	1.31×10^6
	基準平均有効拘束圧 σ_{vm}' (kN/m ²)	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0
	ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.070	0.120	0.050	0.050	0.050
強度特性	粘着力 c (kN/m ²)	4894.0	1393.0	2500.0	3536.0	4000.0
	内部摩擦角 ϕ (°)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

2.7 評価構造物諸元

照査を行う軽油タンク基礎（6号機設備）の基礎版に関する諸元を表 2-9 に、鋼管杭に関する諸元を表 2-10 に、鋼管杭の配置図を図 2-8 に示す。

表 2-9 構造物の評価部位とその仕様（その 1：基礎版（鉄筋コンクリート部材））

部位	部材高 (m)	材料		機能要求
		コンクリート f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋	
基礎版	1.4	23.5	SD35 (SD345 相当)	間接支持

表 2-10 構造物の評価部位とその仕様（その 2：鋼管杭）

杭位置	仕様			材料	機能要求
	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭長 (m)		
1	800	14	24.0	SKK400 (SKK41 相当)	間接支持
2		9	24.0		
3		14	22.0		
4		9	22.0		
5		14	20.0		
6		9	20.0		
7		14	18.0		
8		9	18.0		
9		14	15.0		
10		9	15.0		
11		14	13.0		

注：道路橋示方書では、杭中心間隔が杭径の 2.5 倍以上の場合、単杭で評価する旨が記載されている。軽油タンク基礎（6号機設備）の杭中心間隔は基礎版長辺方向が 2300mm、基礎版短辺方向が 2200mm であり、ともに杭径の 2.5 倍となる 2000mm 以上のため、単杭として評価する。

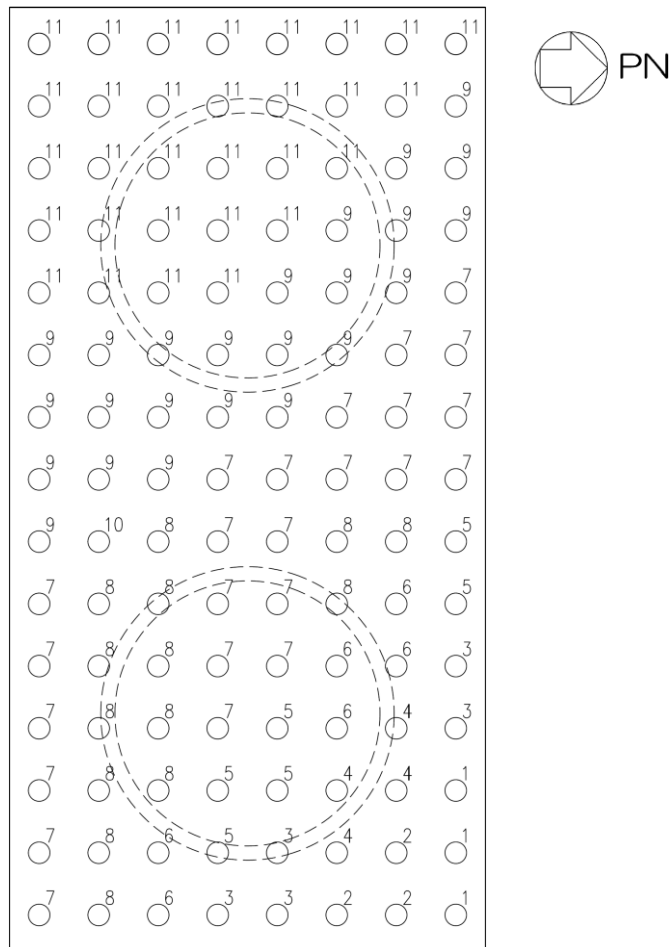


図 2-8 鋼管杭配置図

2.8 地下水位

地下水位はV-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」より、地表面（T.M.S.L.12.0m）に設定する。

2.9 耐震評価フロー

図 2-9 に軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答解析フローを、図 2-10 に軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価フローを示す。

基礎版の耐震評価については、軽油タンク（6号機設備）及び付帯設備の荷重の平面的な偏りを考慮するため、3次元の版解析を実施する。版解析にあたっては、2次元動的有限要素法解析により得られた応答値から、版解析モデルへ入力する荷重を算出する。付帯設備のうち3次元な構造を示す張出しダクト及び張出し基礎については、別途作成する荷重算定用のモデルを使用して版解析モデルに入力する荷重を算出する。

鋼管杭及び基礎地盤の支持性能については、2次元動的有限要素法解析より得られた応答値を用いて耐震評価を行う。

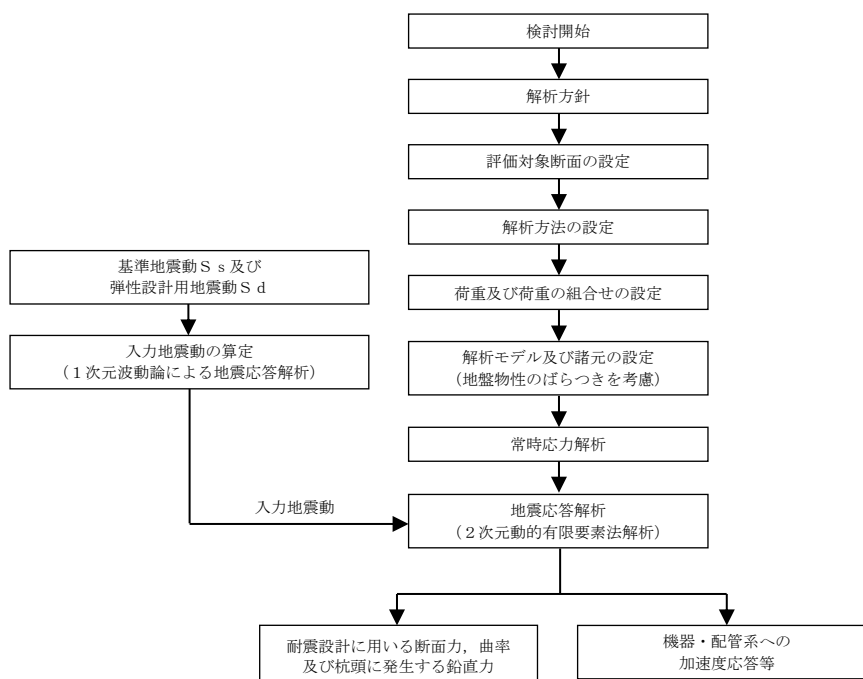


図 2-9 軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答解析フロー

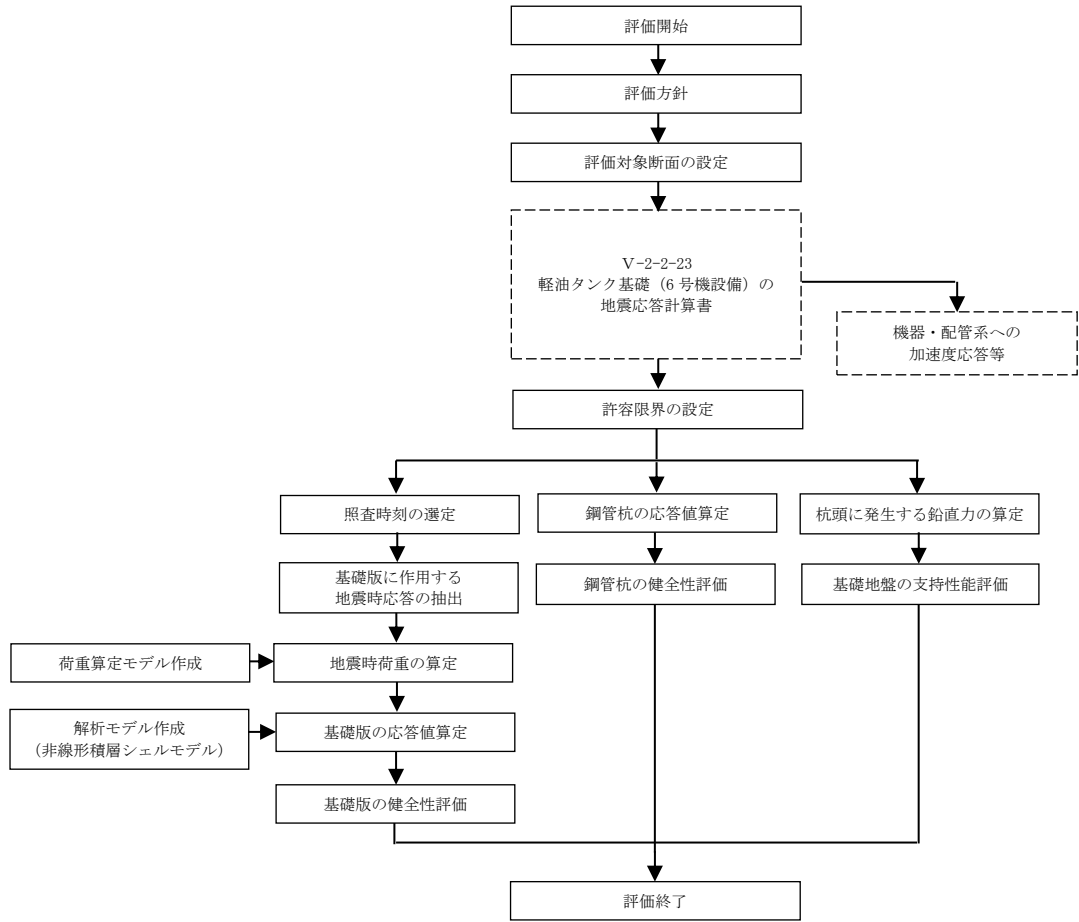


図 2-10 軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価フロー

2.10 適用規格

軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価に当たっては、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会，2002年）（以下「コンクリート標準示方書」という。），原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987（日本電気協会）を適用するが，鉄筋コンクリート部材の曲げ及びせん断の許容限界については，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（土木学会，2005年）（以下「土木学会マニュアル」という。）を適用する。鋼管杭の曲げ及びせん断の許容限界は，乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程 J E A C 4 6 1 6 - 2009（日本電気協会）（以下「キャスク指針」という。），鋼・合成構造標準示方書〔耐震設計編〕（土木学会，2008年）（以下「鋼・合成構造標準示方書」という。）を適用する。また，基礎地盤の支持性能の許容限界は，道路橋示方書（I共通編・IV下部構造編）・同解説（日本道路協会，平成14年3月）（以下「道路橋示方書」という。）を適用する。

表 2-11 に適用する規格，基準類を示す。

表 2-11 適用する規格，基準類

項目	適用する規格，基準類	備考
使用材料及び材料定数	・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（2002年）	—
荷重及び荷重の組合せ	・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（2002年）	・永久荷重＋偶発荷重＋従たる変動荷重の適切な組合せを検討
許容限界	【鉄筋コンクリート部材】 ・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（2005年）	・曲げに対する照査は，限界ひずみを設定した上で，発生ひずみが限界ひずみを下回ることを確認* ・せん断に対する照査は，発生せん断力がせん断耐力を下回ることを確認*
	【鋼管杭】 ・乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程 J E A C 4 6 1 6 -2009 ・鋼・合成構造標準示方書〔耐震設計編〕（2008年）	・曲げに対する照査は，限界値として終局曲率及び降伏モーメントに対する曲率を設定した上で，発生曲率が限界値を下回ることを確認* ・せん断に対する照査は，発生せん断力が終局せん断強度を下回ることを確認*
	【基礎地盤の支持性能】 ・道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（平成 14 年 3 月）	・基礎地盤の支持性能に対する照査は，杭頭に発生する鉛直力が終局鉛直支持力及び終局引抜き力を下回ることを確認*
地震応答解析	・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987	・有限要素法による 2 次元モデルを用いた時刻歴非線形解析

注記*： 妥当な安全余裕を考慮する。

3. 地震応答解析

3.1 地震応答解析手法

軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答解析は、地盤と構造物の相互作用を考慮できる2次元有限要素法を用いて、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析にて行う。構造部材については、はり要素及び平面ひずみ要素を用いることとするが、非線形特性については鋼管杭の $M-\phi$ 関係を適切にモデル化する。また、地盤については、有効応力の変化に応じた地震時挙動を適切に考慮できるようにモデル化する。地震応答解析については、解析コード「FLIP ver. 7.4.1」を使用する。

地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線の構成則を有効応力解析へ適用する際は、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線に関するせん断ひずみ及び有効応力の変化に応じた特徴を適切に表現できるモデルを用いる必要がある。一般に、地盤は荷重を与えることによりせん断ひずみを増加させていくと、地盤のせん断応力は上限値に達し、それ以上はせん断応力が増加しなくなる特徴がある。また、地盤のせん断応力の上限値は有効応力に応じて変化する特徴がある。よって、耐震評価における有効応力解析では、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線の構成則として、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線に関するせん断ひずみ及び有効応力の変化に応じたこれら2つの特徴を表現できる双曲線モデル（H-Dモデル）を選定する。

地震応答解析手法の選定フローを図3-1に示す。

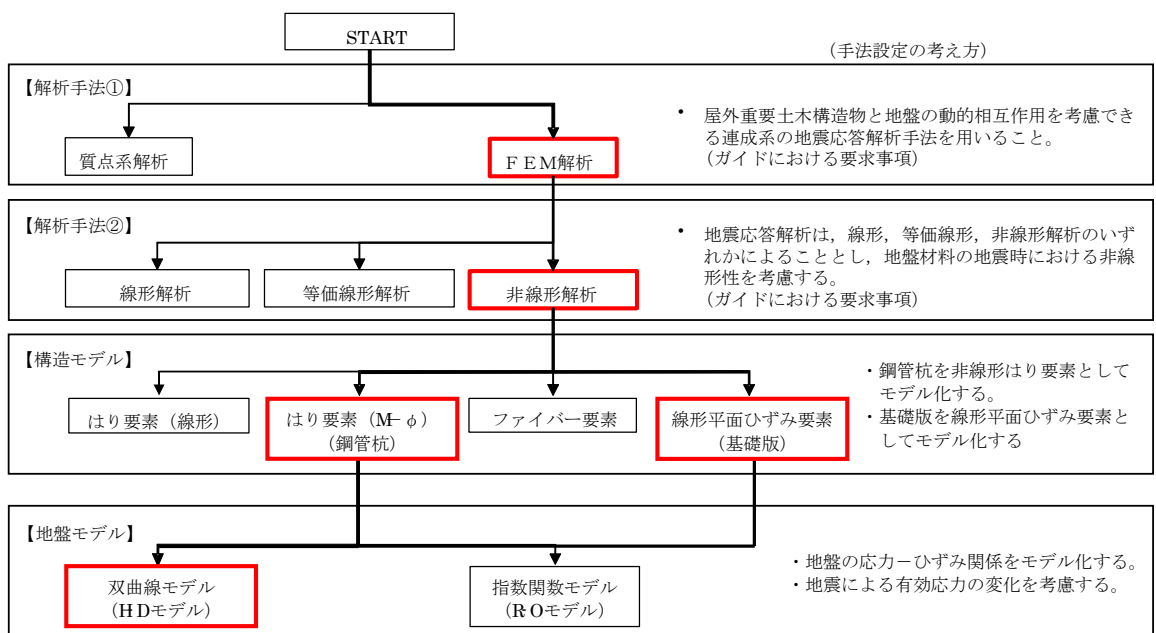


図 3-1 地震応答解析手法の選定フロー

3.2 地震応答解析モデルの設定

3.2.1 解析モデル領域

地震応答解析モデルは、境界条件の影響が地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。具体的には、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 (日本電気協会) を参考に、図 3-2 に示すとおりモデル幅を構造物基礎幅の 5 倍程度、モデル高さを構造物幅の 2 倍程度とする。

なお、解析モデルの境界条件は、側面及び底面ともに粘性境界とする。

地盤の要素分割については、地盤の波動をなめらかに表現するために、最大周波数 20Hz 及びせん断波速度 V_s で算定される波長の 5 又は 4 分割、すなわち $V_s/100$ 又は $V_s/80$ を考慮し、要素高さを 0.5m~1m 程度まで細分割して設定する。

構造物の要素分割については、土木学会マニュアルに、線材モデルの要素分割については、要素長さを部材の断面厚さ又は有効高さの 2.0 倍以下とし、1.0 倍程度とするのが良い旨が示されていることを考慮し、部材の断面厚さ又は有効高さの 1.0 倍程度まで細分割して設定する。なお、杭の要素分割については、杭に接する地盤の要素分割に合わせて設定する。

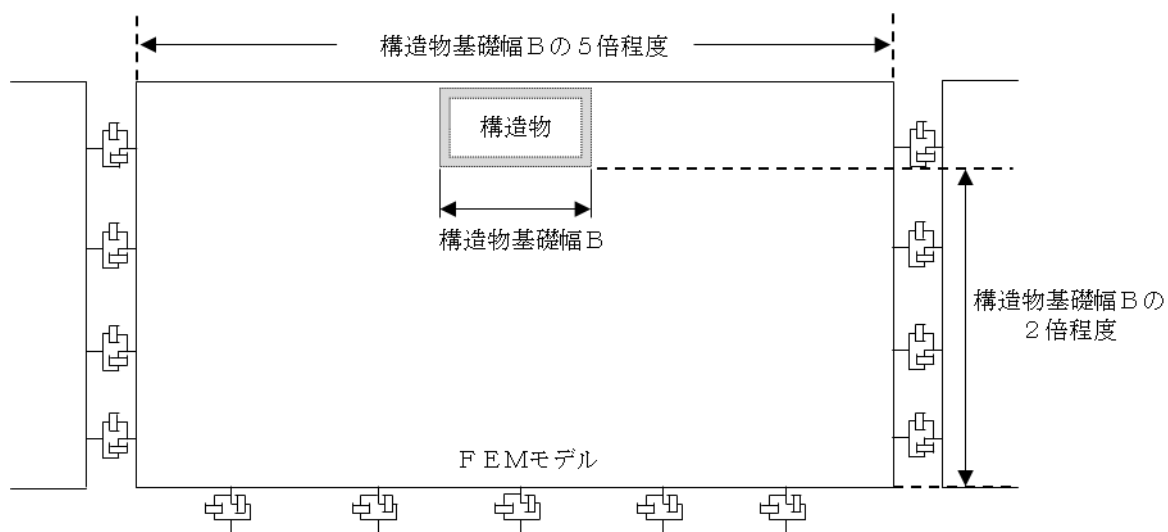


図 3-2 モデル範囲の考え方

2次元有効応力解析モデルは、検討対象構造物とその周辺地盤をモデル化した不整形地盤に加え、この不整形地盤の左右に広がる地盤をモデル化した自由地盤で構成される。この自由地盤は、不整形地盤の左右端と同じ地層構成を有する1次元地盤モデルである。2次元有効応力解析における自由地盤の初期応力解析から不整形地盤の地震応答解析までのフローを図3-3に示す。また、軽油タンク基礎（6号機設備）周辺の地質断面図を図3-4及び図3-5に示す。

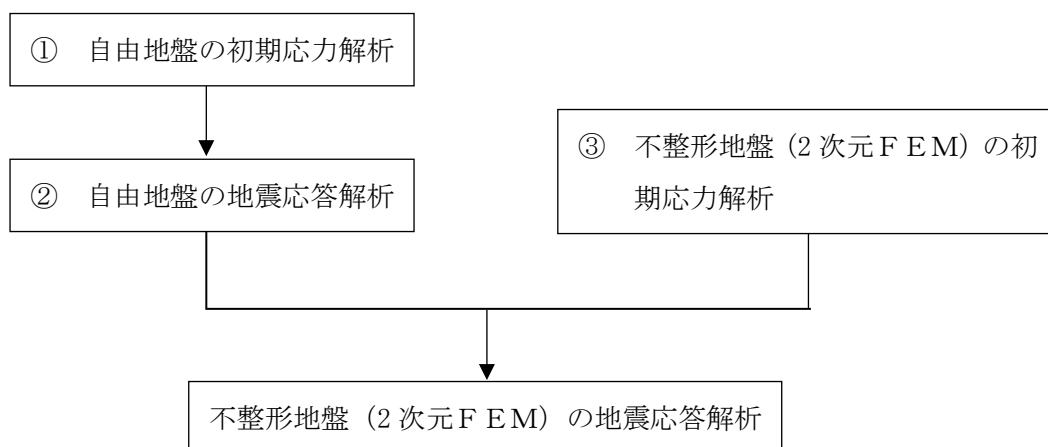
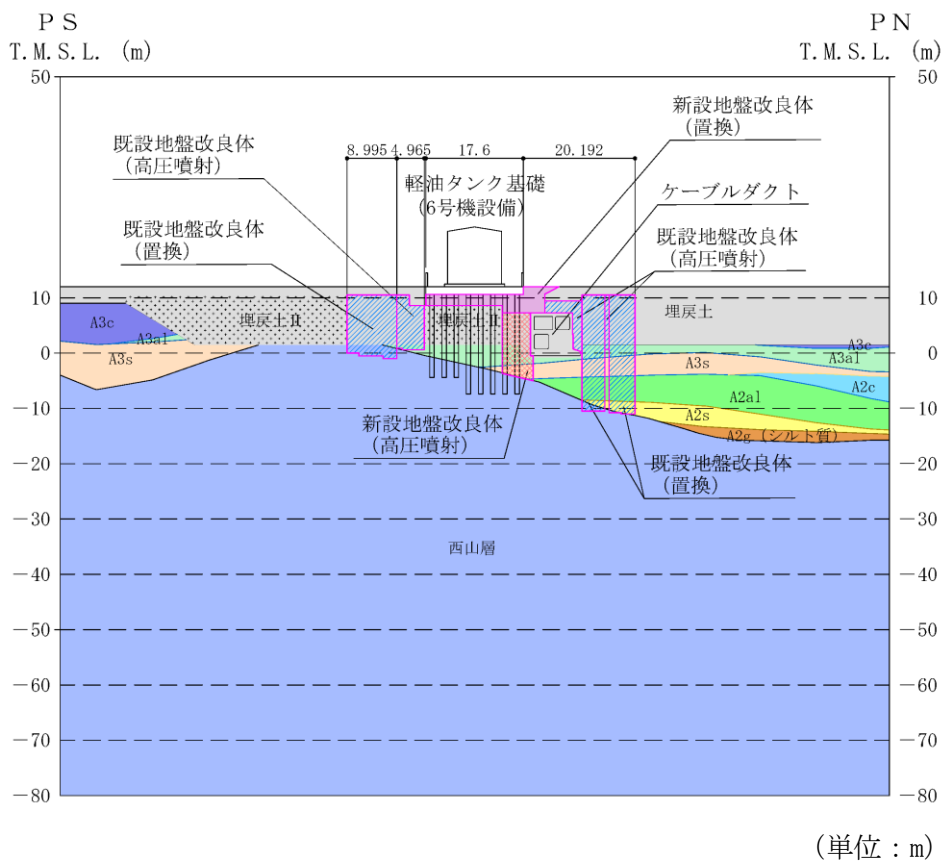


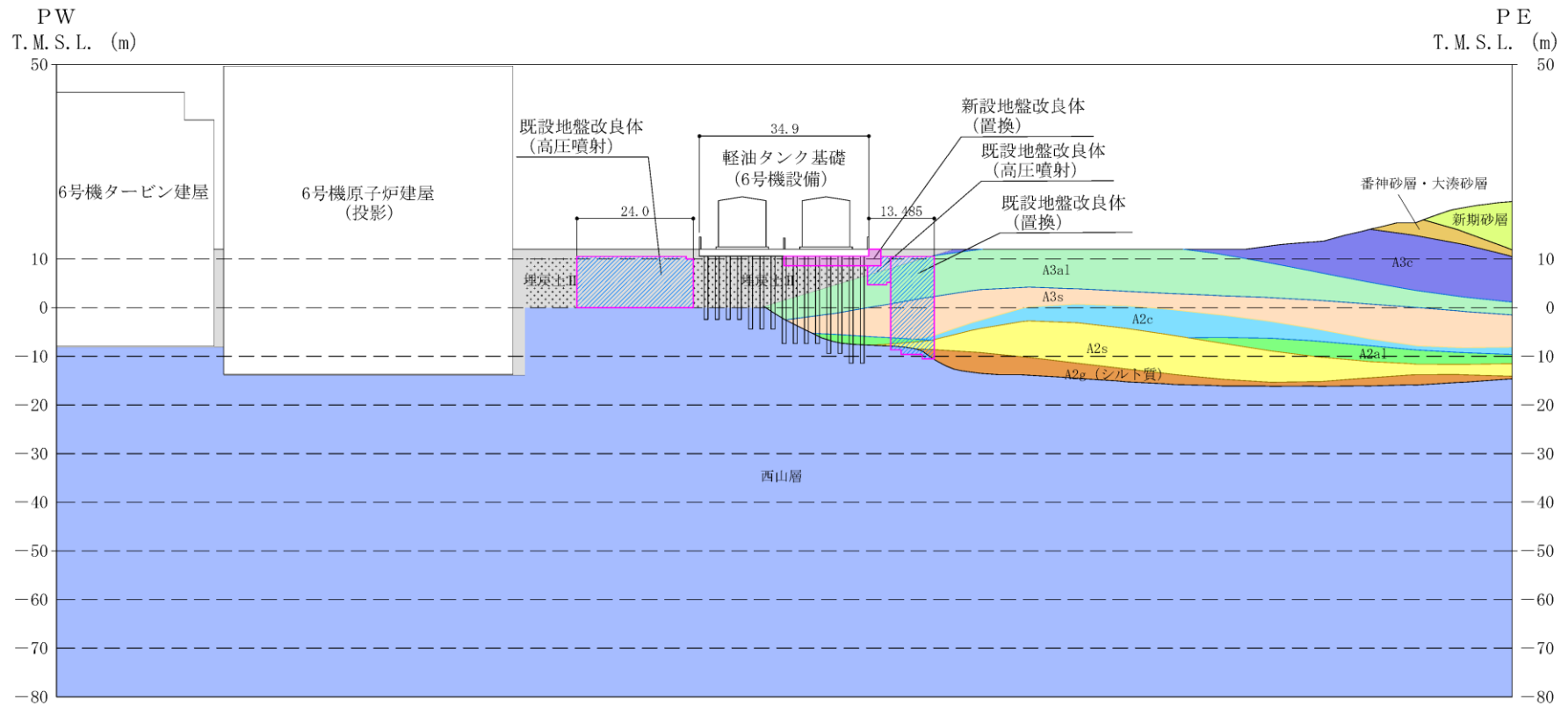
図 3-3 自由地盤の初期応力解析から不整形地盤（2次元FEM）の地震応答解析までのフロー



既設／新設	凡例	地盤改良工法
既設地盤改良体		置換 (CD掘削)
新設地盤改良体		置換 (開削)
		高圧噴射

注：置換工法 (CD掘削) の施工範囲の内、地上構造物及び埋設構造物がある箇所では、高圧噴射を適用

図 3-4 軽油タンク基礎 (6号機設備) 周辺地質断面図 (A-A断面)



(単位：m)

既設／新設	凡例	地盤改良工法
既設地盤改良体		置換 (CD掘削)
新設地盤改良体		置換 (開削)
		高圧噴射

注：置換工法 (CD掘削) の施工範囲の内、地上構造物及び埋設構造物がある箇所では、高圧噴射を適用

図 3-5 軽油タンク基礎 (6号機設備) 周辺地質断面図 (B-B断面)

3.2.2 境界条件

(1) 初期応力解析時

初期応力解析は、地盤や構造物の自重等の静的な荷重を載荷することによる常時の初期応力を算定するために行う。初期応力解析時の境界条件は底面固定とし、側方は自重等による地盤の鉛直方向の変形を拘束しないよう鉛直ローラーとする。境界条件の概念図を図3-6に示す。

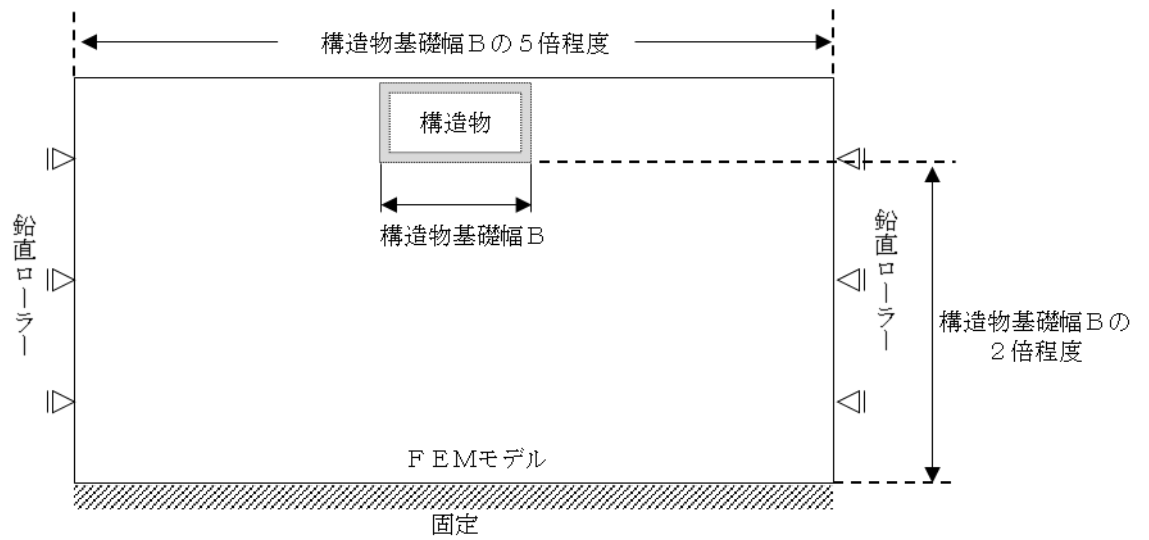


図 3-6 初期応力解析における境界条件の概念図

(2) 地震応答解析時

地震応答解析時の境界条件については、有限要素解析における半無限地盤を模擬するため、粘性境界を設ける。底面の粘性境界については、地震動の下降波がモデル底面境界から半無限地盤へ通過していく状態を模擬するため、ダッシュポットを設定する。側方の粘性境界については、自由地盤の地盤振動と不整形地盤側方の地盤振動の差分が側方を通過していく状態を模擬するため、自由地盤の側方にダッシュポットを設定する。軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答解析モデルを図3-7及び図3-8に示す。

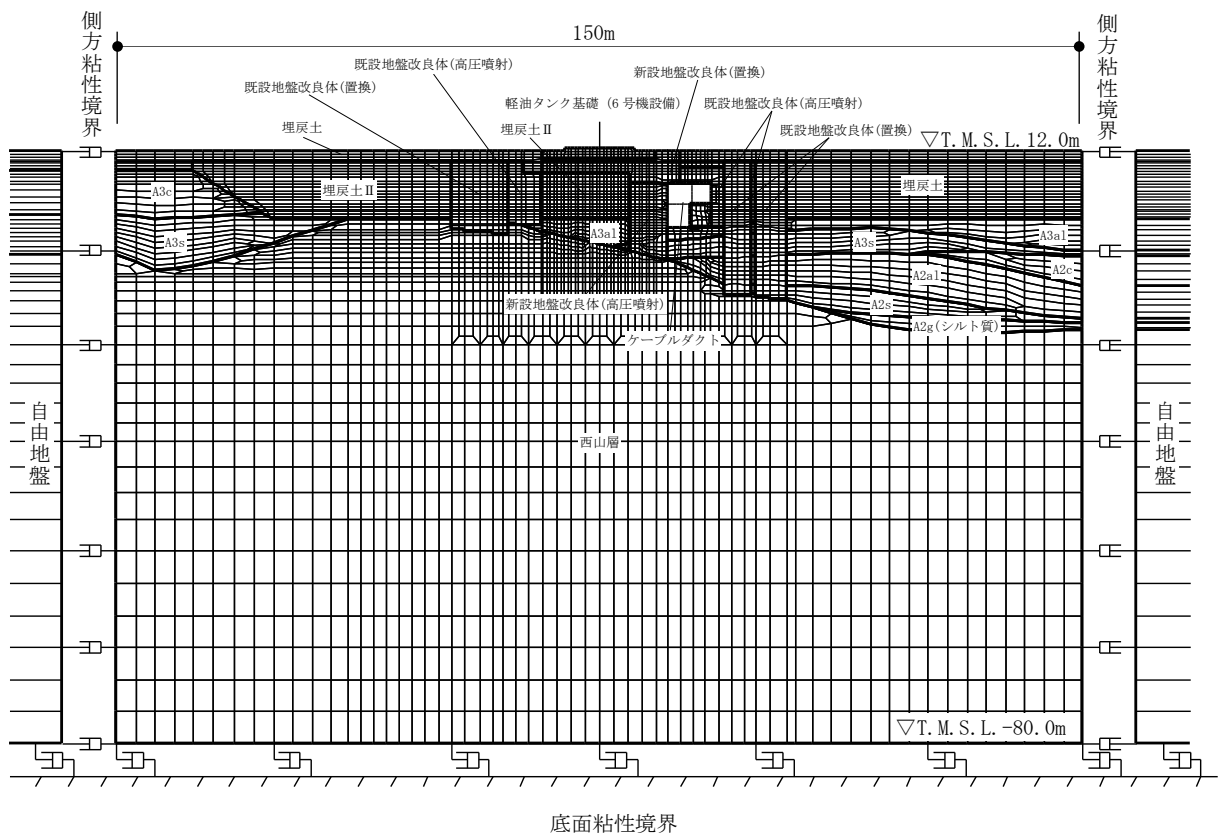


図 3-7 軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答解析モデル（A-A断面）

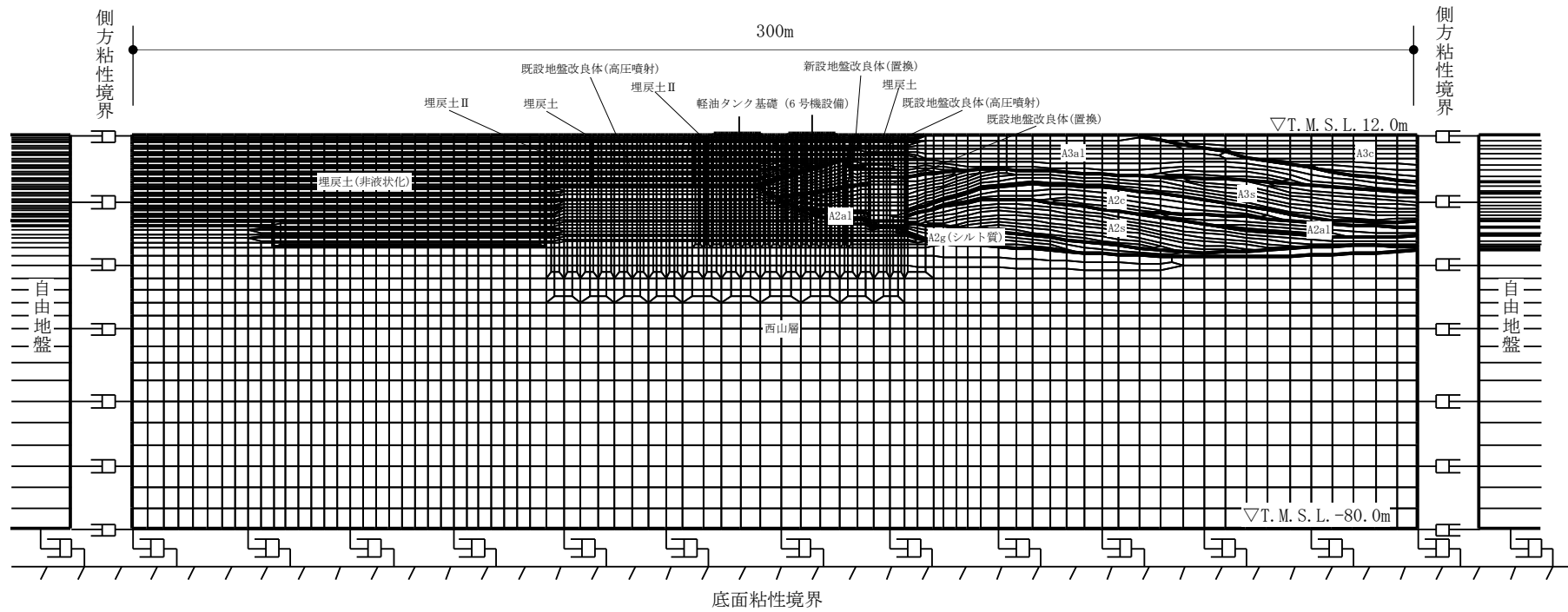


図 3-8 軽油タンク基礎(6号機設備)の地震応答解析モデル(B-B断面)

3.2.3 解析奥行幅

A-A断面及びB-B断面の解析奥行幅は、各断面の軽油タンク基礎幅として設定する。
解析奥行幅の考え方を図 3-9 に示す。

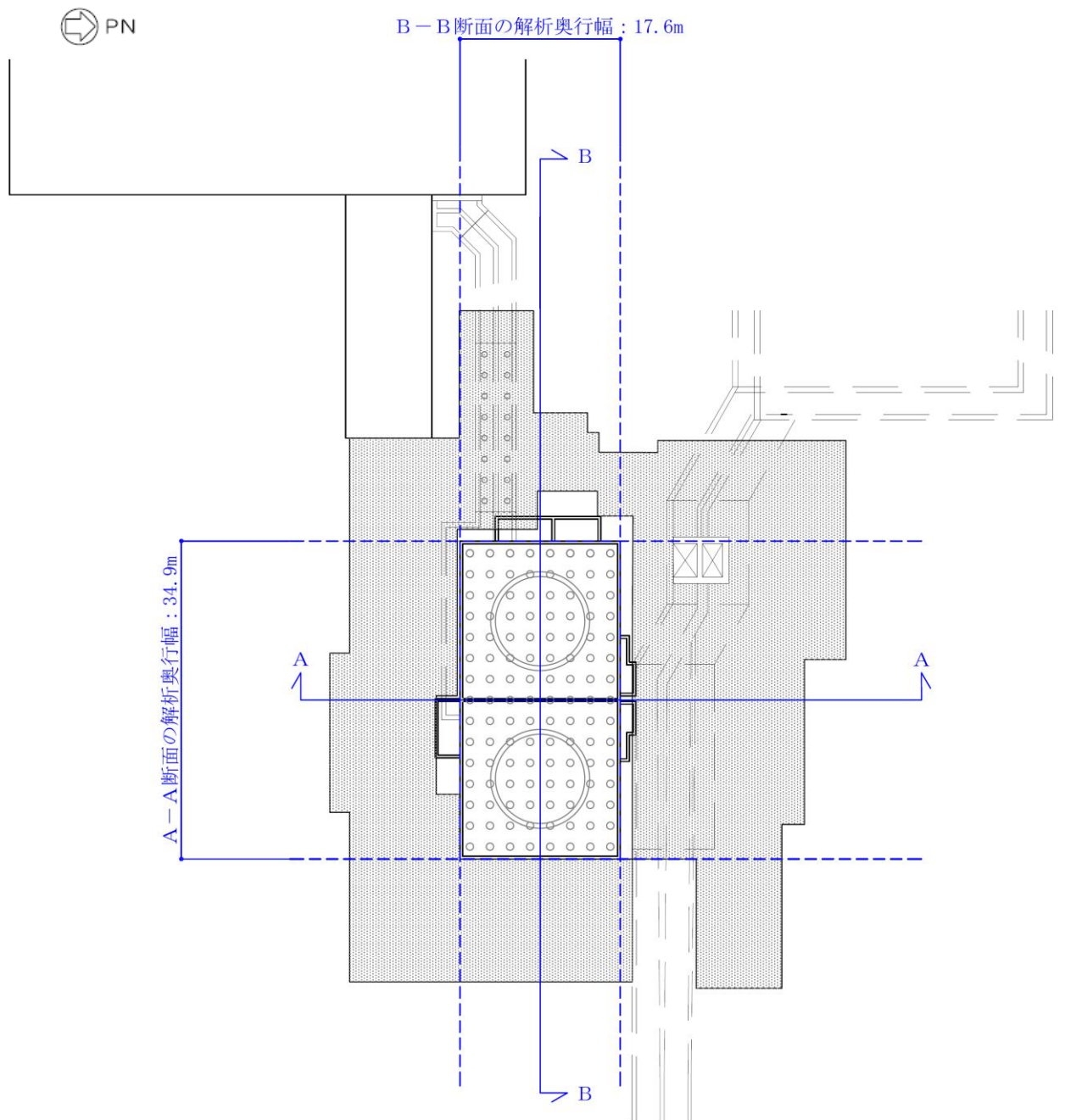


図 3-9 各断面の解析奥行幅の考え方

3.2.4 構造物のモデル化

基礎版（鉄筋コンクリート部材）は、線形平面ひずみ要素でモデル化する。鋼管杭は、非線形はり要素でモデル化する。モデル化する杭の杭長は、解析断面位置の杭長とし、杭頭部は基礎版と剛結する。

軽油タンク基礎（6号機設備）の解析モデルにおける構造物部分の拡大図を図 3-10 に示す。

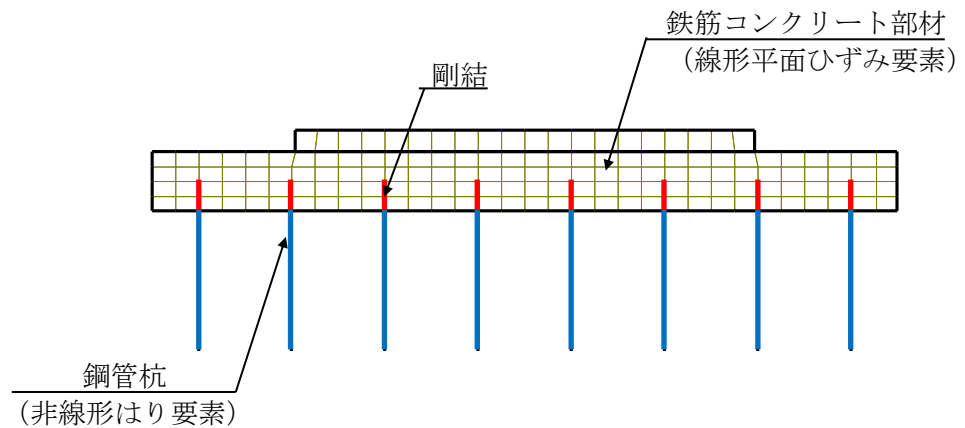


図 3-10 構造物の解析モデル（A-A断面，構造物部分拡大部）

3.2.5 地盤改良体のモデル化

構造物周辺の地盤改良体の効果を考慮するため、改良率及び解析奥行幅に応じた等価剛性を設定し、モデル化する。

3.2.6 ジョイント要素の設定

「地盤と構造物」，「地盤改良体と構造物」及び「地盤と地盤改良体」との接合面にジョイント要素を設けることにより，地震時の接合面における剥離及びすべりを考慮する。なお，既設地盤改良体と新設地盤改良体との接合面については，既設地盤改良体に対し新設地盤改良体をラップさせて設置し，接合させることから，ジョイント要素は設定しない。

ジョイント要素は，隣接する要素の接合面で法線方向及びせん断方向に対して設定する。法線方向については，常時の圧縮荷重以上の引張荷重が生じた場合，剛性及び応力を零とし，剥離を考慮する。せん断方向については，各要素間の接合面におけるせん断抵抗力以上のせん断荷重が生じた場合，せん断剛性を零とし，すべりを考慮する。

なお，せん断強度 τ_f は，次式により設定する。

$$\tau_f = c_B + \sigma' \tan \phi_B$$

ここで，

σ' : 要素間の直応力

c_B : 付着力

ϕ_B : 摩擦角

要素間の付着力 c_B ，摩擦角 ϕ_B は，表 3-1 に示す道路橋示方書の設定を参考に，表 3-2 のとおり設定する。周辺地盤の粘着力 c ，内部摩擦角 ϕ は，V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき，表 3-3 のとおり設定する。

表 3-1 道路橋示方書における摩擦角 ϕ_B と付着力 c_B

条 件	摩擦角 ϕ_B (摩擦係数 $\tan \phi_B$)	付着力 c_B
土とコンクリート	$\phi_B = \frac{2}{3} \phi$	$c_B = 0$
土とコンクリートの間に栗石を敷く場合	$\tan \phi_B = 0.6$ $\phi_B = \phi$ } の小さい方	$c_B = 0$
岩とコンクリート	$\tan \phi_B = 0.6$	$c_B = 0$
土と土又は岩と岩	$\phi_B = \phi$	$c_B = c$

ただし， ϕ : 支持地盤のせん断抵抗角 (°) c : 支持地盤の粘着力 (kN/m²)

(道路橋示方書より引用)

表 3-2 要素間の付着力 c_B と摩擦角 ϕ_B

条件	付着力 c_B	摩擦角 ϕ_B (°)
地盤と構造物	$c_B=0$	$\phi_B=2/3 \phi$
地盤改良体と構造物	$c_B=0$	$\phi_B=31.0$
地盤と地盤改良体*	$c_B=c$	$\phi_B=\phi$

注記* : 地盤と地盤改良体の付着力と摩擦角は, 地盤の c , ϕ を適用する。

表 3-3 周辺地盤の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ

地盤	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
埋戻土	0.0	35.9
A2s 層	0.0	36.6
A3s 層	0.0	36.6
埋戻土 II	7.4	31.7
A3a1 層	29.2	34.2
A2c 層	113.0	27.9
A2a1 層	82.8	28.7
A2g 層 (シルト質)	113.0	27.9
西山層	1370-5.04Z *	0.0

注記* : Z は, 標高 (m) を示す

ジョイント要素のばね定数は, 数値解析上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きい値として, 港湾構造物設計事例集 (上巻) (沿岸技術研究センター, 平成 19 年 3 月) に従い, 表 3-4 の通り設定する。ジョイント要素の力学特性を図 3-11 に, ジョイント要素の配置を図 3-12 に示す。

表 3-4 ジョイント要素のばね定数

せん断剛性 k_s (kN/m ³)	圧縮剛性 k_n (kN/m ³)
1.0×10^6	1.0×10^6

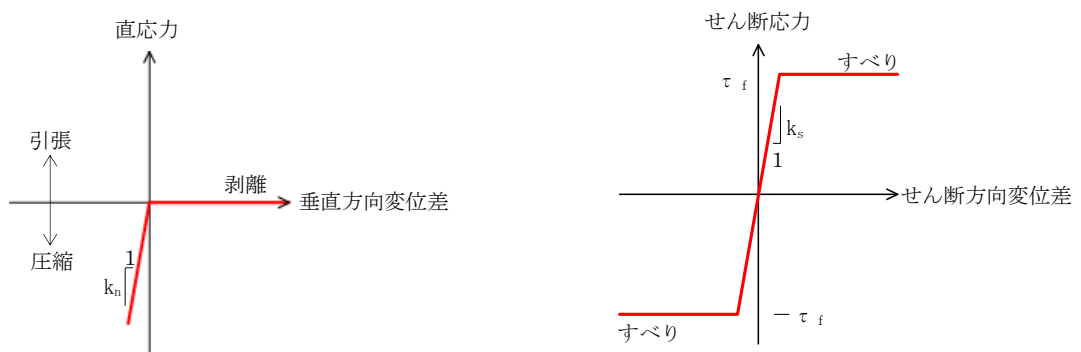
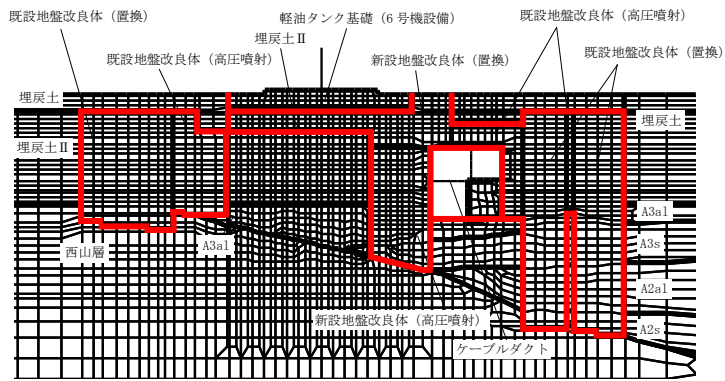
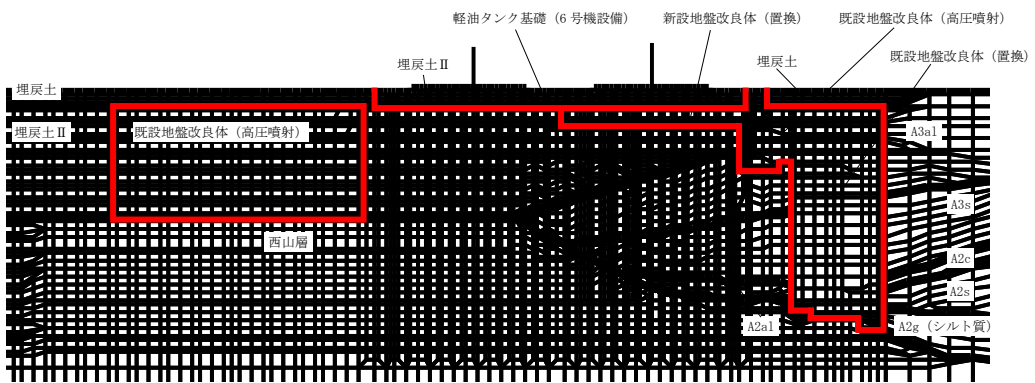


図 3-11 ジョイント要素の力学特性



(A-A断面)



(B-B断面)

— : ジョイント要素

図 3-12 ジョイント要素の配置

3.2.7 杭－地盤相互作用ばねの設定

地盤と杭の接合面に杭－地盤相互作用ばねを設けることにより，地震時の地盤と杭の接合面における相互作用の3次元効果を2次元モデルで適切に考慮する。

杭－地盤相互作用ばねの杭軸方向については，地盤と杭の接合面におけるせん断抵抗力以上のせん断荷重が発生した場合，せん断剛性を零とし，すべりを考慮する。

せん断強度 τ_f は，次式により設定する。

$$\tau_f = c_B + \sigma' \tan \phi_B$$

ここで，

τ_f : せん断強度

c_B : 付着力

ϕ_B : 摩擦角

付着力 c_B 及び摩擦角 ϕ_B は，軽油タンク基礎（6号機設備）の杭が鋼管杭であることを踏まえ，鋼材と地盤間の条件であることを考慮し設定する。付着力 c_B は道路橋示方書に基づき，表 3-2 に示す「地盤と構造物」の条件から考慮しないものとする。摩擦角 ϕ_B は，港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，平成 19 年 7 月）において，構造物と地盤間の壁面摩擦角を $15 \sim 20^\circ$ とする旨が記載されるとともに，港湾構造物設計事例集（上巻）（沿岸技術研究センター，平成 19 年 3 月）において，鋼材と地盤間の摩擦角を 15° と設定していることから，本解析における摩擦角 ϕ_B は 15° と設定する。

杭－地盤相互作用ばねの杭軸方向のばね定数は，数値解析上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きい値として，港湾構造物設計事例集（上巻）（沿岸技術研究センター，平成 19 年 3 月）に従い，表 3-5 のとおり設定する。

また，杭－地盤相互作用ばねの杭軸直角方向のばね定数については，杭径及び杭間隔より設定する*。

杭－地盤相互作用ばねの力学特性を図 3-13 に，杭－地盤相互作用ばねの配置を図 3-14 に示す。

注記* : FLIP 研究会 14 年間の検討結果のまとめ「理論編」（FLIP コンソーシアム）

表 3-5 杭－地盤相互作用ばねのばね定数

	せん断剛性 k_s (kN/m^3)
杭軸方向	1.0×10^6

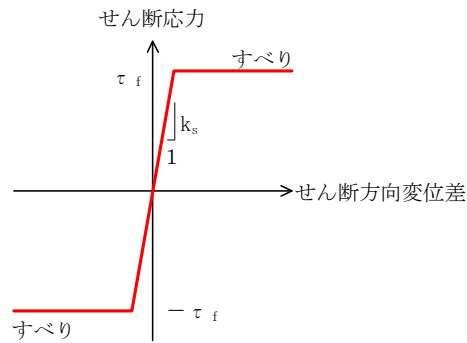
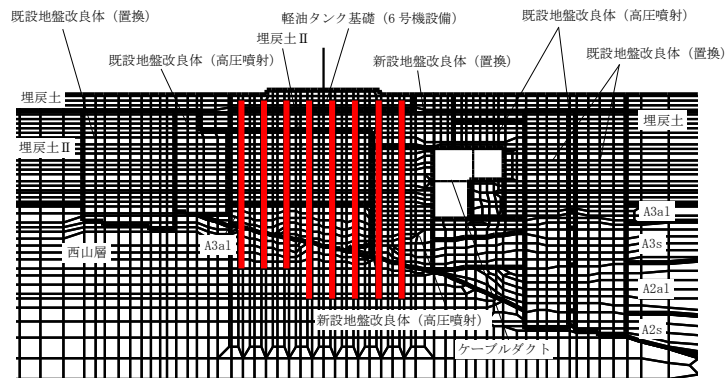
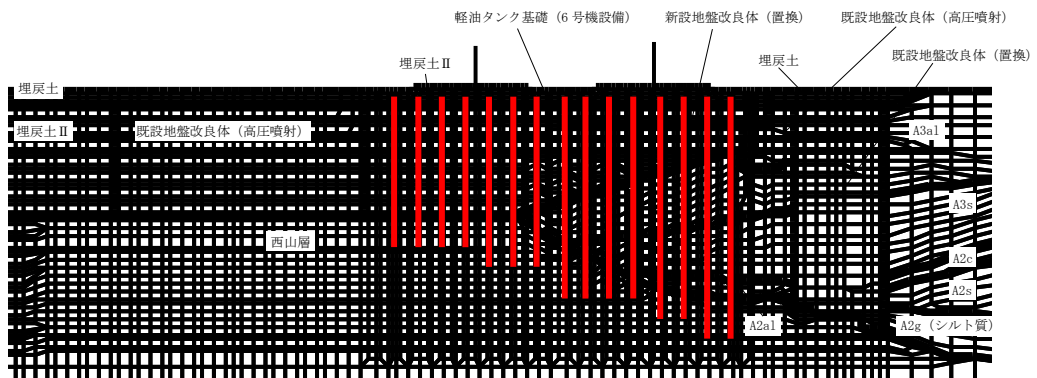


図 3-13 杭-地盤相互作用ばねの力学特性



(A-A断面)



(B-B断面)

— : 杭-地盤相互作用ばね要素

図 3-14 杭-地盤相互作用ばねの配置

3.2.8 杭先端ばねの設定

杭軸方向の荷重変位関係は、杭の鉛直載荷試験の結果等から図 3-15に示すとおり、双曲線型の関係を示すことが知られている。本解析においても実現象を精緻にモデル化する観点から、杭先端と地盤間にHirayama(1990)*による杭先端抵抗と杭先端変位の双曲線型の関係を杭軸方向のばねの抵抗力と変位差関係に置き換えたばねを設けることにより、杭先端における地盤と杭の相互作用を適切に考慮する。このばねは、圧縮側の関係を取り扱うため、杭先端と地盤間の変位差が引張り状態となった場合、剛性及び応力を零とし、剥離を考慮する。

杭先端ばねの杭軸方向のばねの抵抗力と変位差関係は、次式および図 3-16に示す双曲線型の式で設定される。

Hirayama(1990)では、N値が30または50程度の硬質な砂層地盤における橋梁建設時の杭の鉛直載荷試験結果に対して、当杭先端ばねを用いた荷重変位関係の再現解析を実施し、適用性を検証している。また、当杭先端ばねは「一般社団法人F L I Pコンソーシアム平成25年度研究成果報告書（F L I Pコンソーシアム，2013年）」にて、解析コードF L I Pに対して適用性を確認している。報告書では、砂層に対する杭の押込み実験結果の杭先端抵抗－杭先端変位関係を、当杭先端ばねが概ね再現可能であることを確認している。また、パラメータスタディとして支持層の相対密度を変化させた解析を実施し、当杭先端ばねの適用性を検証している。検証の結果、支持層に液状化等による剛性低下が生じず、所定の支持力を発揮できる場合、当杭先端ばねは解析コードF L I Pに対し適用性を有することが確認されている。

軽油タンク基礎（6号機設備）については、杭の支持層は西山層であり、地震時においても液状化が生じず、所定の杭先端支持力が期待できる岩盤であることから、当杭先端ばねを適用できると判断した。

注記* : Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions (Soils and Foundations, Vol. 30, No. 1, pp55-64, H.Hirayama, 1990)

$$q = z_e / (a_e + b_e \cdot z_e)$$

q : 杭先端抵抗

z_e : 杭先端変位

a_e : 基準変位を杭先端における極限支持力で除した値 ($=0.25D_e / q_{ult}$)

b_e : 杭先端における極限支持力の逆数 ($=1 / q_{ult}$)

D_e : 杭径

q_{ult} : 杭先端における極限支持力

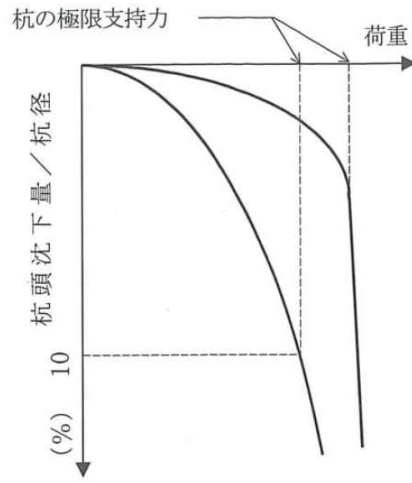


図 3-15 杭の鉛直載荷試験における一般的な荷重—変位関係
(道路橋示方書より引用)

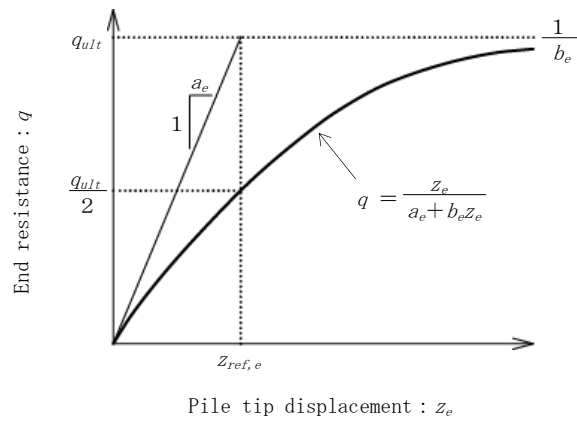


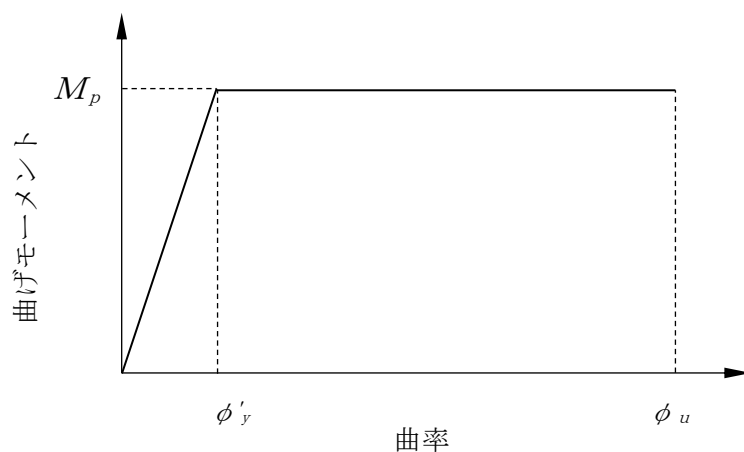
図 3-16 杭先端ばねの杭軸方向のばねの抵抗力と変位差関係 (Hirayama (1990))

3.2.9 材料特性の設定

鉄筋コンクリート部材は、線形平面ひずみ要素を用いてモデル化する。鋼管杭は、非線形はり要素でモデル化し、非線形性を考慮する。材料の非線形特性は、コンクリート標準示方書に基づき設定する。

図 3-17 に、鋼管杭におけるM- ϕ 関係のバイリニアモデルを示す。また、鋼管杭の応力-ひずみ関係を図 3-18 に示す。

なお、解析コードFLIPにおいては、鋼管杭の軸力変動に応じて非線形特性を自動的に設定し、応答を算定している。

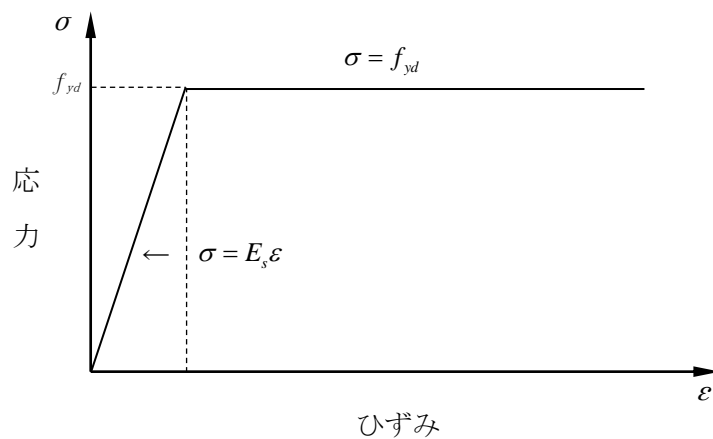


M_p : 終局曲げ強度 (全塑性モーメント)

ϕ'_y : 全塑性モーメントに至る時の曲率

ϕ_u : 局部座屈が発生する時の曲率

図 3-17 鋼管杭のM- ϕ 関係



f_{yd} : 鋼材の降伏応力

E_s : 鋼材のヤング係数

図 3-18 鋼管杭の応力-ひずみ関係

3.3 減衰定数

減衰定数は、KK7 補足-027-1「資料 1 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に基づき設定する。

3.4 荷重の組合せ

耐震評価にて考慮する荷重は、通常運転時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせ設定する。地震荷重には、地震時土圧、機器・配管系からの反力による荷重が含まれるものとする。

なお、軽油タンク基礎（6号機設備）は、地中に埋設されている構造物であることから運転時の異常な過度変化時の状態及び設計基準事故時の状態の影響を受けないと考えられるため、当該状態についての組合せは考慮しないものとする。また、重大事故等対処時においても、地中で設計基準事故時の条件を上回るような事象は発生しないため、設計基準事故時の条件を上回る荷重はない。

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

地震時に軽油タンク基礎（6号機設備）に作用する機器・配管系の荷重について、軽油タンク（6号機設備）は一質点でモデル化し、その他機器・配管系は解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

表 3-6 荷重の組合せ

種別		荷重		算定方法
永久荷重	固定荷重	躯体自重	○	・設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する
		機器・配管自重	○	・機器・配管の重さに基づいて設定する
		土被り荷重	—	・構造物に土被りはないため考慮しない
		永久上載荷重	—	・地盤表面に恒常的に置かれる構造物はないため考慮しない
	静止土圧		○	・常時応力解析により算定する
	外水圧		○	・地下水位に応じた静水圧として設定する ・地下水の密度を考慮する
	雪荷重		○	・積雪を考慮する
偶発荷重 (地震荷重)	水平地震動	○	・基準地震動 S_s による水平・鉛直同時加振を考慮する	
	鉛直地震動	○	・躯体、機器・配管の慣性力、動土圧を考慮する	

3.4.1 機器・配管荷重

(1) 軽油タンク（6号機設備）荷重

図 3-19 に示すとおり、軽油タンク（6号機設備）を一質点でモデル化することにより、軽油タンク（6号機設備）による荷重を考慮する。質点要素の質量及びはり要素の物性値は、V-2-10-1-2-2-5「軽油タンク（6号機設備）の耐震性についての計算書」及び設計値に基づき、表 3-7 に基づき設定する。

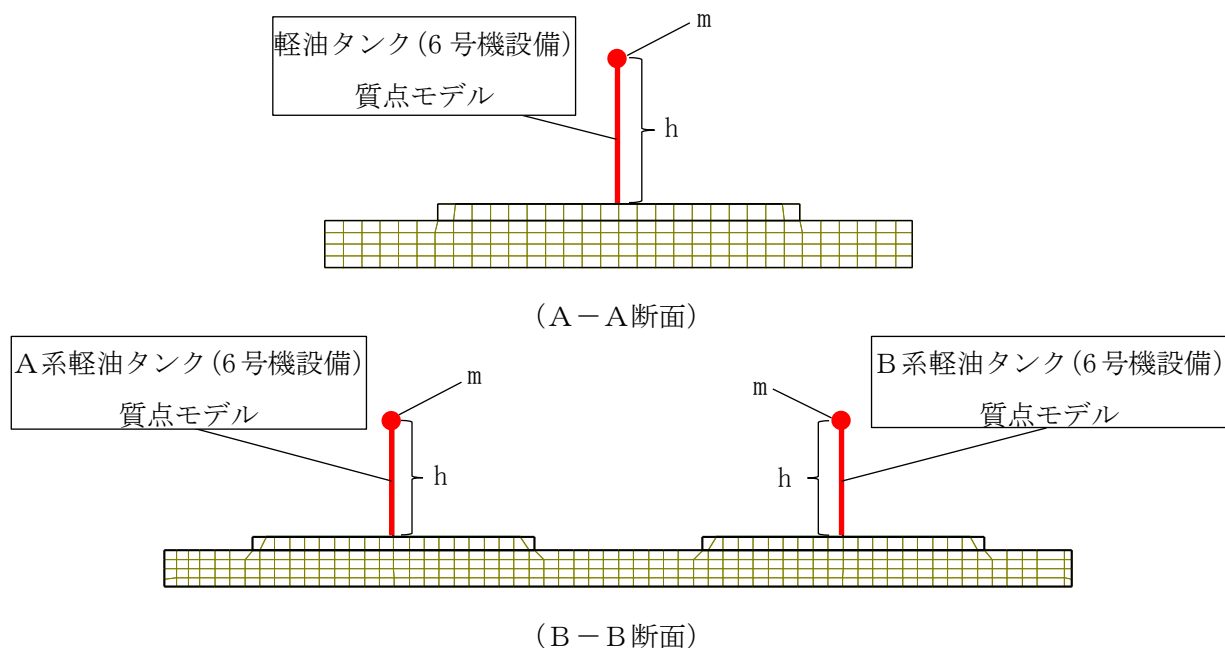


図 3-19 軽油タンク（6号機設備）質点モデル

表 3-7 各タンクの諸元

名称	質量* m (kg)	タンク基礎から 重心までの距離 h (mm)	ヤング 係数 (MPa)	ポアソン 比	断面積 (mm ²)	せん断 断面積 (mm ²)	断面二次 モーメント (mm ⁴)
A系タンク (6号機設備)	632900	4248	200000	0.3	1.112×10 ⁶	7.416×10 ⁵	1.345×10 ¹³
B系タンク (6号機設備)	647100	4418	200000	0.3	1.112×10 ⁶	7.416×10 ⁵	1.345×10 ¹³

注記* : 内包液（軽油）及び積雪荷重を含む

(2) 付帯設備荷重

荷重を考慮する付帯設備を図 3-20 及び表 3-8 に示す。各付帯設備の荷重は図 3-21 に示すとおり、地震応答解析モデルへ入力する。

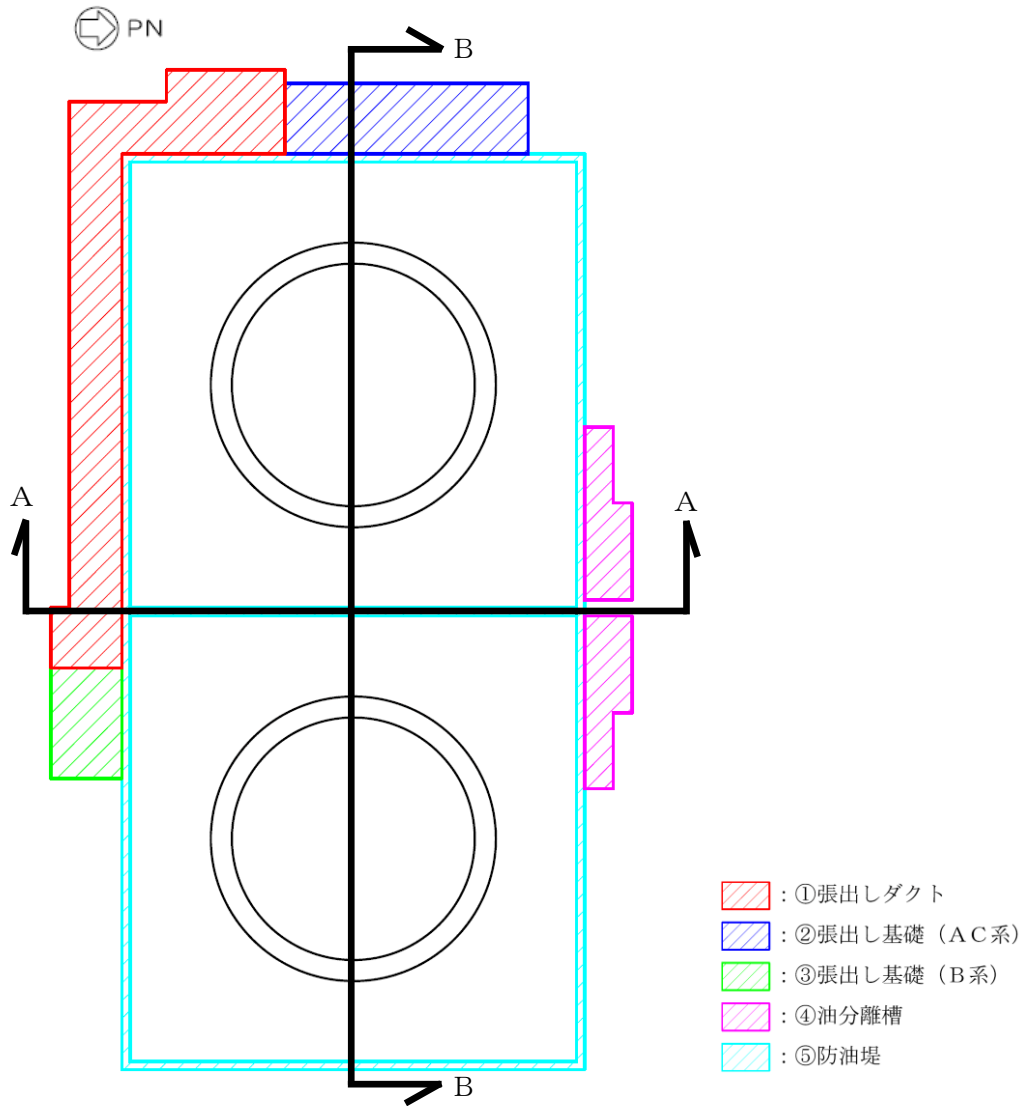


図 3-20 荷重を考慮する付帯設備

表 3-8 荷重を考慮する付帯設備

付帯設備		質量	考慮する質量
①張出しダクト		399t	<ul style="list-style-type: none"> ・ダクト躯体 ・燃料移送配管 ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護版(AC) ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護版(B) ・積雪
②張出し基礎 (AC系)		151t	<ul style="list-style-type: none"> ・張出し基礎躯体 ・燃料移送ポンプ(A) ・燃料移送ポンプ(C) ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護版(AC) ・積雪
③張出し基礎 (B系)		69t	<ul style="list-style-type: none"> ・張出し基礎躯体 ・燃料移送ポンプ(B) ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護版(B) ・積雪
④油分離槽		40t	<ul style="list-style-type: none"> ・油分離層躯体 ・積雪
⑤防油堤	基礎端部	1.50t/m (1.85~2.10t/m)*	<ul style="list-style-type: none"> ・防油堤躯体 ・燃料移送配管 (一部)
	南北方向中央	1.66t/m	<ul style="list-style-type: none"> ・防油堤躯体

注記* : 燃料移送系配管 (6号機設備) を含めた質量

- ↓ : ①張出しダクト荷重
- ↓ : ②張出し基礎 (AC系) 荷重
- ↓ : ③張出し基礎 (B系) 荷重
- ↓ : ④油分離槽荷重
- ↓ : ⑤防油堤荷重

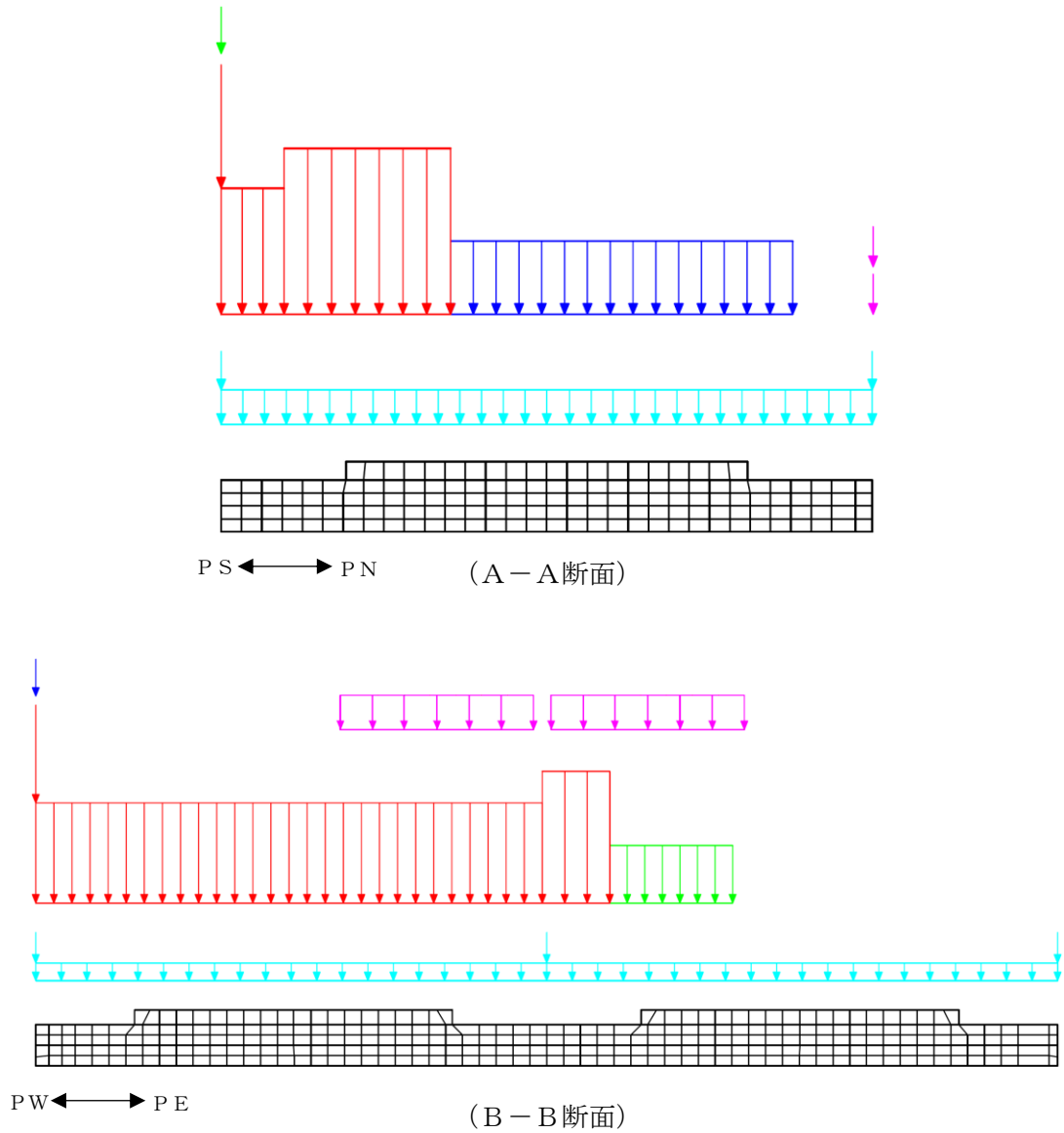


図 3-21 地震応答解析における付帯設備荷重 (鉛直方向*)

注記* : 水平方向にも同位置に載荷する。

3.4.2 外水圧

地下水位は地表面 (T. M. S. L. 12.0m) として設定する。地下水の密度は、 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ とする。

3.4.3 雪荷重

雪荷重については、V-1-1-3「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち、V-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷防止に関する基本方針」に従い、積雪厚さ115.4cm、積雪厚さ1cmあたりの荷重を $29.4\text{N}/\text{cm} \cdot \text{m}^2$ とし、積雪荷重を $3.39\text{kN}/\text{m}^2$ として設定する。

3.5 地震応答解析の解析ケース

3.5.1 耐震評価における解析ケース

軽油タンク基礎（6号機設備）は地中埋設構造物であるため、地震時の応答は地盤の応答に大きく影響される。また、構造物の地震時の変形は、主に側方地盤から作用する土圧によって生じ、この作用力は地盤のせん断弾性係数に大きく依存する。したがって、軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価においてばらつきを考慮する物性値は、地盤の初期せん断弾性係数 G_0 とする。

耐震評価における解析ケースを表 3-9 に示す。

地盤剛性のばらつきの影響を考慮するため、地表付近で地下水面をまたぐ地層（埋戻土及び新期砂層）のばらつきは、初期せん断弾性係数と有効拘束圧の関係から初期せん断弾性係数の標準偏差 σ を用いてせん断波速度のばらつきとして設定する。地下水以深の飽和土層（沖積層及び古安田層）のばらつきは、各地層のPS検層の結果から得られるせん断波速度の標準偏差 σ を求め、せん断波速度のばらつきとして設定する（解析ケース②，③，⑤）。

地盤の液状化強度特性は、代表性及び網羅性を踏まえた上で保守性を考慮し、液状化強度試験データの最小二乗法による回帰曲線と、その回帰係数の自由度を考慮した不偏分散に基づく標準偏差 σ を用いて、液状化強度特性を (-1σ) にて設定する（解析ケース①，②，③）。

また、構造物及び機器・配管系への加速度応答に対する保守的な配慮として、地盤の非液状化の条件を仮定した解析ケースを設定する（解析ケース④，⑤）。

上記の地盤剛性及び液状化強度特性の設定を組み合わせた解析ケース（①～⑤）を実施することにより、地盤物性のばらつきの影響を網羅的に考慮する。

耐震評価においては、全ての基準地震動 S_s に対して解析ケース①（基本ケース）を実施する。また、解析ケース①において、曲げ軸力照査及びせん断力照査をはじめとした全ての評価項目について、各照査値が最も厳しい（許容限界に対する余裕が最も小さい）地震動を用い、追加解析ケースとして解析ケース②～⑤を実施する。最も厳しい地震動の選定は、照査値 1.0 に対して 2 倍の余裕となる照査値 0.5 以上を相対的に厳しい地震動の選定の目安として実施する。また、上記解析ケースの結果を踏まえ、さらに照査値が大きくなる可能性がある場合は、追加解析を実施する。

追加解析ケースを実施する地震動の選定フローを図 3-22 に示す。

表 3-9 耐震評価における解析ケース

解析ケース		①	②	③	④	⑤
		基本ケース	地盤物性のばらつき (+1σ) を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース	非液状化の条件を仮定した解析ケース	地盤物性のばらつき (+1σ) を考慮して非液状化の条件を仮定した解析ケース
地盤剛性の設定		地盤剛性 (平均値)	地盤剛性 (+1σ)	地盤剛性 (-1σ)	地盤剛性 (平均値)	地盤剛性 (+1σ)
液状化強度特性の設定		液状化強度特性 (-1σ)	液状化強度特性 (-1σ)	液状化強度特性 (-1σ)	液状化パラメータを非適用	液状化パラメータを非適用
地震動 (位相)	Ss-1	++*	実施			
		+ -*	実施			
		- +*	実施			
		--*	実施			
	Ss-2		実施			
	Ss-3	++*	実施			
		+ -*	実施			
		- +*	実施			
		--*	実施			
	Ss-4		実施			
	Ss-5		実施			
	Ss-6		実施			
Ss-7		実施				
Ss-8	++*	実施				
	- +*	実施				

全ての基準地震動 S_s に対して実施する①の解析ケース (基本ケース) において、せん断力照査及び曲げ軸力照査をはじめとした全ての照査項目について、各照査値が最も厳しい (許容限界に対する余裕が最も小さい) 地震動を用い、②~⑤より追加解析ケースを実施する。また、上記解析ケースの結果を踏まえ、さらに照査値が大きくなる可能性がある場合は、追加解析を実施する。

注記* : 表中の符号+, -は地震動の位相 (水平, 鉛直) を示す。

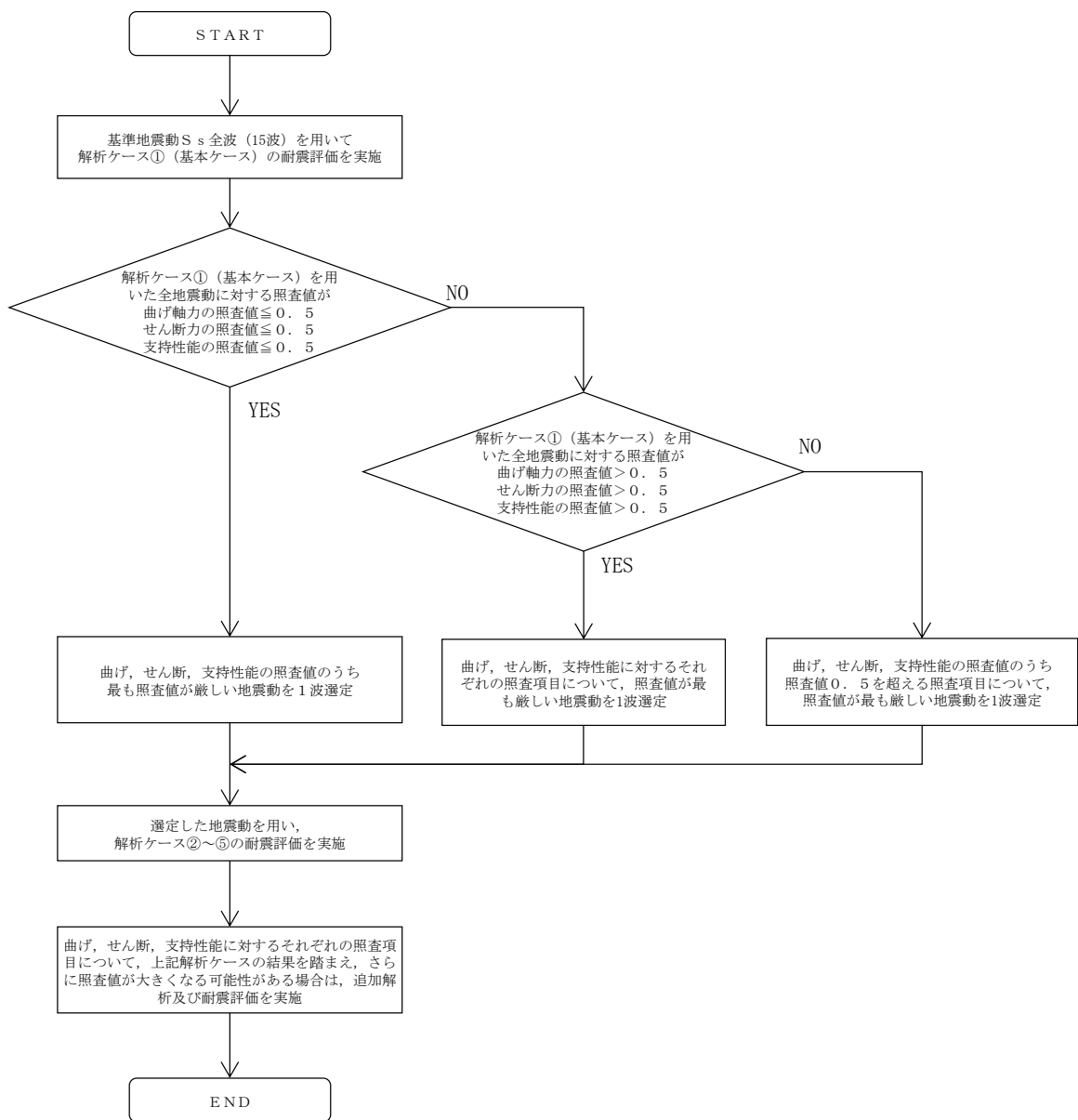


図 3-22 追加解析ケースを実施する地震動の選定フロー

3.5.2 機器・配管系に対する加速度応答抽出のための解析ケース

機器・配管系に対する応答加速度及び応答変位の抽出における解析ケースを表 3-10 に示す。

全ての基準地震動 S_s に対して、解析ケース③、④、⑤を実施する。機器・配管系に対する応答加速度及び応答変位抽出の基本ケースである解析ケース④に対し、応答加速度については、最も地盤が軟らかい条件となる解析ケース③及び最も地盤が固い条件となる解析ケース⑤を実施することで、地盤剛性のばらつき及び液状化の有無を網羅的に考慮する。

応答変位については、最も地盤が軟らかい条件となる解析ケース③を含んでいることから、変位を保守的に見込むことができる。

表 3-10 機器・配管系に対する加速度応答抽出のための解析ケース

解析ケース		③	④	⑤	
		地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース	非液状化の条件を仮定した解析ケース	地盤物性のばらつき (+1σ) を考慮して非液状化の条件を仮定した解析ケース	
地盤剛性の設定		地盤剛性 (-1σ)	地盤剛性 (平均値)	地盤剛性 (+1σ)	
液状化強度特性の設定		液状化強度特性 (-1σ)	液状化パラメータを非適用	液状化パラメータを非適用	
地震動 (位相)	S _s -1	++*	実施	実施	実施
		+ - *	実施	実施	実施
		- + *	実施	実施	実施
		--*	実施	実施	実施
	S _s -2		実施	実施	実施
	S _s -3	++*	実施	実施	実施
		+ - *	実施	実施	実施
		- + *	実施	実施	実施
		--*	実施	実施	実施
	S _s -4		実施	実施	実施
	S _s -5		実施	実施	実施
	S _s -6		実施	実施	実施
	S _s -7		実施	実施	実施
	S _s -8	++*	実施	実施	実施
		- + *	実施	実施	実施

注記* : 表中の符号+, -は地震動の位相(水平, 鉛直)を示す。

4. 基礎版の解析

4.1 解析手法

基礎版の評価は、軽油タンク（6号機設備）及び附帯設備の荷重の平面的な偏りを考慮するため、基礎版を積層シェル要素でモデル化し、水平二方向及び鉛直方向の荷重に対する評価を、版解析を用いて行う。

基礎版に作用する荷重は、地震応答解析（2次元動的有限要素法解析）において基礎版の評価に支配的な荷重が最大となる時刻を選定し、当該時刻における地震時応答から設定する。版解析には、解析コード「Engineer's Studio Ver. 8.0.1」を用いる。

本検討で扱う積層シェル要素は、断面高さ方向に分割された鉄筋コンクリート部材の各層に対し、前川モデルに基づく非線形性を考慮しており、これを断面高さ方向に積分することで、面内変形だけではなく面外変形の非線形挙動も考慮しているものである。

なお、前川モデルは新規制基準適合性審査において使用実績のある解析コード「WCOMD」に適用されている構成則であり、「コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会、2012年）」にも規定されている。

解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、V-2別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

4.2 解析モデルの設定

4.2.1 基礎版のモデル化

基礎版は材料の非線形特性を考慮した積層シェル要素で、杭は杭頭バネ要素でモデル化する。モデル概念図を図 4-1 に、要素分割図を図 4-2 に示す。積層シェル要素は 8 層とし、主鉄筋の位置が層の中心となるよう上側、下側の鉄筋コンクリート要素を設定する。鉄筋コンクリート要素を除く範囲は、無筋コンクリート要素としてモデル化する。

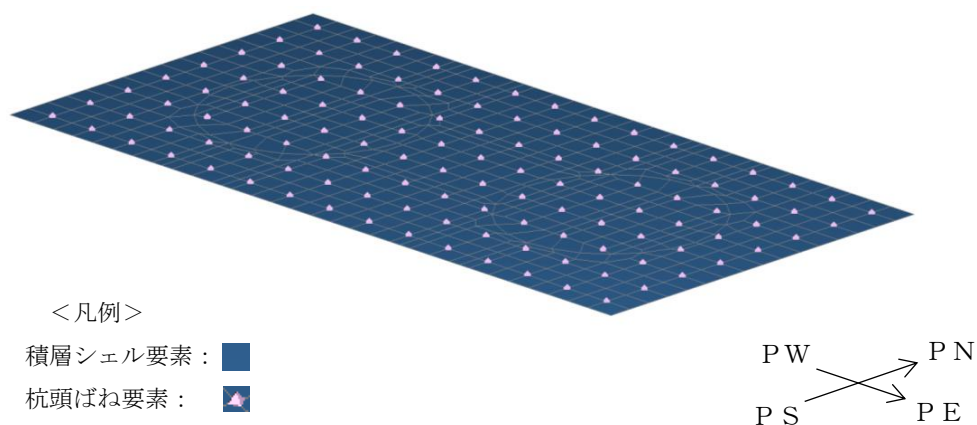


図 4-1 モデル概念図

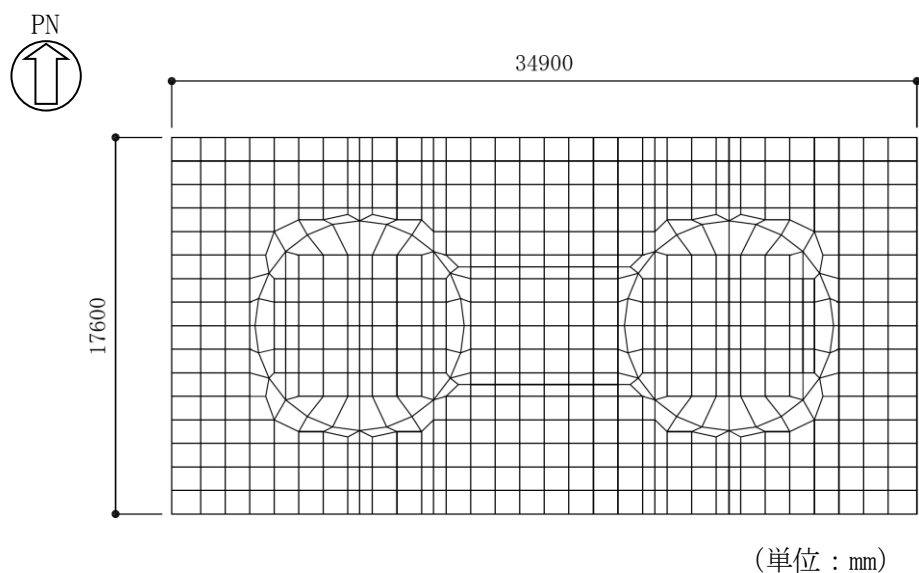


図 4-2 要素分割図

4.2.2 材料の非線形特性

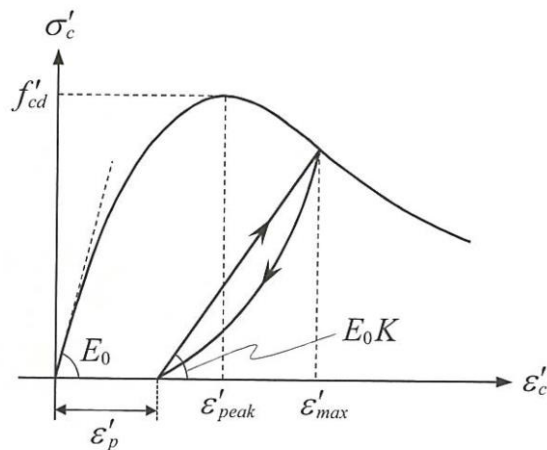
(1) コンクリート

a. 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図 4-3 に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図 4-4 に示す低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left(-0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$

ε'_{peak} : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002 としてもよい)

ε'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

ε'_p : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図 4-3 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性
(コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2012 年) より引用)

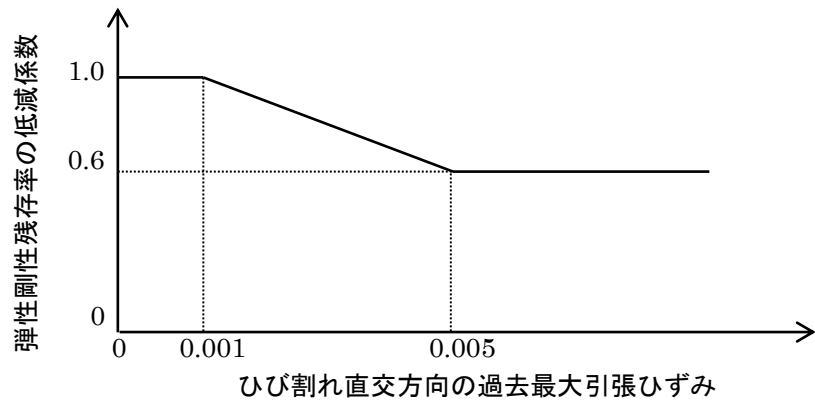


図 4-4 弾性剛性残存率の低減係数

(コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会, 2012年)より引用)

b. 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 4-5 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

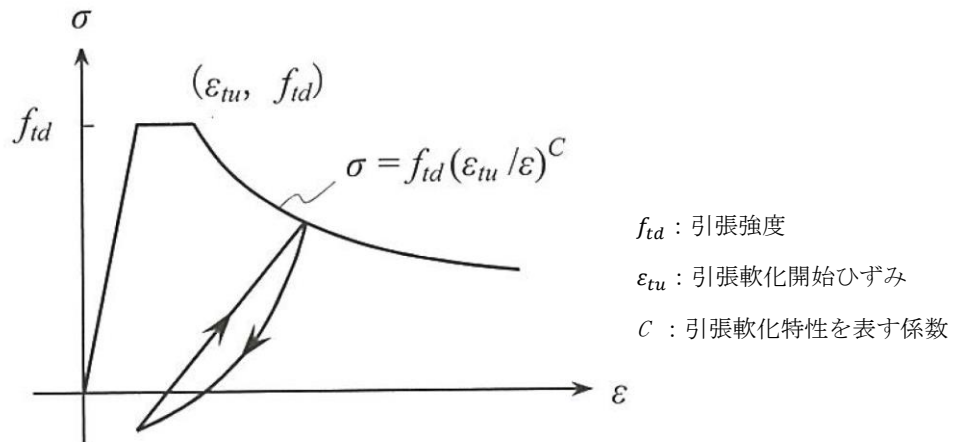


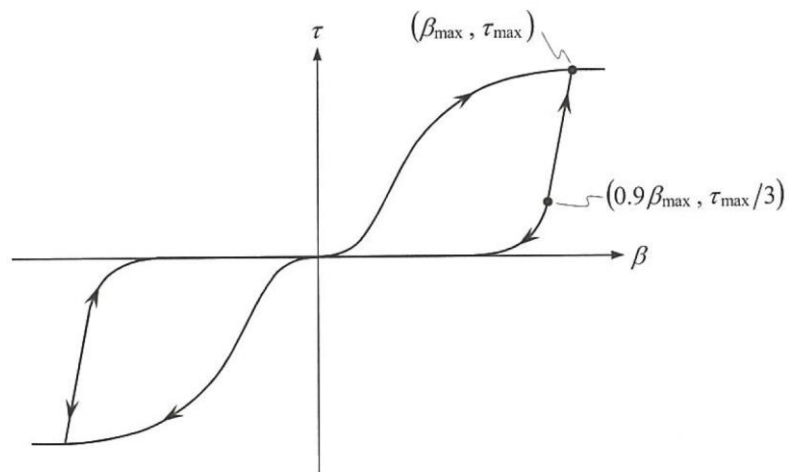
図 4-5 引張応力下における応力-ひずみ関係

(コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会, 2012年)より引用)

c. ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 4-6 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



- β : ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比 (γ / ε)
- τ : ひび割れ面でのせん断応力
- τ_{max} : 除荷開始時せん断応力
- β_{max} : 除荷開始時せん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比

図 4-6 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

(コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2012 年) より引用)

(2) 鉄筋

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、図 4-7 に示すひずみ硬化特性を考慮する。

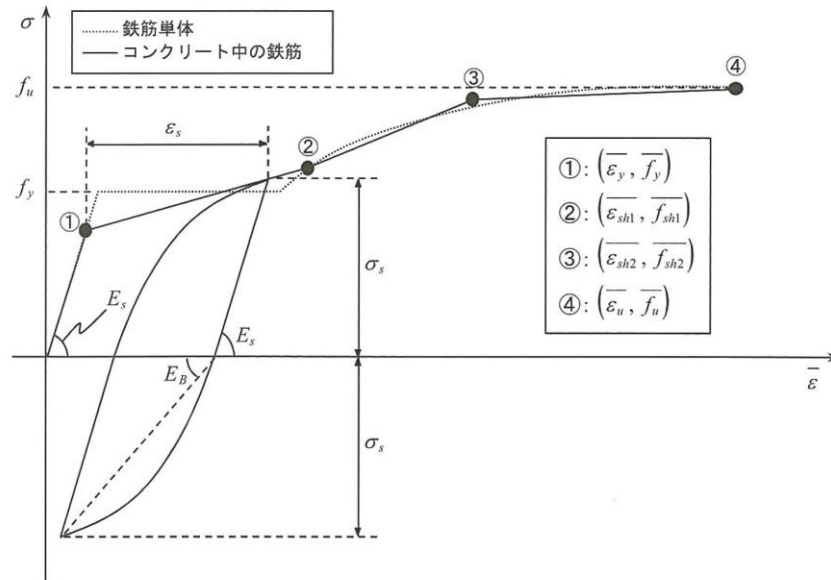


図 4-7 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係
(コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2012 年) より引用)

(3) 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果（引張特性が硬化する現象）として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式*で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_s}{A_{RC}} \bar{\sigma}_s + \frac{A_c}{A_{RC}} \bar{\sigma}_c$$

ここに、 $\bar{\sigma}_s$ 、 $\bar{\sigma}_c$: それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

A_s 、 A_c : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積、 $A_{RC} = A_s + A_c$

注記* : 土木学会マニュアルより引用

4.2.3 杭頭ばね要素の設定

杭頭ばね要素の剛性は、道路橋示方書に基づき設定する。杭頭ばね要素の区分を表 4-1 に、概念図を図 4-8 に示す。

表 4-1 杭頭ばね要素の区分

名称	記号	区分	単位
軸方向ばね	K_v	杭軸方向のばね	kN/m
軸直角方向ばね	K_1	杭の法線方向ばね	kN/m
	K_2	杭の回転ばね	kN/rad
	K_3	杭の法線方向ばね (モーメント)	kNm/m
	K_4	杭の回転ばね (モーメント)	kNm/rad

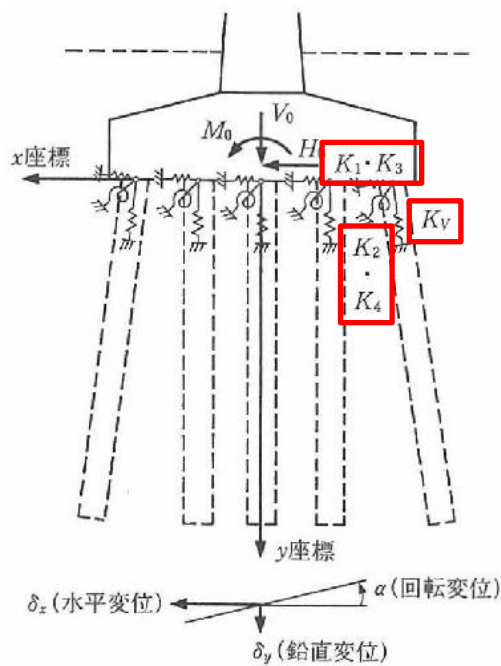


図 4-8 杭頭ばね要素の概念図

(注記* : 杭基礎設計便覧 (日本道路協会, 平成 19 年 1 月) より引用)

各杭頭ばね要素のばね定数は、以下のとおり算出する。

$$K_V = a \frac{A_p E_p}{L}$$

ここで、 K_V : 杭の軸方向ばね定数 (kN/m)

a : 適用する杭工法に応じて設定

$$a = 0.010 (L/D) + 0.36 \quad (\text{中掘り杭})$$

A_p : 杭の純断面積 (mm²)

E_p : 杭のヤング係数 (kN/mm²)

L : 杭長 (m)

D : 杭径 (m)

$$K_1 = \frac{12E I \beta^3}{(1 + \beta h)^3 + 2}$$

$$K_2 = K_3 = K_1 \frac{\lambda}{2}$$

$$K_4 = \frac{4E I \beta (1 + \beta h)^3 + 0.5}{1 + \beta h (1 + \beta h)^3 + 2}$$

ここで、 β : 杭の特性値 $\beta = \sqrt[4]{\frac{\kappa_H D}{4E I}} \quad (\text{m}^{-1})$

λ : $h + \frac{1}{\beta}$

κ_H : 水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

D : 杭径 (m)

$E I$: 杭の曲げ剛性 (kNm²)

h : 設計上の地盤面から上の杭の杭軸方向の長さ (m)

4.3 照査時刻の選定

軽油タンク基礎（6号機設備）は軽油タンクを間接支持する構造物であり、その健全性評価には軽油タンクからの外力が大きく影響する。

表4-2に軽油タンク基礎（6号機設備）が支持する設備の質量を示す。軽油タンク基礎（6号機設備）が支持する設備の中で、軽油タンクの質量が最大であり、地上部に突出した設備であること、及び軽油タンク基礎（6号機設備）は7号機軽油タンク基礎と構造形式が同一であることを踏まえ、基礎版の照査時刻は7号機軽油タンク基礎と同様に、地震応答解析において軽油タンクの圧縮軸力及びモーメントがそれぞれ最大となる時刻とする。

表 4-2 軽油タンク基礎（6号機設備）が支持する設備の質量

設備名称		質量
軽油タンク（A）		633t
軽油タンク（B）		647t
張出しダクト		399t
張出し基礎（AC）		151t
張出し基礎（B）		69t
油分離槽		40t
防油堤	基礎端部	1.50t/m (1.85~2.10t/m)*
	南北方向中央	1.66t/m

注記* : 燃料移送系配管を含めた質量

4.4 入力荷重

版解析の入力荷重は、照査時刻における地震応答解析の応答値を用いて算定する。入力荷重の一覧を表 4-3 に、入力荷重の算定フローを図 4-9 に示す。

入力荷重のうち、「軽油タンクによる荷重」及び「張出しダクト及び張出し基礎による荷重」については、基礎版に対する 3 次元的な荷重を適切に考慮するため、抽出した地震時応答に対し、別途作成した荷重算定モデルを介して入力荷重を算定する。

「慣性力」及び「土圧及び水圧」については、抽出した地震時応答を用いて入力荷重を算定する。

表 4-3 入力荷重一覧

入力荷重		地震応答解析から抽出する地震時応答	载荷位置
軽油タンクによる荷重		断面力	設置位置
張出しダクト及び張出し基礎による荷重		応答加速度	設置位置
慣性力	油分離槽	応答加速度	設置位置
	防油堤	応答加速度	設置位置
	基礎版	応答加速度	基礎版全体
	リングコンクリート及び乾燥砂	応答加速度	設置位置
	積雪	応答加速度	基礎版上面
土圧及び水圧		土圧・水圧	基礎版側面

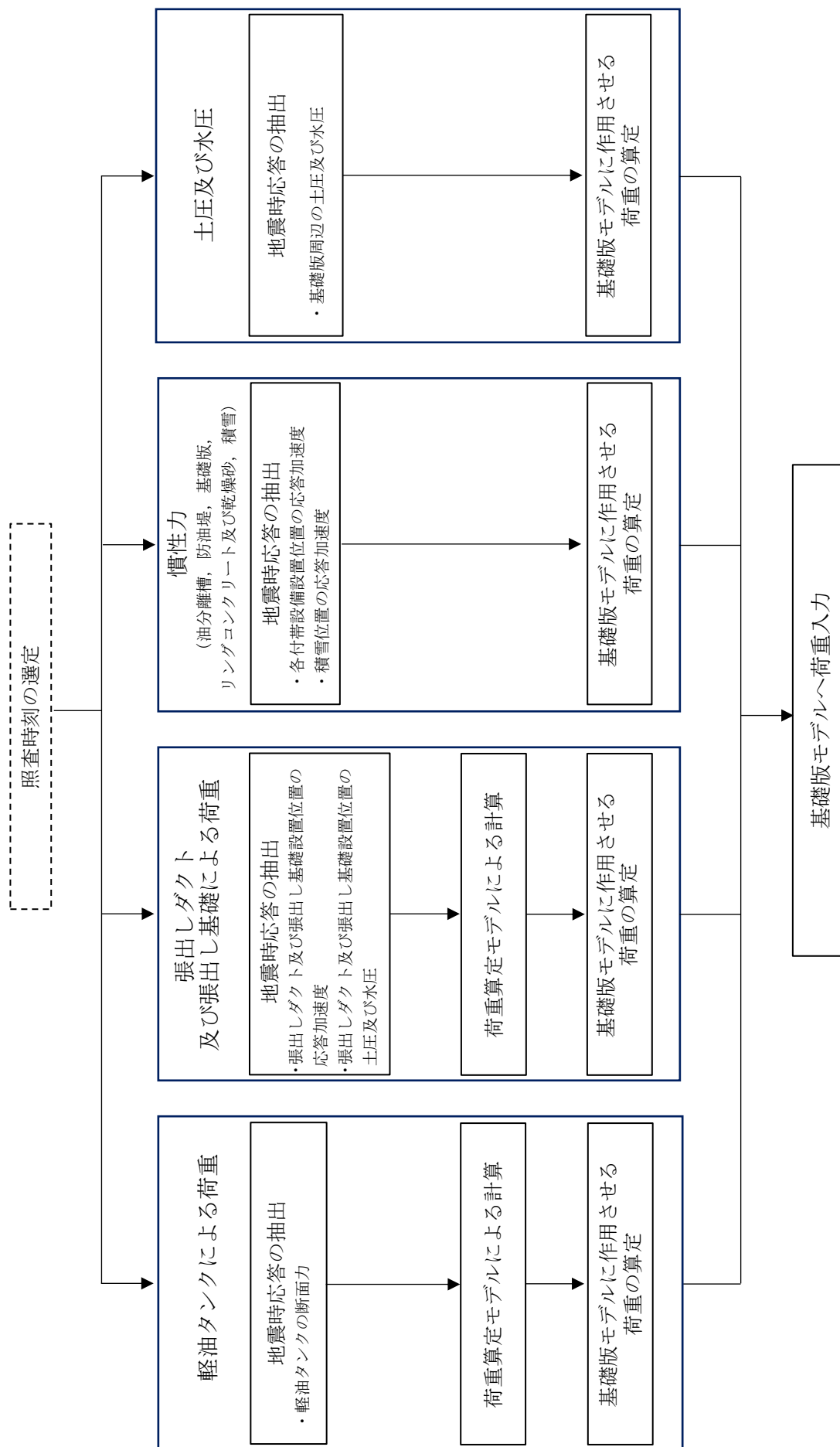


図 4-9 各入力荷重の算定フロー

4.4.1 軽油タンクによる荷重

(1) 算定方法

軽油タンクによる荷重は、軽油タンク下面での荷重分布を考慮するため、地震応答解析の照査時刻における軽油タンクの地震時応答を、別途作成した3次元の軽油タンク荷重算定モデルに作用させ、算定する。

(2) 軽油タンクの地震時応答の抽出

軽油タンクの地震時応答は、地震応答解析の軽油タンクをモデル化したはり要素の、照査時刻における断面力とする。断面力抽出位置を図4-10に示す。

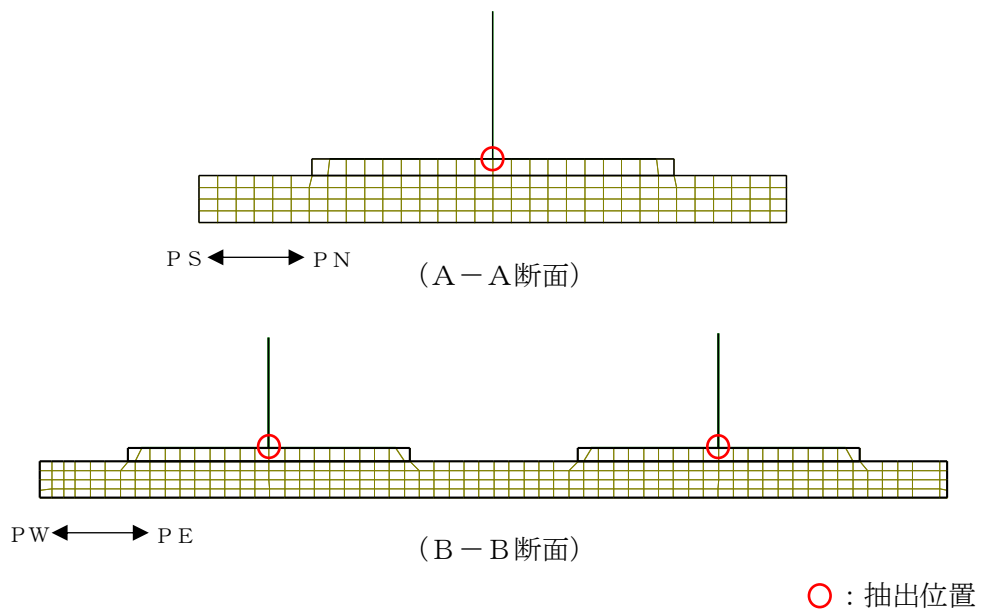
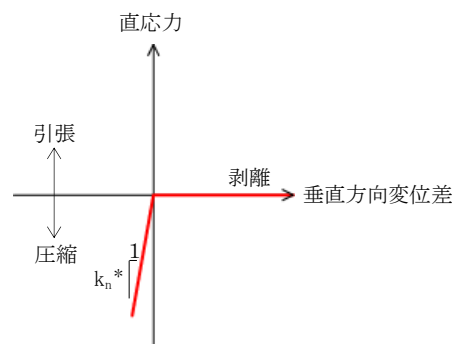
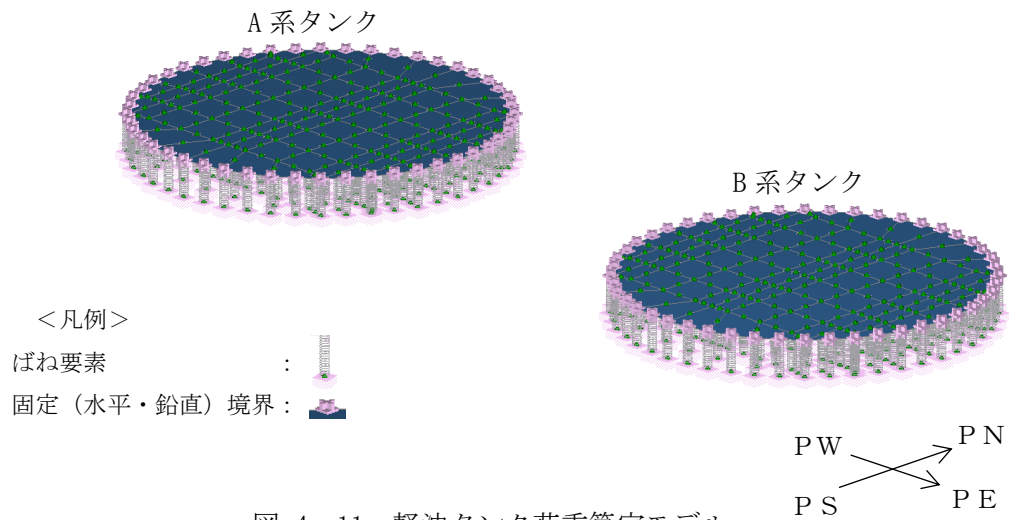


図 4-10 軽油タンクの地震時応答抽出位置

(3) 基礎版モデルに作用させる荷重の算定

軽油タンク荷重算定モデルを図 4-11 に示す。軽油タンクはボルトによって基礎版に固定されており、引張力及びせん断力はボルトを介して、圧縮力はタンク底面を介して基礎版に作用するため、表 4-4 に示す荷重の伝達方法を考慮する。軽油タンク荷重算定モデルは、ボルト位置である外縁部を水平・鉛直ともに固定境界とし、底面には圧縮力のみを分担するばね要素を配置する。底面のばね要素の特性を図 4-12 に示す。

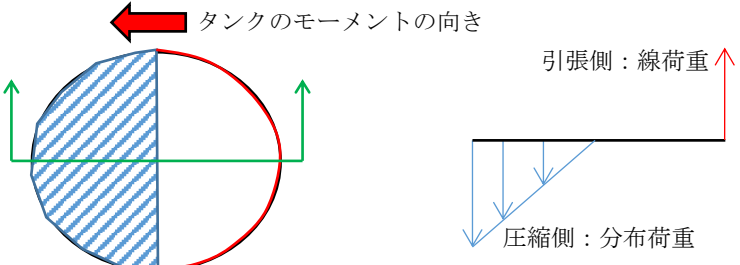
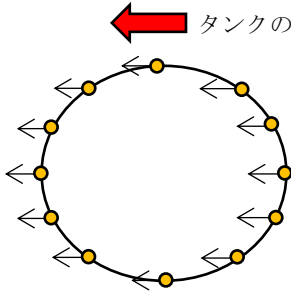
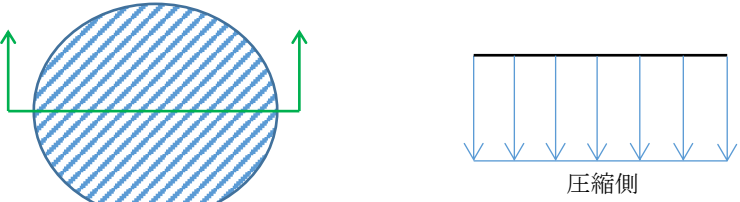
「(2) 軽油タンクの地震時応答の抽出」より抽出した軽油タンクの地震時応答を軽油タンク荷重算定モデルに載荷することで基礎版モデルに作用させる荷重を算定し、図 4-13 の概略図に示すとおり基礎版モデルに作用させる。



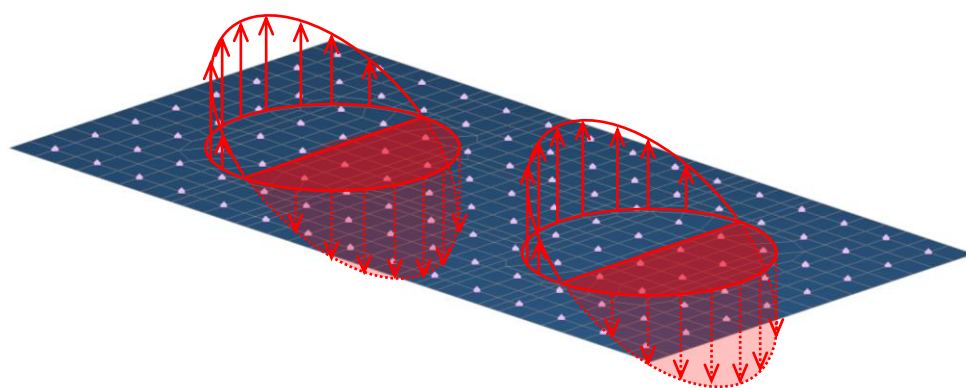
注記* : k_n 数値解析上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きい値とする

図 4-12 底面のばね要素の特性

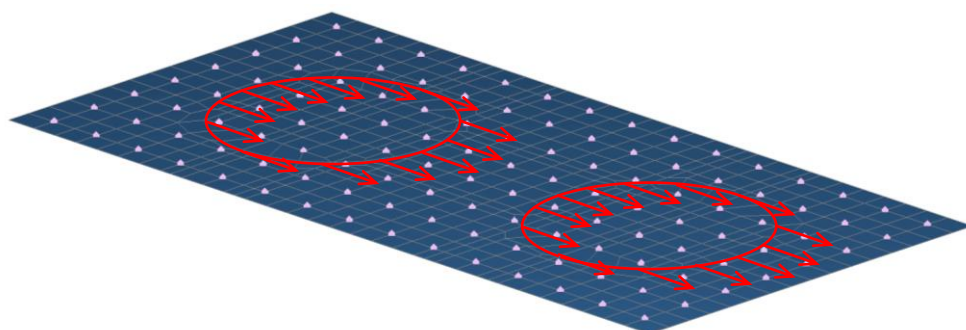
表 4-4 軽油タンクの荷重の伝達方法

方向	軽油タンクの断面力	入力方法
水平	曲げ	<p>引張はボルトを介して荷重が伝達するため、線荷重とする。 圧縮はタンク底面を介して荷重が伝達するため、分布荷重とする。</p> <p style="text-align: center;">← タンクのモーメントの向き</p>  <p style="display: flex; justify-content: space-around;"> タンクモデルの概念図 モデル底面の断面力図 </p>
	せん断	<p>水平方向にはボルトを介して荷重が伝達するため、線荷重とする。</p> <p style="text-align: center;">← タンクのせん断力の向き</p>  <p style="text-align: center;">タンクモデルの概念図</p>
鉛直	軸力*	<p>圧縮は基礎底面を介して荷重が伝達するため、分布荷重とする。</p>  <p style="display: flex; justify-content: space-around;"> タンクモデルの概念図 モデル底面の断面力図 </p>

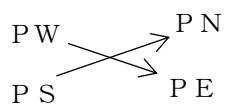
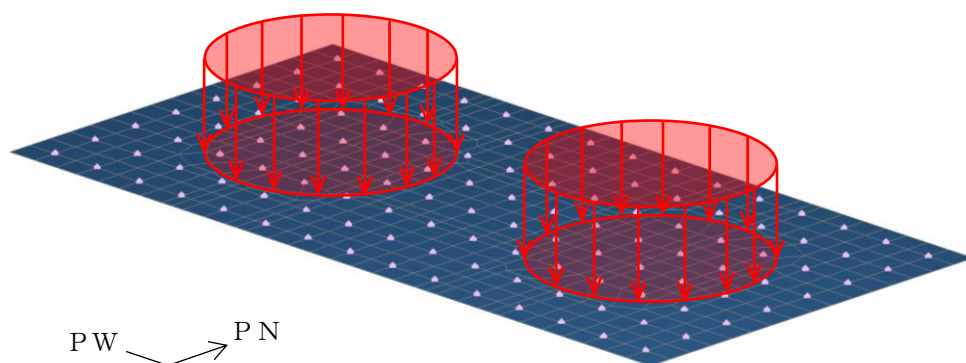
注記* : 地震応答解析におけるタンクモデルのはり要素の軸力は、常に圧縮側である。



(曲げ)



(せん断)



(軸力)

図 4-13 軽油タンクによる荷重の概略図

4.4.2 張出しダクト及び張出し基礎による荷重

(1) 算定方法

張出しダクト及び張出し基礎から基礎版に作用する荷重は、地震応答解析の照査時刻における張出しダクト及び張出し基礎の地震時応答及び土水圧を、図 4-14 に示す張出しダクト及び張出し基礎の荷重算定モデルに作用させ、算定する。

荷重算定モデルは、慣性力や土水圧が、張出しダクト及び張出し基礎を介して軽油タンク基礎版との接続部に伝達する荷重を算定することを目的とする。躯体は線形シェル要素でモデル化し、軽油タンク基礎版との接続部は完全固定とする。

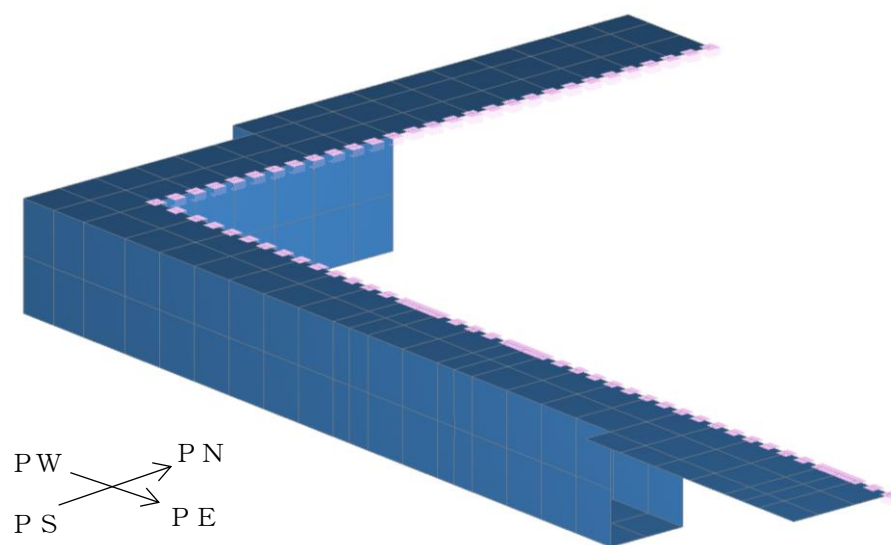


図 4-14 張出しダクト及び張出し基礎の荷重算定モデル

(2) 張出しダクト及び張出し基礎の地震時応答の抽出

張出しダクト及び張出し基礎の地震時応答は、地震応答解析モデルにおける基礎版の張出しダクト及び張出し基礎設置箇所に位置する各節点の、照査時刻における応答加速度の平均値から算定される各設備の慣性力とする。張出しダクト及び張出し基礎の応答加速度抽出位置を図 4-15 に示す。

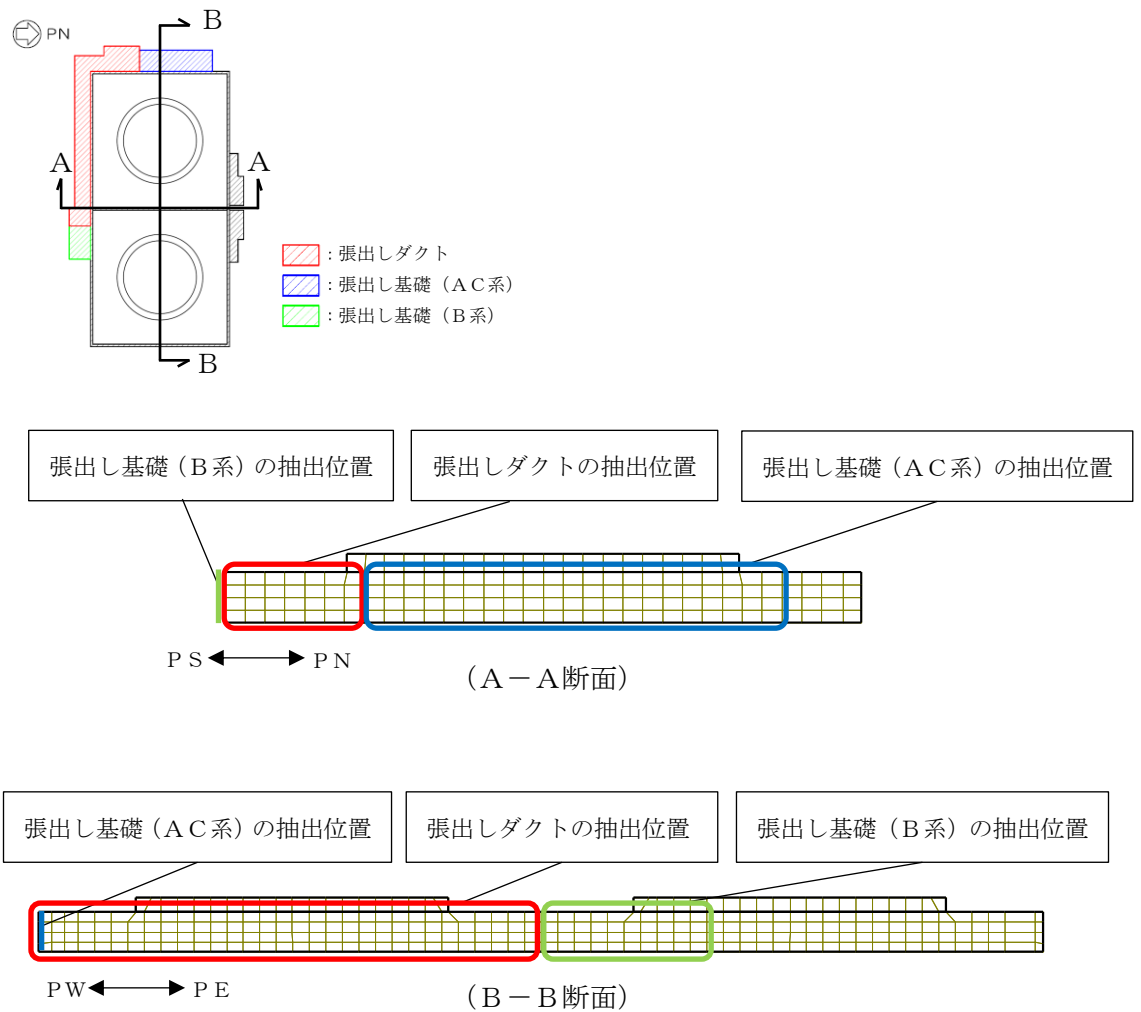


図 4-15 張出しダクト及び張出し基礎の地震時応答抽出位置

(3) 土圧及び水圧の抽出

張出しダクトの側壁に作用する土圧及び水圧は、地震応答解析モデルにおける軽油タンク基礎版の側面に接する地盤要素及び間隙水要素の、照査時刻における要素応力から抽出する。また、張出しダクト底板には、常時の水圧を作用させる。

(4) 基礎版モデルに作用させる荷重の算定

基礎版モデルに作用させる荷重算定の概要を図 4-16 に示す。「4.4.2 (2) 張出しダクト及び張出し基礎の地震時応答の抽出」及び「4.4.2 (3) 土圧及び水圧の抽出」より抽出した荷重を、荷重算定モデルに載荷する。荷重算定モデルにおける軽油タンク基礎版との接続部の節点は完全固定とし、当該箇所から得られた鉛直、水平、回転方向の反力を基礎版モデルに作用させる荷重とする。

算定した荷重は図 4-17 の概略図に示すとおり、基礎版モデルに入力する。

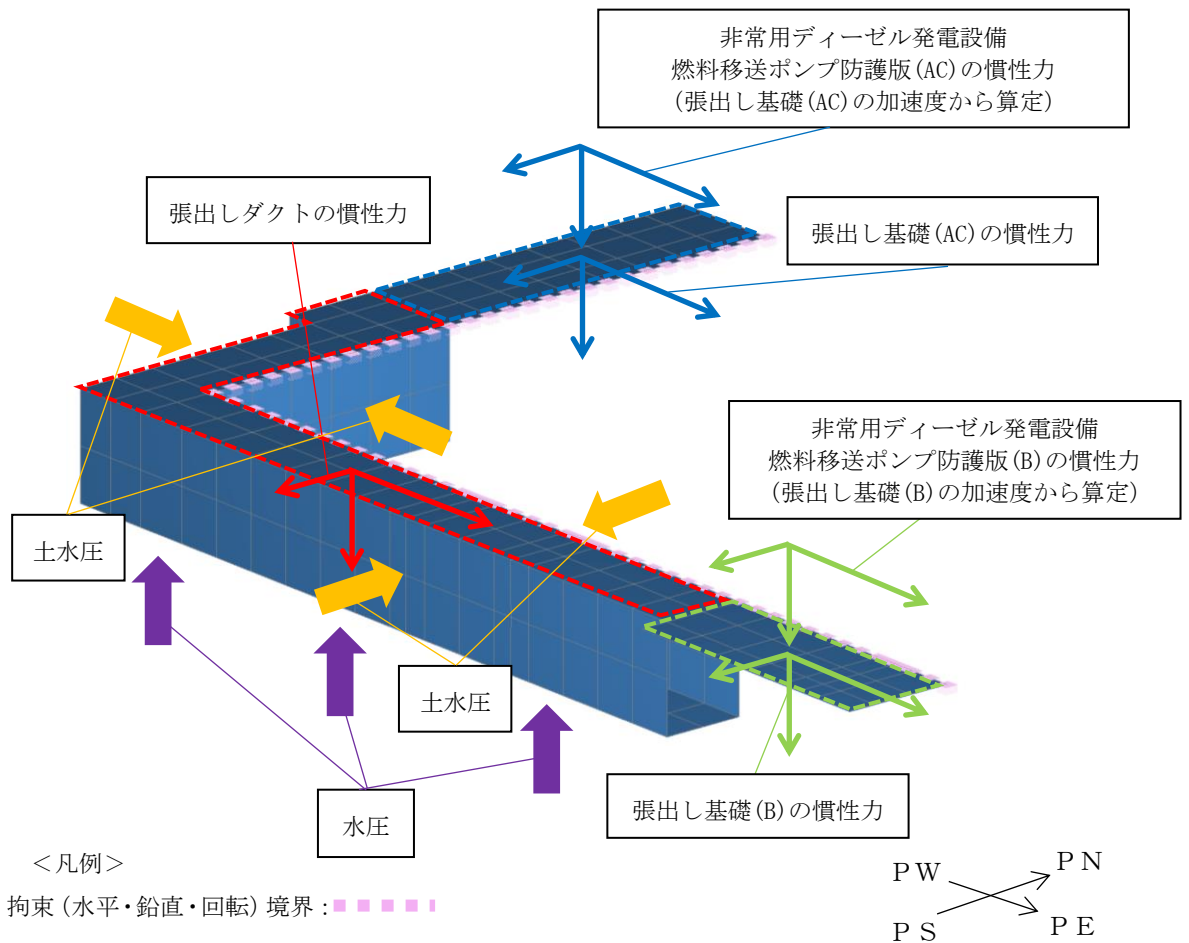


図 4-16 基礎版モデルに作用させる荷重算定の概要図

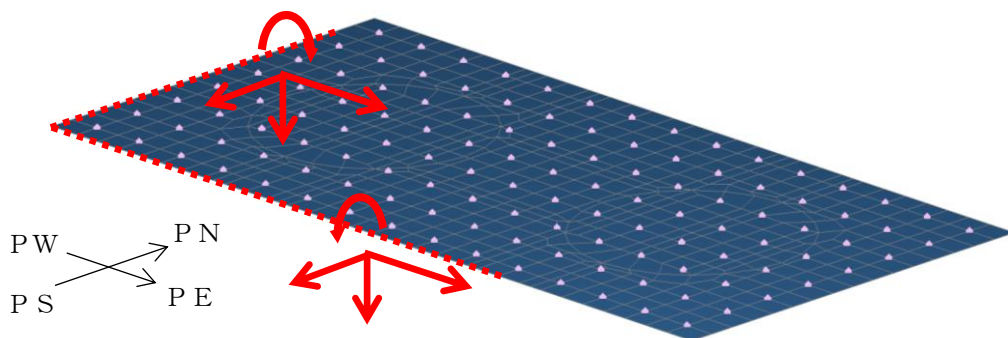


図 4-17 張出しダクト及び張出し基礎による荷重の概略図

4.4.3 油分離槽の慣性力

油分離槽の慣性力は、地震応答解析モデルにおける基礎版の油分離槽設置箇所に位置する各節点の、照査時刻における応答加速度の平均値から算定する。油分離槽の応答加速度抽出位置を図 4-18 に示す。

算定した慣性力は、図 4-19 の概略図に示すとおり、基礎版モデルに入力する。

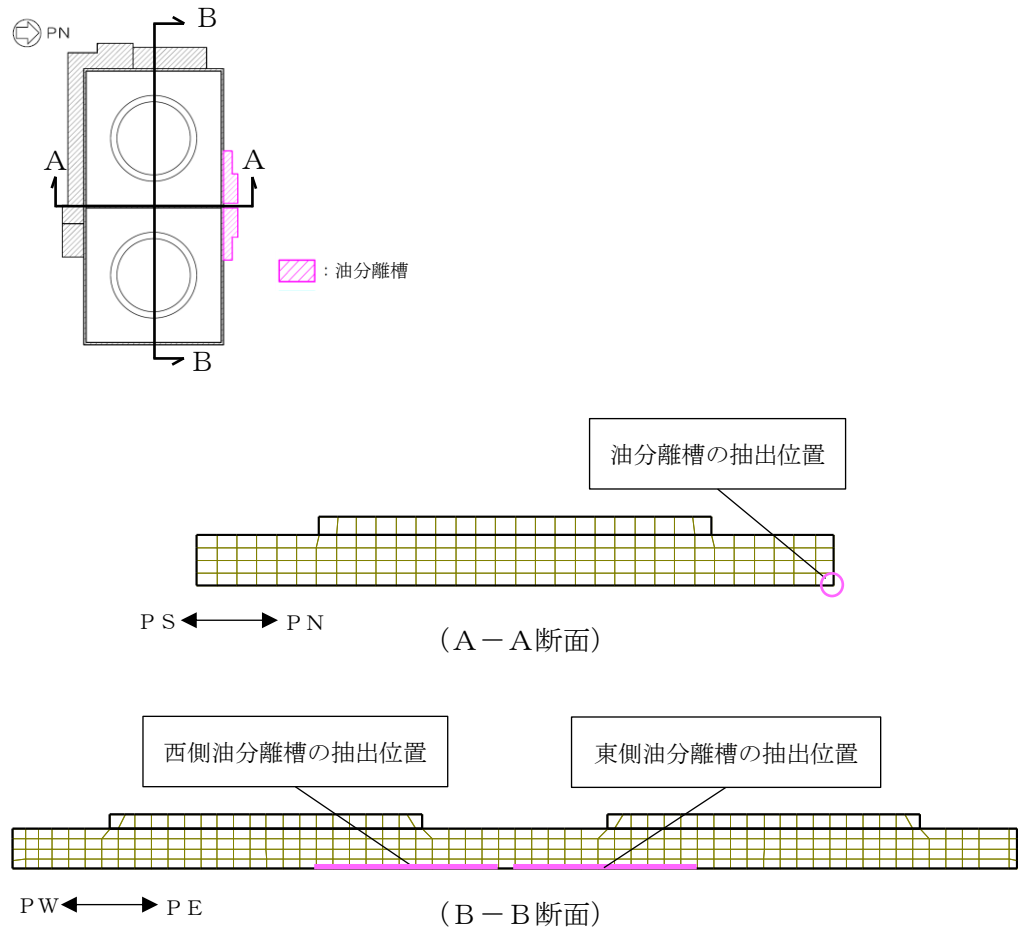


図 4-18 油分離槽の応答加速度抽出位置

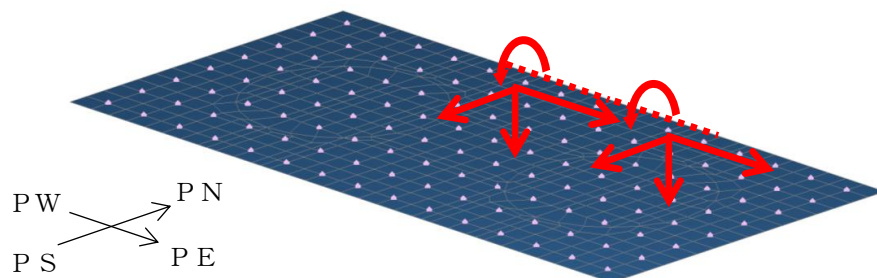


図 4-19 油分離槽の慣性力の概略図

4.4.4 防油堤の慣性力

防油堤の慣性力は、地震応答解析モデルにおける基礎版の防油堤設置箇所位置する各節点の、照査時刻における応答加速度の平均値から算定する。防油堤の応答加速度抽出位置を図 4-20 に示す。

算定した慣性力は図 4-21 の概略図に示すとおり、基礎版モデルに入力する。

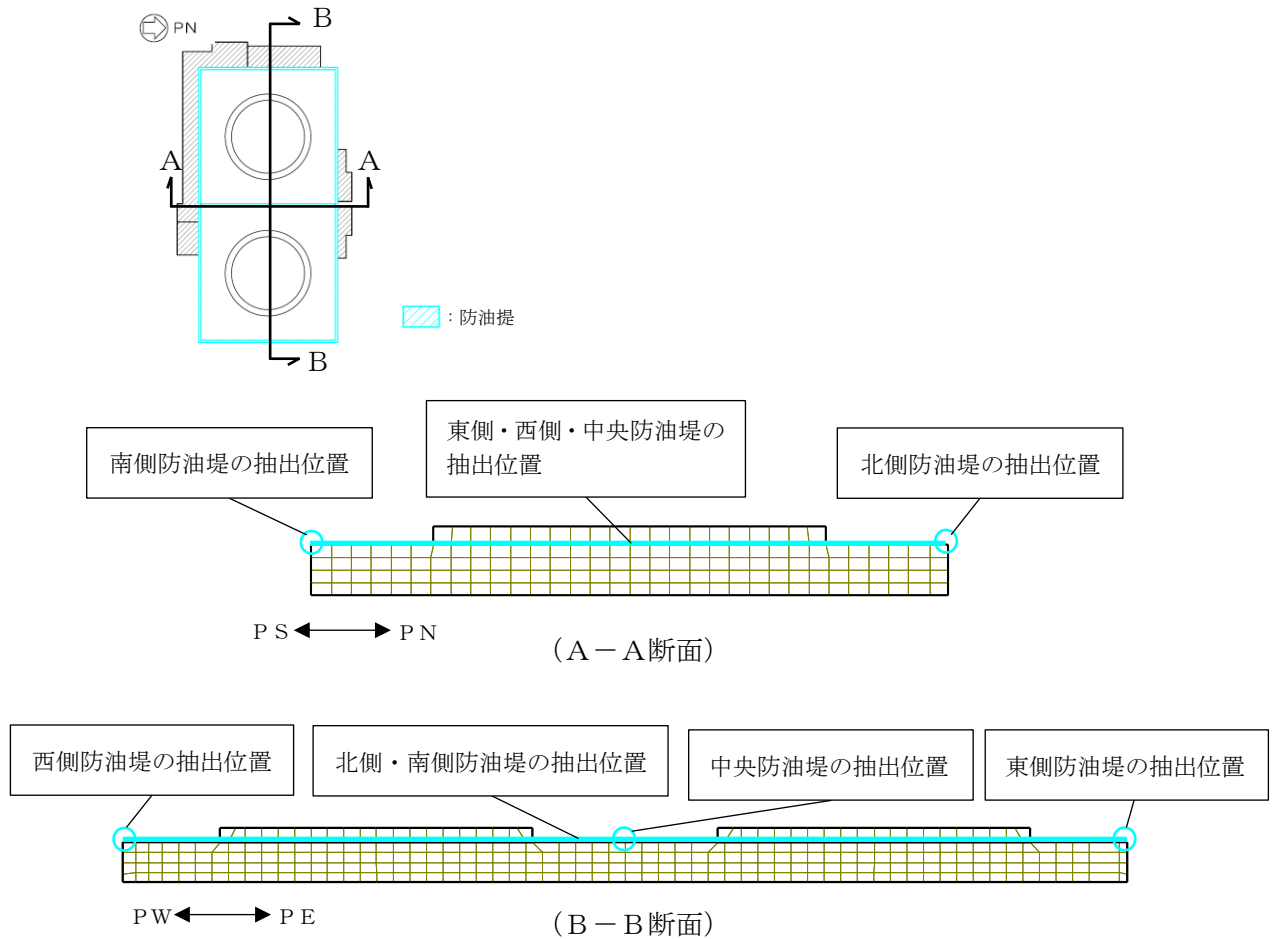


図 4-20 防油堤の応答加速度抽出位置

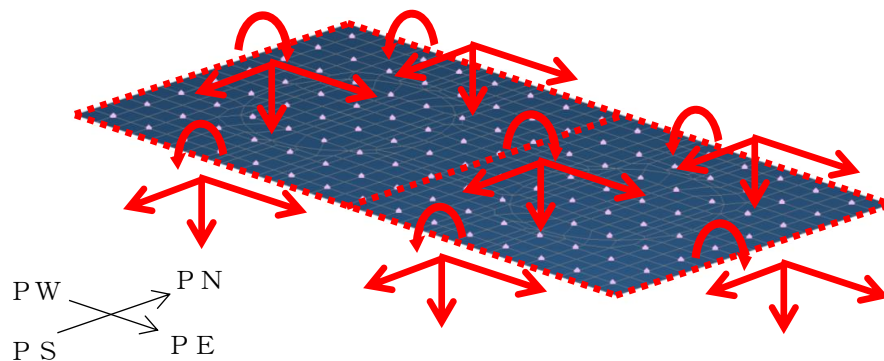


図 4-21 防油堤の慣性力の概略図

4.4.5 基礎版の慣性力

基礎版の慣性力は、地震応答解析モデルにおける基礎版個所に位置する各節点の、照査時刻における応答加速度の平均値から算定する。基礎版の応答加速度抽出位置を図 4-22 に示す。

算定した慣性力は図 4-23 の概略図に示すとおり、基礎版モデルに入力する。

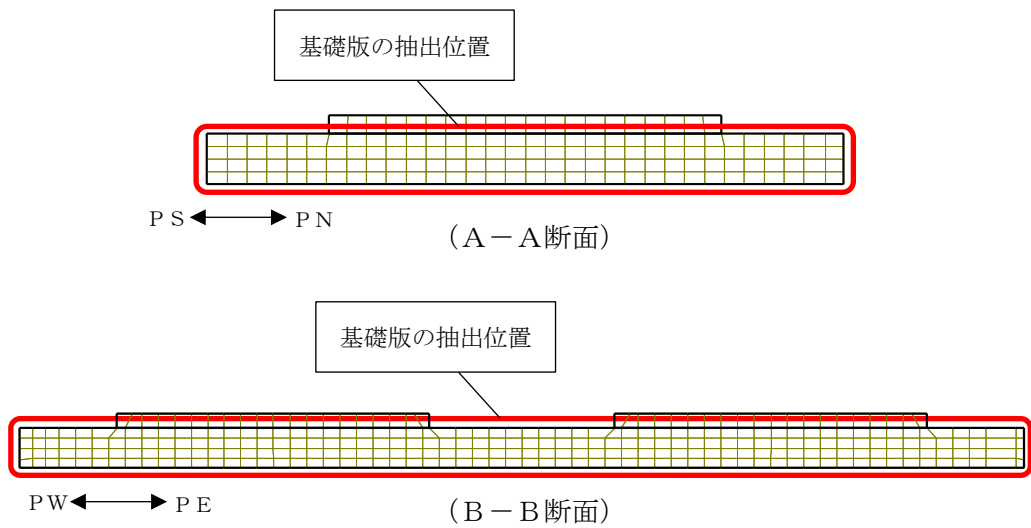


図 4-22 基礎版の応答加速度抽出位置

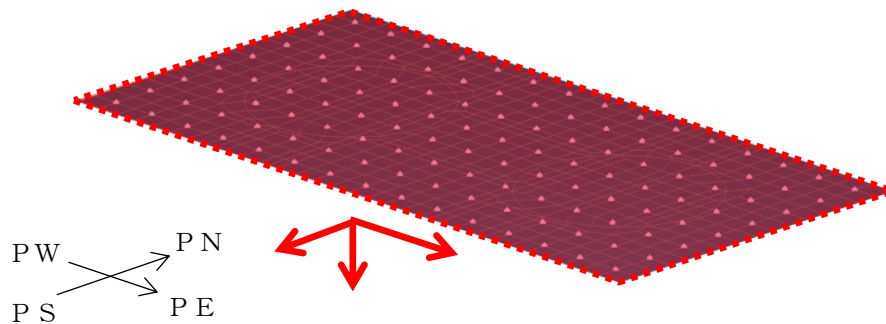


図 4-23 基礎版の慣性力の概略図

4.4.6 リングコンクリート及び乾燥砂の慣性力

リングコンクリート及び乾燥砂の慣性力は、地震応答解析の基礎版のリングコンクリート及び乾燥砂個所に位置する各節点の、照査時刻における応答加速度の平均値から算定する。応答加速度抽出位置を図 4-24 に示す。

算定した慣性力は図 4-25 の概略図に示すとおり、基礎版モデルに入力する。

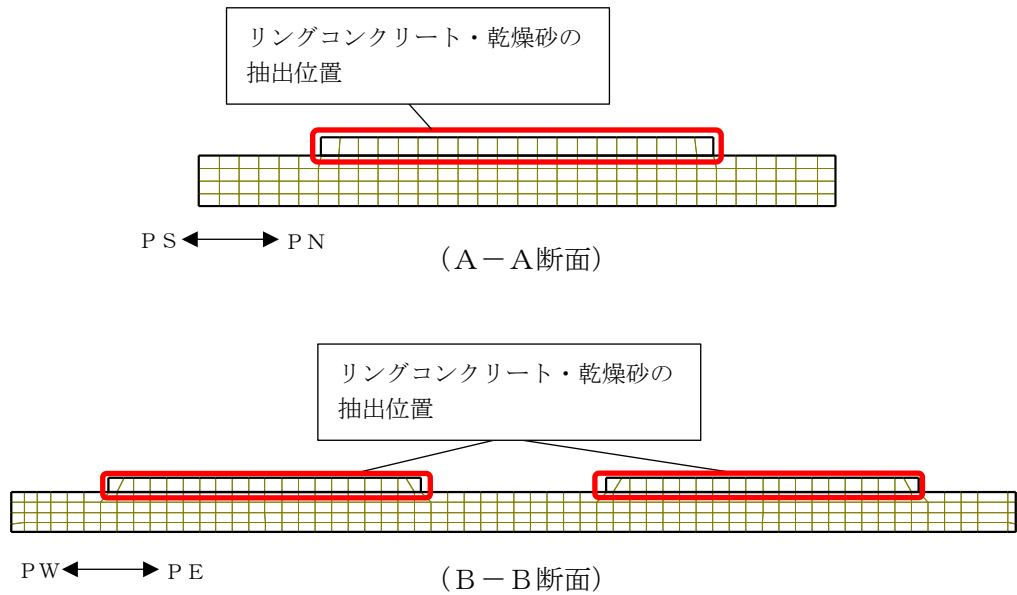


図 4-24 リングコンクリート及び乾燥砂の応答加速度抽出位置

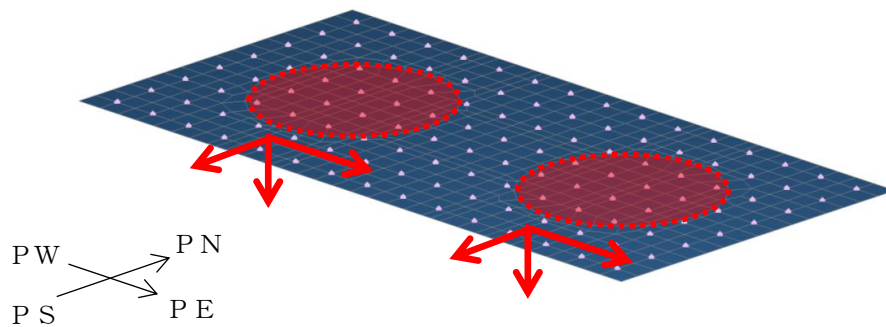


図 4-25 リングコンクリート及び乾燥砂の慣性力の概略図

4.4.7 積雪の慣性力

積雪の慣性力は、地震応答解析モデルにおける基礎版上面に位置する各節点の、照査時刻における応答加速度の平均値から算定する。応答加速度抽出位置を図 4-26 に示す。算定した慣性力は図 4-27 の概略図に示すとおり、基礎版モデルに入力する。

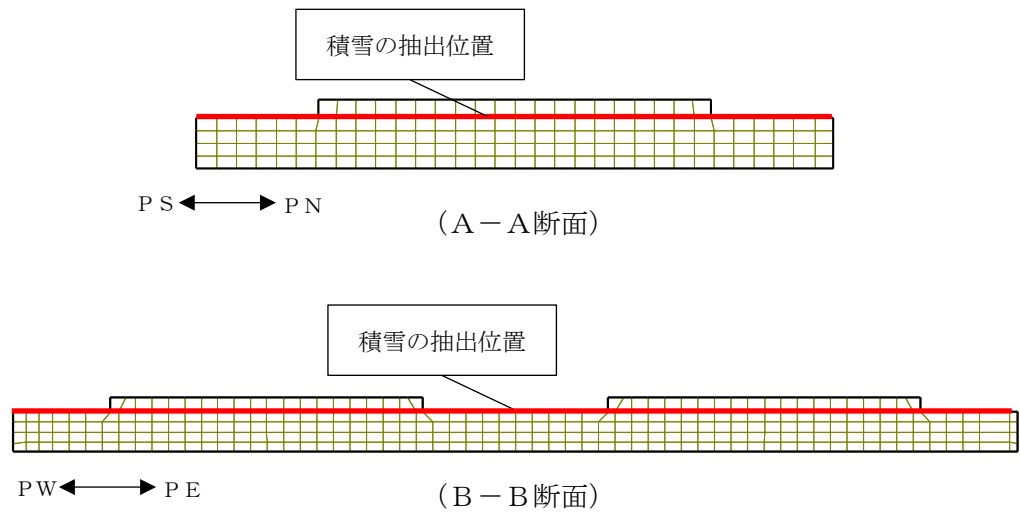


図 4-26 積雪の応答加速度抽出位置

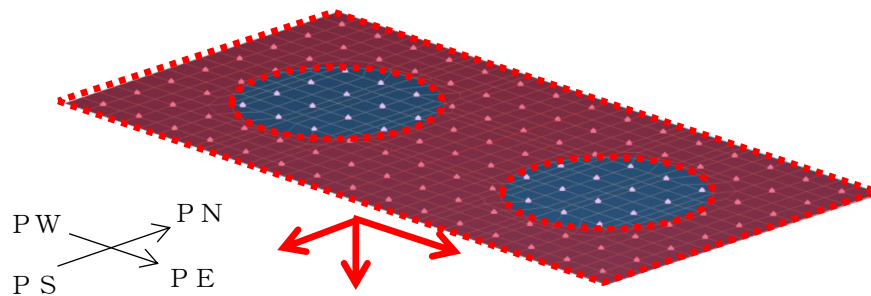


図 4-27 積雪の慣性力の概略図

4.4.8 土圧及び水圧

基礎版の側面に作用する水平方向の土圧及び水圧は、地震応答解析モデルにおける基礎版の側面に接する地盤要素及び間隙水要素の、照査時刻における要素応力から算定する。また、基礎版モデル底面には常時分の水圧を作用させる。土圧及び水圧の抽出位置を図 4-28 に示す。

算定した土圧及び水圧は図 4-29 の概略図に示すとおり、基礎版モデルに入力する。

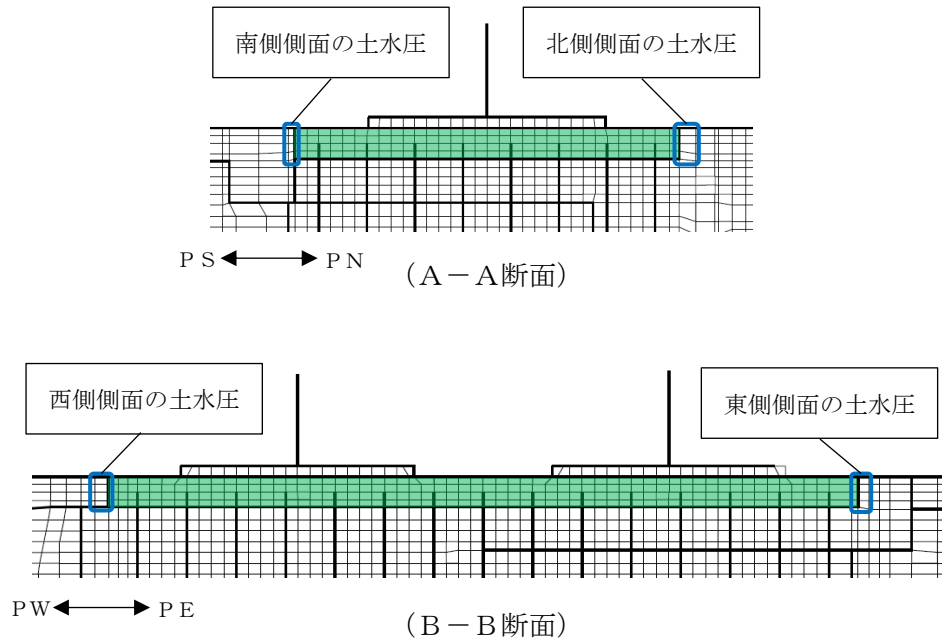


図 4-28 基礎版側面の土圧及び水圧の抽出位置

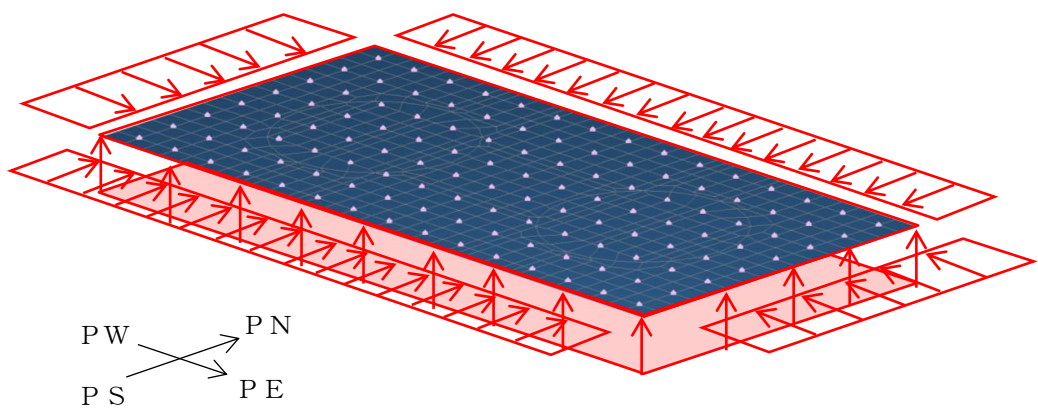


図 4-29 基礎版の土圧及び水圧の概略図

5. 評価内容

5.1 入力地震動の設定

地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を 1 次元波動論により地震応答解析モデルの底面位置で評価したものをを用いる。入力地震動の設定においては、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に示す地下構造モデルを用いる。

入力地震動算定の概念図を図 5-1 に、入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトルを図 5-2～図 5-27 に示す。入力地震動の算定には解析コード「S L O K Ver. 2.0」を使用する。

なお、基準地震動 S_s のうち特定の方向性を有しない地震動については、位相を反転させた場合の影響も確認する。

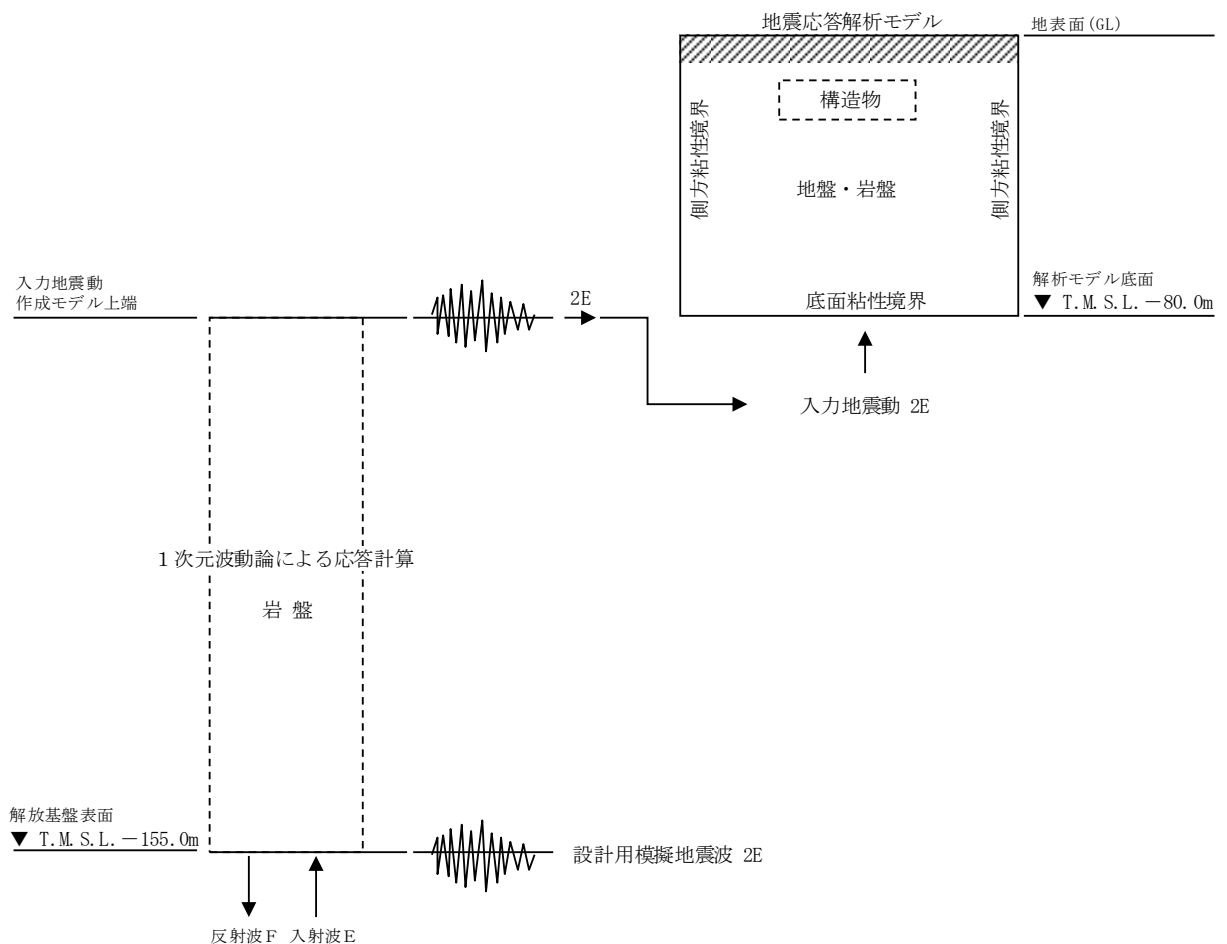
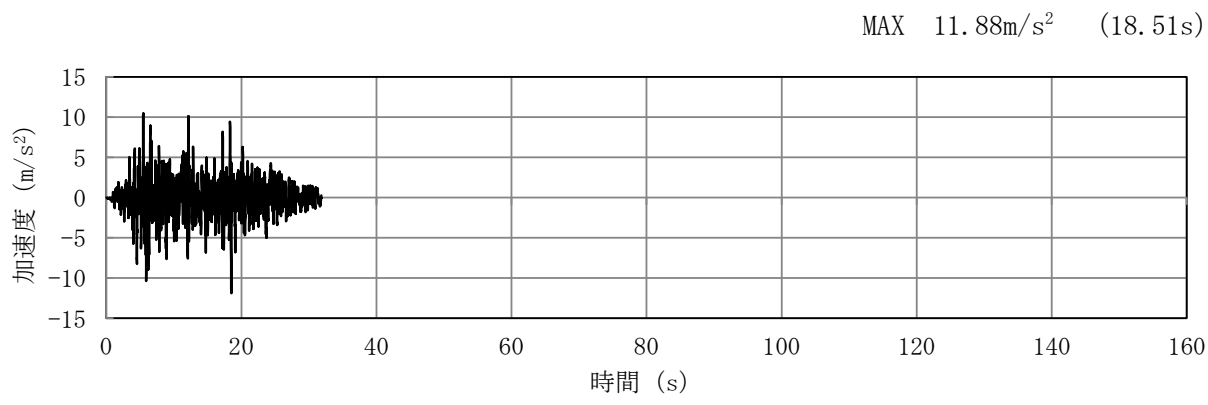
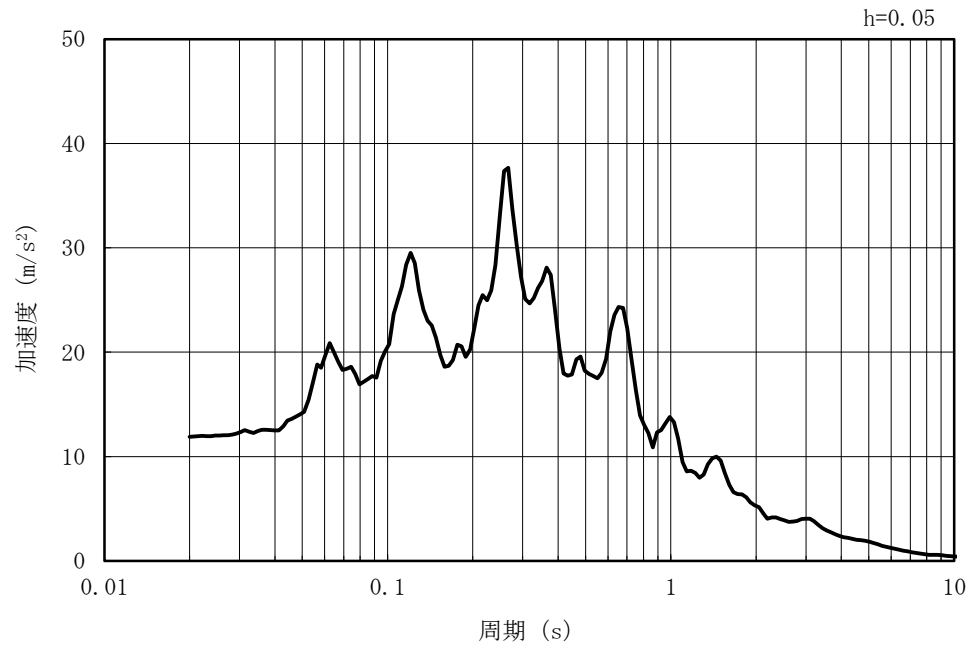


図 5-1 入力地震動算定の概念図

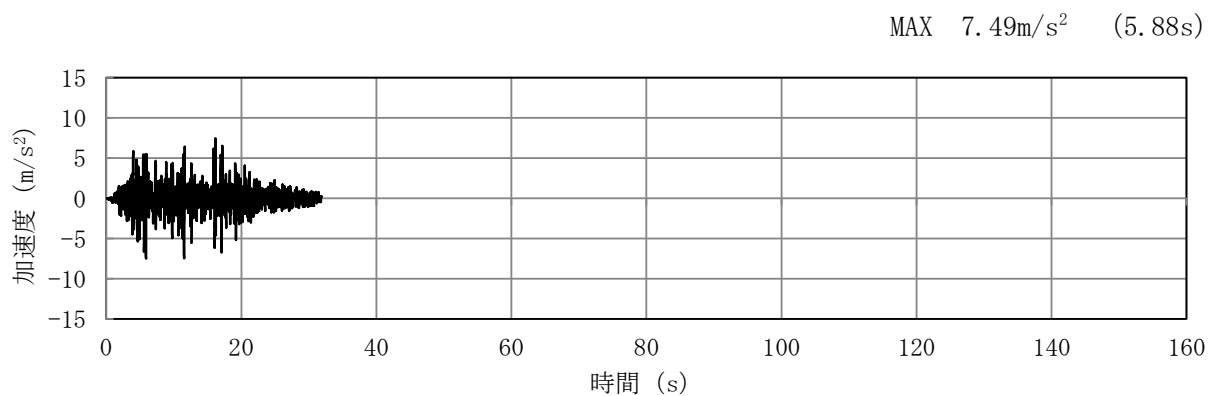


(a) 加速度時刻歴波形

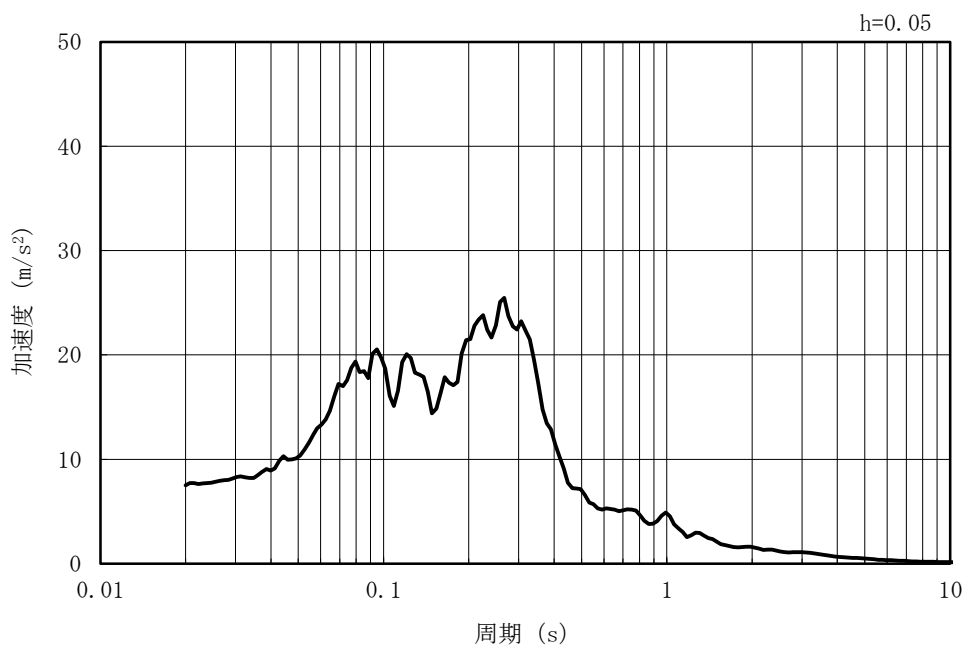


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-2 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-1)

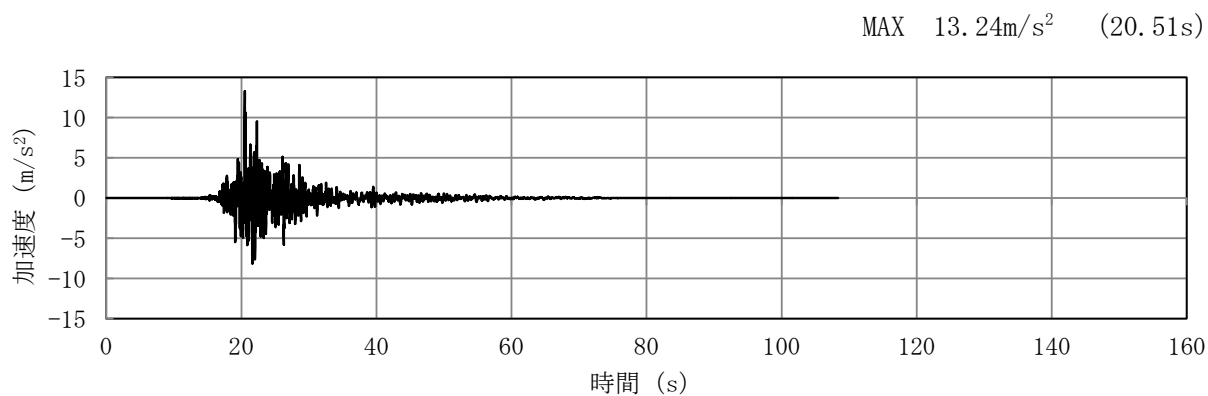


(a) 加速度時刻歴波形

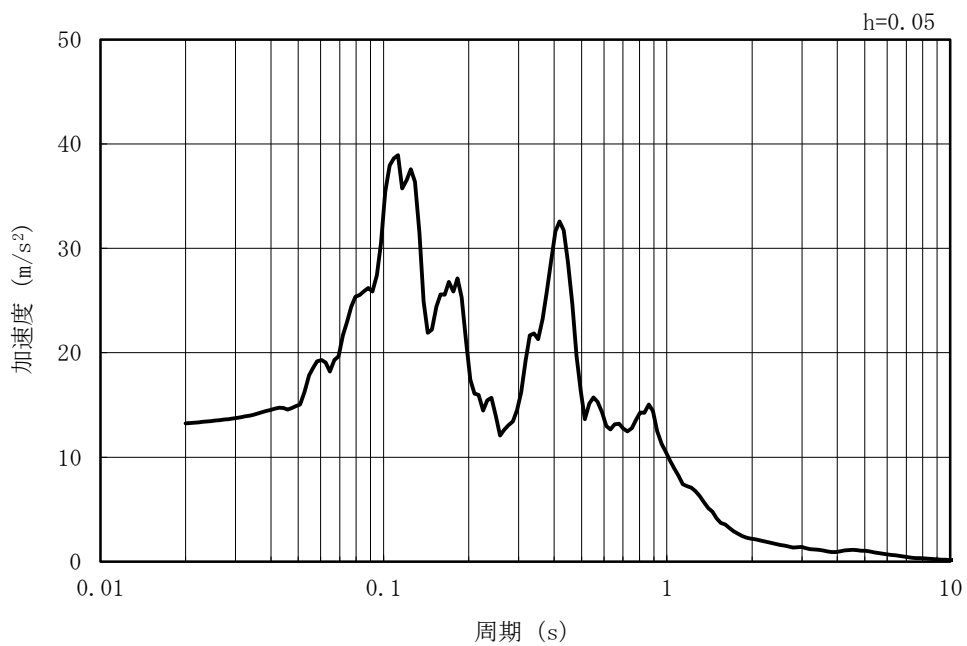


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-3 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-1)

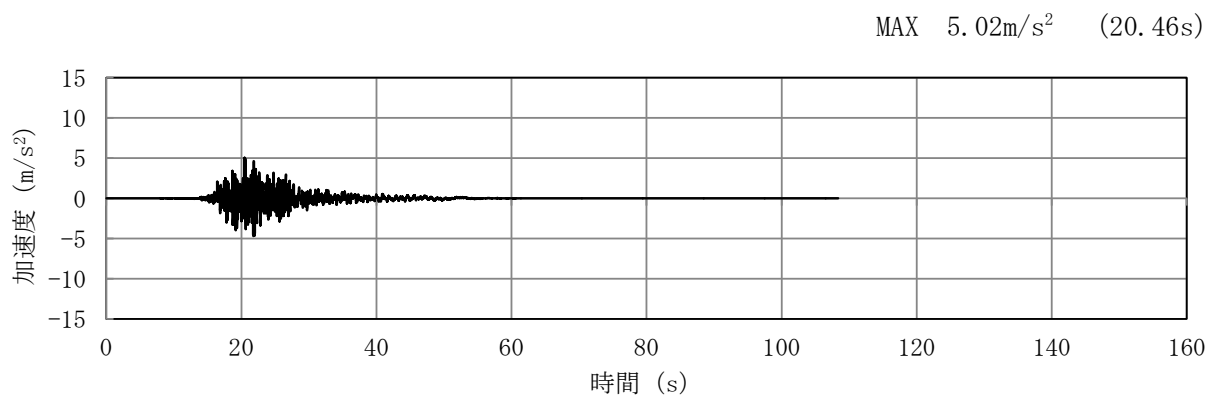


(a) 加速度時刻歴波形

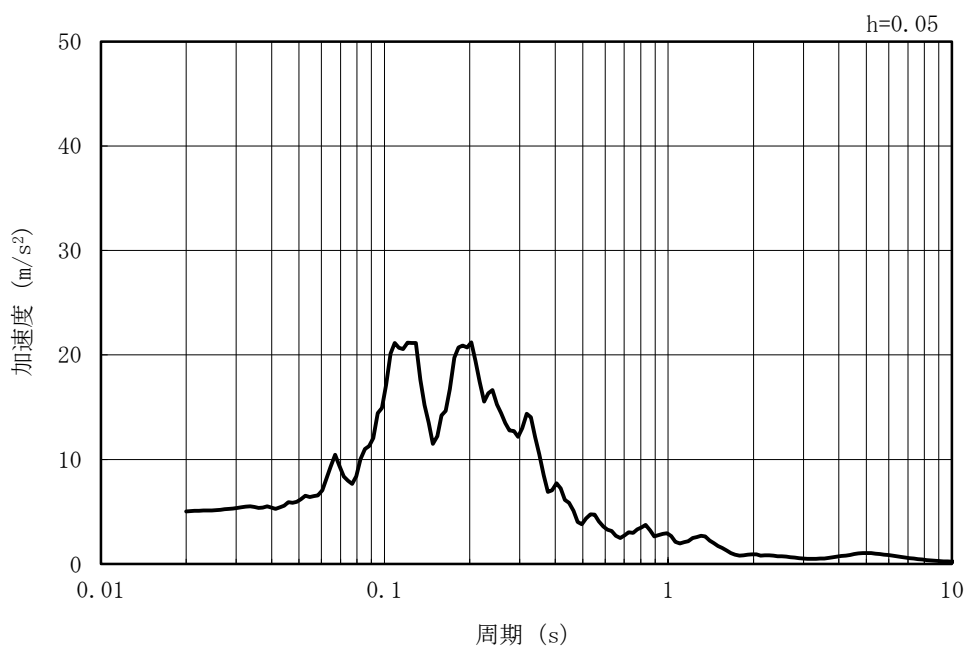


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-4 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-2EW)

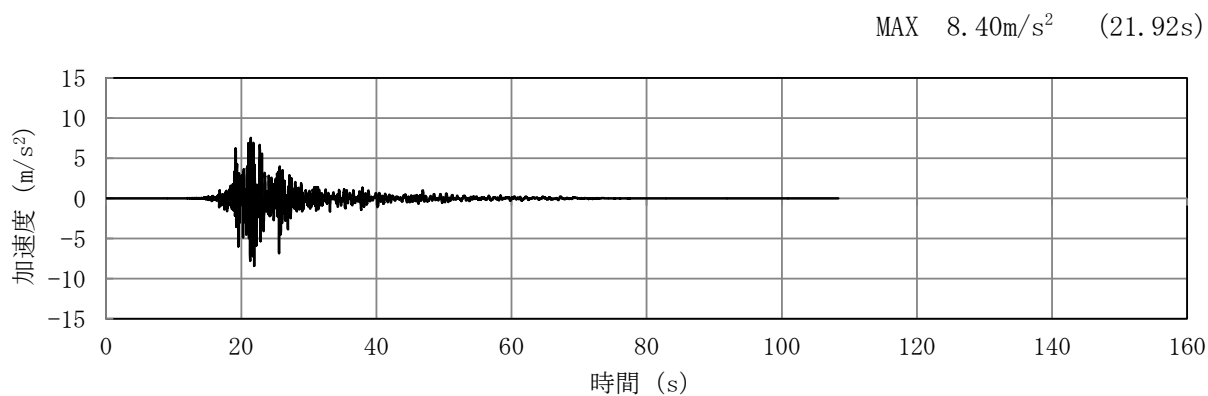


(a) 加速度時刻歴波形

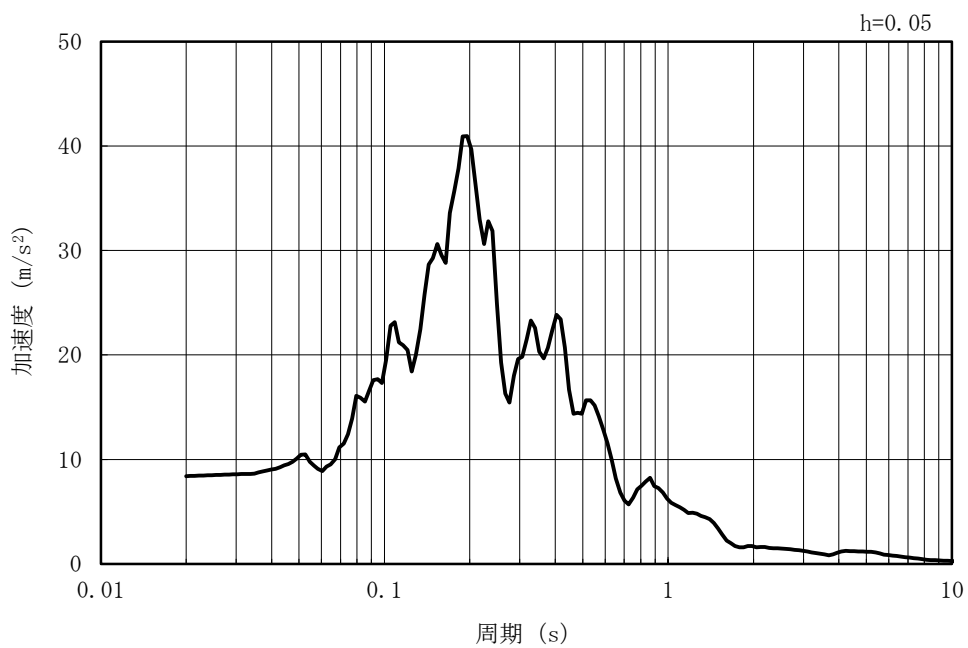


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-5 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-2EW)

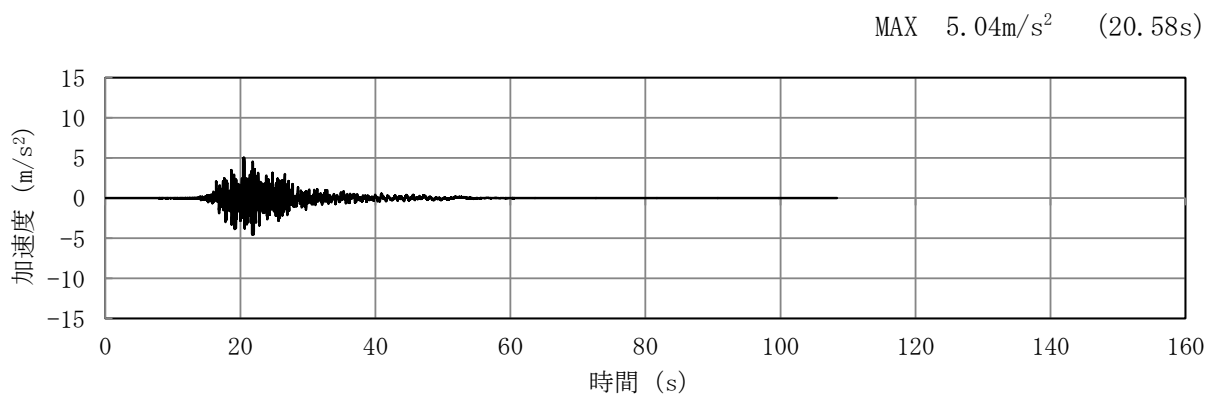


(a) 加速度時刻歴波形

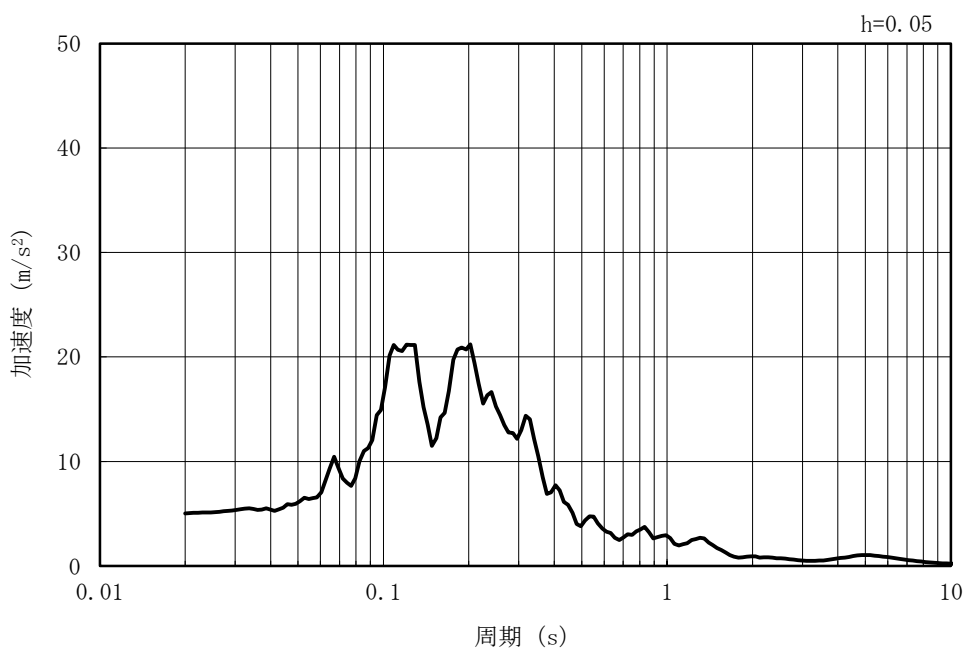


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-6 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-2NS)



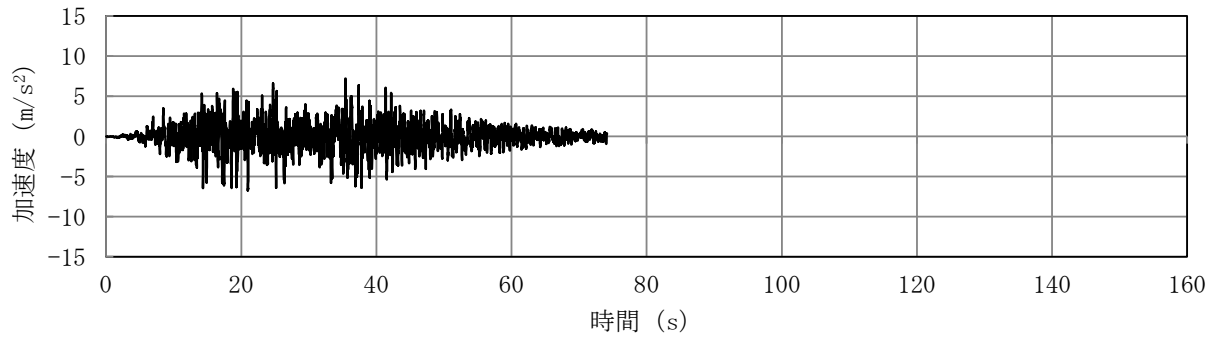
(a) 加速度時刻歴波形



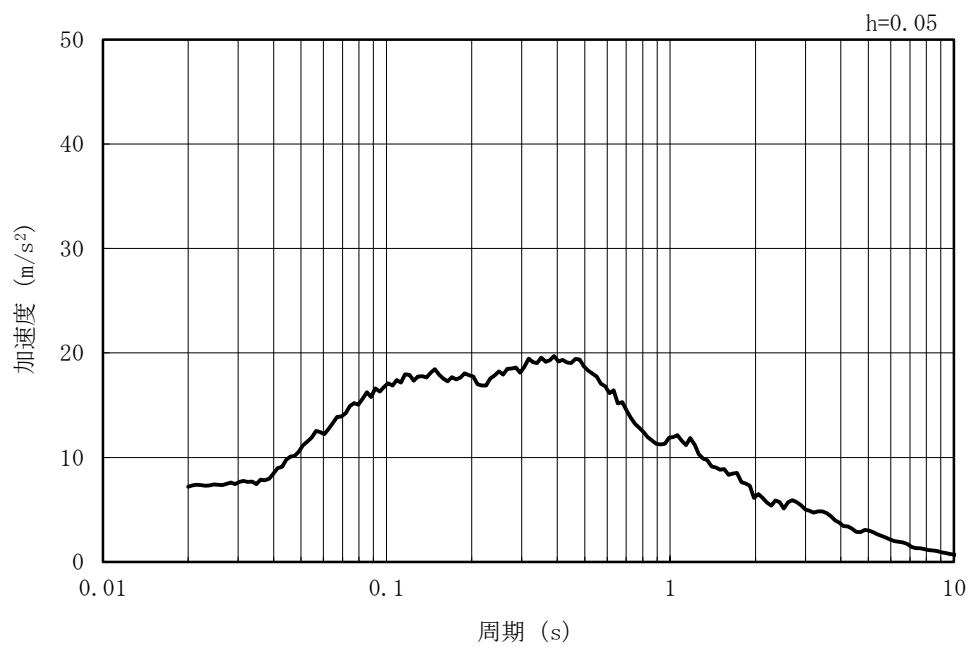
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-7 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-2NS)

MAX 7.18m/s² (35.43s)

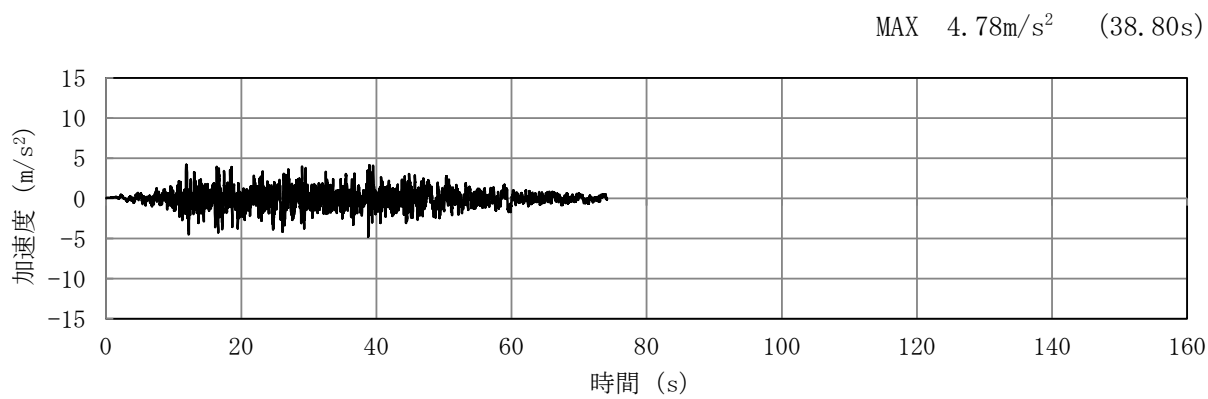


(a) 加速度時刻歴波形

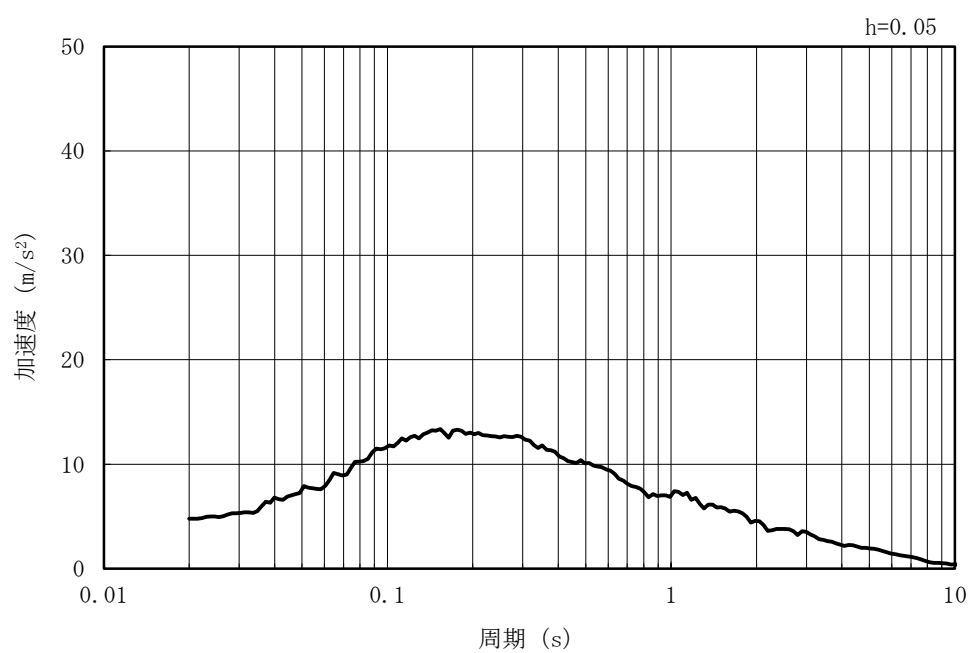


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-8 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-3)

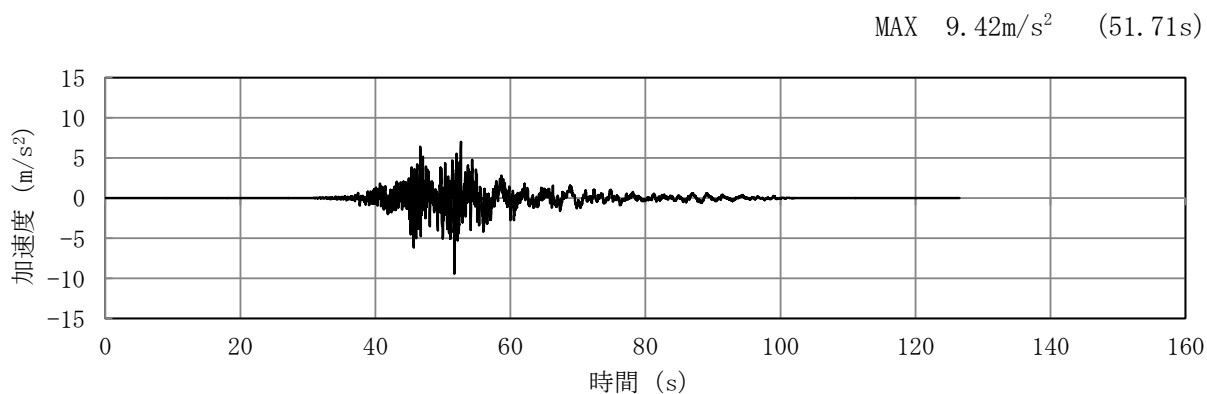


(a) 加速度時刻歴波形

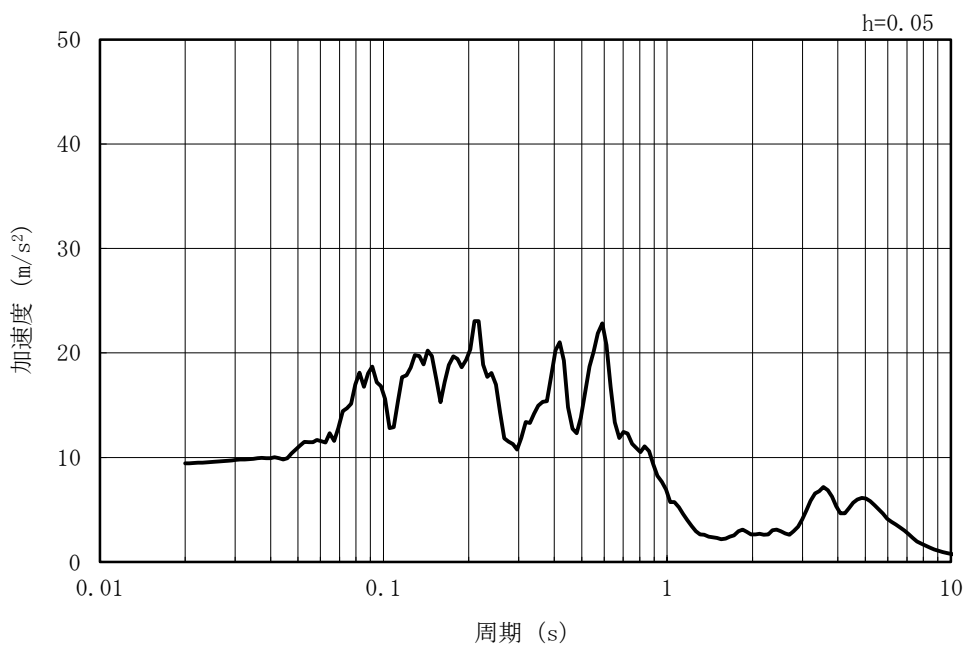


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-9 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-3)

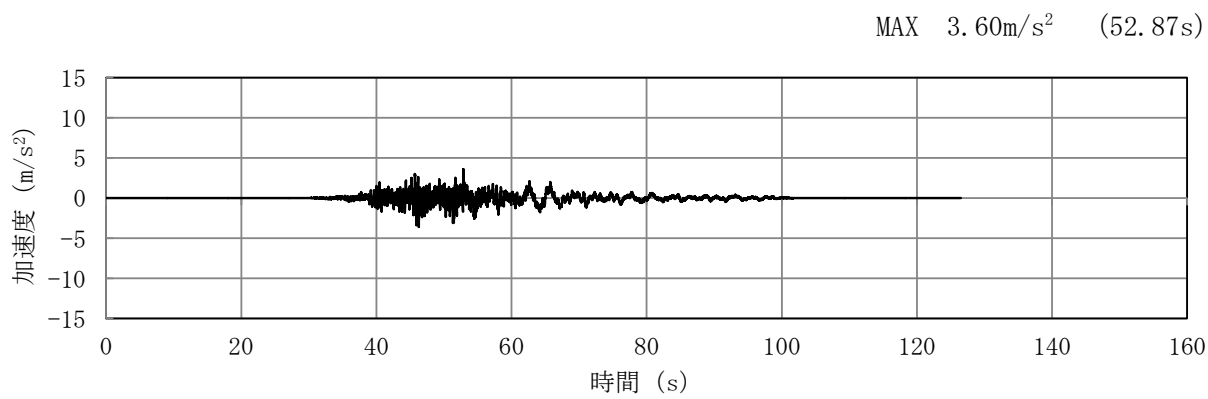


(a) 加速度時刻歴波形

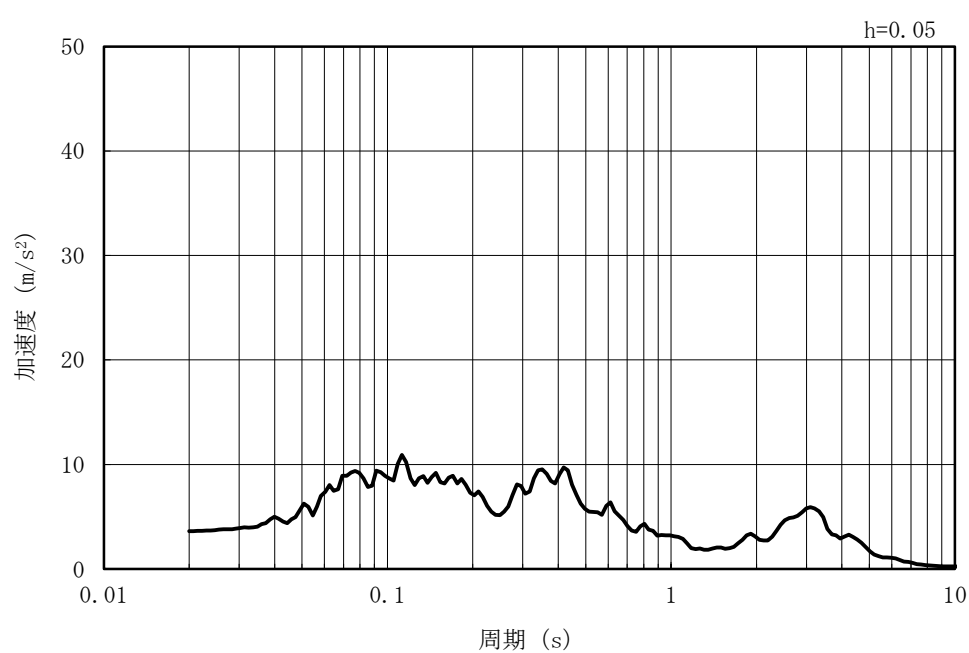


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-10 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-4EW)

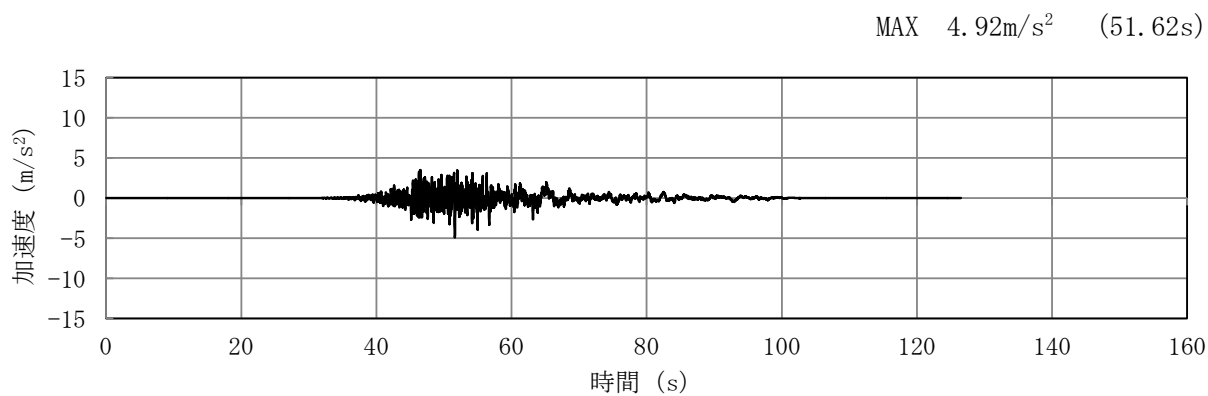


(a) 加速度時刻歴波形

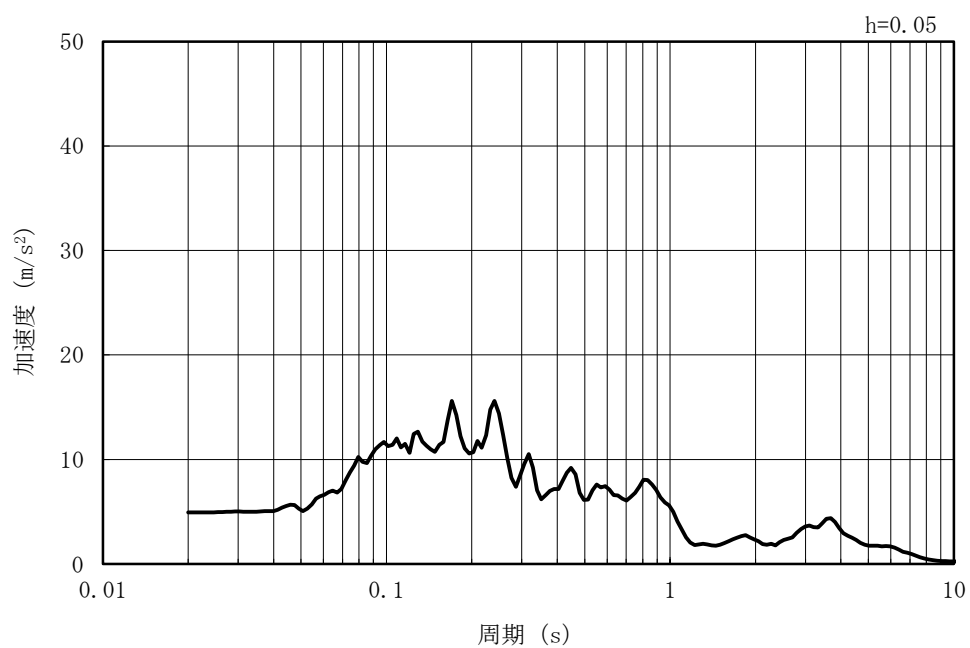


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-11 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-4EW)

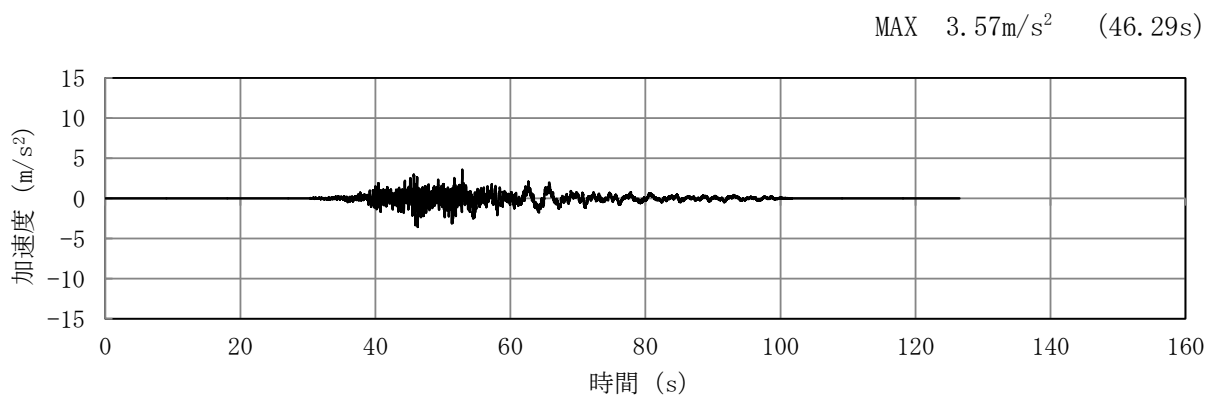


(a) 加速度時刻歴波形

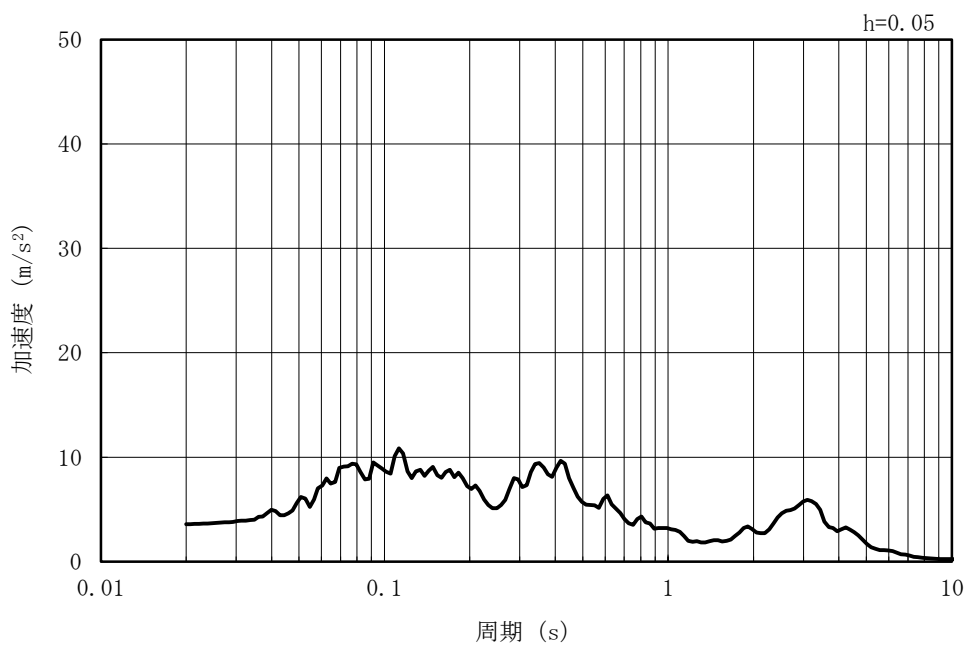


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-12 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss=4NS)

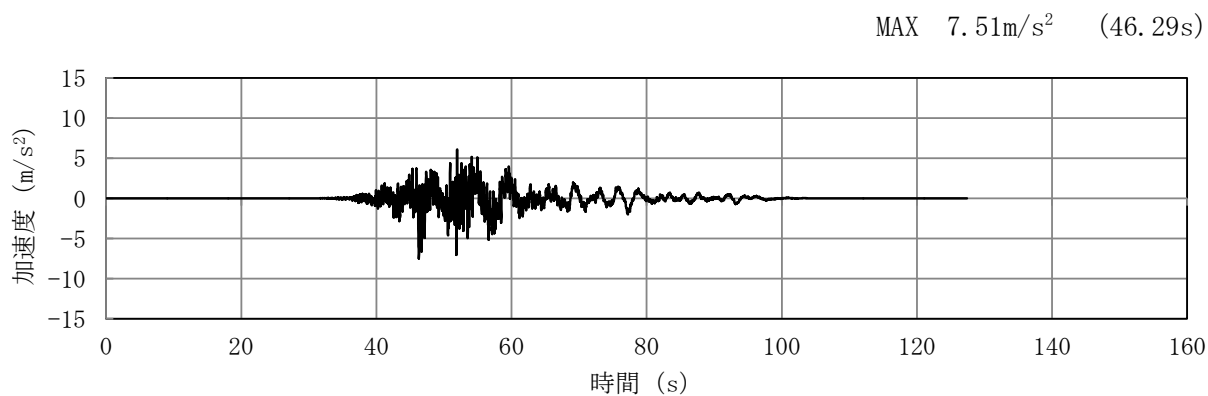


(a) 加速度時刻歴波形

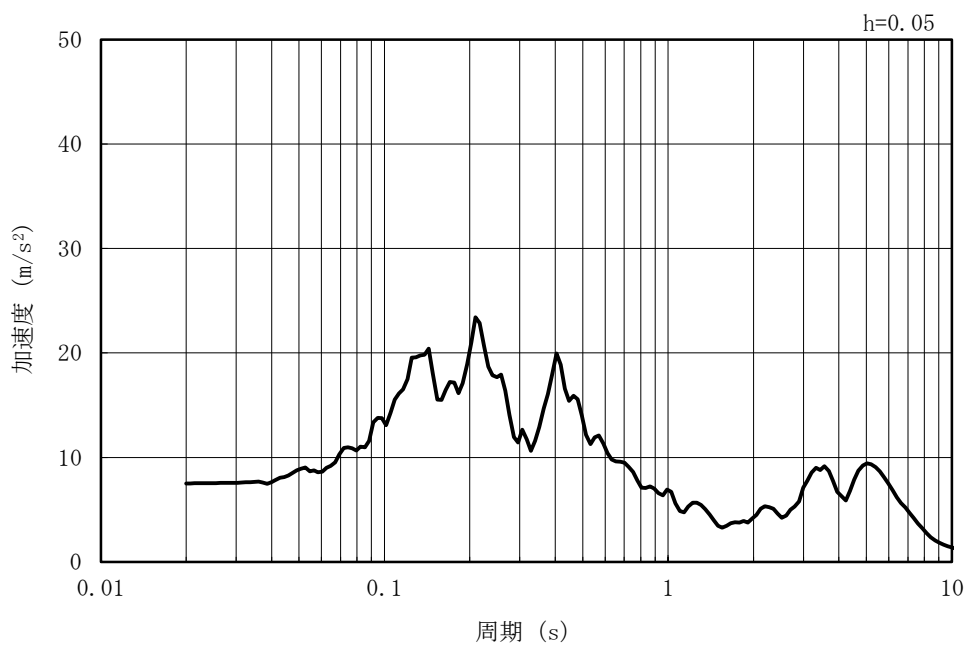


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-13 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-4NS)

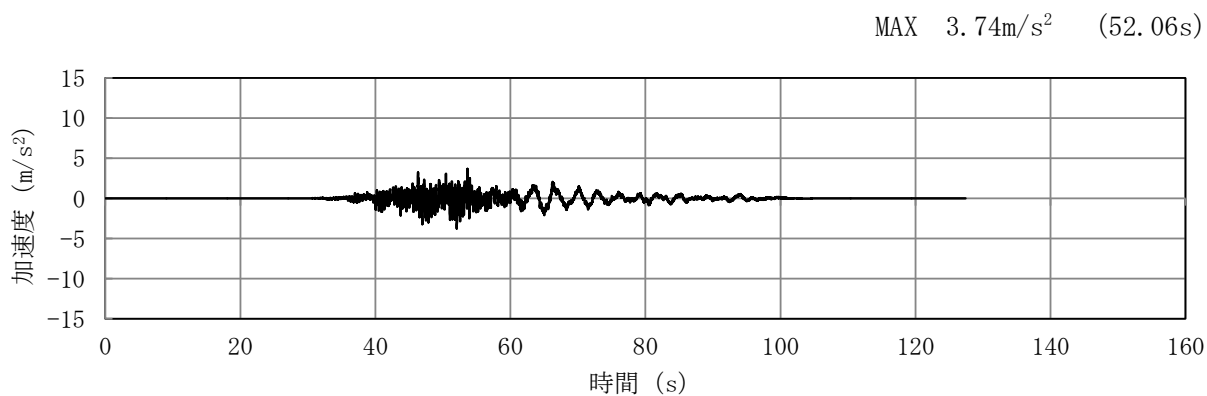


(a) 加速度時刻歴波形

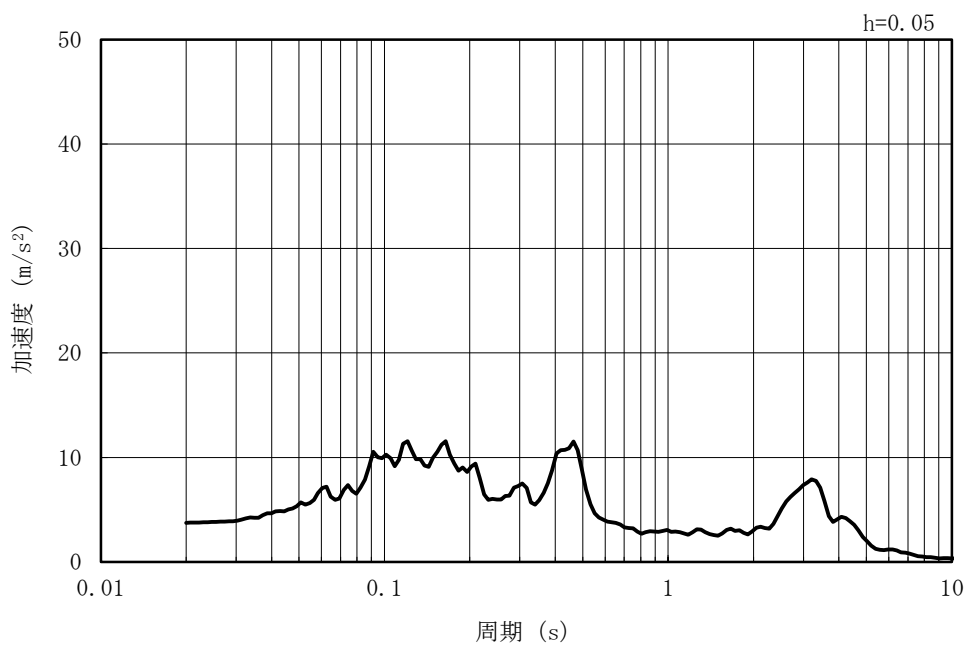


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-14 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-5EW)

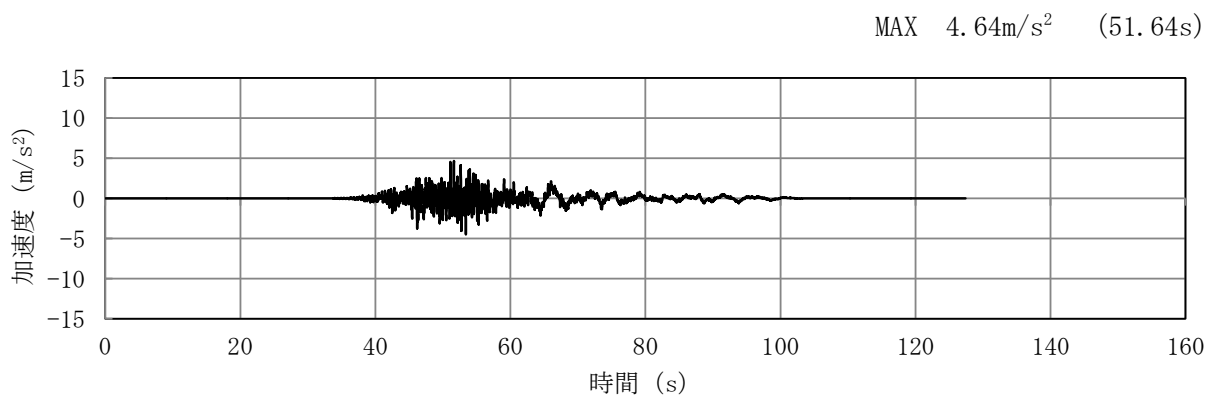


(a) 加速度時刻歴波形

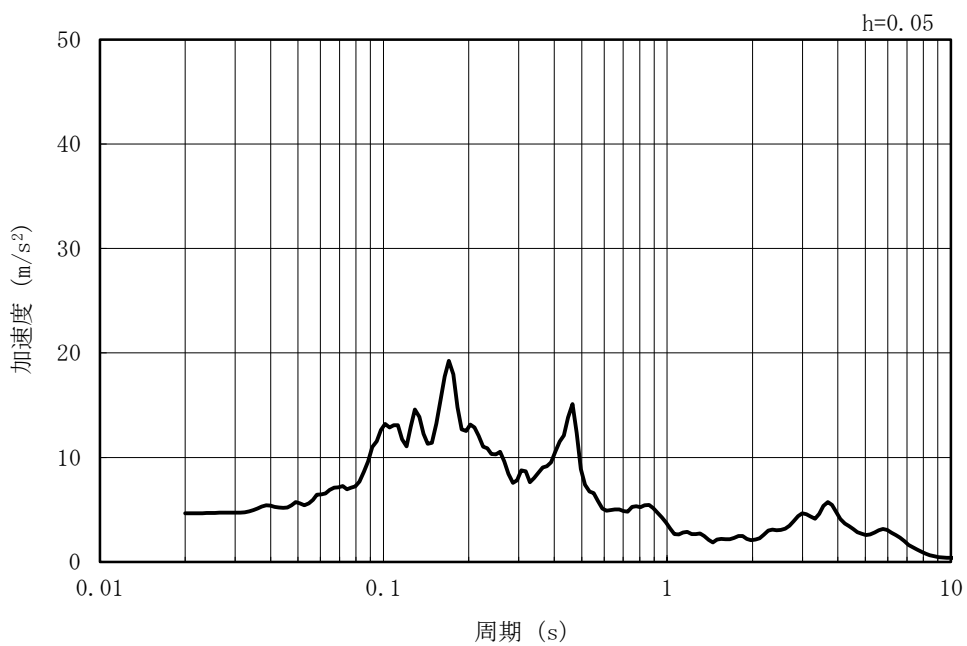


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-15 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-5EW)

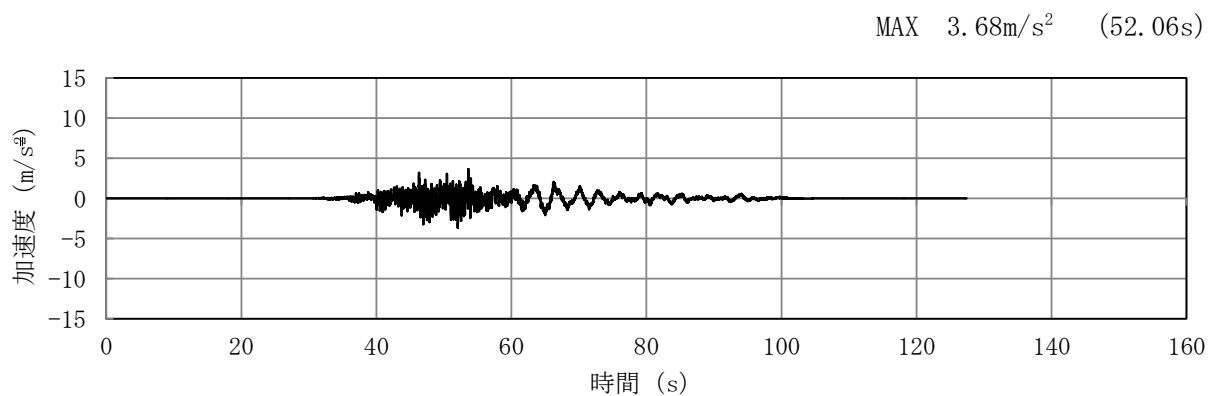


(a) 加速度時刻歴波形

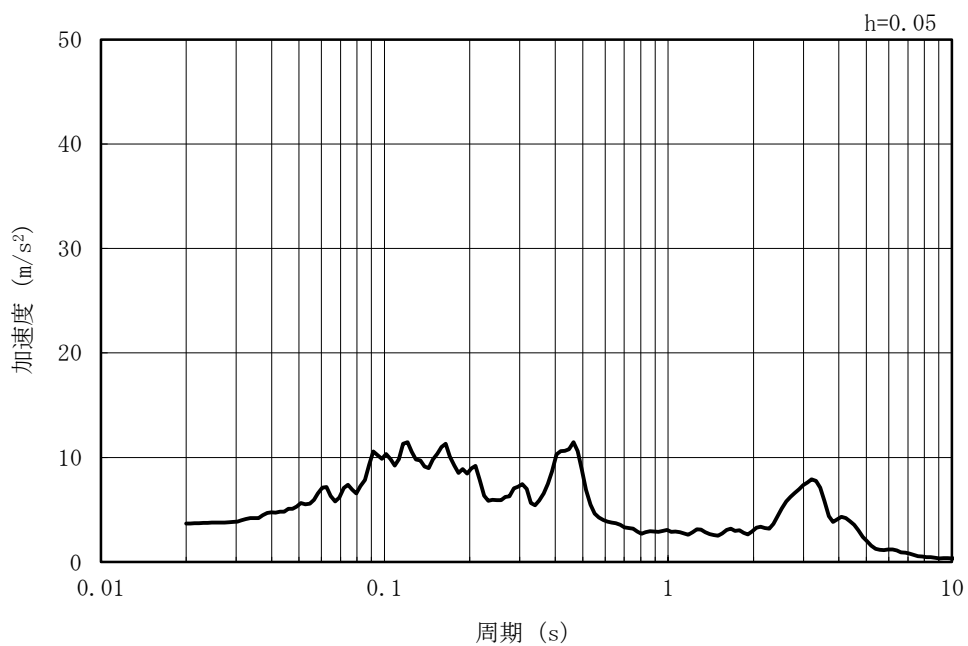


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-16 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-5NS)

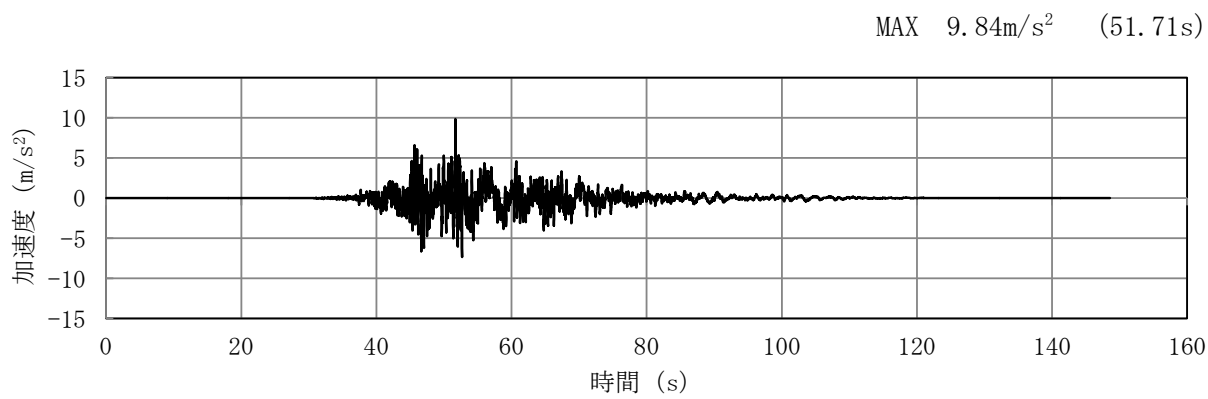


(a) 加速度時刻歴波形

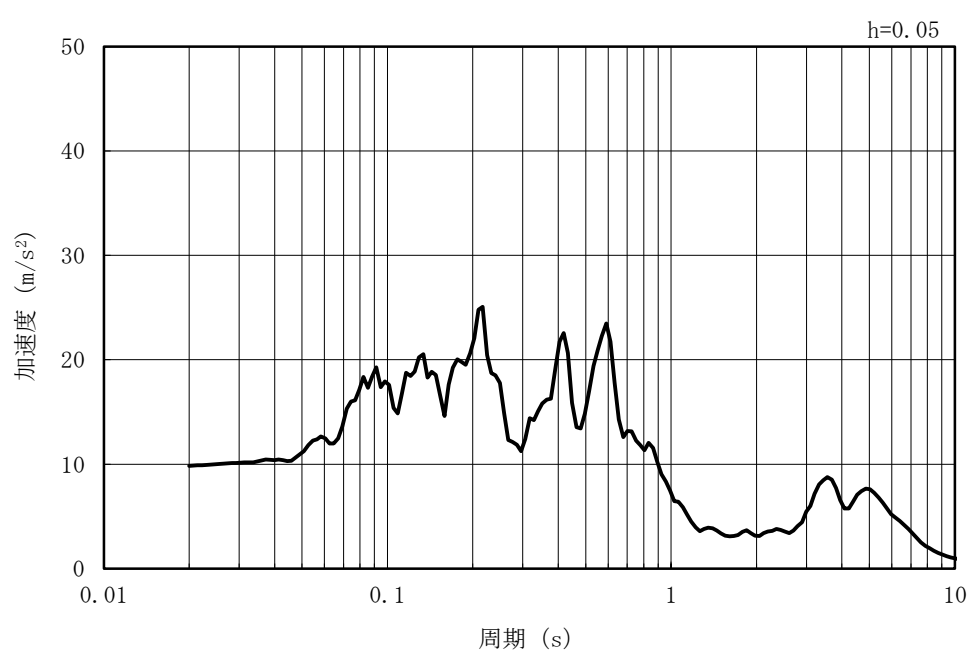


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-17 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-5NS)

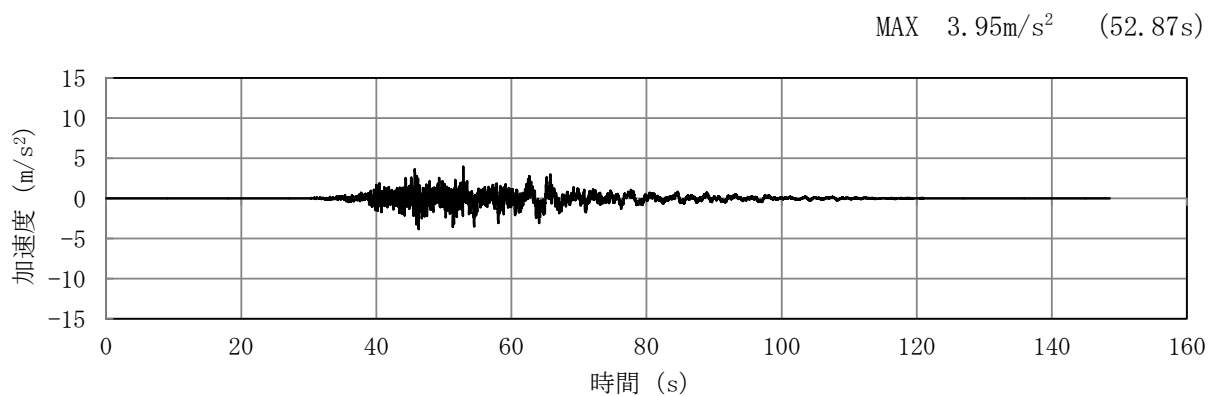


(a) 加速度時刻歴波形

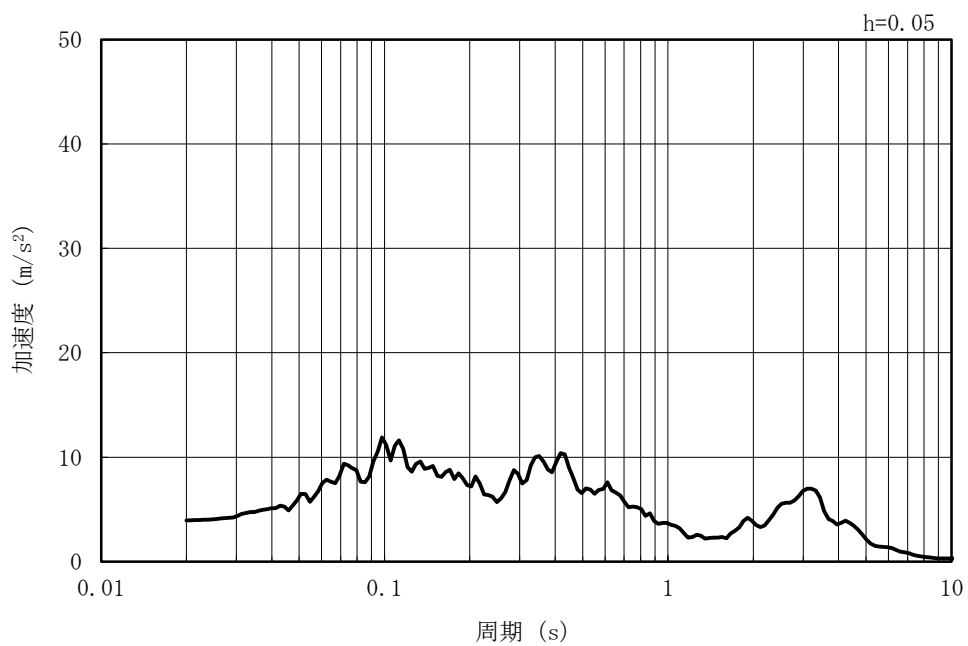


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-18 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-6EW)

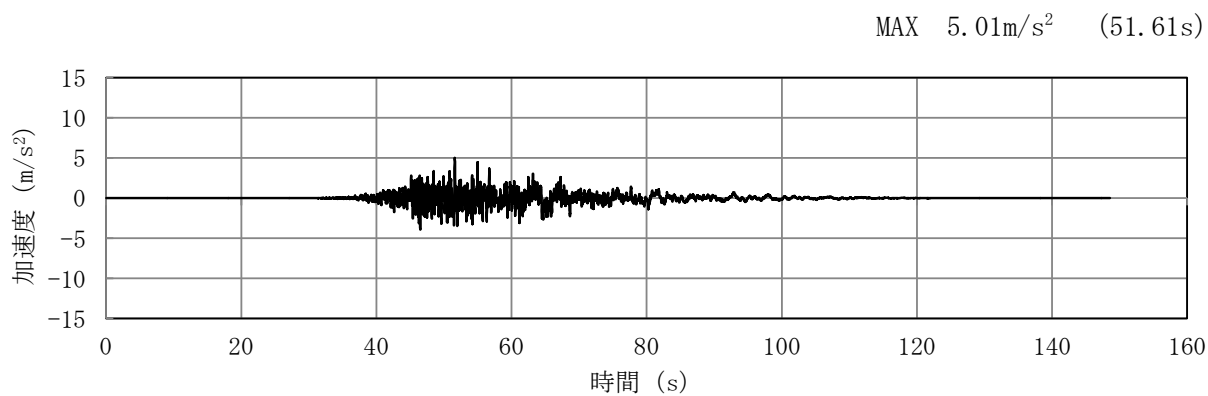


(a) 加速度時刻歴波形

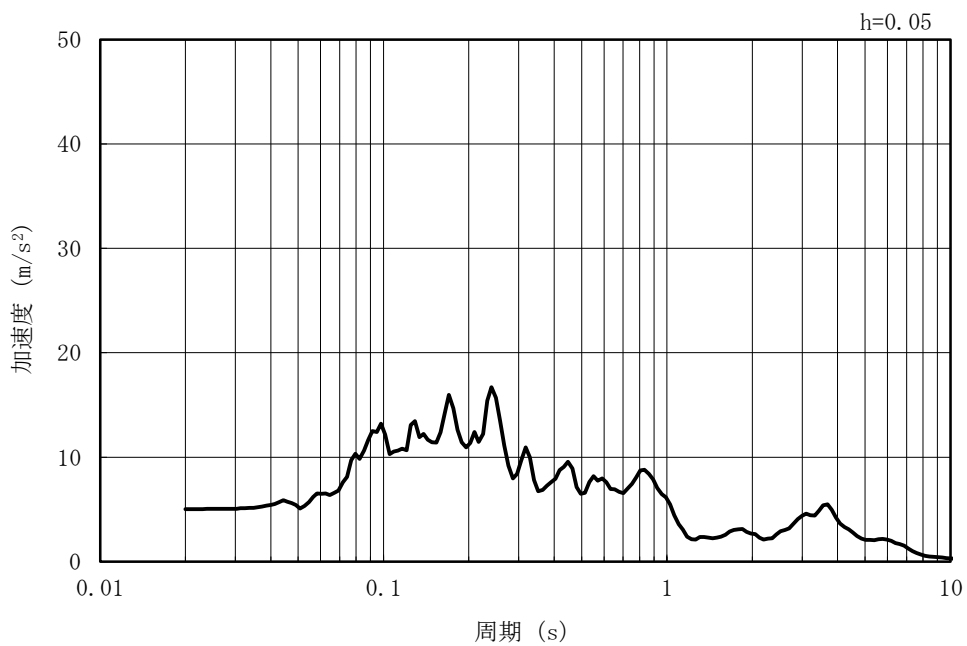


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-19 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-6EW)

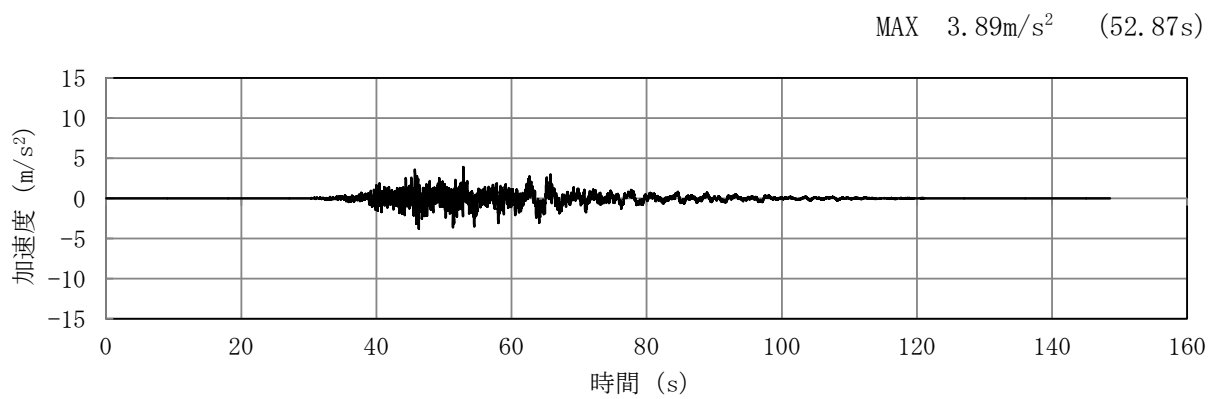


(a) 加速度時刻歴波形

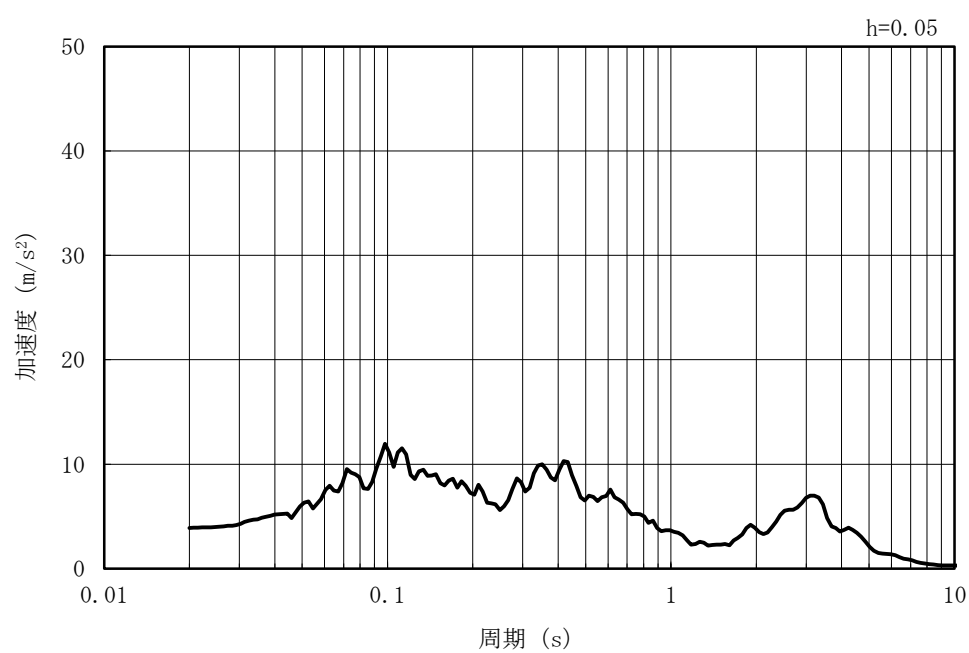


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-20 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-6NS)

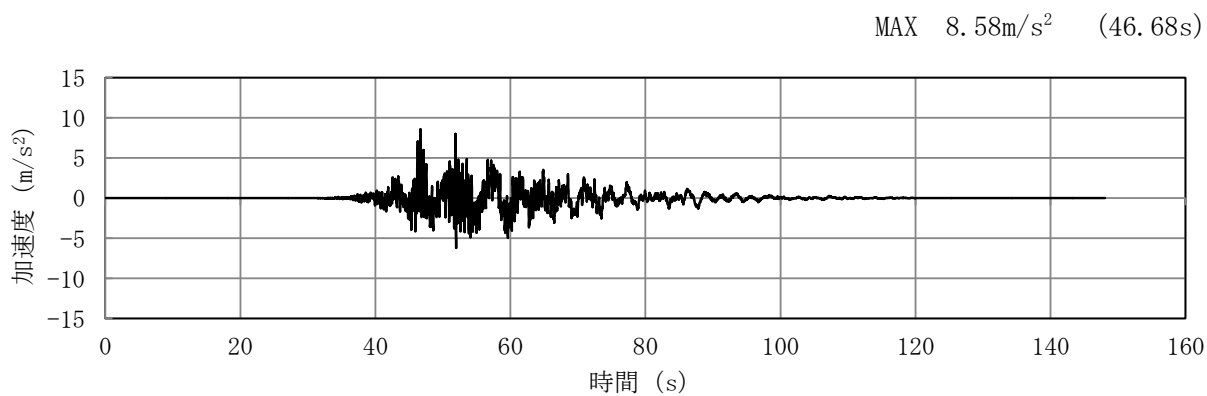


(a) 加速度時刻歴波形

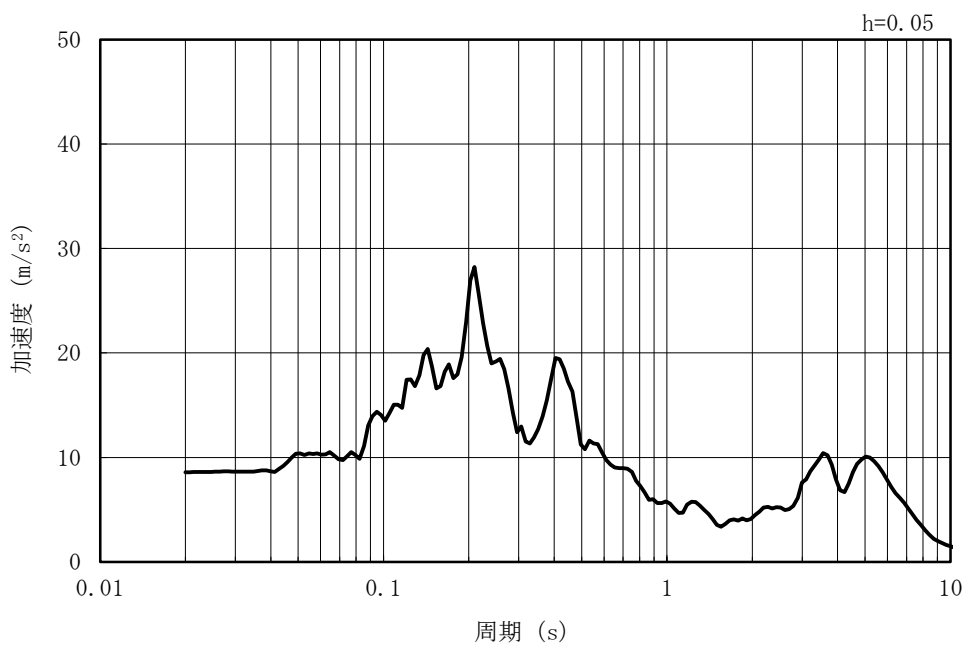


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-21 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-6NS)

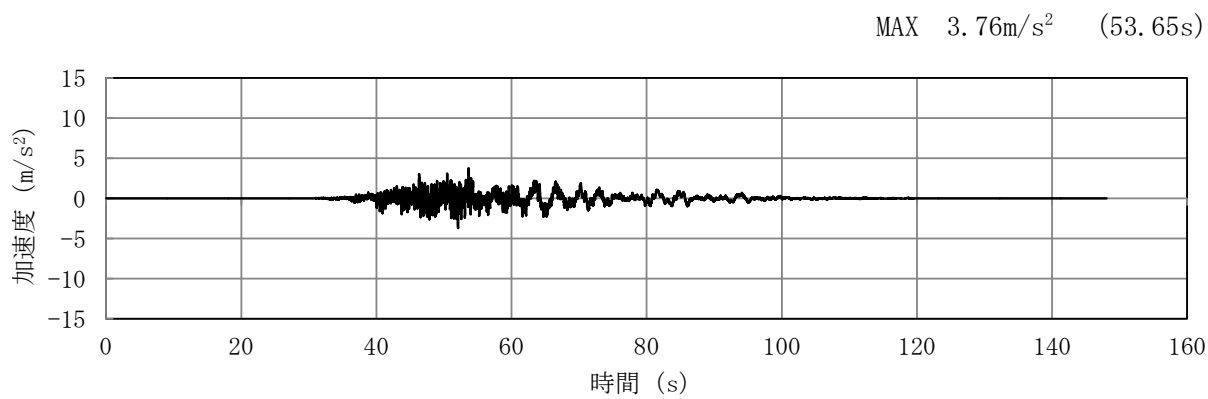


(a) 加速度時刻歴波形

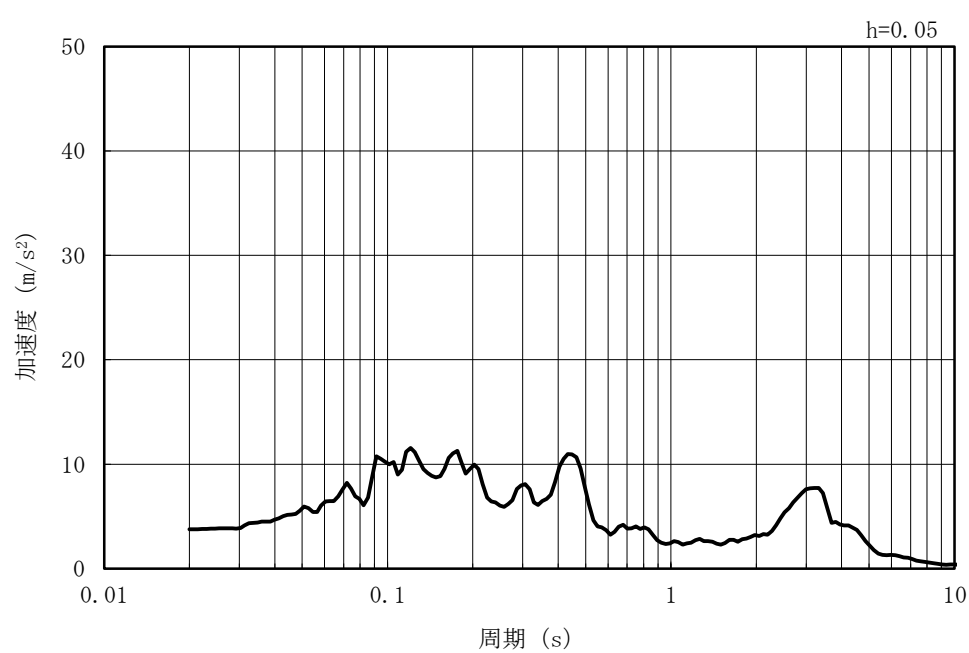


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-22 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-7EW)

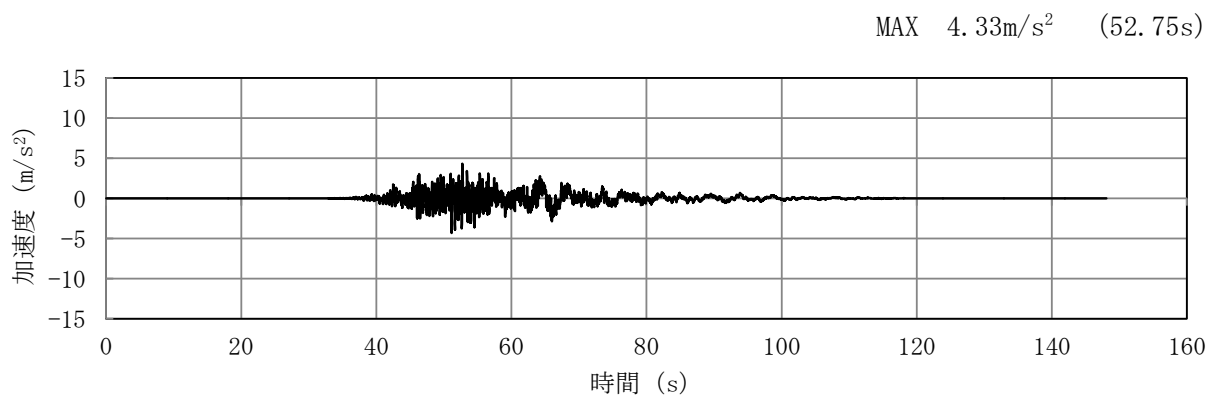


(a) 加速度時刻歴波形

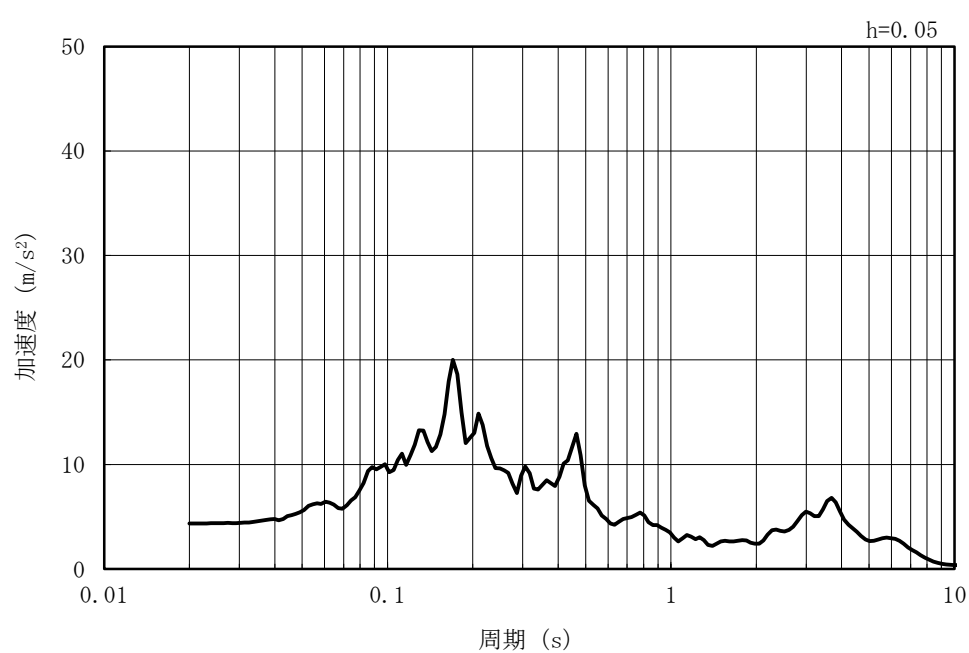


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-23 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-7EW)

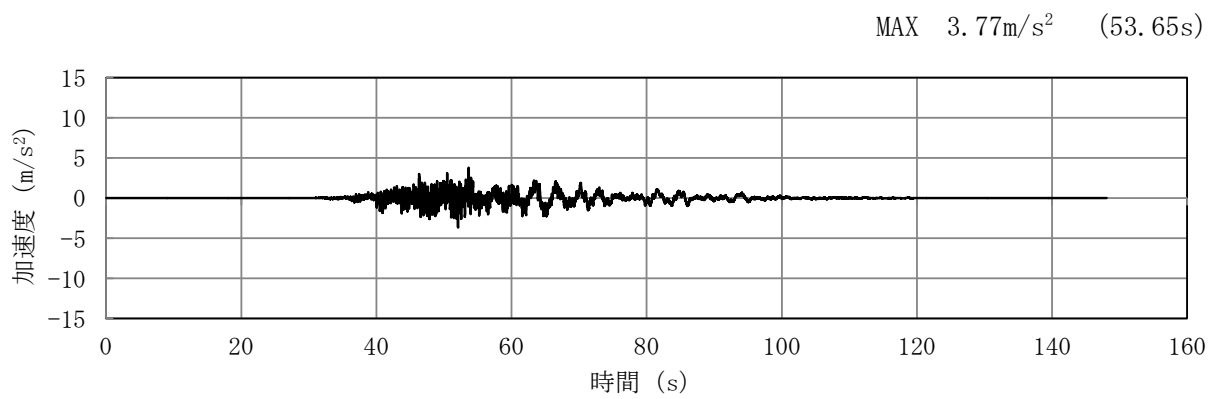


(a) 加速度時刻歴波形

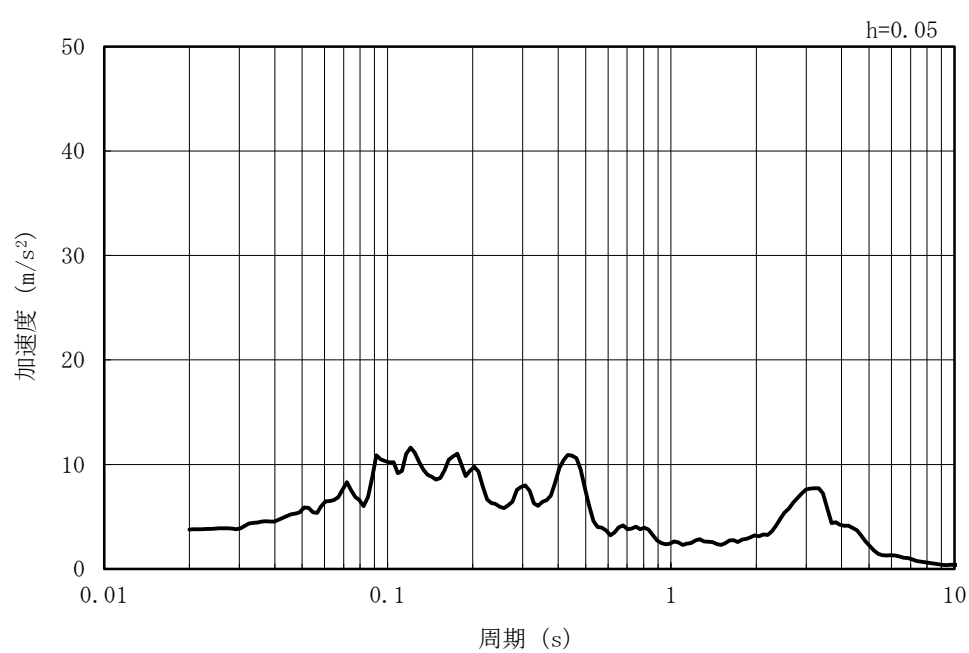


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-24 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-7NS)

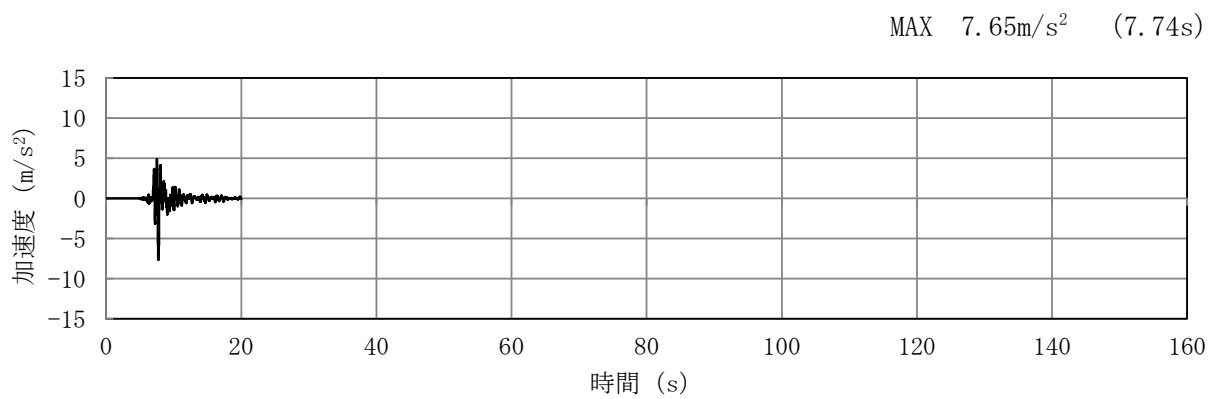


(a) 加速度時刻歴波形

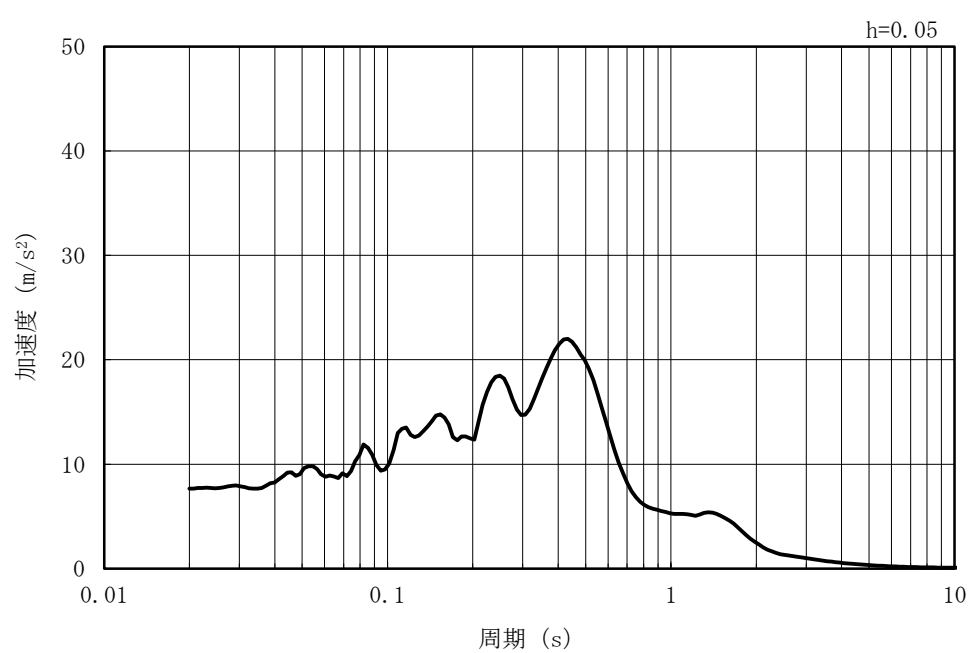


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-25 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-7NS)

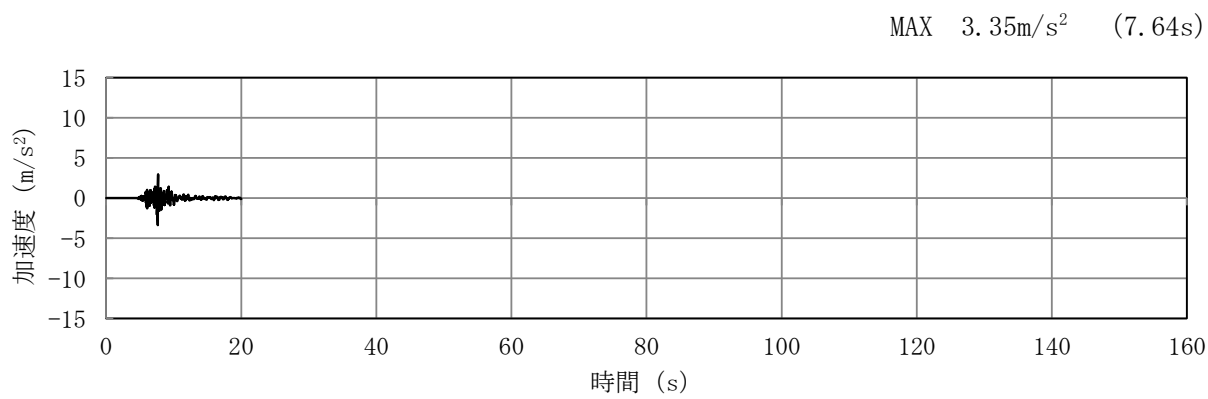


(a) 加速度時刻歴波形

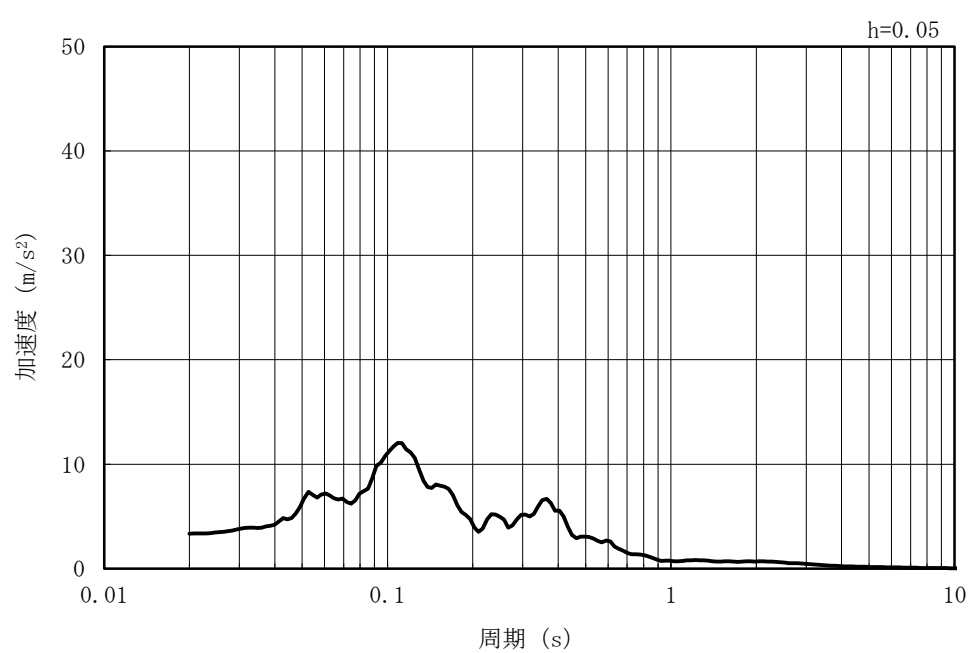


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-26 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-8)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5-27 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-8)

5.2 許容限界の設定

5.2.1 曲げに対する許容限界

(1) 鉄筋コンクリート部材

鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ 1%）を許容限界とし、照査用コンクリートひずみが限界ひずみを下回ることを確認する。

鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査に用いる照査用コンクリートひずみは、版解析より得られたコンクリートひずみに安全係数（構造解析係数）1.2 を乗じることにより、曲げ破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。

(2) 鋼管杭

キャスク指針では、鋼管杭の曲げに対する許容限界を、部材の終局強度に基づき設定する場合、図 5-28 に示す径厚比の条件を満たすことが前提とされている。

鋼管杭の終局強度は、鋼材の材料強度に基づいて評価する。JIS 適合品を用いるので、鋼材の材料強度は基準強度 F の 1.1 倍以下に基づく数値とする。この場合、鋼管杭の弾性局部座屈を防止するため、「鋼構造限界状態設計指針・同解説（1998年）」（日本建築学会）^(附2.3-1) に示される冷間成形円形中空断面柱の板要素の幅厚比区分の考え方を適用して、鋼管杭の径厚比は $\frac{2r}{t} \leq 90$ を満たすことを前提とする。

(r : 杭の半径 (板厚中心線の半径) , t : 腐食しろを除いた杭材の厚さ)

図 5-28 キャスク指針における鋼管杭の構造細目
(キャスク指針より引用)

軽油タンク基礎 (6 号機設備) の鋼管杭については、肉厚 14mm 及び 9mm の鋼管杭があるが、このうち肉厚 9mm の鋼管杭については上記の径厚比の条件を満たさないため、鋼管杭の肉厚に応じて以下のとおり許容限界を設定する。

a. 肉厚 14mm の鋼管杭

キャスク指針に基づき、鋼管杭の終局曲率を許容限界とし、照査用曲率が終局曲率を下回ることを確認する。

b. 肉厚 9mm の鋼管杭

鋼管杭の降伏モーメントに対する曲率を許容限界とし、照査用曲率が降伏モーメントに対する曲率を下回ることを確認する。

なお、鋼管杭の曲げ軸力照査に用いる照査用曲率は、地震応答解析により得られた曲率に安全係数 (構造解析係数) 1.05 を乗じることにより、曲げ破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。

a. 肉厚 14mm の鋼管杭

$$\gamma_i \frac{\phi_d}{\phi_u} < 1.0$$

ここで, γ_i : 構造物係数 (=1.0)

$$\phi_d = \gamma_a \cdot \phi$$

γ_a : 構造解析係数 (=1.05)

ϕ : 応答計算による最大曲率

ϕ_u : 鋼管杭の終局曲率

$$\phi_u(N) = \varepsilon_{\max} / [r \cdot \{1 + \sin(\pi N / 2N_y)\}] / \gamma_b \quad (N < 0 : \text{引張}, N > 0 : \text{圧縮})$$

N : 発生軸力

$\varepsilon_{\max} = 0.22 t / r$: 局部座屈発生時ひずみ

r : 杭の半径

t : 腐食しろを除いた鋼材の厚さ

$N_y = 2 \pi r t \sigma_y$: 鋼材降伏時の軸力

σ_y : 鋼材の降伏点応力

γ_b : 部材係数 (=1.1)

b. 肉厚 9mm の鋼管杭

$$\gamma_i \frac{\phi_d}{\phi_y} < 1.0$$

ここで, γ_i : 構造物係数 (=1.0)

$$\phi_d = \gamma_a \cdot \phi$$

γ_a : 構造解析係数 (=1.05)

ϕ : 応答計算による最大曲率

ϕ_y : 鋼管杭の降伏モーメントに対する曲率

$$\phi_y(N) = M_y / E I / \gamma_b \quad (N < 0 : \text{引張}, N > 0 : \text{圧縮})$$

N : 発生軸力

$$M_y = M_{y0} \cdot (1 - N / N_y)$$

$$M_{y0} = \frac{\pi}{32D} \cdot \{D^4 - (D-2t)^4\} f_{yd}$$

M_y : 降伏モーメント

M_{y0} : 軸力 0 に対する降伏モーメント

$N_y = 2 \pi r t \sigma_y$: 鋼材降伏時の軸力

D : 腐食しろを除いた鋼管杭の外周径

t : 腐食しろを除いた鋼材の厚さ

f_{yd} : 鋼材の設計降伏強度

γ_b : 部材係数 (=1.1)

5.2.2 せん断に対する許容限界

(1) 鉄筋コンクリート部材

鉄筋コンクリート部材のせん断に対する許容限界は、土木学会マニュアルに基づき、a. 棒部材式又はb. ディープビーム式で求まるせん断耐力のうち、いずれか大きい方を許容限界とし、照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認する。

鉄筋コンクリート部材のせん断照査に用いる照査用せん断力は、地震応答解析により得られたせん断力に安全係数（構造解析係数）1.05 を乗じることにより、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。

$$\gamma_i \frac{V_d}{V_{y d}} < 1.0$$

ここで、

γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)

$V_{y d}$: せん断耐力

V_d : 照査用せん断力 ($V_d = \gamma_a \cdot V$)

γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.0$)

V : 応答計算によるせん断力

a. 棒部材式

$$V_{y d} = V_{c d} + V_{s d}$$

ここで,

$V_{c d}$: コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{s d}$: せん断補強筋が分担するせん断耐力

$$V_{c d} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{v c d} \cdot b \cdot d / \gamma_{b c}$$

$$f_{v c d} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{c d}} \quad \text{ただし, } f_{v c d} > 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ となる場合は } f_{v c d} = 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad \text{ただし, } \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} \quad (d \text{ [m]}) \quad \text{ただし, } \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_p = 1.5$$

$$\beta_n = 1 + 2 M_0 / M_u \quad (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし, } \beta_n > 2.0 \text{ となる場合は } \beta_n = 2.0$$

$$= 1 + 4 M_0 / M_u \quad (N'_d < 0) \quad \text{ただし, } \beta_n < 0 \text{ となる場合は } \beta_n = 0$$

$$\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d} \quad \text{ただし, } \beta_a < 1.0 \text{ となる場合は } \beta_a = 1.0$$

$f'_{c d}$: コンクリート圧縮強度の設計用値 (N/mm²) で設計基準強度 $f'_{c k}$ を材料係数 $\gamma_{m c}$ (=1.3) で除したもの

$p_v = A_s / (b_w \cdot d)$: 引張鉄筋比

A_s : 引張側鋼材の断面積

b_w : 部材の有効幅

d : 部材の有効高さ

N'_d : 設計軸圧縮力

M_u : 曲げモーメント耐力

$M_0 = N'_d \cdot D / 6$: 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ち消すのに必要なモーメント (デコンプレッションモーメント)

D : 断面高さ

a/d : せん断スパン比

$\gamma_{b c}$: 部材係数 (=1.3)

$$V_{s d} = \{A_w \cdot f_{w y d} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) / s\} \cdot z / \gamma_{b s}$$

ここで、

- A_w : 区間 s におけるせん断補強筋の総断面積
- $f_{w y d}$: せん断補強筋の降伏強度を材料係数 $\gamma_{m s}$ (1.0) で除したもので、
400N/mm²以下とする。ただし、コンクリートの圧縮強度の特性値 $f'_{c k}$ が 60N/mm² 以上の時は、800N/mm² 以下とする。
- α : せん断補強筋と部材軸のなす角
- s : せん断補強筋の配置間隔
- 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 $d / 1.15$ とする。
- $\gamma_{b s}$: 部材係数 (=1.1)

b. デイープビーム式

$$V_{y d d} = V_{c d d} + V_{s d d}$$

ここで,

$V_{c d d}$: コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{s d d}$: せん断補強筋が分担するせん断耐力

$$V_{c d d} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{d d} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{b c}$$

$$f_{d d} = 0.19 \sqrt{f'_{c d}}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d \text{ [m]})$$

ただし, $\beta_d > 1.5$ となる場合は $\beta_d = 1.5$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v}$$

ただし, $\beta_p > 1.5$ となる場合は $\beta_p = 1.5$

$$\beta_a = \frac{5}{1 + (a/d)^2}$$

$\gamma_{b c}$: 部材係数 (=1.3)

$$V_{s d d} = \phi \cdot V_{s d}$$

$\phi = -0.17 + 0.3 a/d + 0.33/p_{wb}$ ただし, $0 \leq \phi \leq 1$

p_{wb} : せん断補強鉄筋比 (%)

土木学会マニュアルでは、コンクリート標準示方書におけるせん断耐力式のうち棒部材式において等価せん断スパンにより設定可能な係数 β_a を考慮している。これは、地中に埋設されたラーメン構造で、分布荷重が卓越、スパン内に曲げモーメントの反曲点が存在する等の載荷形態にある条件下では、せん断耐力が増大するという実験的知見を踏まえ、より合理的なせん断耐力を与えるよう、コンクリート標準示方書のせん断耐力式を精緻化したものである。

土木学会マニュアルにおけるせん断耐力式による評価においては、表 5-1 に示すとおり、複数の安全係数が見込まれていることから、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施することが可能である。

表 5-1 せん断耐力式において考慮している安全係数

安全係数			値	内容
材料係数	コンクリート	γ_{mc}	1.30	コンクリートの特性値（圧縮強度）を低減
部材係数	コンクリート	γ_{bc}	1.30	コンクリートが負担するせん断力を低減
	鉄筋	γ_{bs}	1.10	せん断補強筋が負担するせん断力を低減
構造解析係数		γ_a	1.05	応答値（断面力）を割り増し

5.2.3 鋼管杭

鋼管杭のせん断に対する許容限界は、キャスク指針及び鋼・合成構造標準示方書に基づき、以下の式で求まる終局せん断強度とする。

鋼管杭のせん断照査に用いる照査用せん断力は、地震応答解析により得られたせん断力に安全係数（構造解析係数）1.05 を乗じることにより、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。

$$\gamma_i \frac{Q_d}{Q_u} < 1.0$$

ここで、 γ_i : 構造物係数 (=1.0)

$$Q_d = \gamma_a \cdot Q$$

γ_a : 構造解析係数 (=1.05)

Q : 応答計算による最大せん断力

Q_u : 鋼管杭の終局せん断強度

$$Q_u = A_e \cdot f_s / \kappa / \gamma_b$$

A_e : 腐食代を除いた杭の断面積

f_s : 鋼材の短期許容せん断応力度

κ : せん断応力度の分布係数で 2.0 とする。

γ_b : 部材係数 (=1.1)

5.2.4 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

(1) 基礎地盤の押し込みに対する支持性能評価

基礎地盤の押し込みに対する許容限界は、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、道路橋示方書の杭基礎（中掘り杭工法）より設定する極限支持力に、キャスク指針に基づく安全率 1.2 を考慮した終局鉛直支持力とする。杭周面の地盤が液状化層である場合、有効応力解析により過剰間隙水圧比が 95%以上と判定された地盤については液状化するものとし、周面摩擦力を考慮しない。地盤改良体や非液状化層については、周面摩擦力を支持力として考慮する。

終局鉛直支持力の算定条件を表 5-2 及び表 5-3 に示す。

$$R_{ua} = \frac{\gamma}{n} R_u$$

ここで、 R_{ua} : 終局鉛直支持力

γ : 極限支持力推定法の相違による安全率の補正係数

(極限支持力を支持力推定式で算定するため、 $\gamma = 1.0$ とする)

n : 安全率 (キャスク指針に基づき、 $n = 1.2$ とする)

R_u : 地盤から決まる杭の極限支持力 (kN)

$$R_u = q_d \cdot A + U \cdot \sum L_i \cdot f_i$$

q_d : 杭先端における単位面積当たりの極限支持力度 (kN/m²)

適用する杭工法及び杭先端の地盤種別に応じて設定

$q_d = 200 \cdot N$ (≤ 10000) (セメントミルク噴出攪拌方式)

A : 杭先端面積 (m²)

N : 杭先端地盤における標準貫入試験の N 値

U : 杭の周長 (m)

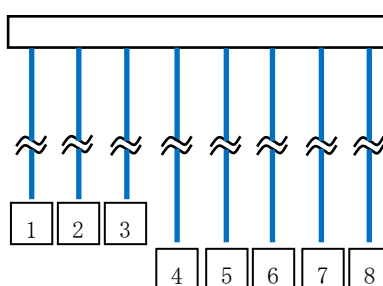
L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

f_i : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 (kN/m²)

表 5-2 地盤の支持性能に対する許容限界の算定条件（押し込み， A-A断面）

項目	算定結果							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$q_d A$ (kN)	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001
杭先端の極限支持力度 q_d (kN/m ²)	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
杭先端面積 A (m ²) *	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
杭の周長 U (m) *	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507

注記* : 腐食代 1mm 考慮



評価位置

表 5-3 (1) 地盤の支持性能に対する許容限界の算定条件 (押し込み, B-B断面)

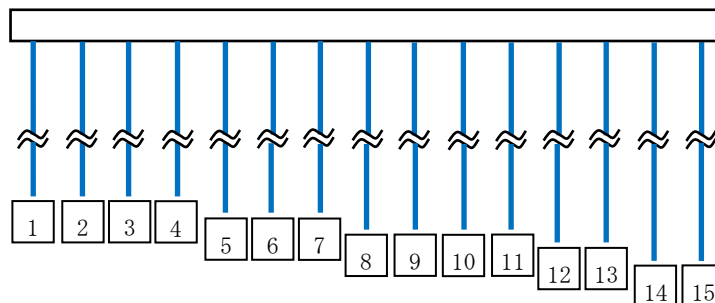
項目	算定結果							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$q_d A$ (kN)	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001
杭先端の極限支持力度 q_d (kN/m ²)	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
杭先端面積 A (m ²) *	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
杭の周長 U (m) *	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507

注記* : 腐食代 1mm 考慮

表 5-3 (2) 地盤の支持性能に対する許容限界の算定条件 (押し込み, B-B断面)

項目	算定結果							
	9	10	11	12	13	14	15	
$q_d A$ (kN)	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	
杭先端の極限支持力度 q_d (kN/m ²)	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	
杭先端面積 A (m ²) *	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	
杭の周長 U (m) *	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507	

注記* : 腐食代 1mm 考慮



評価位置

(2) 基礎地盤の引抜きに対する評価

基礎地盤の引抜きに対する許容限界は、道路橋示方書の杭基礎（中掘り杭工法）より設定する極限引抜き力に、キャスク指針に基づく安全率 1.2 を考慮した終局引抜き力とする。杭周面の地盤が液状化層である場合、有効応力解析により過剰間隙水圧比が 95%以上と判定された地盤については液状化するものとし、周面摩擦力を考慮しない。地盤改良体や非液状化層については、周面摩擦力を支持力として考慮する。

$$P_a = \frac{1}{n} P_u$$

ここで、 P_a : 終局引抜き力

n : 安全率（キャスク指針に基づき、 $n=1.2$ とする）

P_u : 地盤から決まる杭の極限引抜き力 (kN)

$$P_u = U \cdot \sum L_i \cdot f_i$$

U : 杭の周長 (m)

L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

f_i : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 (kN/m²)

6. 評価結果

6.1 地震応答解析結果

地震応答解析結果として、「ひずみ分布」，「断面力分布」，「曲率分布」，「最大せん断ひずみ分布」及び「過剰間隙水圧比分布」を記載する。なお，断面力分布は単位奥行きあたりの断面力を図示する。

耐震評価においては，「工事計画に係る説明資料（屋外重要土木建造物の耐震性についての計算書）資料1 屋外重要土木建造物の耐震安全性評価について」の「10. 屋外重要土木建造物の耐震評価における追加解析ケースの選定について」に基づき，全ての基準地震動 S_s に対して実施する解析ケース①（基本ケース）において曲げ軸力照査，せん断力照査及び基礎地盤の支持性能照査の各評価項目について，照査値が最も厳しい（許容限界に対する余裕が最も小さい）地震動を用い，追加解析ケース（②～⑤）を実施する。また，上記解析ケースの結果を踏まえ，さらに照査値が大きくなる可能性がある場合は，追加解析を実施する。

6.1.1 解析ケースと照査値

(1) 曲げ軸力照査

a. 鉄筋コンクリート部材

表 6-1 に、版解析に基づく鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査の実施ケースと照査値を示す。

表 6-1 鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査の実施ケースと照査値

地震動		解析ケース				
		鉄筋コンクリートの曲げ軸力照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	-+	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	+-	0.01				
	--	0.02				
Ss-2		0.01				
Ss-3	++	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	-+	0.01				
	+-	0.01				
	--	0.01				
Ss-4		0.01				
Ss-5		0.01				
Ss-6		0.01				
Ss-7		0.01				
Ss-8	++	0.01				
	-+	0.01				

b. 鋼管杭

表 6-2 に、鋼管杭の曲げ軸力照査の実施ケースと照査値を示す。

表 6-2 鋼管杭の曲げ軸力照査の実施ケースと照査値

A-A断面

地震動		鋼管杭の曲げ軸力照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.73				
	-+	0.74				
	+-	0.72				
	--	0.73				
Ss-2		0.48				
Ss-3	++	0.79	0.71	0.87	0.66	0.58
	-+	0.66				
	+-	0.78		0.87		
	--	0.73				
Ss-4		0.16				
Ss-5		0.25				
Ss-6		0.27				
Ss-7		0.20				
Ss-8	++	0.69				
	-+	0.73				

B-B断面

地震動		鋼管杭の曲げ軸力照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.73	0.66	0.82	0.67	0.62
	-+	0.81	0.75	0.91	0.82	0.76
	+-	0.74				
	--	0.72				
Ss-2		0.58				
Ss-3	++	0.66				
	-+	0.81		0.90		
	+-	0.65				
	--	0.81				
Ss-4		0.48				
Ss-5		0.53				
Ss-6		0.66				
Ss-7		0.52				
Ss-8	++	0.61				
	-+	0.53				

注： □は、前述 3.5.1 のフローに基づき、解析ケース②～⑤を実施する地震動の基本ケース①の照査値を示す。

(2) せん断力照査

a. 鉄筋コンクリート部材

表 6-3 に、版解析に基づく鉄筋コンクリート部材のせん断力照査の実施ケースと照査値を示す。

表 6-3 鉄筋コンクリート部材のせん断力照査の実施ケースと照査値

地震動		鉄筋コンクリートのせん断力照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.23	0.20	0.23	0.21	0.21
	-+	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
	+-	0.27				
	--	0.24				
Ss-2		0.27				
Ss-3	++	0.23	0.20	0.21	0.20	0.20
	-+	0.21				
	+-	0.20				
	--	0.20				
Ss-4		0.18				
Ss-5		0.18				
Ss-6		0.21				
Ss-7		0.17				
Ss-8	++	0.19				
	-+	0.21				

b. 鋼管杭

表 6-4 に、鋼管杭のせん断力照査の実施ケースと照査値を示す。

表 6-4 鋼管杭のせん断力照査の実施ケースと照査値

A-A断面

地震動		鋼管杭のせん断力照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.45				
	-+	0.45				
	+-	0.44				
	--	0.44				
Ss-2		0.32				
Ss-3	++	0.47	0.44	0.49	0.42	0.39
	-+	0.41				
	+-	0.46				
	--	0.49				
Ss-4		0.12				
Ss-5		0.20				
Ss-6		0.21				
Ss-7		0.17				
Ss-8	++	0.48				
	-+	0.47				

B-B断面

地震動		鋼管杭のせん断力照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.65	0.60	0.75	0.65	0.60
	-+	0.56	0.53	0.62	0.56	0.53
	+-	0.62		0.73		
	--	0.56				
Ss-2		0.55				
Ss-3	++	0.55				
	-+	0.52				
	+-	0.55				
	--	0.52				
Ss-4		0.44				
Ss-5		0.38				
Ss-6		0.52				
Ss-7		0.43				
Ss-8	++	0.48				
	-+	0.52				

注： □は、前述 3.5.1 のフローに基づき、解析ケース②～⑤を実施する地震動の基本ケース①の照査値を示す。

(3) 基礎地盤の支持性能照査

表 6-5 に基礎地盤の押込みに対する支持性能照査の実施ケースと照査値, 表 6-6 に基礎地盤の引抜きに対する支持性能照査の実施ケースと照査値を示す。

表 6-5 基礎地盤の押込みに対する支持性能照査の実施ケースと照査値

A-A断面

地震動		基礎地盤の押込みに対する支持性能照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.19				
	-+	0.22				
	+-	0.19				
	--	0.19				
Ss-2		0.13				
Ss-3	++	0.15	0.13	0.17	0.13	0.12
	-+	0.17				
	+-	0.14				
	--	0.19				
Ss-4		0.12				
Ss-5		0.12				
Ss-6		0.09				
Ss-7		0.11				
Ss-8	++	0.28				
	-+	0.16				

B-B断面

地震動		基礎地盤の押込みに対する支持性能照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.27	0.27	0.26	0.28	0.27
	-+	0.27	0.26	0.26	0.26	0.25
	+-	0.25				
	--	0.28				
Ss-2		0.27				
Ss-3	++	0.23				
	-+	0.24				
	+-	0.25				
	--	0.22				
Ss-4		0.21				
Ss-5		0.16				
Ss-6		0.21				
Ss-7		0.16				
Ss-8	++	0.21				
	-+	0.16				

表 6-6 基礎地盤の引抜きに対する支持性能照査の実施ケースと照査値

A-A断面

地震動 \ 解析ケース		鋼管杭の引抜きに対する支持性能照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.86				
	-+	0.91				
	+-	0.84				
	--	0.89				
Ss-2		0.61				
Ss-3	++	0.90	0.83	0.97	0.80	0.74
	-+	0.82				
	+-	0.91				
	--	0.86				
Ss-4		0.05				
Ss-5		0.26				
Ss-6		0.22				
Ss-7		0.15				
Ss-8	++	0.57				
	-+	0.74				

B-B断面

地震動 \ 解析ケース		鋼管杭の引抜きに対する支持性能照査				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	0.72	0.73	0.71	0.68	0.67
	-+	0.66	0.65	0.66	0.65	0.63
	+-	0.81				
	--	0.69				
Ss-2		0.58				
Ss-3	++	0.56				
	-+	0.49				
	+-	0.57				
	--	0.50				
Ss-4		0.43				
Ss-5		0.29				
Ss-6		0.61				
Ss-7		0.46				
Ss-8	++	0.35				
	-+	0.62				

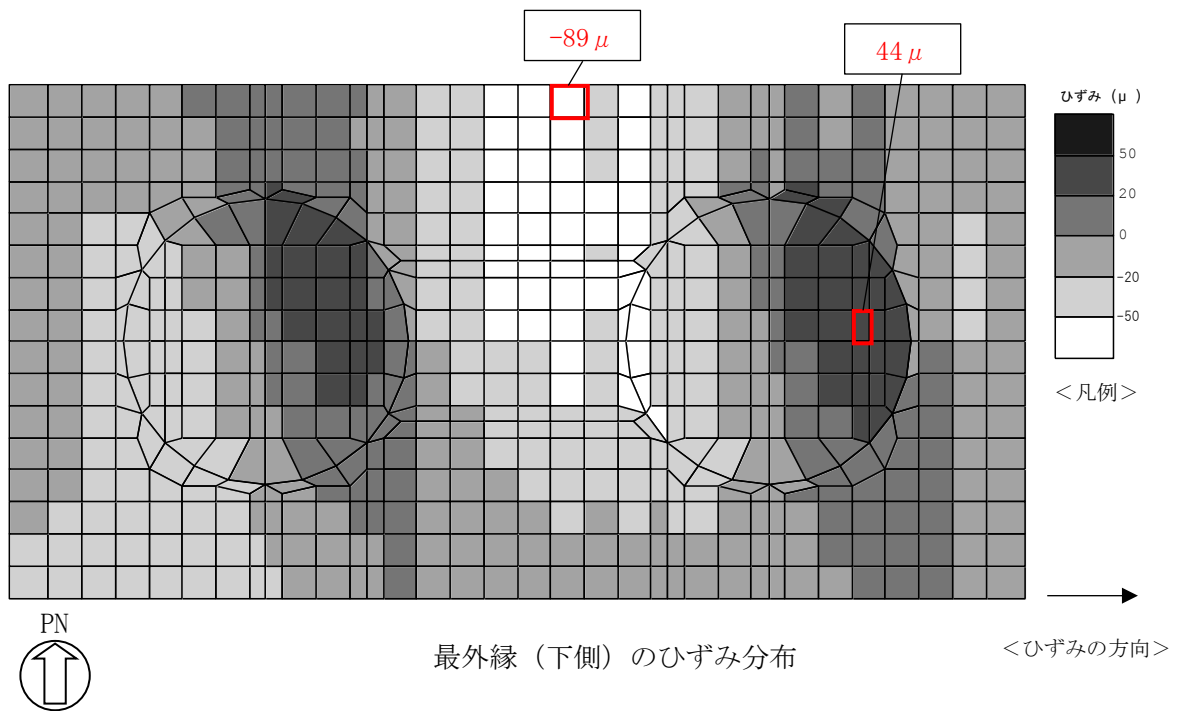
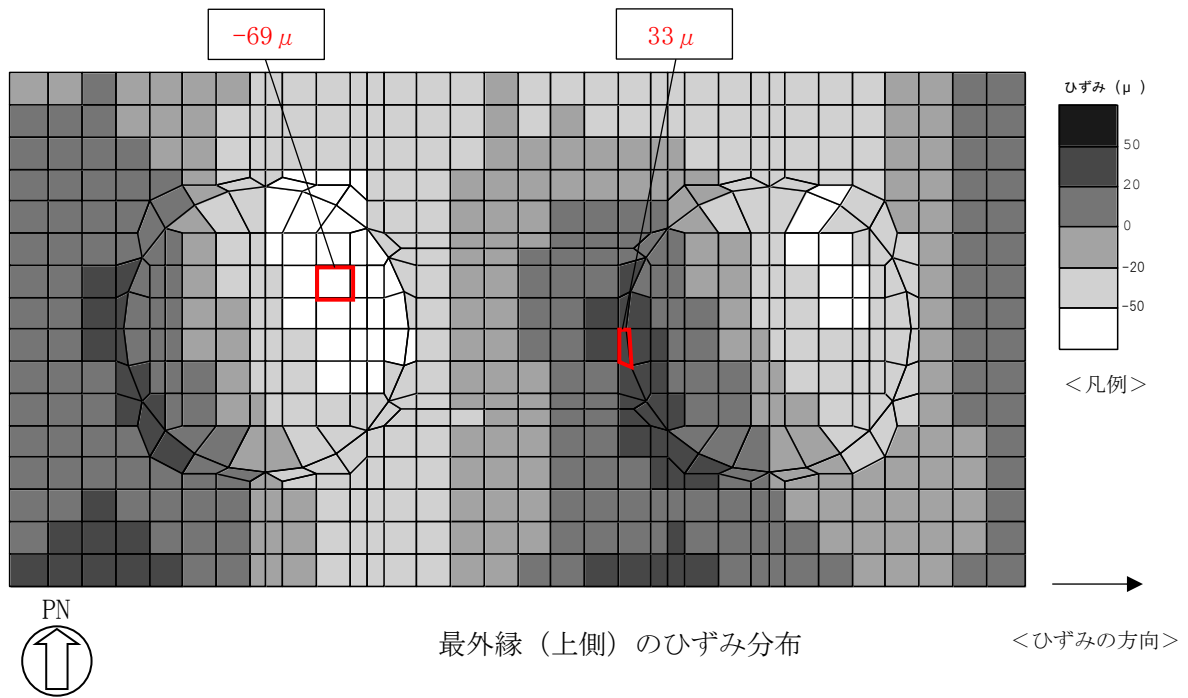
6.1.2 ひずみ分布図（鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査）

軽油タンク基礎（6号機設備）の鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査において、各解析ケースのうち最も厳しい照査値となる結果を表6-7に示す。また、該当する解析ケースのひずみ分布図を図6-1に示す。なお図6-1は、表6-7に示す解析ケースの照査値最大時における最大ひずみと同方向のひずみ分布を示している。

表 6-7 鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査結果
(最も厳しい照査値とその地震動)

解析 ケース	地震動	照査用ひずみ* (μ)	限界ひずみ (μ)	照査値
①	Ss-1-+	107	10000	0.02

注記* : 照査用ひずみ=発生ひずみ×構造解析係数 γ_a



□ : 最大ひずみ発生位置

図 6-1 鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査が最も厳しくなるケースでのひずみ分布図
(解析ケース①, 地震動 Ss-1-+, t=5.72s)

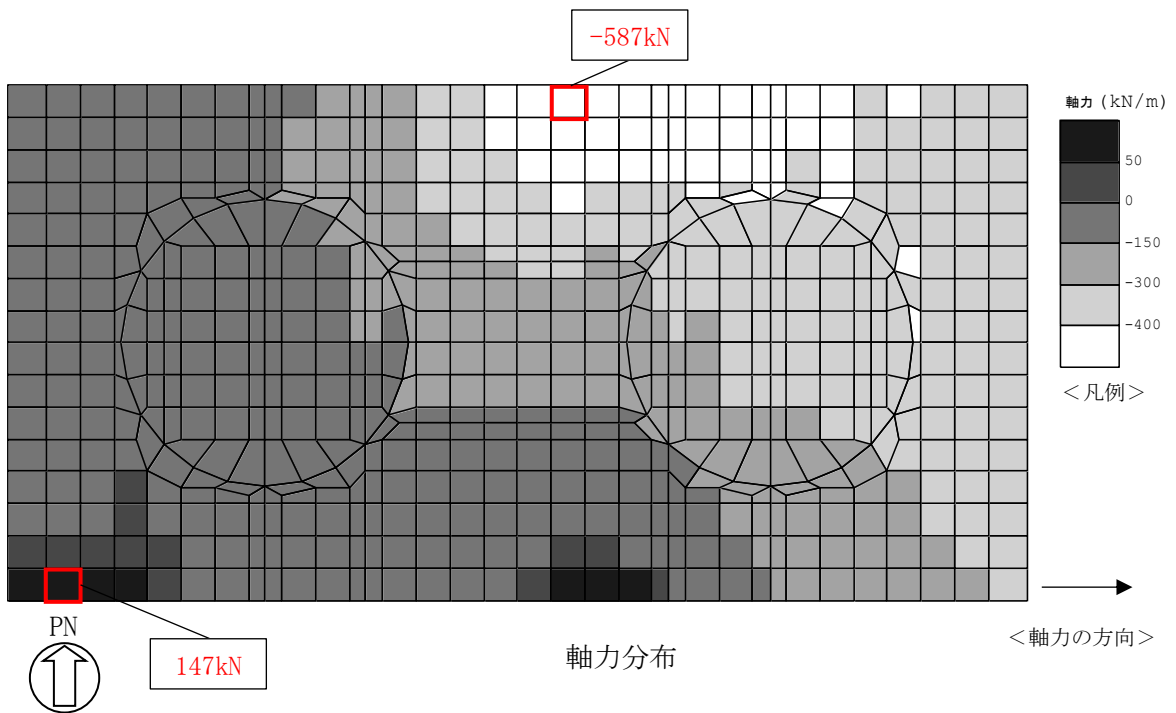
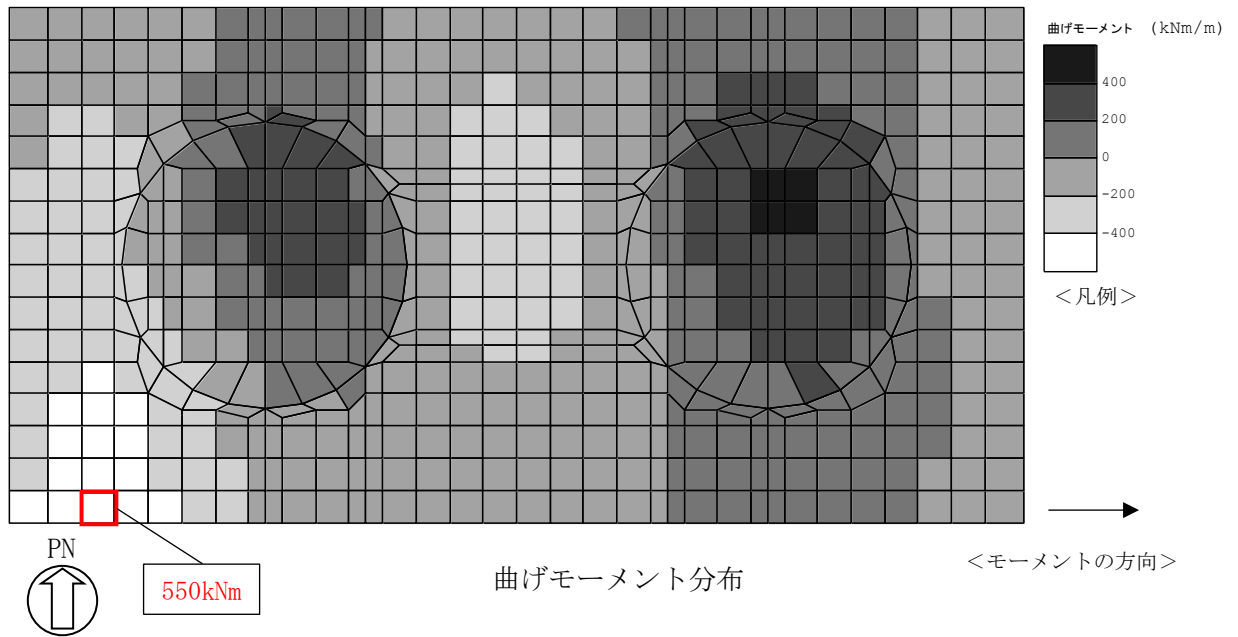
6.1.3 断面力分布（鉄筋コンクリート部材のせん断力照査）

軽油タンク基礎（6号機設備）の鉄筋コンクリート部材のせん断力照査において、最も厳しい照査値となる解析ケースの一覧を表 6-8 に示す。最も厳しい照査値となる時刻における断面力分布図（曲げモーメント、軸力、せん断力）を図 6-2 に示す。なお図 6-2 は、表 6-8 に示す解析ケースの照査値最大時における各断面力最大値と同方向の断面力分布を示している。

表 6-8 鉄筋コンクリート部材のせん断力照査結果
(最も厳しい照査値とその地震動)

解析 ケース	地震動	照査用せん断力* V_d (kN)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
①	Ss-1+-	511	1920	0.27

注記* : 照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 \times 構造解析係数 γ_a



□ : 最大断面力発生位置

図 6-2 (1) 鉄筋コンクリート部材のせん断力照査が最も厳しくなるケースでの断面力分布図
(解析ケース①, 地震動 Ss-1+-, t=5.93s)

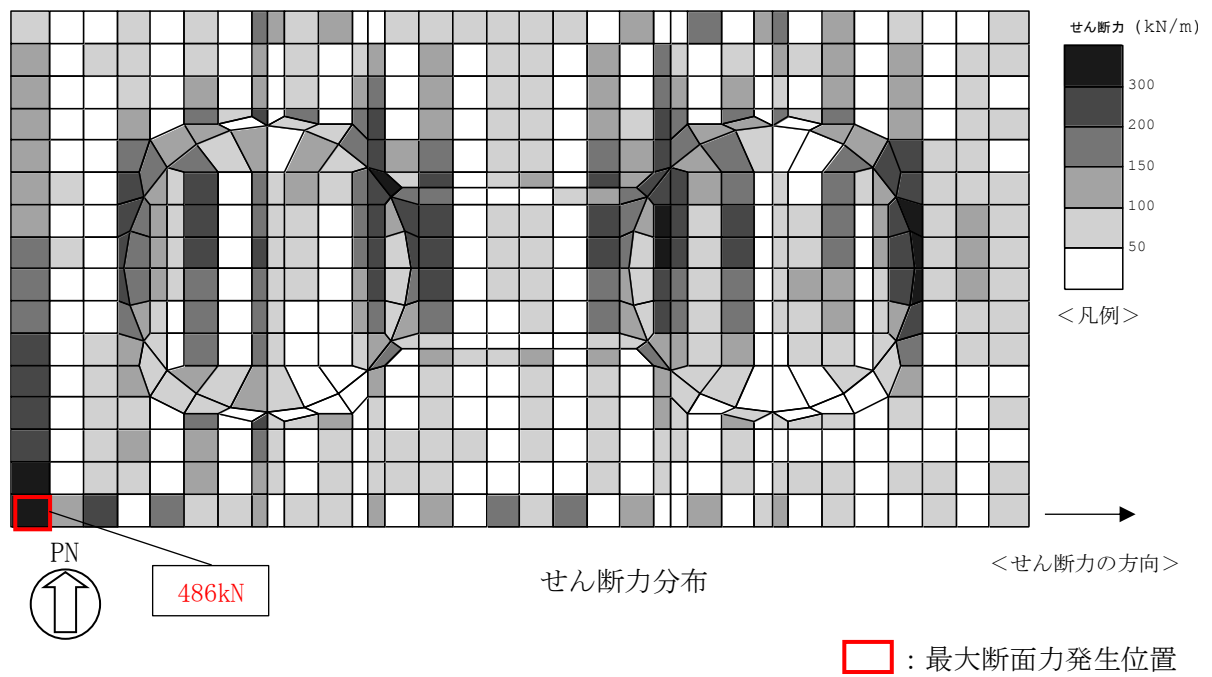


図 6-2 (2) 鉄筋コンクリート部材のせん断力照査が最も厳しくなるケースでの断面力分布図
(解析ケース①, 地震動 Ss-1+-, t=5.93s)

6.1.4 曲率分布（鋼管杭の曲げ軸力照査）

鋼管杭の曲げ軸力照査について、各解析ケースのうち最も厳しい照査値となる解析ケースを表 6-9 及び表 6-10 に示す。また、該当する解析ケースにおいて最も厳しい照査値となる時刻における曲率分布図を図 6-3 及び図 6-4 に示す。

表 6-9 鋼管杭の曲げ軸力照査結果（A-A断面）
（最も厳しい照査値とその地震動）

評価位置*1	解析ケース	地震動	照査用曲率*2 ϕ_d (1/m)	降伏モーメント M_y に対する曲率 ϕ_y (1/m)	照査値 ϕ_d / ϕ_y
2 (肉厚 9mm の杭)	③	Ss-3++	1.78×10^{-3}	2.05×10^{-3}	0.87

注記*1：評価位置は下図に示す。

*2：照査用曲率 $\phi_d =$ 発生曲率 \times 構造解析係数 γ_a

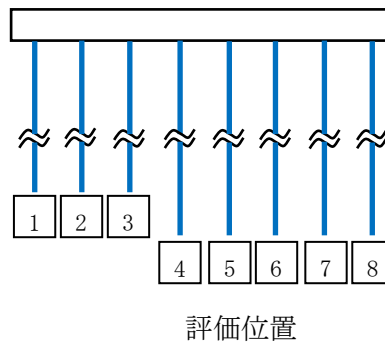
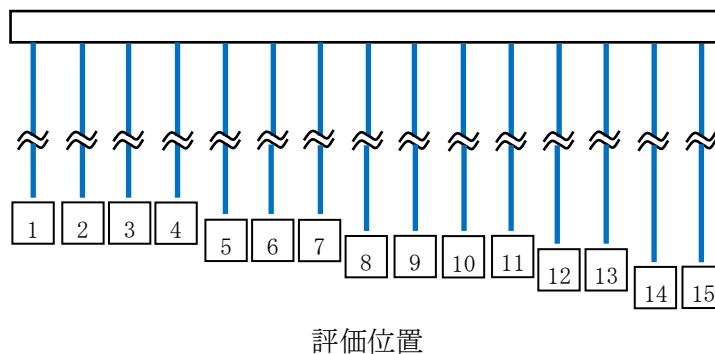


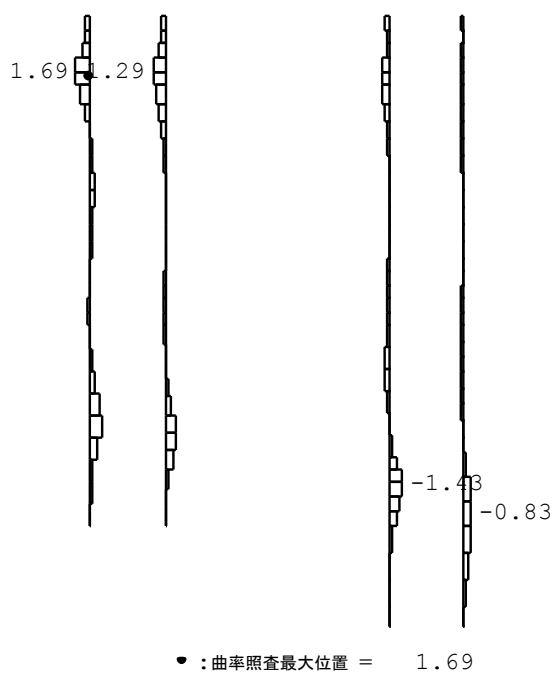
表 6-10 鋼管杭の曲げ軸力照査結果 (B-B断面)
 (各部材において最も厳しい照査値とその地震動)

評価位置*1	解析ケース	地震動	照査用曲率*2 ϕ_d (1/m)	降伏モーメント M_y に対する曲率 ϕ_y (1/m)	照査値 ϕ_d / ϕ_y
9 (肉厚 9mm の杭)	③	Ss-1-+	1.58×10^{-3}	1.75×10^{-3}	0.91

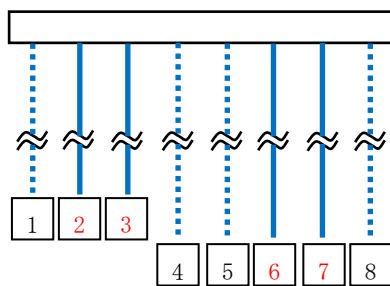
注記*1 : 評価位置は下図に示す。

*2 : 照査用曲率 $\phi_d = \text{発生曲率} \times \text{構造解析係数 } \gamma_a$



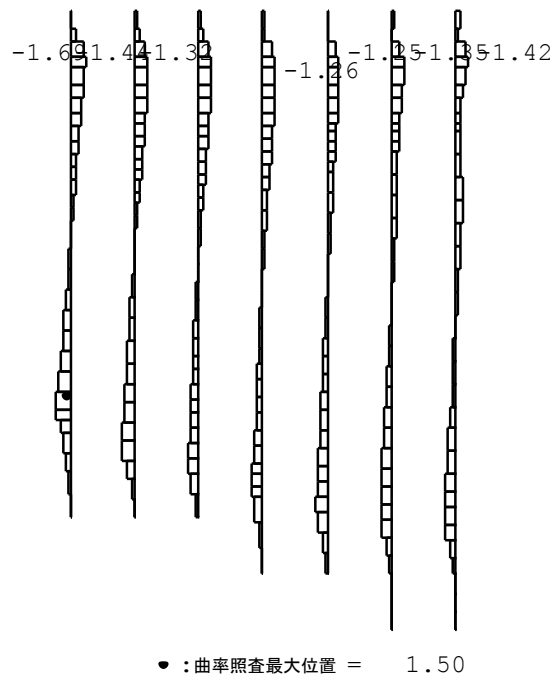


曲率 ($\times 10^{-3} \text{ 1/m}$)
 照査値が最大となる肉厚 9mm の杭



評価位置 (赤字 : 評価対象)

図 6-3 鋼管杭において最も厳しい照査値の曲率分布 (A-A断面)
 (解析ケース③, 地震動 Ss-3++, t=35.68s)



曲率 ($\times 10^{-3}$ 1/m)
 照査値が最大となる肉厚 9mm の杭

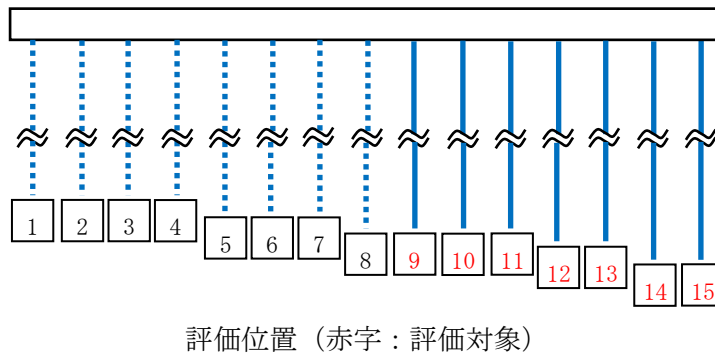


図 6-4 鋼管杭において最も厳しい照査値の曲率分布 (B-B断面)
 (解析ケース③, 地震動 Ss-1-+, t=5.79s)

6.1.5 せん断力分布（鋼管杭のせん断力照査）

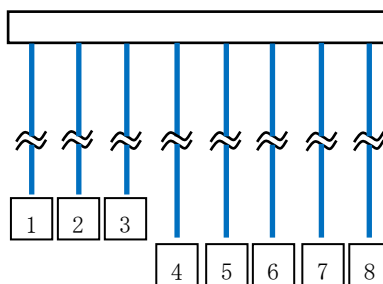
鋼管杭のせん断力照査について、解析ケースのうち最も厳しい照査値となる解析ケースを表 6-11 及び表 6-12 に示す。また、該当する解析ケースにおいて最も厳しい照査値となる時刻におけるせん断力分布図を図 6-5 及び図 6-6 に示す。

表 6-11 鋼管杭のせん断力照査結果（A-A断面）
（各部材において最も厳しい照査値とその地震動）

評価位置*1	解析ケース	地震動	照査用せん断力*2 Q_d (kN)	終局せん断耐力 Q_u (kN)	照査値 Q_d/Q_u
1 (肉厚 14mm の杭)	③	Ss-3++	967	1977	0.49

注記*1：評価位置は下図に示す。

*2：照査用せん断力 $Q_d = \text{発生せん断力} \times \text{構造解析係数 } \gamma_a$



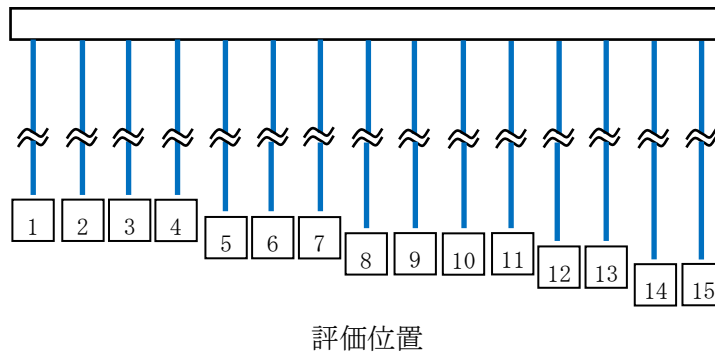
評価位置

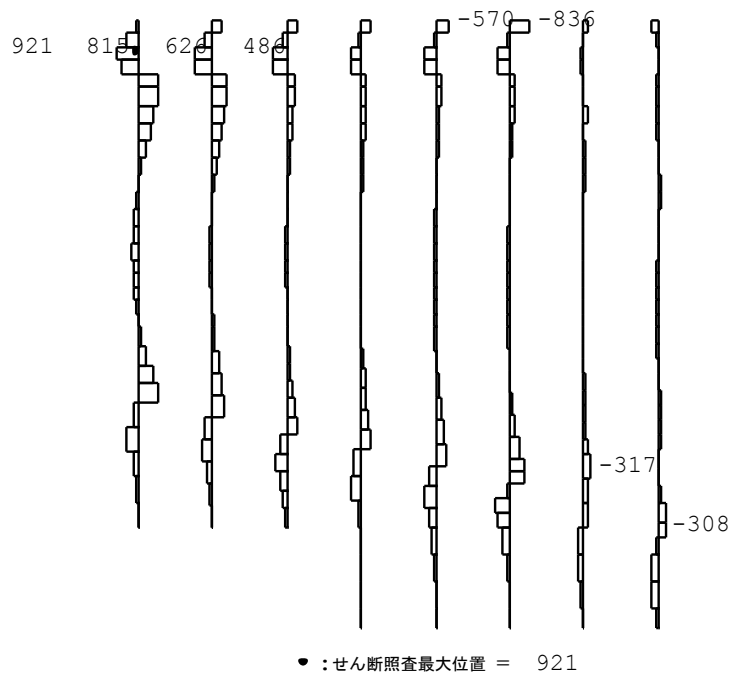
表 6-12 鋼管杭のせん断力照査結果 (B-B断面)
 (各部材において最も厳しい照査値とその地震動)

評価位置*1	解析ケース	地震動	照査用せん断力*2 Q_d (kN)	終局せん断耐力 Q_u (kN)	照査値 Q_d/Q_u
15 (肉厚 14mm の杭)	③	Ss-1++	1467	1977	0.75

注記*1 : 評価位置は下図に示す。

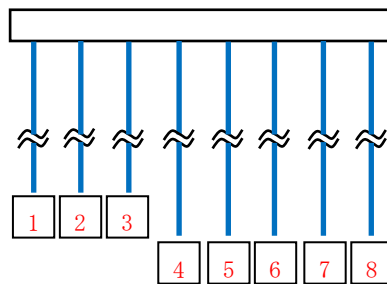
*2 : 照査用せん断力 $Q_d = \text{発生せん断力} \times \text{構造解析係数 } \gamma_a$





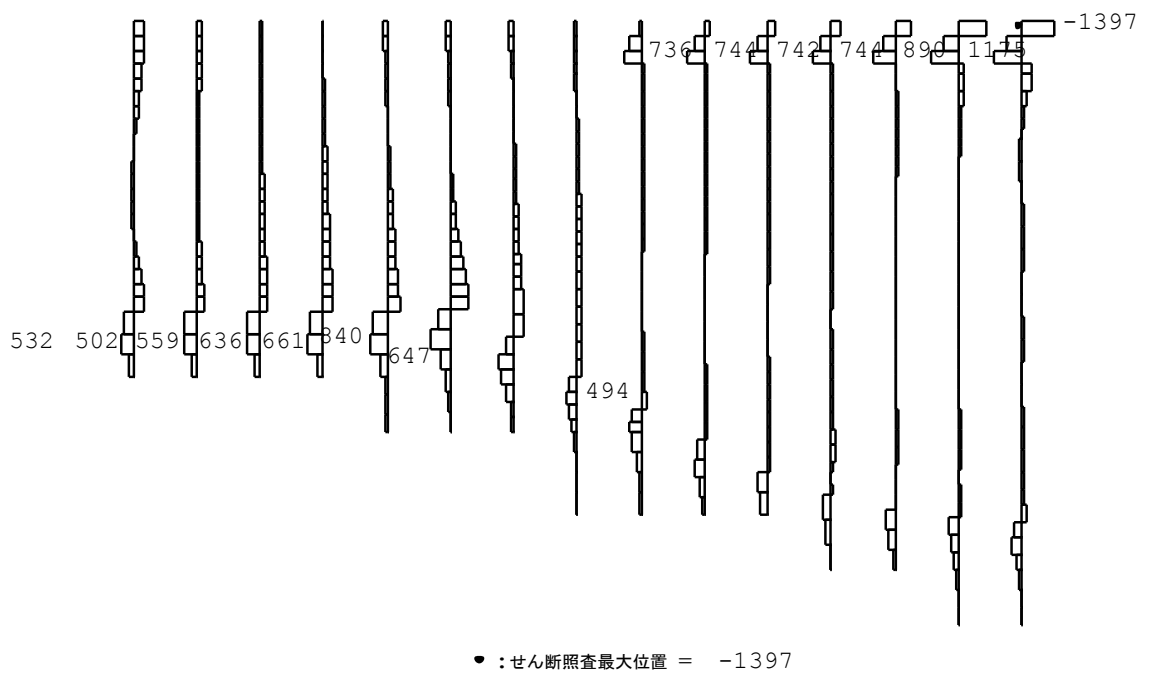
せん断力 (kN)

照査値が最大となる肉厚 14mm の杭



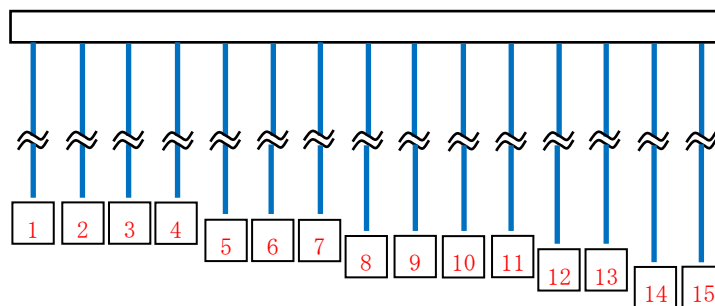
評価位置 (赤字 : 評価対象)

図 6-5 鋼管杭において最も厳しい照査値の地震時せん断力分布 (A-A断面)
(解析ケース③, 地震動 Ss-3++, t=35.68s)



せん断力 (kN)

照査値が最大となる肉厚 14mm の杭



評価位置 (赤字 : 評価対象)

図 6-6 鋼管杭において最も厳しい照査値の地震時せん断力分布 (B-B断面)
(解析ケース③, 地震動 Ss-1++, t=5.77s)

6.1.6 最大せん断ひずみ分布

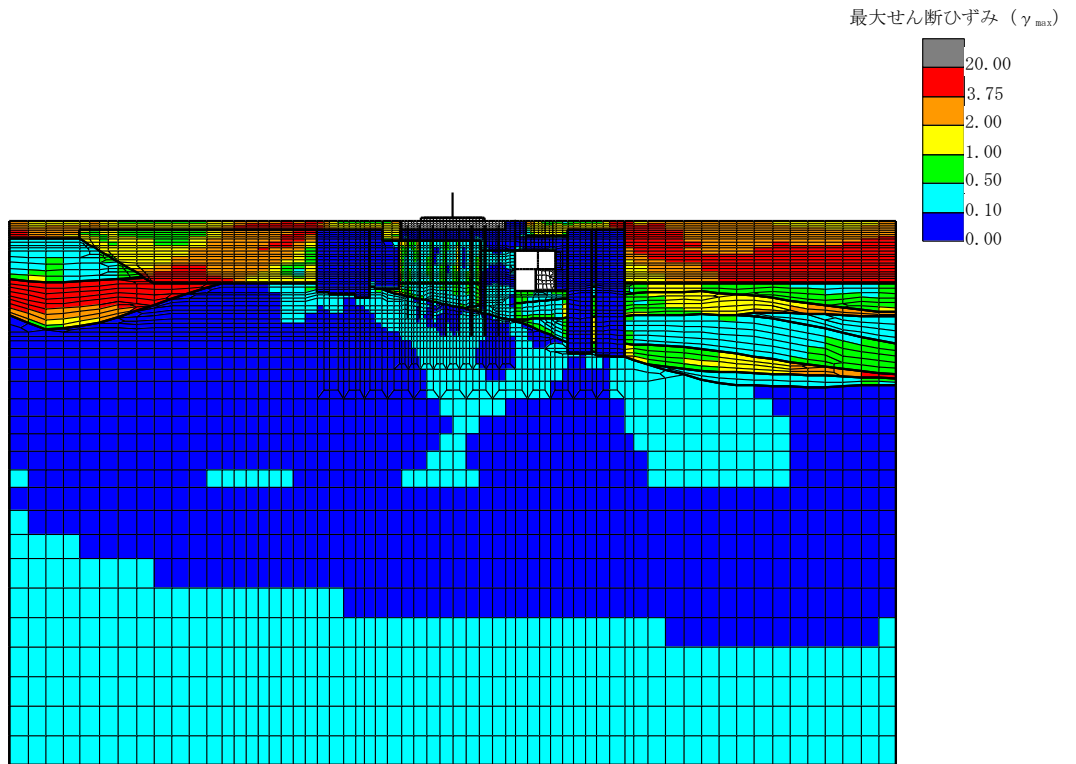
地盤に発生した最大せん断ひずみを確認するため、曲げ軸力照査及びせん断力照査において最大照査値を示した地震動について、地震応答解析の全時刻における最大せん断ひずみの分布を示す。表 6-13 に最大照査値を示す解析ケース一覧を示す。A-A断面における最大せん断ひずみ分布を図 6-7～図 6-9 に、B-B断面における最大せん断ひずみ分布を図 6-10～図 6-13 に示す。

表 6-13 最大照査値を示す解析ケース一覧

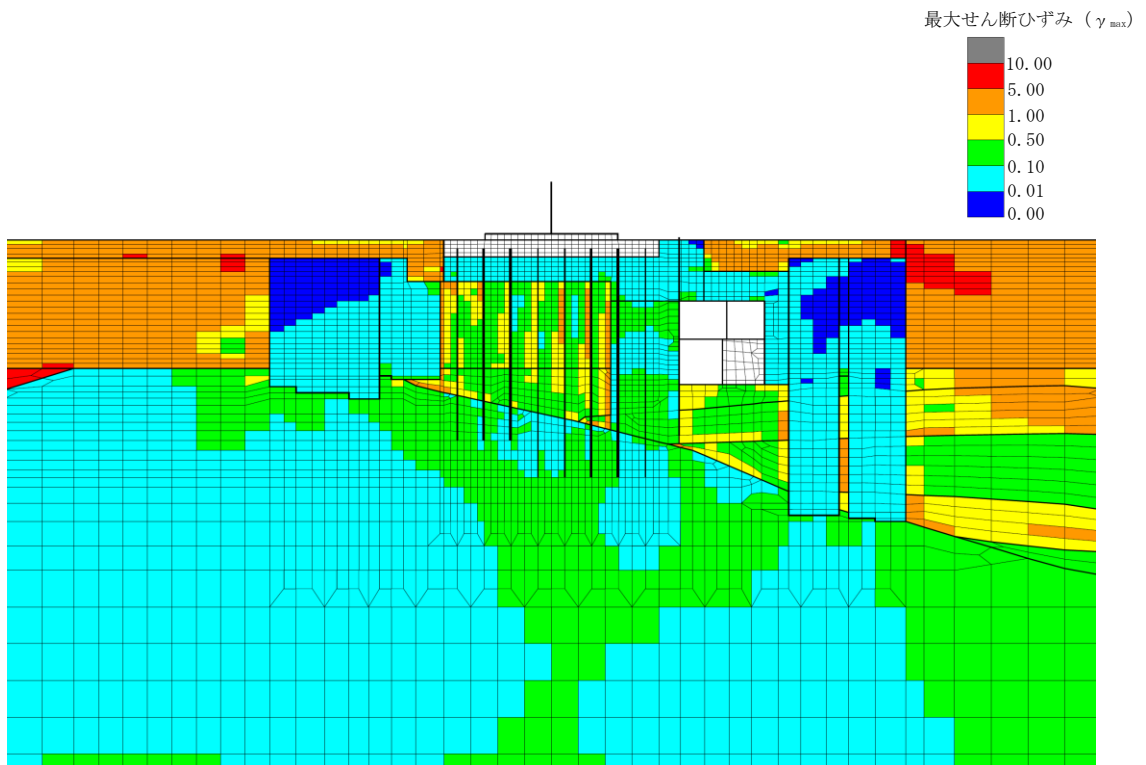
評価部位	断面	評価項目	
		曲げ軸力照査	せん断力照査
鉄筋コンクリート部材	—	Ss-1-+ (解析ケース①)	Ss-1+- (解析ケース①)
鋼管杭	A-A断面	Ss-3++ (解析ケース③)	Ss-3++ (解析ケース③)
	B-B断面	Ss-1-+ (解析ケース③)	Ss-1++ (解析ケース③)

注：耐震評価における解析ケース一覧

	①	②	③	④	⑤
解析ケース	基本ケース	地盤物性のばらつき(+1 σ)を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき(-1 σ)を考慮した解析ケース	非液状化の条件を仮定した解析ケース	地盤物性のばらつき(+1 σ)を考慮して非液状化の条件を仮定した解析ケース
地盤剛性の設定	地盤剛性(平均値)	地盤剛性(+1 σ)	地盤剛性(-1 σ)	地盤剛性(平均値)	地盤剛性(+1 σ)
液状化強度特性の設定	液状化強度特性(-1 σ)	液状化強度特性(-1 σ)	液状化強度特性(-1 σ)	液状化パラメータを非適用	液状化パラメータを非適用



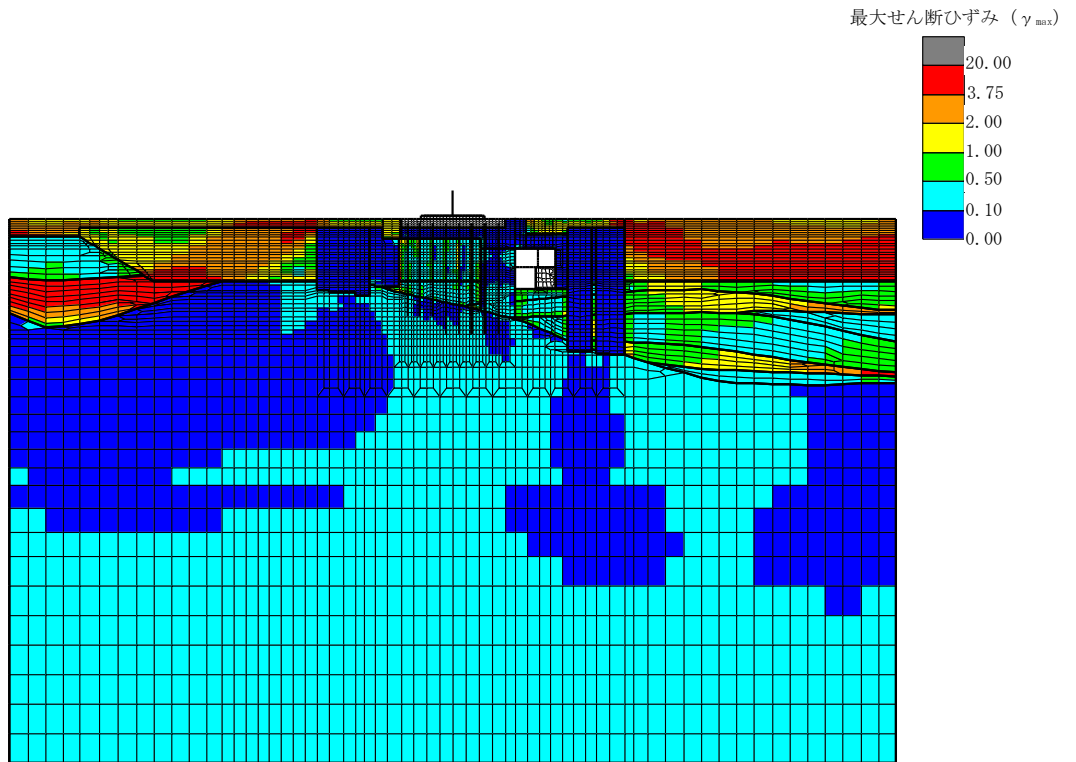
全体図



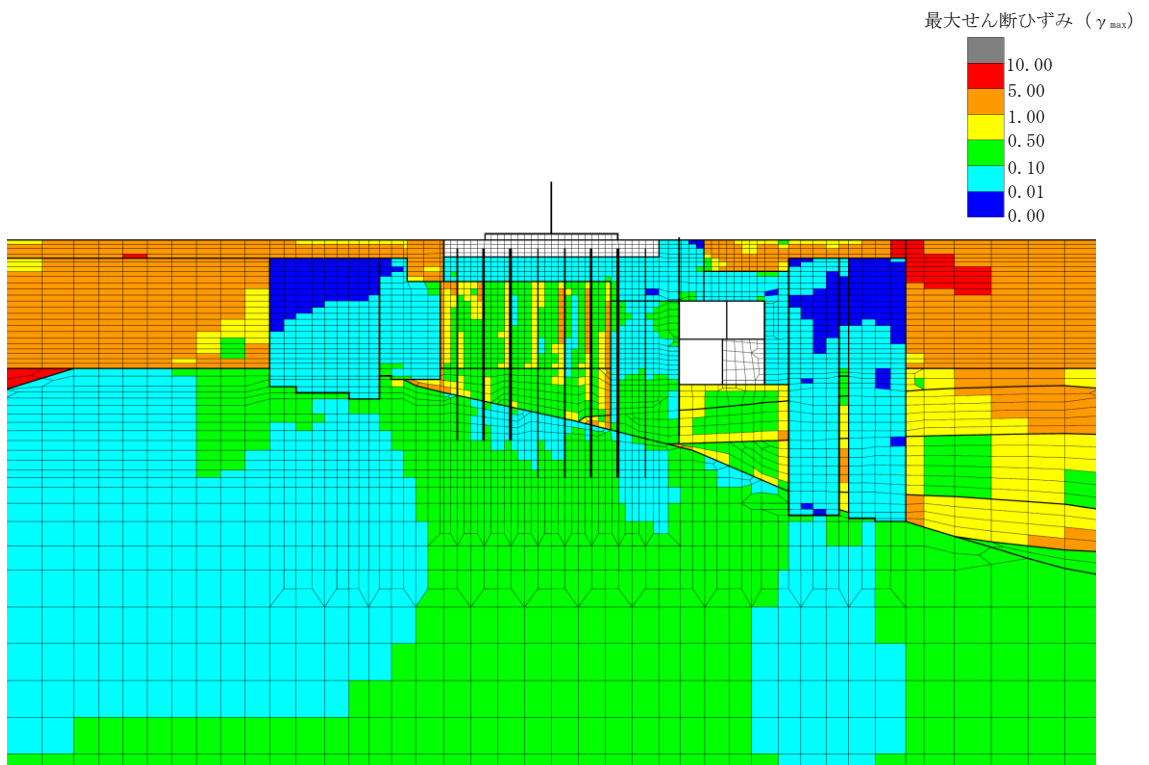
構造物周辺拡大図

図 6-7 A-A断面の最大せん断ひずみ分布
(解析ケース①, 地震動 Ss-1-+)

鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査で照査値が最も厳しい解析ケース



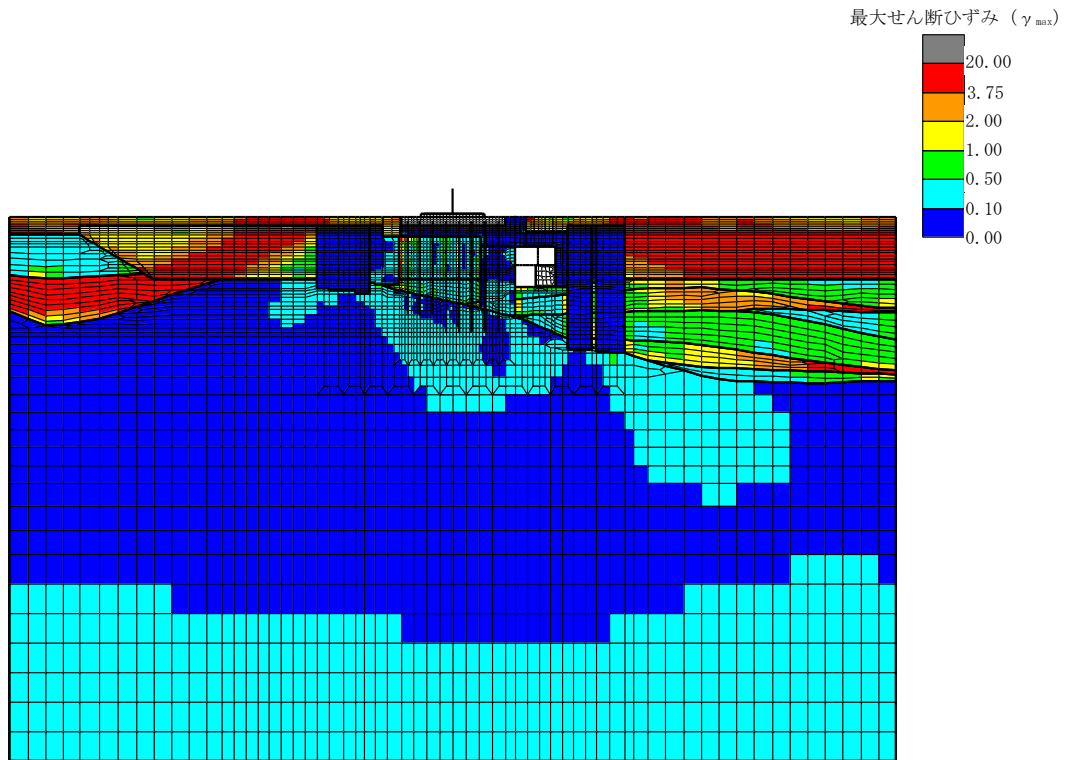
全体図



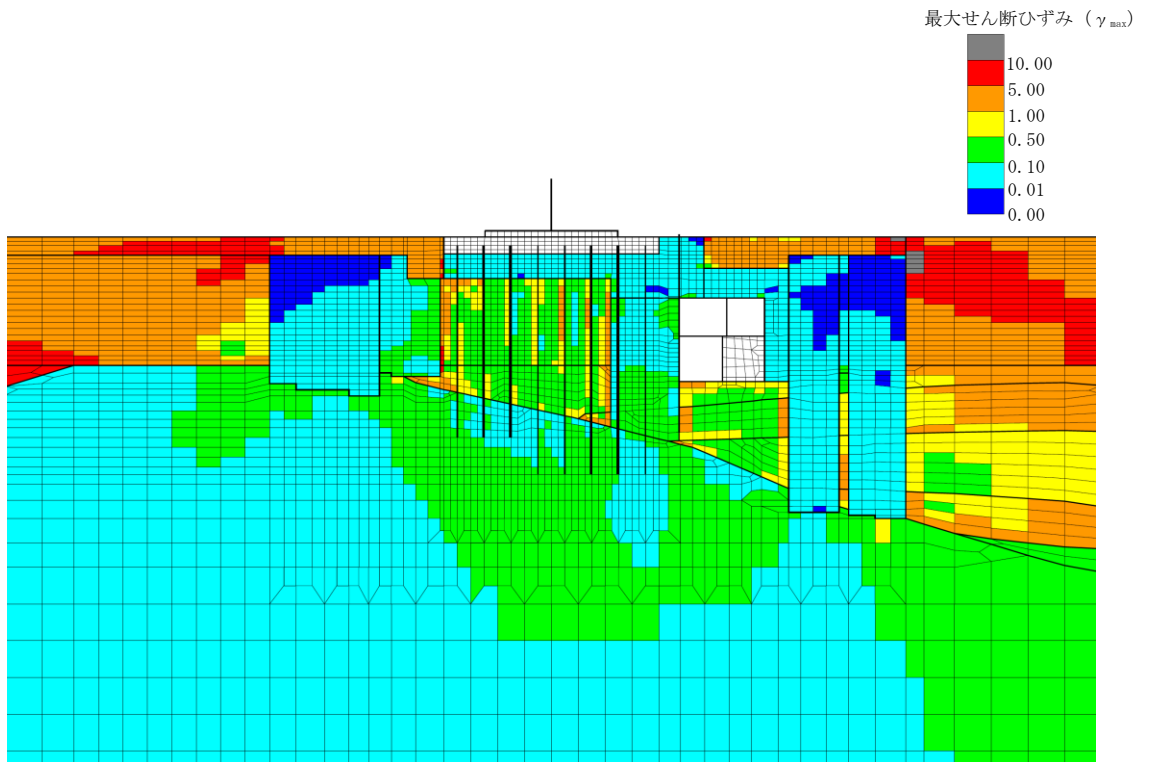
構造物周辺拡大図

図 6-8 A-A断面の最大せん断ひずみ分布
(解析ケース①, 地震動 Ss-1+-)

鉄筋コンクリート部材のせん断力照査で照査値が最も厳しい解析ケース



全体図

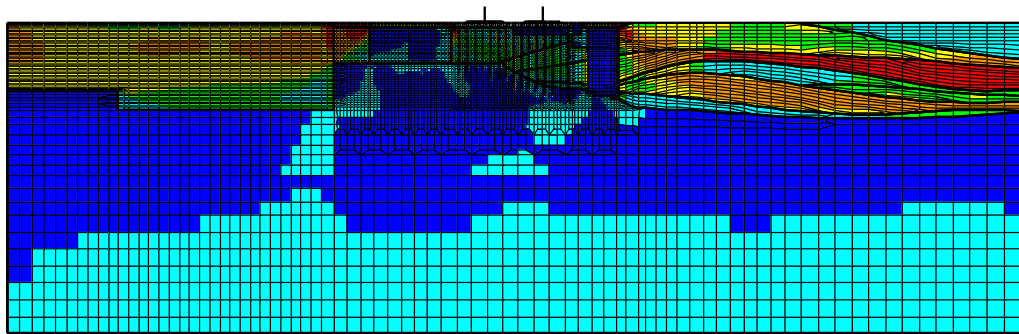
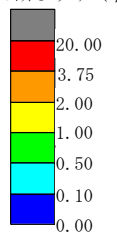


構造物周辺拡大図

図 6-9 A-A断面の最大せん断ひずみ分布
(解析ケース③, 地震動 Ss-3++)

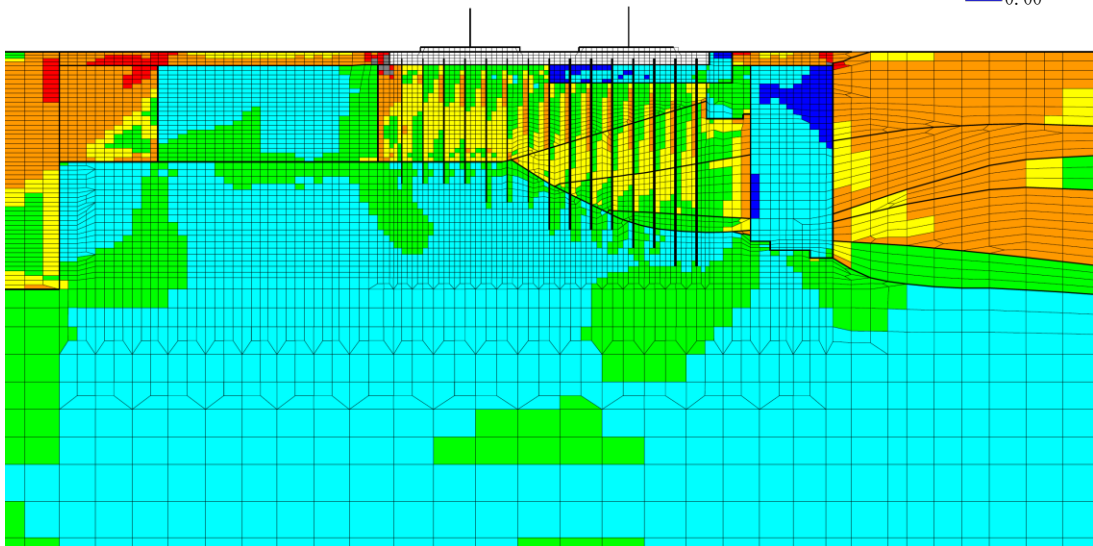
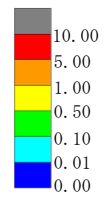
鋼管杭の曲げ軸力照査及びせん断力照査で照査値が最も厳しい解析ケース

最大せん断ひずみ (γ_{max})



全体図

最大せん断ひずみ (γ_{max})



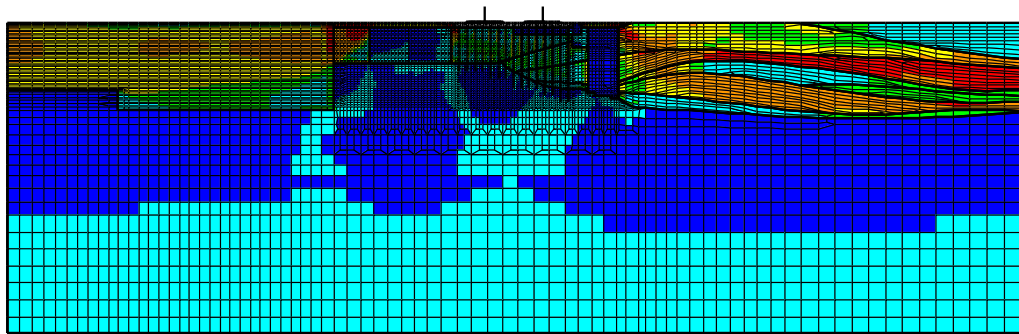
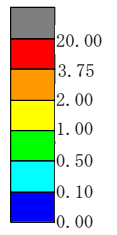
構造物周辺拡大図

図 6-10 B-B断面の最大せん断ひずみ分布

(解析ケース①, 地震動 Ss-1-+)

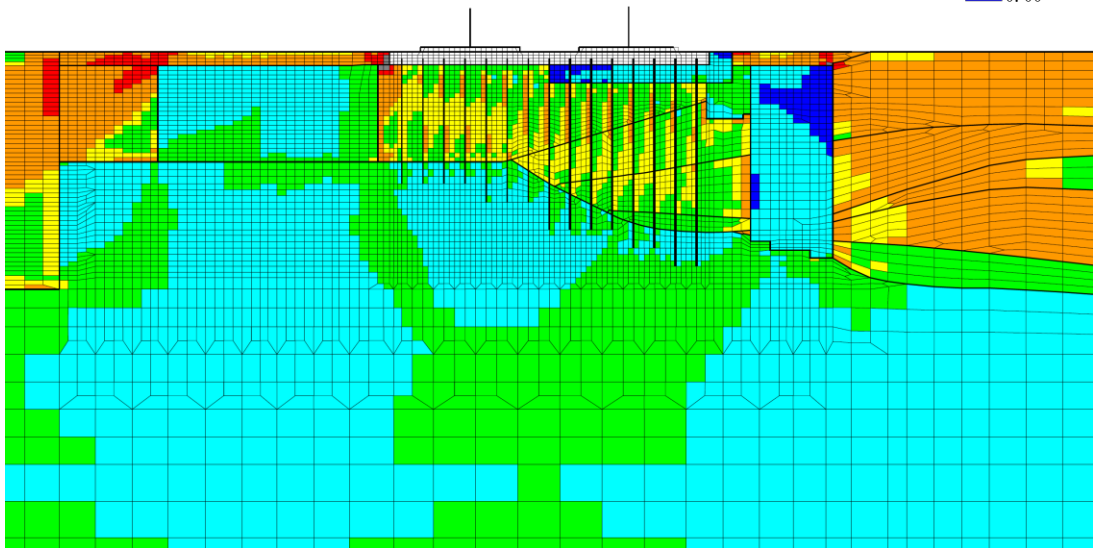
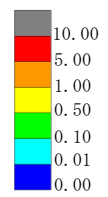
鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査が最も厳しい解析ケース

最大せん断ひずみ (γ_{max})



全体図

最大せん断ひずみ (γ_{max})



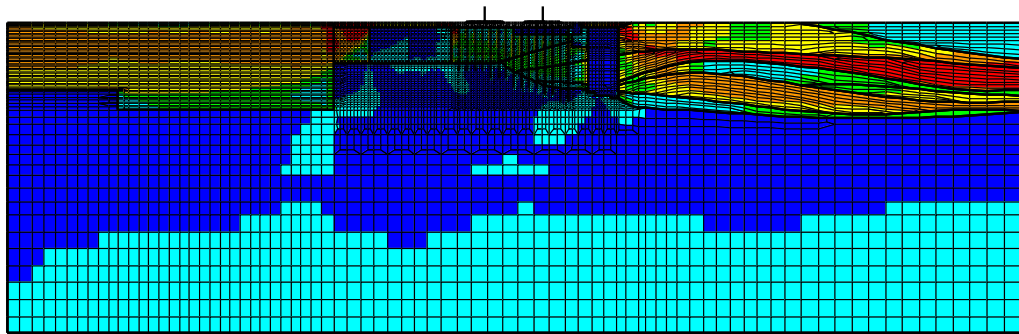
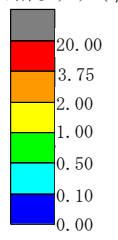
構造物周辺拡大図

図 6-11 B-B断面の最大せん断ひずみ分布

(解析ケース①, 地震動 Ss-1+-)

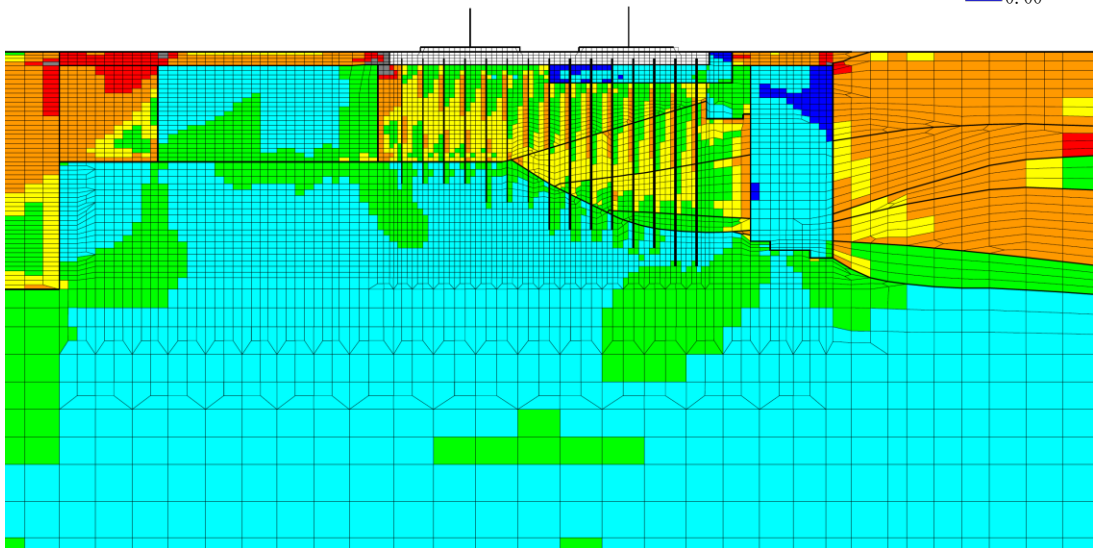
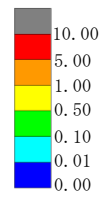
鉄筋コンクリート部材のせん断力照査が最も厳しい解析ケース

最大せん断ひずみ (γ_{max})



全体図

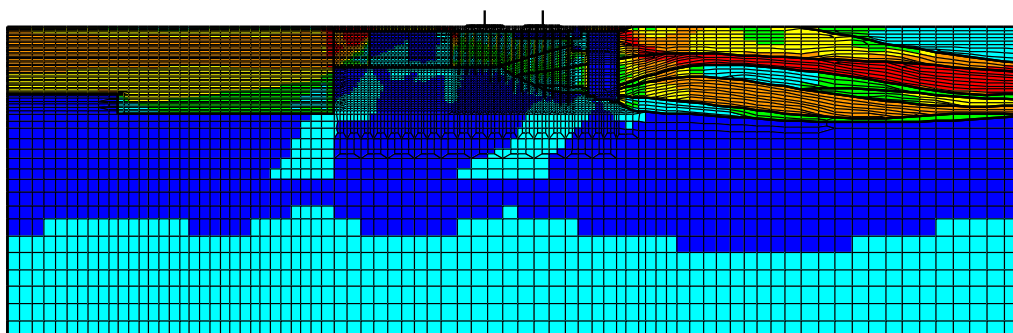
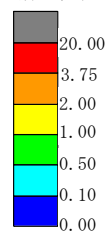
最大せん断ひずみ (γ_{max})



構造物周辺拡大図

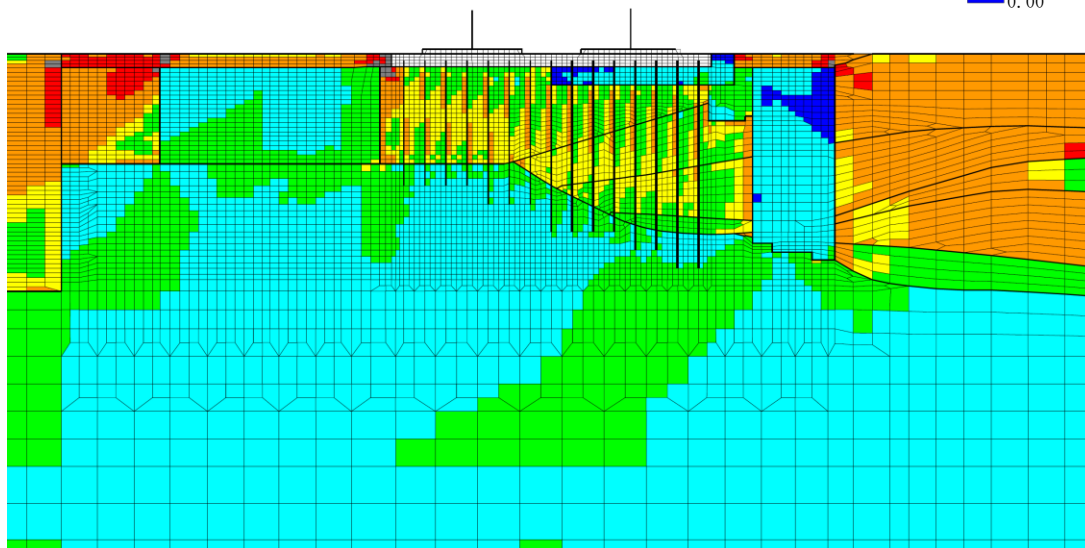
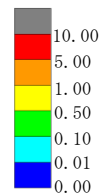
図 6-12 B-B断面の最大せん断ひずみ分布
(解析ケース③, 地震動 Ss-1-+)
鋼管杭の曲げ軸力照査が最も厳しい解析ケース

最大せん断ひずみ (γ_{max})



全体図

最大せん断ひずみ (γ_{max})



構造物周辺拡大図

図 6-13 B-B断面の最大せん断ひずみ分布
(解析ケース③, 地震動 Ss-1++)

鋼管杭のせん断力照査が最も厳しい解析ケース

6.1.7 過剰間隙水圧比分布

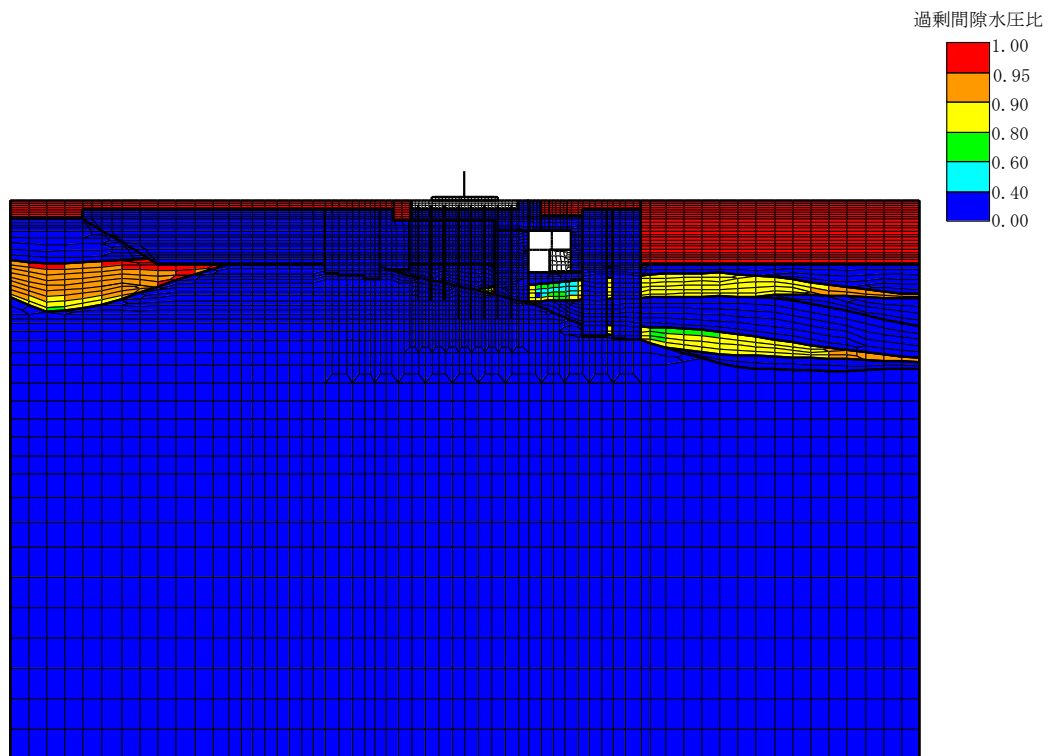
地盤に発生した過剰間隙水圧比を確認するため、曲げ軸力照査及びせん断力照査において最大照査値を示した地震動について、地震応答解析の全時刻における過剰間隙水圧比の最大値分布を示す。表 6-14 に最大照査値を示す解析ケース一覧を示す。A-A断面における過剰間隙水圧比分布を図 6-14～図 6-16 に、B-B断面における過剰間隙水圧比分布を図 6-17～図 6-20 に示す。

表 6-14 最大照査値を示す解析ケース一覧

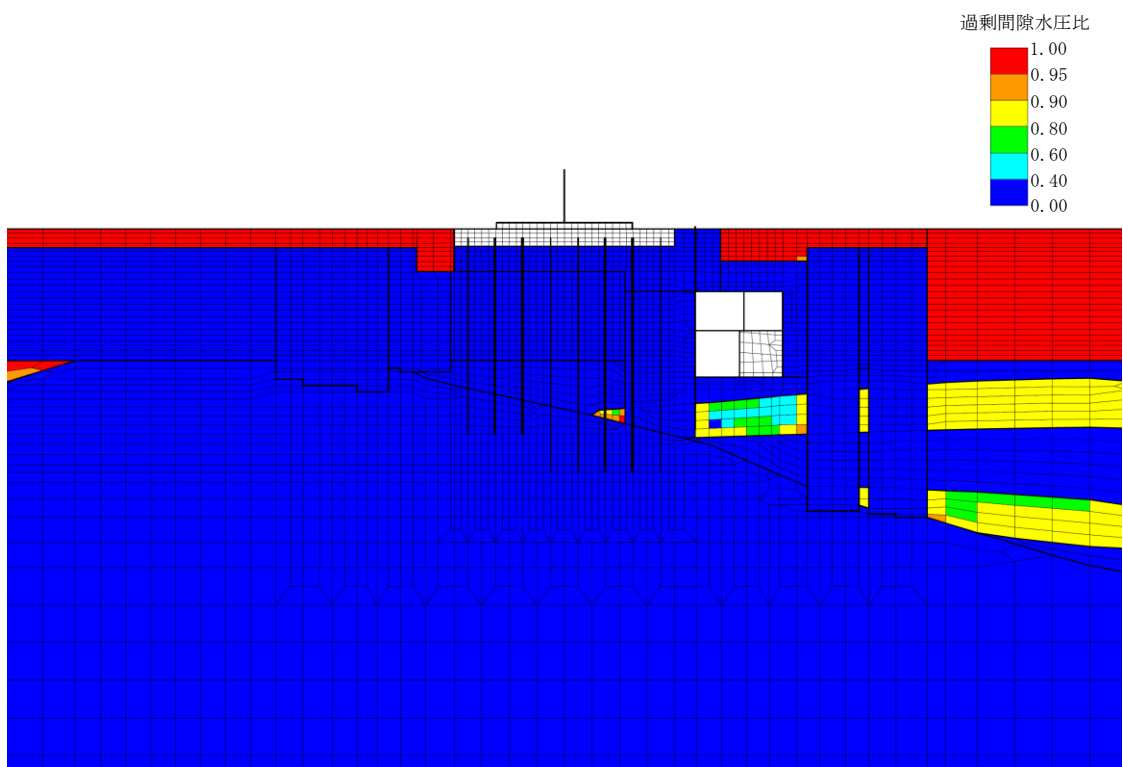
評価部位	断面	評価項目	
		曲げ軸力照査	せん断力照査
鉄筋コンクリート部材	—	Ss-1-+ (解析ケース①)	Ss-1+- (解析ケース①)
鋼管杭	A-A断面	Ss-3++ (解析ケース③)	Ss-3++ (解析ケース③)
	B-B断面	Ss-1-+ (解析ケース③)	Ss-1++ (解析ケース③)

注：耐震評価における解析ケース一覧

	①	②	③	④	⑤
解析ケース	基本ケース	地盤物性のばらつき(+1 σ)を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき(-1 σ)を考慮した解析ケース	非液状化の条件を仮定した解析ケース	地盤物性のばらつき(+1 σ)を考慮して非液状化の条件を仮定した解析ケース
地盤剛性の設定	地盤剛性(平均値)	地盤剛性(+1 σ)	地盤剛性(-1 σ)	地盤剛性(平均値)	地盤剛性(+1 σ)
液状化強度特性の設定	液状化強度特性(-1 σ)	液状化強度特性(-1 σ)	液状化強度特性(-1 σ)	液状化パラメータを非適用	液状化パラメータを非適用



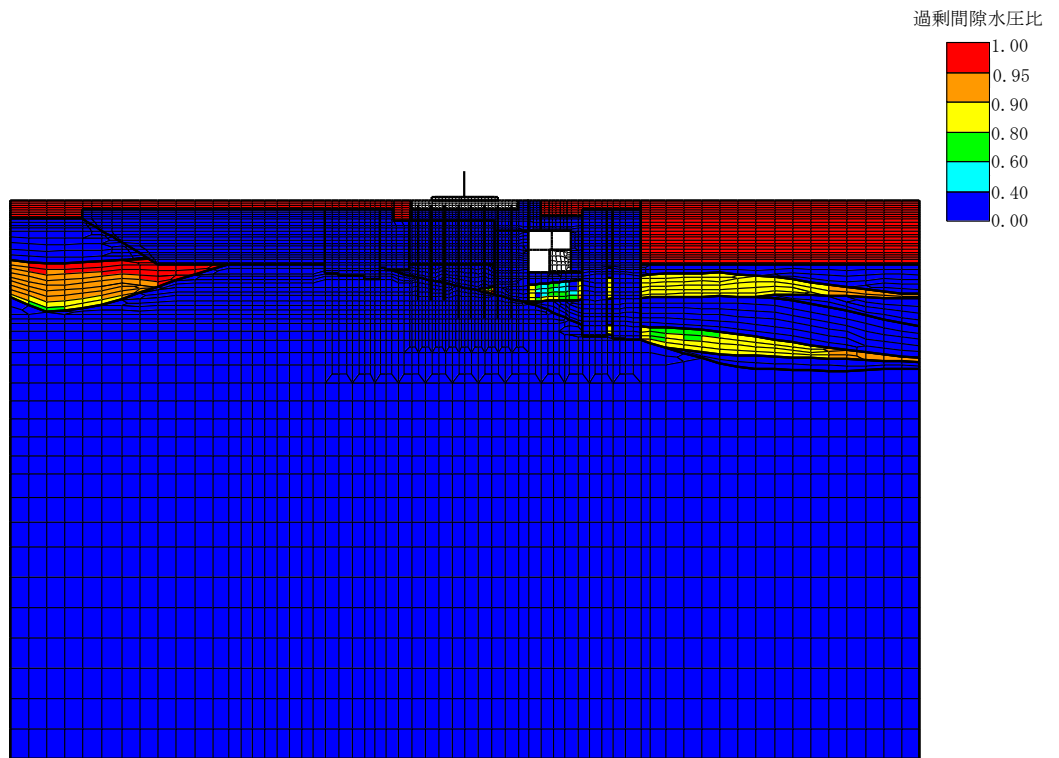
全体図



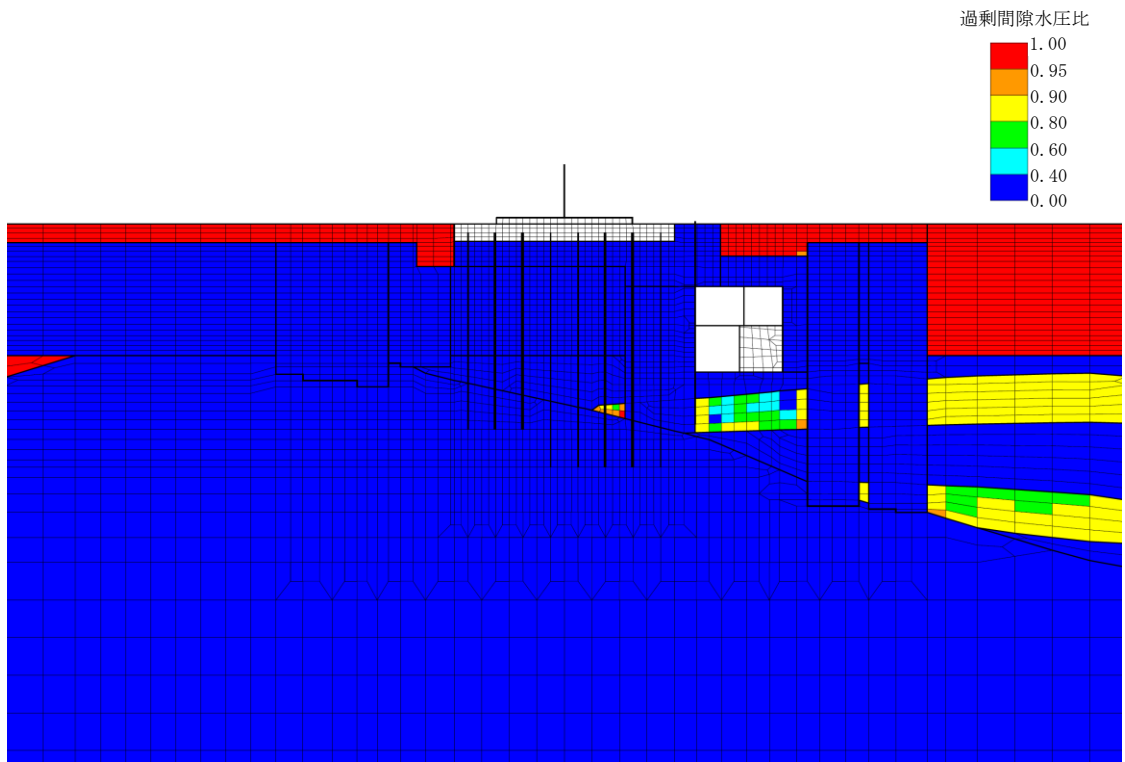
構造物周辺拡大図

図 6-14 A-A断面の過剰間隙水圧比最大値分布
(解析ケース①, 地震動 Ss-1-+)

鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査で照査値が最も厳しい解析ケース



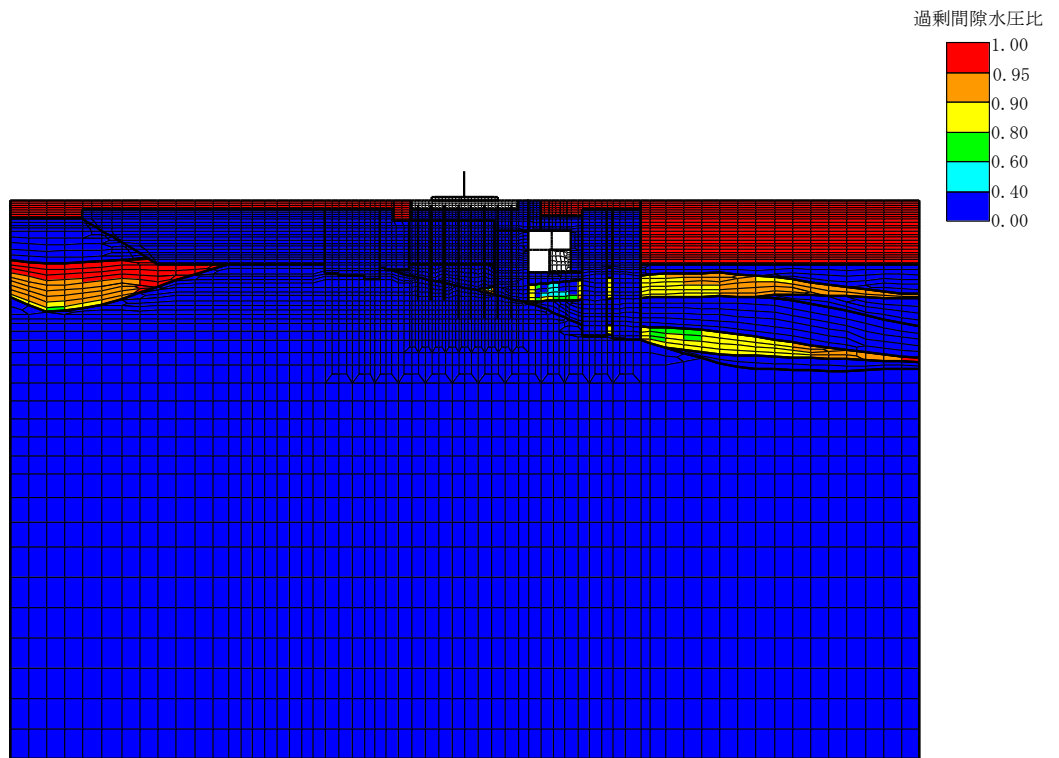
全体図



構造物周辺拡大図

図 6-15 A-A断面の過剰間隙水圧比最大値分布
(解析ケース①, 地震動 Ss-1+-)

鉄筋コンクリート部材のせん断力照査で照査値が最も厳しい解析ケース



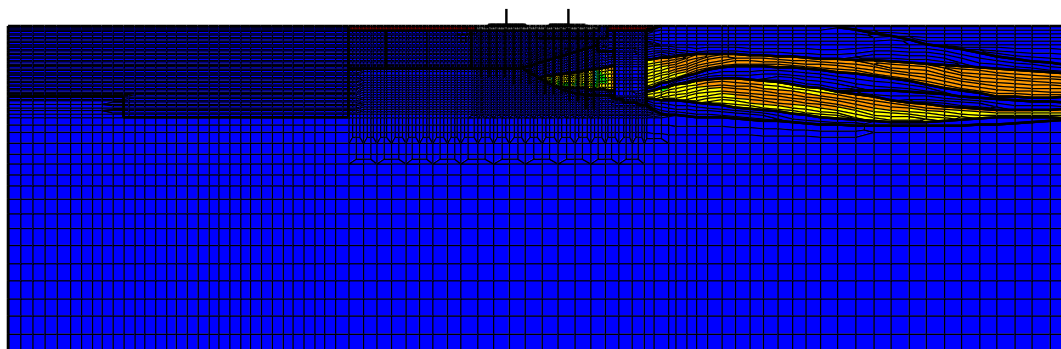
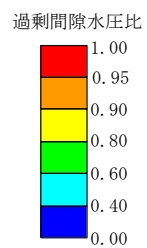
全体図



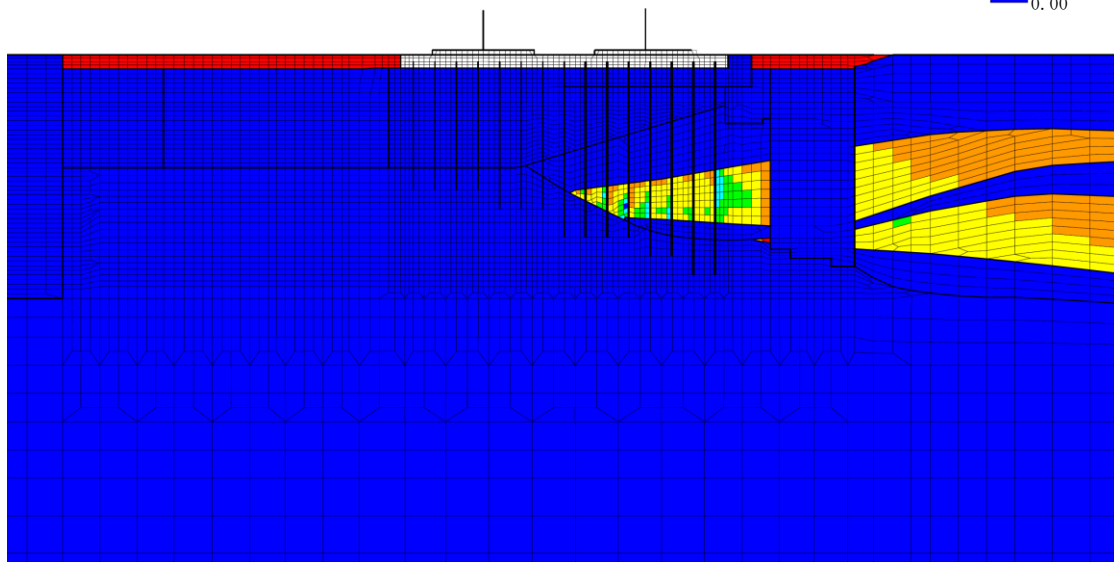
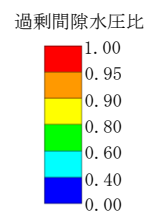
構造物周辺拡大図

図 6-16 A-A断面の過剰間隙水圧比最大値分布
(解析ケース③, 地震動 Ss-3++)

鋼管杭の曲げ軸力照査及びせん断力照査で照査値が最も厳しい解析ケース



全体図

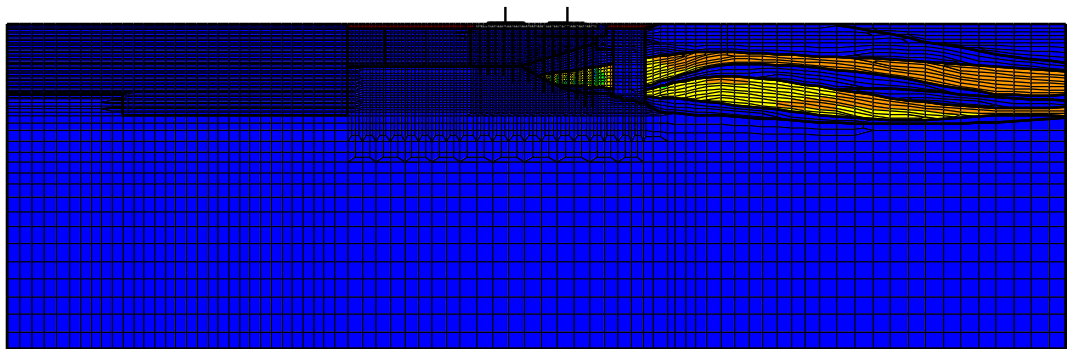
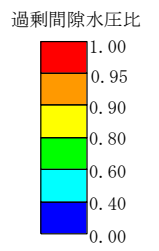


構造物周辺拡大図

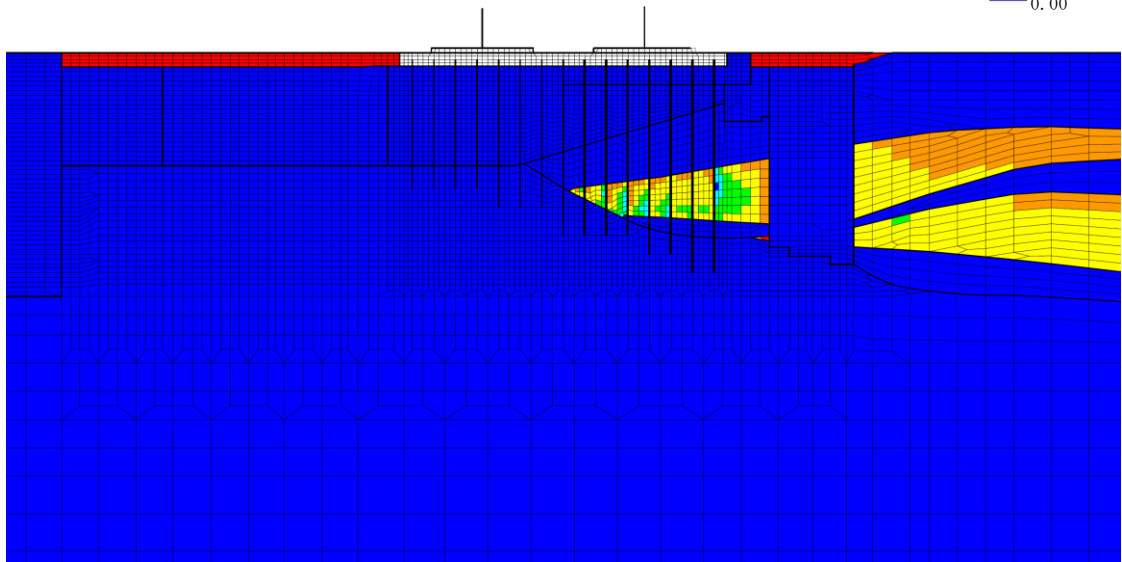
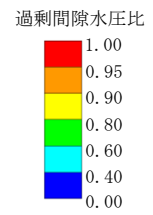
図 6-17 B-B断面の過剰間隙水圧比最大値分布

(解析ケース①, 地震動 Ss-1-+)

鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査が最も厳しい解析ケース



全体図

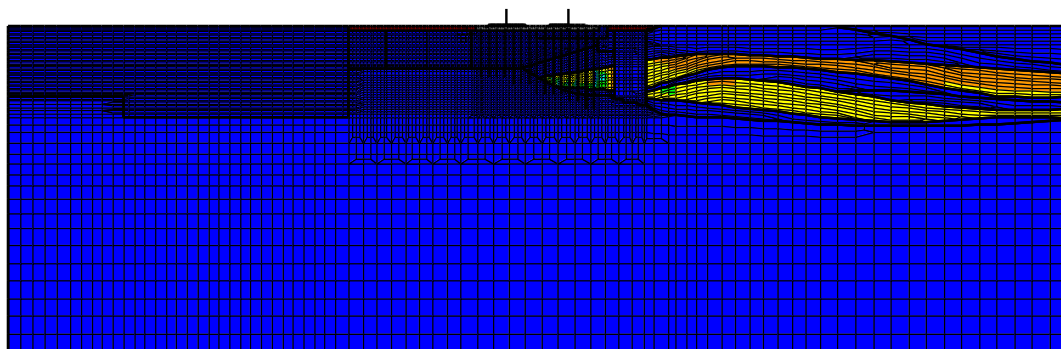
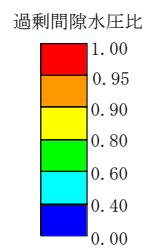


構造物周辺拡大図

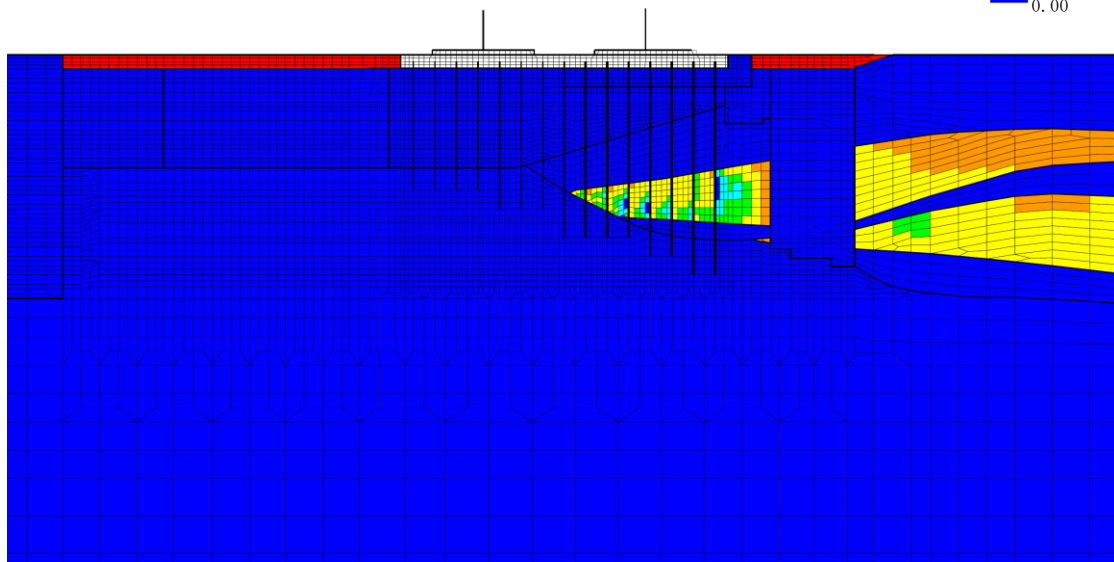
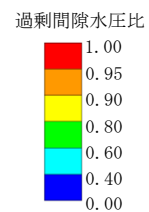
図 6-18 B-B断面の過剰間隙水圧比最大値分布

(解析ケース①, 地震動 Ss-1+-)

鉄筋コンクリート部材のせん断力照査が最も厳しい解析ケース



全体図

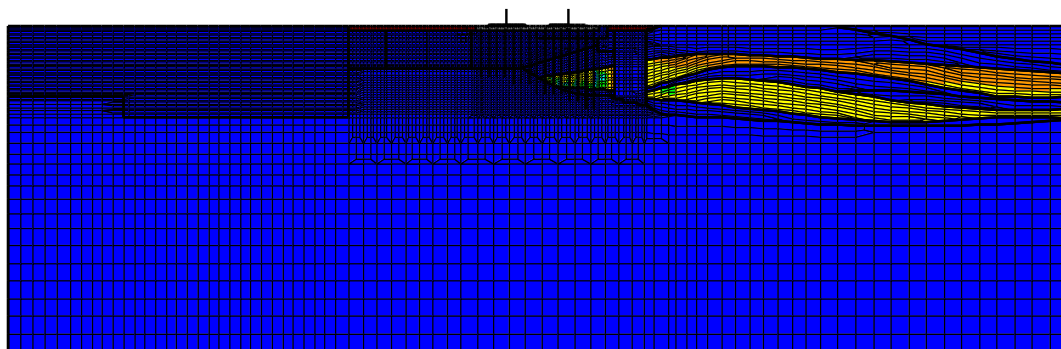
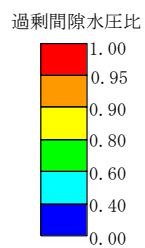


構造物周辺拡大図

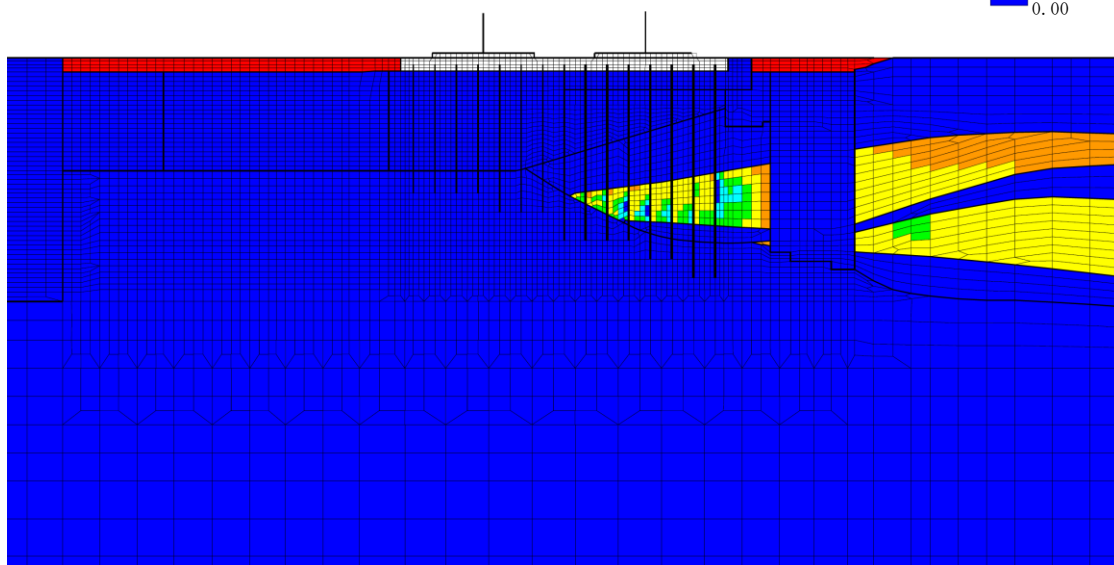
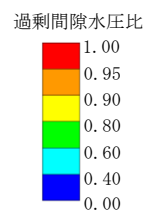
図 6-19 B-B断面の過剰間隙水圧比最大値分布

(解析ケース③, 地震動 Ss-1-+)

鋼管杭の曲げ軸力照査が最も厳しい解析ケース



全体図



構造物周辺拡大図

図 6-20 B-B断面の過剰間隙水圧比最大値分布

(解析ケース③, 地震動 Ss-1++)

鋼管杭のせん断照査が最も厳しい解析ケース

6.2 鉄筋コンクリート部材の耐震評価

6.2.1 鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力に対する評価結果

版解析に基づく鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査結果を表 6-15 に示す。

照査結果より，照査用コンクリートひずみが限界ひずみを下回ることを確認した。

表 6-15 鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査結果

解析 ケース	地震動	照査用ひずみ* (μ)	限界ひずみ (μ)	照査値
①	Ss-1++	89	10000	0.01
	Ss-1-+	107		0.02
	Ss-1+-	91		0.01
	Ss-1--	103		0.02
	Ss-2	98		0.01
	Ss-3++	79		0.01
	Ss-3-+	85		0.01
	Ss-3+-	86		0.01
	Ss-3--	87		0.01
	Ss-4	73		0.01
	Ss-5	65		0.01
	Ss-6	72		0.01
	Ss-7	60		0.01
	Ss-8++	97		0.01
Ss-8-+	76	0.01		
②	Ss-1++	81	0.01	
	Ss-1-+	87	0.01	
	Ss-3++	81	0.01	
③	Ss-1++	88	0.01	
	Ss-1-+	91	0.01	
	Ss-3++	85	0.01	
④	Ss-1++	87	0.01	
	Ss-1-+	91	0.01	
	Ss-3++	83	0.01	
⑤	Ss-1++	84	0.01	
	Ss-1-+	89	0.01	
	Ss-3++	80	0.01	

注記* : 照査用ひずみ=発生ひずみ×構造解析係数 γ_a

6.2.2 鉄筋コンクリート部材のせん断力に対する評価結果

版解析に基づく鉄筋コンクリート部材のせん断力照査結果を表 6-16 に示す。

照査結果より，照査用せん断耐力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表 6-16 鉄筋コンクリート部材のせん断力照査結果

解析 ケース	地震動	照査用せん断力* V_d (kN)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
①	Ss-1++	591	2602	0.23
	Ss-1-+	486	1921	0.26
	Ss-1+-	511	1920	0.27
	Ss-1--	448	1918	0.24
	Ss-2	504	1937	0.27
	Ss-3++	586	2662	0.23
	Ss-3-+	398	1907	0.21
	Ss-3+-	538	2695	0.20
	Ss-3--	378	1906	0.20
	Ss-4	327	1919	0.18
	Ss-5	336	1941	0.18
	Ss-6	398	1921	0.21
	Ss-7	321	1890	0.17
	Ss-8++	483	2596	0.19
	Ss-8-+	545	2697	0.21
②	Ss-1++	326	1696	0.20
	Ss-1-+	488	1926	0.26
	Ss-3++	330	1687	0.20
③	Ss-1++	436	1914	0.23
	Ss-1-+	488	1927	0.26
	Ss-3++	356	1745	0.21
④	Ss-1++	358	1728	0.21
	Ss-1-+	487	1926	0.26
	Ss-3++	341	1720	0.20
⑤	Ss-1++	402	1989	0.21
	Ss-1-+	485	1925	0.26
	Ss-3++	322	1679	0.20

注記* : 照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 \times 構造解析係数 γ_a

6.3 鋼管杭の耐震評価

6.3.1 鋼管杭の曲げ軸力に対する評価結果

鋼管杭の曲げ軸力照査結果を表 6-17 及び表 6-18 に示す。

照査結果より，照査用曲率が終局曲率または降伏モーメントに対する曲率を下回ることを確認した。

表 6-17 鋼管杭の曲げ軸力照査結果 (A-A断面)

解析 ケース	評価位置*1	地震動	照査用曲率*2 ϕ_d (1/m)	限界曲率*3 ϕ_u (1/m) または ϕ_y (1/m)	照査値 ϕ_d / ϕ_u または ϕ_d / ϕ_y
①	2 (肉厚 9mm)	Ss-1++	1.54×10^{-3}	2.11×10^{-3}	0.73
	2 (肉厚 9mm)	Ss-1-+	1.55×10^{-3}	2.10×10^{-3}	0.74
	2 (肉厚 9mm)	Ss-1+-	1.52×10^{-3}	2.12×10^{-3}	0.72
	2 (肉厚 9mm)	Ss-1--	1.52×10^{-3}	2.09×10^{-3}	0.73
	2 (肉厚 9mm)	Ss-2	1.08×10^{-3}	2.29×10^{-3}	0.48
	2 (肉厚 9mm)	Ss-3++	1.64×10^{-3}	2.09×10^{-3}	0.79
	2 (肉厚 9mm)	Ss-3-+	1.42×10^{-3}	2.17×10^{-3}	0.66
	2 (肉厚 9mm)	Ss-3+-	1.60×10^{-3}	2.07×10^{-3}	0.78
	7 (肉厚 9mm)	Ss-3--	1.79×10^{-3}	2.48×10^{-3}	0.73
	6 (肉厚 9mm)	Ss-4	3.70×10^{-4}	2.35×10^{-3}	0.16
	2 (肉厚 9mm)	Ss-5	6.20×10^{-4}	2.49×10^{-3}	0.25
	2 (肉厚 9mm)	Ss-6	6.60×10^{-4}	2.47×10^{-3}	0.27
	2 (肉厚 9mm)	Ss-7	5.00×10^{-4}	2.54×10^{-3}	0.20
	7 (肉厚 9mm)	Ss-8++	1.73×10^{-3}	2.53×10^{-3}	0.69
2 (肉厚 9mm)	Ss-8-+	1.48×10^{-3}	2.05×10^{-3}	0.73	
②	2 (肉厚 9mm)	Ss-3++	1.51×10^{-3}	2.14×10^{-3}	0.71
③	2 (肉厚 9mm)	Ss-3++	1.78×10^{-3}	2.05×10^{-3}	0.87
	2 (肉厚 9mm)	Ss-3+-	1.74×10^{-3}	2.02×10^{-3}	0.87
④	2 (肉厚 9mm)	Ss-3++	1.44×10^{-3}	2.19×10^{-3}	0.66
⑤	2 (肉厚 9mm)	Ss-3++	1.29×10^{-3}	2.24×10^{-3}	0.58

注記*1 : 評価位置は下図に示す。

*2 : 照査用曲率 $\phi_d =$ 発生曲率 \times 構造解析係数 γ_a

*3 : 径厚比が $2r/t \leq 90$ を満たす鋼管杭 (肉厚 14mm の鋼管杭) については終局曲率 ϕ_u , 満たさない鋼管杭 (肉厚 9mm の鋼管杭) については降伏モーメントに対する曲率 ϕ_y とする。

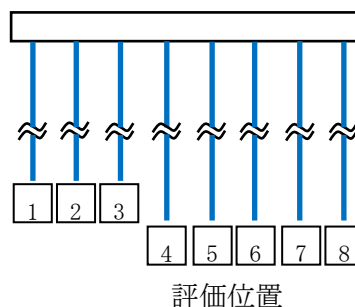


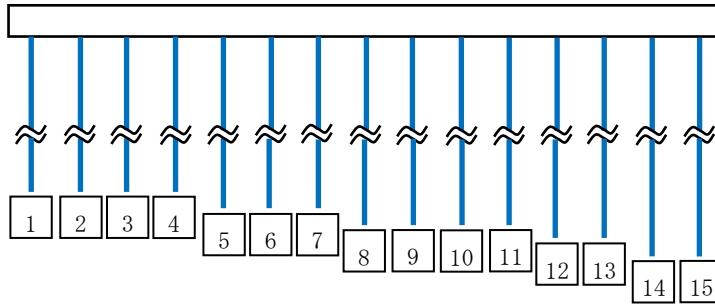
表 6-18 鋼管杭の曲げ軸力照査結果 (B-B断面)

解析 ケース	評価位置*1	地震動	照査用曲率*2 ϕ_d (1/m)	限界曲率*3 ϕ_u (1/m) または ϕ_y (1/m)	照査値 ϕ_d/ϕ_u または ϕ_d/ϕ_y
①	9 (肉厚 9mm)	Ss-1++	1.56×10^{-3}	2.15×10^{-3}	0.73
	9 (肉厚 9mm)	Ss-1-+	1.46×10^{-3}	1.81×10^{-3}	0.81
	9 (肉厚 9mm)	Ss-1+-	1.53×10^{-3}	2.08×10^{-3}	0.74
	9 (肉厚 9mm)	Ss-1--	1.33×10^{-3}	1.86×10^{-3}	0.72
	9 (肉厚 9mm)	Ss-2	1.06×10^{-3}	1.85×10^{-3}	0.58
	9 (肉厚 9mm)	Ss-3++	1.47×10^{-3}	2.26×10^{-3}	0.66
	9 (肉厚 9mm)	Ss-3-+	1.54×10^{-3}	1.92×10^{-3}	0.81
	9 (肉厚 9mm)	Ss-3+-	1.45×10^{-3}	2.26×10^{-3}	0.65
	9 (肉厚 9mm)	Ss-3--	1.55×10^{-3}	1.93×10^{-3}	0.81
	9 (肉厚 9mm)	Ss-4	9.50×10^{-4}	2.02×10^{-3}	0.48
	9 (肉厚 9mm)	Ss-5	1.23×10^{-3}	2.36×10^{-3}	0.53
	9 (肉厚 9mm)	Ss-6	1.49×10^{-3}	2.29×10^{-3}	0.66
	9 (肉厚 9mm)	Ss-7	1.22×10^{-3}	2.36×10^{-3}	0.52
	9 (肉厚 9mm)	Ss-8++	1.18×10^{-3}	1.96×10^{-3}	0.61
9 (肉厚 9mm)	Ss-8-+	1.16×10^{-3}	2.23×10^{-3}	0.53	
②	9 (肉厚 9mm)	Ss-1++	1.44×10^{-3}	2.19×10^{-3}	0.66
	9 (肉厚 9mm)	Ss-1-+	1.37×10^{-3}	1.85×10^{-3}	0.75
③	9 (肉厚 9mm)	Ss-1++	1.71×10^{-3}	2.09×10^{-3}	0.82
	9 (肉厚 9mm)	Ss-1-+	1.58×10^{-3}	1.75×10^{-3}	0.91
	9 (肉厚 9mm)	Ss-3-+	1.70×10^{-3}	1.89×10^{-3}	0.90
④	9 (肉厚 9mm)	Ss-1++	1.25×10^{-3}	1.87×10^{-3}	0.67
	9 (肉厚 9mm)	Ss-1-+	1.49×10^{-3}	1.82×10^{-3}	0.82
⑤	9 (肉厚 9mm)	Ss-1++	1.17×10^{-3}	1.90×10^{-3}	0.62
	9 (肉厚 9mm)	Ss-1-+	1.39×10^{-3}	1.84×10^{-3}	0.76

注記*1 : 評価位置は下図に示す。

*2 : 照査用曲率 $\phi_d =$ 発生曲率 \times 構造解析係数 γ_a

*3 : 径厚比が $2r/t \leq 90$ を満たす鋼管杭 (肉厚 14mm の鋼管杭) については終局曲率 ϕ_u ,
満たさない鋼管杭 (肉厚 9mm の鋼管杭) については降伏モーメントに対する曲率 ϕ_y
とする。



評価位置

6.3.2 鋼管杭のせん断力に対する評価結果

鋼管杭のせん断力照査結果を表 6-19 及び表 6-20 に示す。

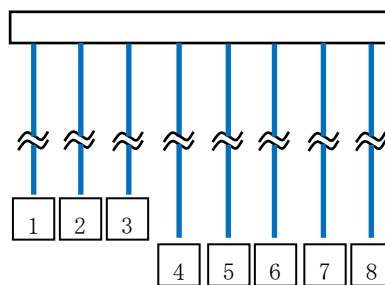
照査結果より，照査用せん断力が終局せん断耐力を下回ることを確認した。

表 6-19 鋼管杭のせん断力照査結果 (A-A断面)

解析 ケース	評価位置*1	地震動	照査用せん断力*2 Q_d (kN)	終局せん断耐力 Q_u (kN)	照査値 Q_d / Q_u
①	1	Ss-1++	876	1977	0.45
	1	Ss-1-+	870	1977	0.45
	1	Ss-1+-	864	1977	0.44
	1	Ss-1--	864	1977	0.44
	1	Ss-2	626	1977	0.32
	1	Ss-3++	916	1977	0.47
	1	Ss-3-+	795	1977	0.41
	1	Ss-3+-	903	1977	0.46
	7	Ss-3--	598	1224	0.49
	6	Ss-4	145	1224	0.12
	1	Ss-5	380	1977	0.20
	1	Ss-6	401	1977	0.21
	1	Ss-7	330	1977	0.17
	7	Ss-8++	581	1224	0.48
	1	Ss-8-+	928	1977	0.47
②	1	Ss-3++	865	1977	0.44
③	1	Ss-3++	967	1977	0.49
④	1	Ss-3++	814	1977	0.42
⑤	1	Ss-3++	757	1977	0.39

注記*1 : 評価位置は下図に示す。

*2 : 照査用せん断力 $Q_d =$ 発生せん断力 \times 構造解析係数 γ_a



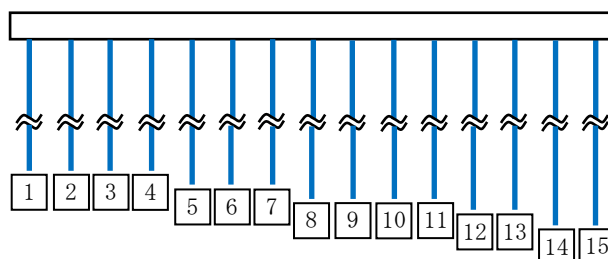
評価位置

表 6-20 鋼管杭のせん断力照査結果 (B-B断面)

解析 ケース	評価位置*1	地震動	照査用せん断力*2 Q_d (kN)	終局せん断耐力 Q_u (kN)	照査値 Q_d / Q_u
①	15	Ss-1++	784	1224	0.65
	15	Ss-1-+	675	1224	0.56
	15	Ss-1+-	1224	1977	0.62
	15	Ss-1--	675	1224	0.56
	15	Ss-2	661	1224	0.55
	14	Ss-3++	665	1224	0.55
	14	Ss-3-+	631	1224	0.52
	14	Ss-3+-	667	1224	0.55
	14	Ss-3--	632	1224	0.52
	15	Ss-4	537	1224	0.44
	15	Ss-5	460	1224	0.38
	15	Ss-6	1009	1977	0.52
	14	Ss-7	525	1224	0.43
	15	Ss-8++	577	1224	0.48
	15	Ss-8-+	1020	1977	0.52
②	15	Ss-1++	726	1224	0.60
	15	Ss-1-+	642	1224	0.53
③	15	Ss-1++	1467	1977	0.75
	15	Ss-1-+	1216	1977	0.62
	15	Ss-1+-	888	1224	0.73
④	15	Ss-1++	791	1224	0.65
	15	Ss-1-+	1094	1977	0.56
⑤	15	Ss-1++	734	1224	0.60
	15	Ss-1-+	1030	1977	0.53

注記*1 : 評価位置は下図に示す。

*2 : 照査用せん断力 $Q_d =$ 発生せん断力 \times 構造解析係数 γ_a



評価位置

6.4 基礎地盤の支持性能に対する支持力評価

6.4.1 基礎地盤の押し込みに対する支持性能評価

基礎地盤の押し込みに対する支持性能照査結果を表 6-21 及び表 6-22 に示す。

照査結果より、全時刻歴において発生した杭頭の鉛直力が終局鉛直支持力を下回ることを確認した。

表 6-21 基礎地盤の押込みに対する支持性能照査結果（A-A断面）

解析 ケース	評価位置*1	地震動	鉛直力 R_a (kN)	終局鉛直支持力*2 R_{ua} (kN)	照査値 R_a / R_{ua}
①	7	Ss-1++	1373	7530	0.19
	7	Ss-1-+	1586	7530	0.22
	7	Ss-1+-	1384	7530	0.19
	7	Ss-1--	1383	7530	0.19
	7	Ss-2	905	7530	0.13
	7	Ss-3++	1068	7530	0.15
	7	Ss-3-+	1213	7530	0.17
	7	Ss-3+-	1044	7530	0.14
	7	Ss-3--	1377	7530	0.19
	7	Ss-4	875	7530	0.12
	7	Ss-5	899	7530	0.12
	7	Ss-6	665	7530	0.09
	7	Ss-7	780	7530	0.11
	7	Ss-8++	2082	7530	0.28
	7	Ss-8-+	1169	7530	0.16
②	7	Ss-3++	947	7530	0.13
③	7	Ss-3++	1222	7530	0.17
④	7	Ss-3++	955	7530	0.13
⑤	7	Ss-3++	866	7530	0.12

注記*1：評価位置は下図に示す。

*2：終局鉛直支持力 R_{ua} ＝極限支持力 R_u ÷安全率

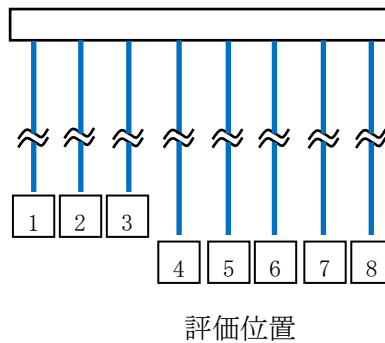
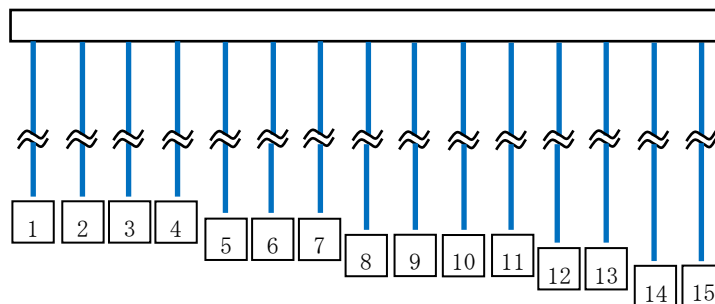


表 6-22 基礎地盤の押込みに対する支持性能照査結果（B-B断面）

解析 ケース	評価位置*1	地震動	鉛直力 R_a (kN)	終局鉛直支持力*2 R_{ua} (kN)	照査値 R_a / R_{ua}
①	1	Ss-1++	1784	6617	0.27
	1	Ss-1-+	1734	6617	0.27
	1	Ss-1+-	1637	6617	0.25
	1	Ss-1--	1818	6617	0.28
	1	Ss-2	1776	6617	0.27
	1	Ss-3++	1484	6617	0.23
	1	Ss-3-+	1541	6617	0.24
	1	Ss-3+-	1652	6617	0.25
	1	Ss-3--	1438	6617	0.22
	1	Ss-4	1360	6617	0.21
	1	Ss-5	1043	6617	0.16
	1	Ss-6	1359	6617	0.21
	1	Ss-7	1058	6617	0.16
	1	Ss-8++	1332	6617	0.21
	1	Ss-8-+	1045	6617	0.16
②	1	Ss-1++	1754	6617	0.27
	1	Ss-1-+	1717	6617	0.26
③	1	Ss-1++	1705	6617	0.26
	1	Ss-1-+	1667	6617	0.26
④	1	Ss-1++	1797	6617	0.28
	1	Ss-1-+	1656	6617	0.26
⑤	1	Ss-1++	1743	6617	0.27
	1	Ss-1-+	1606	6617	0.25

注記*1：評価位置は下図に示す。

*2：終局鉛直支持力 R_{ua} ＝極限支持力 R_u ÷安全率



評価位置

6.4.2 基礎地盤の引抜きに対する支持性能評価

基礎地盤の引抜きに対する支持性能照査結果を表 6-23 及び表 6-24 に示す。

照査結果より、全時刻歴において発生した引抜き力が終局引抜き力を下回ることを確認した。

表 6-23 基礎地盤の引抜きに対する支持性能照査結果（A-A断面）

解析 ケース	評価位置*1	地震動	引抜き力 P_a (kN)	終局引抜き力*2 P_{ua} (kN)	照査値 P_a / P_{ua}
①	7	Ss-1++	2890	3363	0.86
	7	Ss-1-+	3030	3363	0.91
	7	Ss-1+-	2816	3363	0.84
	7	Ss-1--	2989	3363	0.89
	7	Ss-2	2024	3363	0.61
	7	Ss-3++	3007	3363	0.90
	7	Ss-3-+	2754	3363	0.82
	7	Ss-3+-	3060	3363	0.91
	7	Ss-3--	2862	3363	0.86
	7	Ss-4	141	3363	0.05
	7	Ss-5	850	3363	0.26
	7	Ss-6	735	3363	0.22
	7	Ss-7	504	3363	0.15
	7	Ss-8++	1884	3363	0.57
	7	Ss-8-+	2481	3363	0.74
②	7	Ss-3++	2787	3363	0.83
③	7	Ss-3++	3239	3363	0.97
④	7	Ss-3++	2674	3363	0.80
⑤	7	Ss-3++	2458	3363	0.74

注記*1：評価位置は下図に示す。

*2：終局引抜き力 P_{ua} = 極限引抜き力 P_u ÷ 安全率

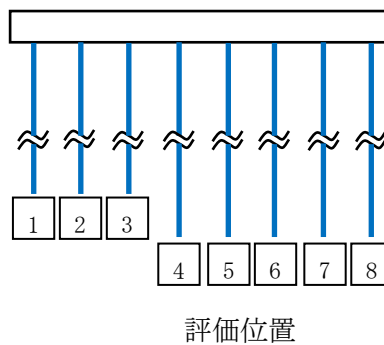
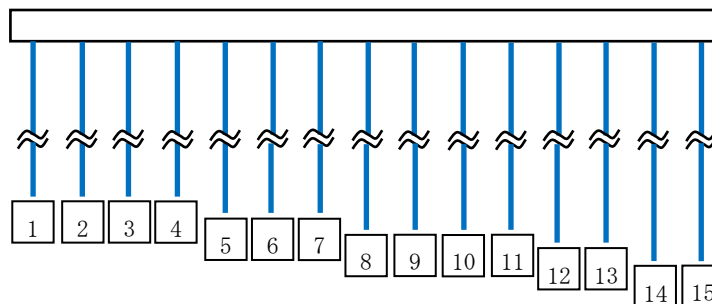


表 6-24 基礎地盤の引抜きに対する支持性能照査結果（B-B断面）

解析 ケース	評価位置*1	地震動	引抜き力 P_a (kN)	終局引抜き力*2 $P_{u a}$ (kN)	照査値 $P_a / P_{u a}$
①	1	Ss-1++	1749	2450	0.72
	1	Ss-1-+	1617	2450	0.66
	1	Ss-1+-	1973	2450	0.81
	1	Ss-1--	1670	2450	0.69
	1	Ss-2	1402	2450	0.58
	1	Ss-3++	1358	2450	0.56
	1	Ss-3-+	1178	2450	0.49
	1	Ss-3+-	1395	2450	0.57
	1	Ss-3--	1220	2450	0.50
	5	Ss-4	1218	2868	0.43
	15	Ss-5	1048	3666	0.29
	1	Ss-6	1477	2450	0.61
	1	Ss-7	1127	2450	0.46
	1	Ss-8++	854	2450	0.35
	1	Ss-8-+	1502	2450	0.62
	②	1	Ss-1++	1778	2450
1		Ss-1-+	1579	2450	0.65
③	1	Ss-1++	1727	2450	0.71
	1	Ss-1-+	1599	2450	0.66
④	1	Ss-1++	1644	2450	0.68
	1	Ss-1-+	1591	2450	0.65
⑤	1	Ss-1++	1636	2450	0.67
	1	Ss-1-+	1540	2450	0.63

注記*1：評価位置は下図に示す。

*2：終局引抜き力 $P_{u a}$ = 極限引抜き力 P_u ÷ 安全率



評価位置

7. まとめ

軽油タンク基礎（6号機設備）は、基準地震動 S_s に対して、構造物の地震応答解析に基づく曲げ軸力に伴うコンクリートひずみ、曲率及びせん断力が各部材の要求性能に応じた許容限界以下であることを確認した。基礎地盤の支持性能評価については、地震応答解析に基づく杭頭に発生する鉛直力が終局鉛直支持力及び終局引抜き力を下回ることを確認した。

以上のことから、軽油タンク基礎（6号機設備）は、基準地震動 S_s による地震力に対して、間接支持機能を維持できる。

軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震安全性評価に関する参考資料

目 次

(参考資料 2-1) 杭頭部の耐震評価	(参考) 2-1-1
(参考資料 2-2) 地盤改良体の安定性について	(参考) 2-2-1

(参考資料 2-1) 杭頭部の耐震評価

1. 概要

軽油タンク基礎（6号機設備）の杭と鉄筋コンクリート部材は、「道路橋示方書・同解説（IV下部構造編）（日本道路協会，平成14年3月）」（以下「道路橋示方書」という。）に示される方法Bにより結合している。軽油タンク基礎（6号機設備）の杭頭部の耐震評価として、「KK7 補足-027-2 軽油タンク基礎の耐震安全性評価 参考資料 1-2」に示す方法Bに対する照査項目に則り，仮想鉄筋コンクリート断面による杭頭部の曲げ軸力照査を実施する。

2. 曲げ軸力に対する評価

2.1 仮想鉄筋コンクリート断面による照査

2.1.1 照査方法

曲げ軸力に対する照査は「道路橋示方書 (H29)」に基づき、表 2-1 及び図 2-1 に示す仮想鉄筋コンクリート断面を設定し、仮想鉄筋コンクリート断面に生じるモーメントが「コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] (2002 年)」に示す終局曲げ耐力以下であることを確認する。

表 2-1 仮想鉄筋コンクリート断面諸元*

項目		諸元
仮想 RC 断面	杭径 D(mm)	798
	仮想 RC 断面の径 (mm)	1098
コンクリート	設計基準強度 (N/mm ²)	23.5
杭頭補強鉄筋	材質	SD35 (SD345 相当)
	鉄筋径	D22
	鉄筋の本数(本)	18
	配置半径 (mm)	330

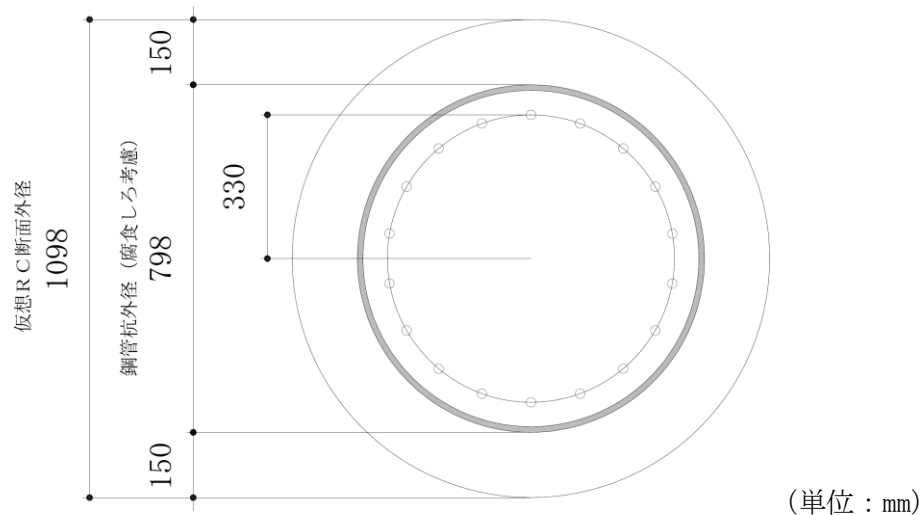


図 2-1 概略補強配筋図 (杭頭補強鉄筋) *

注記* : 「道路橋示方書 (H29)」に基づき設定

2.1.2 照査結果

解析ケース①（基本ケース）について全地震動に対して照査を実施し、最も照査値が厳しい地震動に対し、ばらつきを考慮した解析ケース（解析ケース②～⑤）について照査を実施した。

各断面について杭頭部の曲げ照査値が最大となる解析ケース、地震動における照査結果を表 2-2 及び表 2-3 に、照査値が 1.0 を上回る杭及び照査値が最大となる杭の配置図を図 2-4 に示す。表 2-2、表 2-3 及び図 2-4 に示すとおり、B-B 断面において、一部の杭で照査値が 1.0 を上回り、軽油タンク基礎（6 号機設備）全体の合計 120 本の杭のうち、照査値が 1.0 を上回る杭は 24 本となる。

表 2-2 杭頭部の曲げ照査結果（A-A 断面）

解析ケース	地震動	照査位置	照査用 曲げモーメント* (kNm)	終局 曲げ耐力 (kNm)	照査値
③	Ss-3++	1	368	864	0.43
		2	292		0.34
		3	244		0.29
		4	222		0.26
		5	220		0.26
		6	226		0.27
		7	141		0.17
		8	68		0.08

注記* : 照査用曲げモーメント=発生曲げモーメント×構造解析係数 γ_a

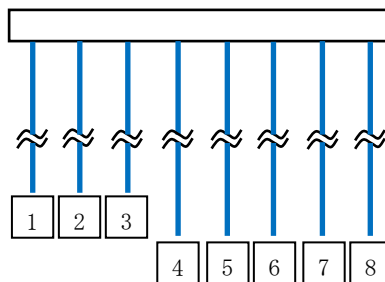


図 2-2 照査位置

表 2-3 杭頭部の曲げ照査結果 (B-B断面)

解析 ケース	地震動	照査位置	照査用 曲げモーメント* (kNm)	終局 曲げ耐力 (kNm)	照査値
③	Ss-1+-	1	1320	864	1.53
		2	1053		1.22
		3	876		1.02
		4	710		0.83
		5	561		0.65
		6	428		0.50
		7	361		0.42
		8	344		0.40
		9	161		0.19
		10	212		0.25
		11	211		0.25
		12	195		0.23
		13	160		0.19
		14	160		0.19
		15	299		0.35

注記* : 照査用曲げモーメント=発生曲げモーメント×構造解析係数 γ_a

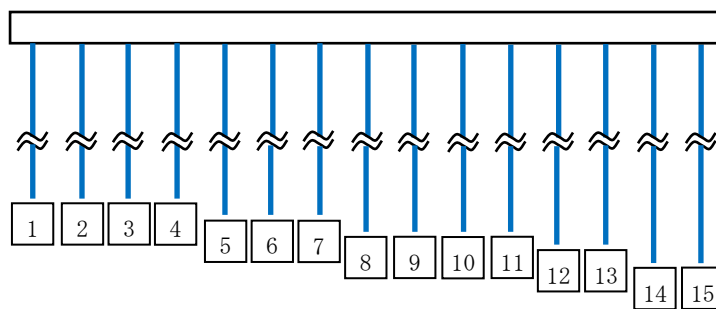
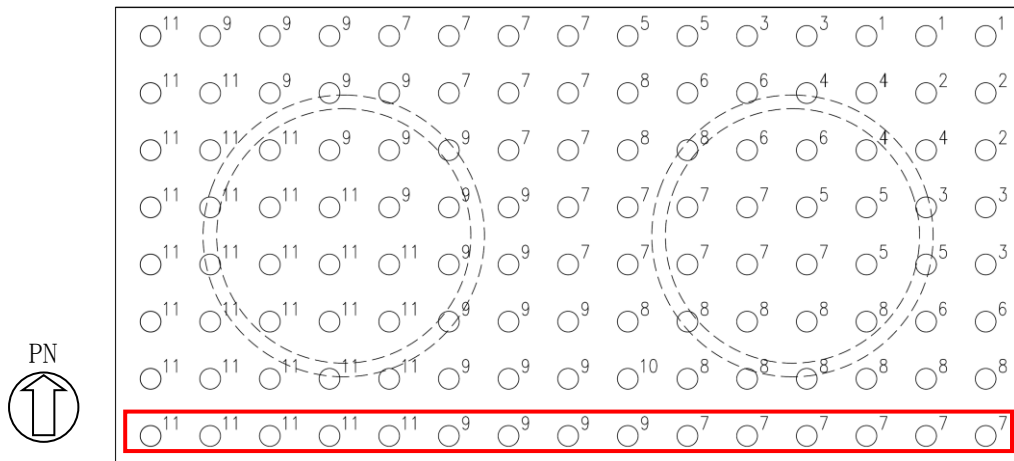
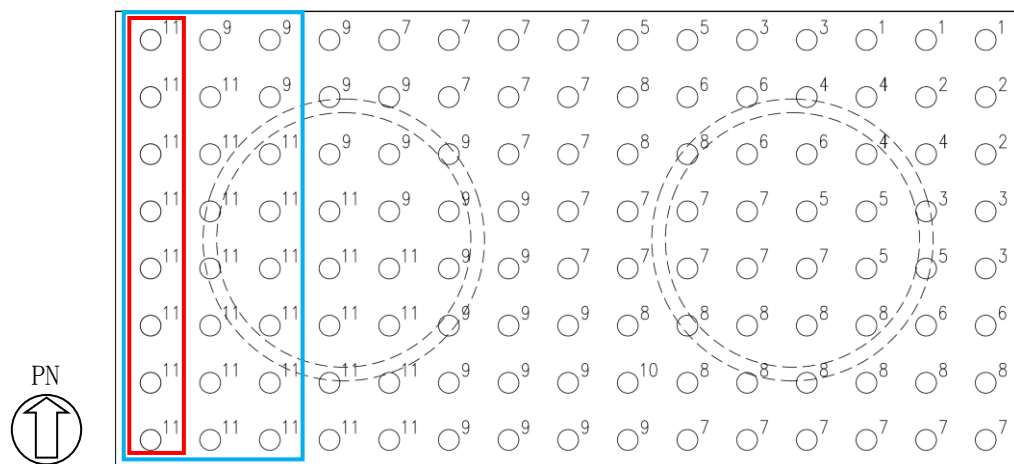


図 2-3 照査位置



(a) A-A断面 (解析ケース③, Ss-3++地震動)



(b) B-B断面 (解析ケース③, Ss-1+-地震動)

杭位置	仕様		
	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭長 (m)
1	800	14	24.0
2		9	24.0
3		14	22.0
4		9	22.0
5		14	20.0
6		9	20.0
7		14	18.0
8		9	18.0
9		14	15.0
10		9	15.0
11		14	13.0

: 照査値が1を上回る杭
 : 照査値が最大となる杭

図 2-4 照査値が1.0を上回る杭及び照査値が最大となる杭の配置図

2.1.3 杭頭部の健全性について

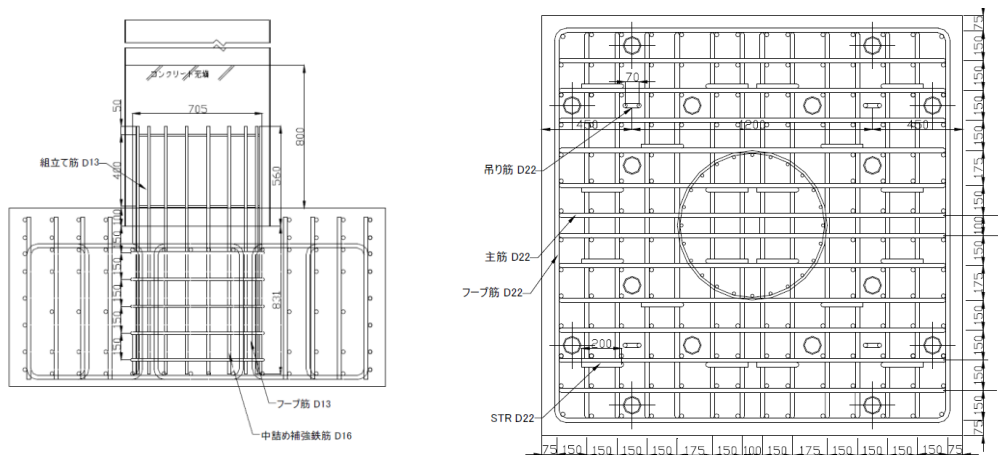
杭頭部の曲げ軸力に対する評価において、B-B断面では一部の杭頭部で発生曲げモーメントが終局曲げ耐力を上回るため、軽油タンク基礎（6号機設備）に要求される支持機能の観点で、その影響について検討を行う。

杭基礎の支持力特性に関する既往の研究*では、図2-5に示すとおり、杭頭結合部の破壊形態を確認することを目的とした、繰り返し水平載荷試験を実施している。当研究結果によると、図2-5(c)荷重-変位関係に示すとおり、鉄筋降伏時の変位 $1d_y$ に対して20倍の変位 $20d_y$ においても急激な荷重低下は見られず、安定した挙動を示している。

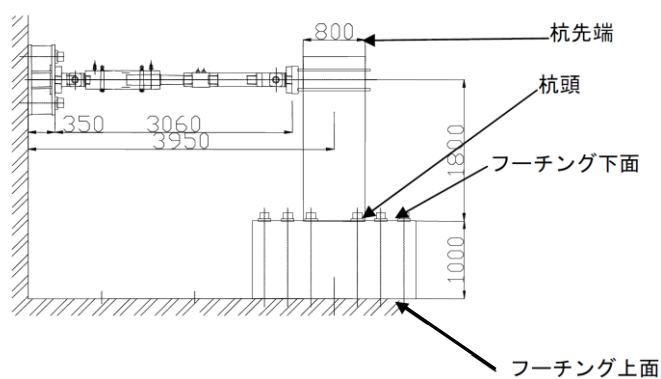
上記の実験結果で示された変形性能を考慮すると、一部の杭頭部で発生曲げモーメントが終局曲げ耐力を上回った場合においても、軽油タンク基礎（6号機設備）の支持機能は確保されと考えられる。

注記*：杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書（杭頭結合部に関する研究）

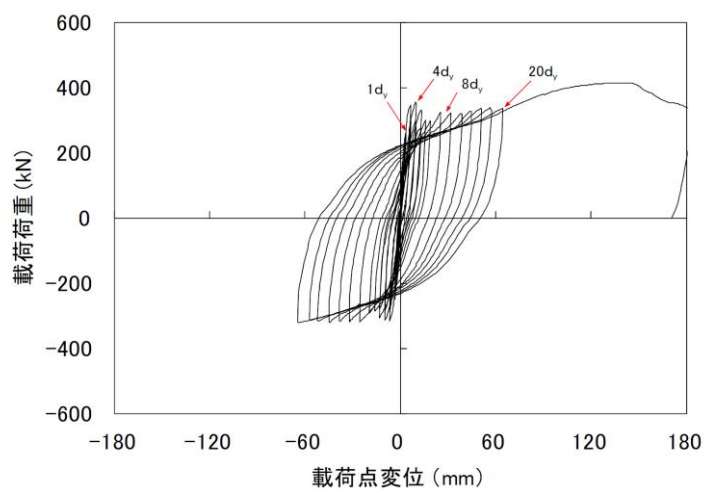
（2012年独立行政法人 土木研究所，一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協力会社）



(a) 配筋図



(b) 試験装置概要



(c) 荷重-変位関係

図 2-5 単杭に対する鋼管杭の杭頭結合部の水平載荷実験*

注記* : 杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書(杭頭結合部に関する研究)(2012年 独立行政法人 土木研究所, 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協力会社)より引用

また、表 2-4 及び表 2-5 に示すとおり、杭頭の発生曲げモーメントが終局曲げ耐力を上回る一部の杭の支持力に期待しないと仮定した場合においても、軽油タンク基礎（6号機設備）全体としての支持力は確保されることから、支持機能に問題は無いと判断出来る。

表 2-4 基礎全体として評価した場合の押込みに対する支持性能照査結果

解析断面	解析ケース	地震動	鉛直力* ¹ R _a (kN)	終局鉛直支持力* ² R _{u a} (kN)	照査値 R _a /R _{u a}
B-B断面	③	Ss-1+-	101769	708093	0.15

注記*1：全ての杭頭に生じる鉛直力の総和を示す。

*2：杭頭の発生曲げモーメントが終局曲げ耐力を上回る一部の杭を除いた杭の終局鉛直支持力の総和を示す。また、「終局鉛直支持力 R_{u a} = 極限支持力 R_u ÷ 安全率」とする。

表 2-5 基礎全体として評価した場合の引抜きに対する支持性能照査結果

解析断面	解析ケース	地震動	引抜き力* ¹ P _a (kN)	終局引抜き力* ² P _{u a} (kN)	照査値 P _a /P _{u a}
B-B断面	③	Ss-1+-	147830	308013	0.48

注記*1：全ての杭頭に生じる引抜き力の総和を示す。

*2：杭頭の発生曲げモーメントが終局曲げ耐力を上回る一部の杭を除いた杭の終局引抜き力の総和を示す。また「終局引抜き力 P_{u a} = 極限引抜き力 P_u ÷ 安全率」とする。

ただし、軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答解析においては、杭頭部を鉄筋コンクリートの基礎版と剛結した解析モデルとしていることから、杭頭部の鉄筋降伏後における非線形性を考慮した場合の、軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価に対する影響について検討する。

2.2 杭頭部の非線形性による影響検討

杭頭部の非線形性を考慮した地震応答解析を実施し、軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価に対する影響について検討する。

2.2.1 検討方法

軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答解析は、杭頭部を剛結としたモデル（以下「基本モデル」という。）を用いている。本検討では、B-B断面について、基本モデルの解析結果と杭頭部に曲げ変形に対する非線形性を考慮した回転ばね要素を配置した解析モデル（以下「杭頭回転ばねモデル」という。）の解析結果を比較することで影響検討を行う。

杭頭回転ばねモデルの回転ばね要素は、表 2-1 及び図 2-1 に示す仮想鉄筋コンクリート断面に基づき設定する。また、杭頭回転ばねモデルについて、回転ばね要素の応答を確認し、モデル化の妥当性について確認する。

検討フローを図 2-6 に示す。

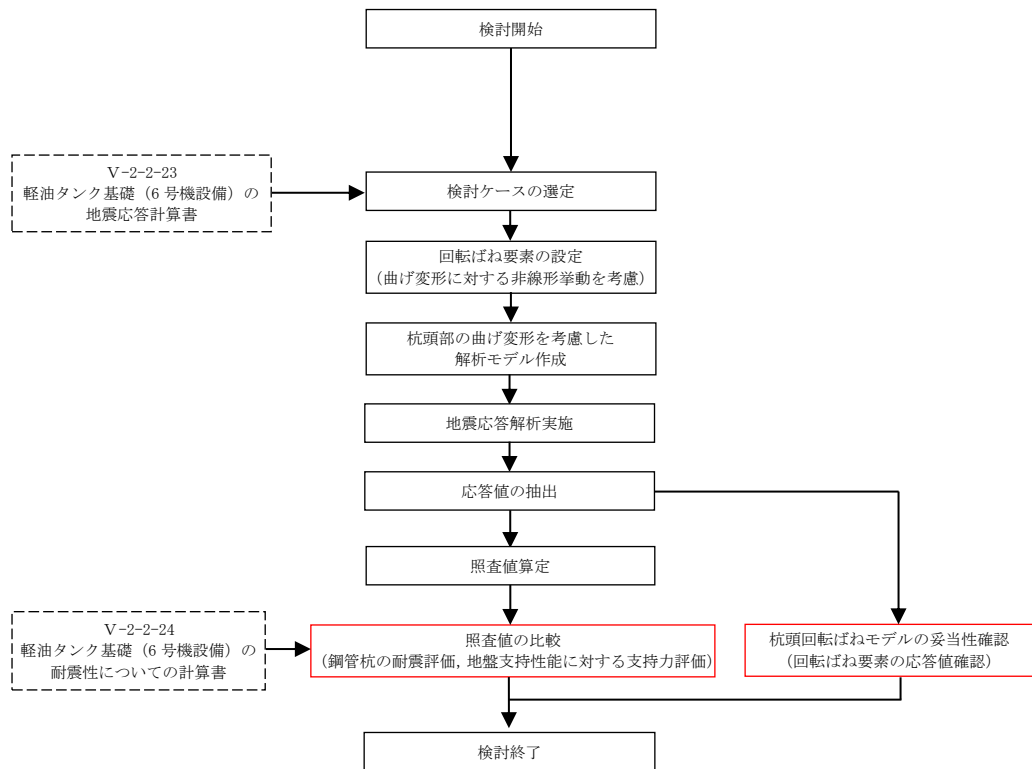


図 2-6 検討フロー

2.2.2 検討ケースの選定

基本モデルでの地震応答解析結果のうち、杭頭部の発生曲げモーメントが最も大きい解析ケースを検討ケースとする。

基本モデルにおける杭頭部の発生曲げモーメント一覧を表 2-6 に示す。杭頭部の発生曲げモーメントが最も大きい解析ケースは、解析ケース③、地震動 Ss-1 (+-) となる。

表 2-6 杭頭部の発生曲げモーメント (B-B 断面)

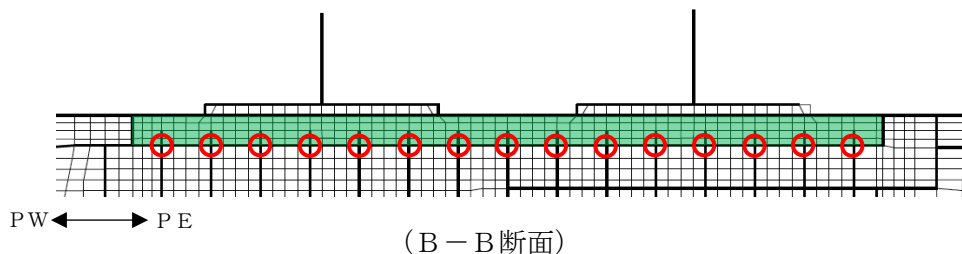
地震動 \ 解析ケース		杭頭部の発生曲げモーメント (kN/本)				
		①	②	③	④	⑤
Ss-1	++	1186				
	-+	1126				
	+-	1203	1163	1258	1131	1094
	--	1131				
Ss-2		1034				
Ss-3	++	1179				
	-+	1075				
	+-	1182				
	--	1036				
Ss-4		912				
Ss-5		795				
Ss-6		1000				
Ss-7		825				
Ss-8	++	905				
	-+	852				

2.2.3 回転ばね要素の設定

基本モデルの解析結果では、杭頭部の発生曲げモーメントが終局曲げ耐力を上回る杭は一部であるが、杭頭回転ばねモデルを用いた解析では、全ての杭頭位置に回転ばね要素を配置し、杭頭部の曲げ変形に対する非線形挙動を考慮する。回転ばね要素の配置位置を図 2-7 に、回転ばね要素の M- θ 特性を図 2-8 に、回転ばね要素のばね定数を表 2-7 に示す。

回転ばね要素の一次勾配は、数値解析上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きな値、二次勾配は、仮想鉄筋コンクリート断面の非線形特性に基づき、塑性化領域を $10\phi^*$ (ϕ : 補強鉄筋の直径) として設定した値とし、三次勾配は十分小さな値とする。

注記* : 「杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書(杭頭結合部に関する研究) (独立行政法人 土木研究所 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会社, 平成 24 年 3 月)」を参考に、塑性化領域を 10ϕ と設定。



○ : 回転ばね要素の配置位置

図 2-7 回転ばね要素の配置位置

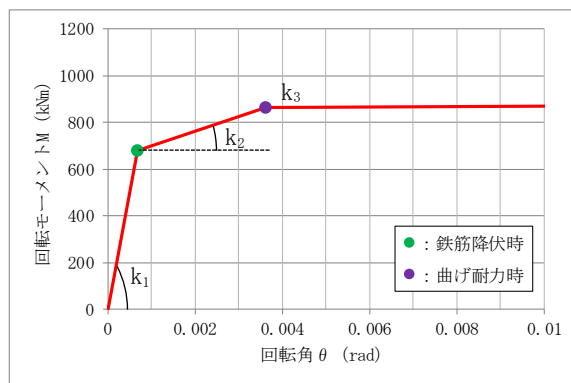


図 2-8 回転ばね要素の M- θ 特性*

注記* : 杭一本あたりの特性を示す。

表 2-7 回転ばね要素のばね定数*

勾配	ばね定数 (kNm/rad)
一次勾配 k_1	1.00×10^6
二次勾配 k_2	6.26×10^4
三次勾配 k_3	1.00×10^{-6}

注記* : 杭一本あたりの値を示す。

2.2.4 照査値の比較

基本モデルと杭頭回転ばねモデルにおける鋼管杭の曲げ軸力照査，せん断力照査及び基礎地盤の支持性能照査の照査値を比較する。

照査値の比較結果を表 2-8～表 2-11 に示す。表 2-8～表 2-11 に示すとおり，基本モデルと杭頭回転ばねモデルの照査値の差は軽微であることを確認した。

表 2-8 鋼管杭の曲げ軸力照査の比較

解析モデル	照査用曲率* ϕ_d (1/m)	終局曲率 ϕ_u (1/m)	照査値 ϕ_d / ϕ_u
①基本モデル	1.67×10^{-3}	2.00×10^{-3}	0.84
②杭頭回転ばねモデル	1.71×10^{-3}	2.00×10^{-3}	0.86

注記* : 照査用曲率 $\phi_d =$ 発生曲率 \times 構造解析係数 γ_a

表 2-9 鋼管杭のせん断照査の比較

解析モデル	照査用せん断力* Q_d (kN)	終局せん断耐力 Q_u (kN)	照査値 Q_d / Q_u
①基本モデル	888	1224	0.73
②杭頭回転ばねモデル	908	1224	0.75

注記* : 照査用せん断力 $Q_d =$ 発生せん断力 \times 構造解析係数 γ_a

表 2-10 基礎地盤の押込みに対する支持性能照査の比較

解析モデル	鉛直力 R_a (kN)	終局鉛直支持力* R_{ua} (kN)	照査値 R_a / R_{ua}
①基本モデル	1679	7035	0.24
②杭頭回転ばねモデル	1575	6617	0.24

注記* : 終局鉛直支持力 $R_{ua} =$ 極限支持力 $R_u \div$ 安全率

表 2-11 基礎地盤の引抜きに対する支持性能照査の比較

解析モデル	引抜き力 P_a (kN)	終局引抜き力* P_{ua} (kN)	照査値 P_a / P_{ua}
①基本モデル	1956	2450	0.80
②杭頭回転ばねモデル	2056	2450	0.84

注記* : 終局引抜き力 $P_{ua} =$ 極限引抜き力 $P_u \div$ 安全率

2.2.5 回転ばね要素の応答値確認

土木学会マニュアルを参考とし、回転ばね要素の限界値を圧縮縁コンクリートのひずみ1%に相当する回転角とし、応答が限界値を下回ることを確認することで、回転ばね要素によるモデル化の適用範囲内であるかを確認する。限界値は、仮想鉄筋コンクリート断面をモデル化したファイバーのはりモデルによるプッシュオーバー解析により算出する。

表 2-12 に回転ばね要素の回転角の確認結果を示す。表 2-12 より、発生回転角は仮想鉄筋コンクリート断面の限界値を下回るため、回転ばね要素によるモデル化の適用範囲内であると判断できる。

表 2-12 回転ばね要素の回転角の確認結果 (B-B断面)

検討 ケース	地震動	照査位置	発生回転角* (rad)	限界値 (rad)	発生回転角 限界値
①	Ss-1++	1	3.17×10^{-3}	1.02×10^{-2}	0.32
	Ss-1-+	1	2.92×10^{-3}		0.29
	Ss-1+-	1	3.23×10^{-3}		0.32
	Ss-1--	1	2.95×10^{-3}		0.29
	Ss-2	1	2.38×10^{-3}		0.24
	Ss-3++	1	3.22×10^{-3}		0.32
	Ss-3-+	1	2.58×10^{-3}		0.26
	Ss-3+-	1	3.18×10^{-3}		0.32
	Ss-3--	1	2.32×10^{-3}		0.23
	Ss-4	1	1.71×10^{-3}		0.17
	Ss-5	1	1.12×10^{-3}		0.11
	Ss-6	1	2.25×10^{-3}		0.23
	Ss-7	1	1.31×10^{-3}		0.13
	Ss-8++	1	1.67×10^{-3}		0.17
Ss-8-+	1	1.42×10^{-3}	0.14		
②	Ss-1+-	1	3.08×10^{-3}	0.31	
③	Ss-1+-	1	3.44×10^{-3}	0.34	
④	Ss-1+-	1	2.88×10^{-3}	0.29	
⑤	Ss-1+-	1	2.71×10^{-3}	0.27	

注記* : 構造解析係数 γ_a を考慮する。

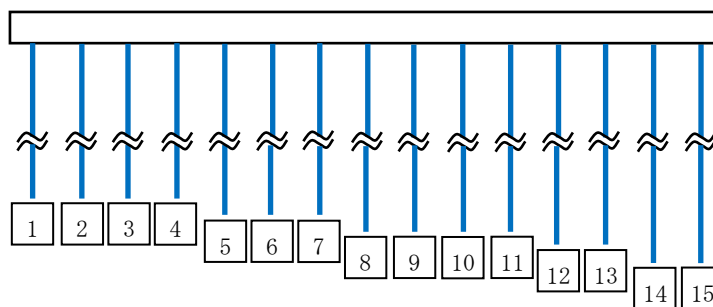


図 2-9 照査位置

3. まとめ

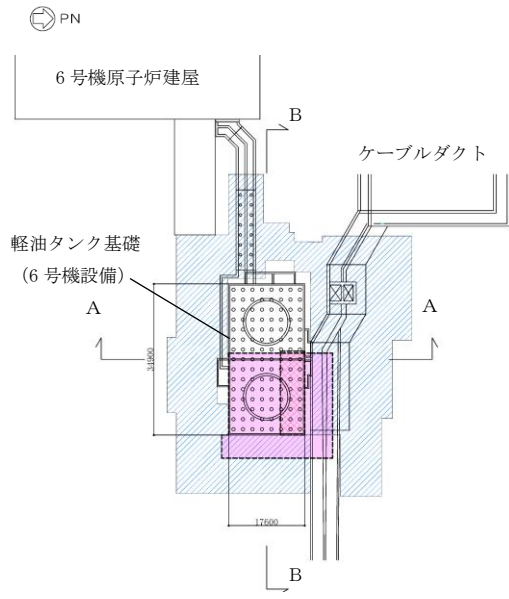
「2.1 仮想鉄筋コンクリート断面による照査」より，曲げ軸力に対する評価において，一部の杭頭部で発生曲げモーメントが終局曲げ耐力を上回るため，軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価に対する影響について検討した。検討の結果，軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震評価に対する影響は軽微であることを確認した。

(参考資料 2-2) 地盤改良体の安定性について

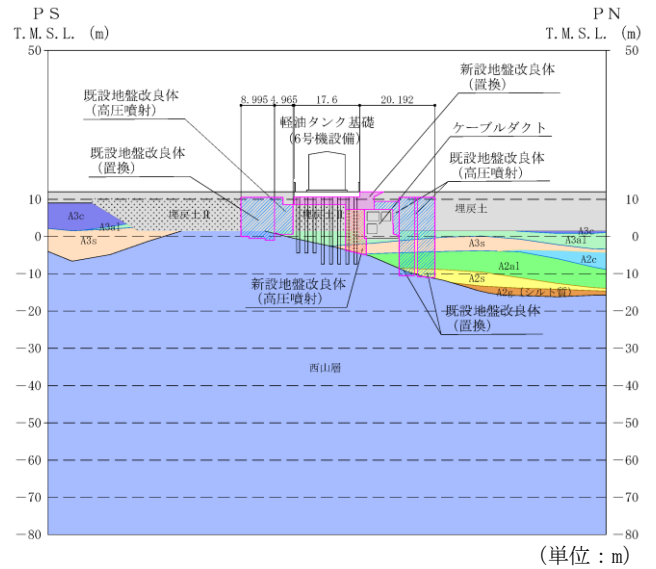
1. 概要

軽油タンク基礎（6号機設備）の地盤改良体の配置図を図 1-1 に示す。軽油タンク基礎（6号機設備）の周囲には、変形抑制対策として地盤改良を実施しており、基礎直下の原地盤において液状化は認められないが、支持層である西山層が南北方向及び東西方向に傾斜しているとともに、地盤改良体の周囲に液状化検討対象層が分布することから、側方流動に伴う地盤改良体の滑動や転倒により安定性が損なわれる可能性が考えられる。

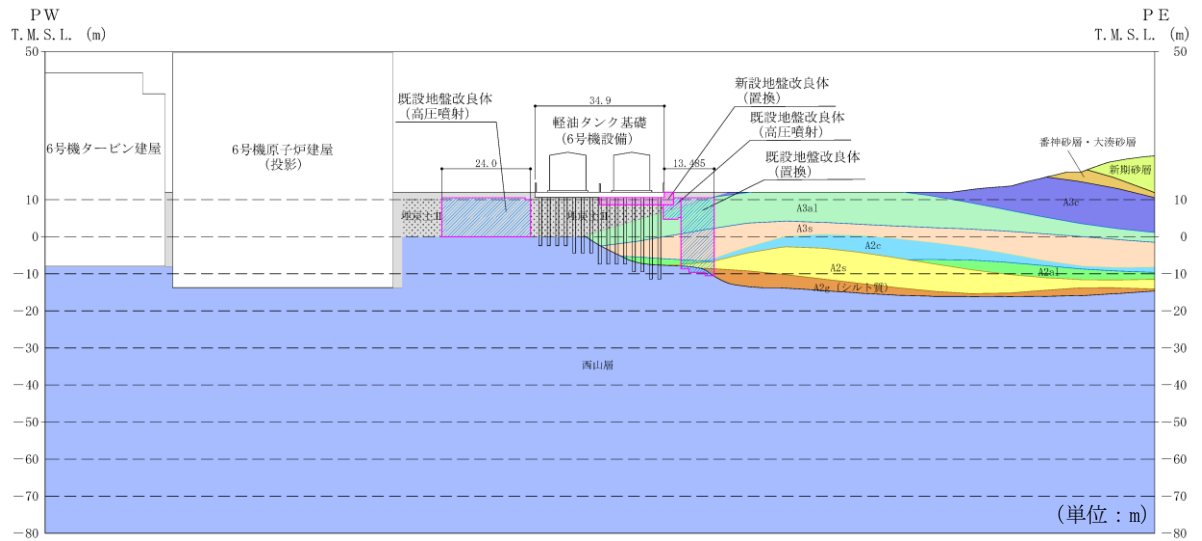
一方、基礎周辺の地盤改良体は、基礎を取り囲むようにして配置されることから、実際の3次元形状を考慮すると、滑動及び転倒により安定性を損なう可能性は低いと考えられるが、本項では念の為、地盤改良体の地震時における安定性について検討を実施する。



(a) 平面図 (単位：mm)



(b) A-A断面図 (単位：m)



(c) B-B断面図

既設／新設	凡例	地盤改良工法
既設地盤改良体		置換 (CD掘削)
新設地盤改良体		置換 (開削)
		高压喷射

注：置換工法(CD掘削)の施工範囲の内、地上構造物及び埋設構造物がある箇所では、高压喷射を適用

図 1-1 軽油タンク基礎 (6号機設備) の地盤改良体の配置図

2. 地震応答解析における変形図による安定性の評価

軽油タンク基礎(6号機設備)の地震応答解析に用いる2次元動的有限要素法解析モデルでは、図2-1に示すとおり、地盤改良体と地盤の間にジョイント要素を配置することで、地震時における地盤改良体の滑動や剛体回転等の挙動を考慮している。また、地震応答解析においては、地盤の剛性低下及び地質の不整形に起因する地盤ひずみも考慮されていることから、当該モデルの地震応答解析における変形状態を確認することで、地盤改良体の安定性を判断する。

変形状態は、地盤改良体の滑動、転倒等の水平方向の挙動に着目する観点から、西山層に対する基礎版の水平相対変位が最大となるケース、時刻で確認する。

図2-2に各断面の変形図を示す。変形図より、地盤改良体の滑動、転倒等は確認されず、地震時においても改良体は安定した挙動を示していると判断できる。

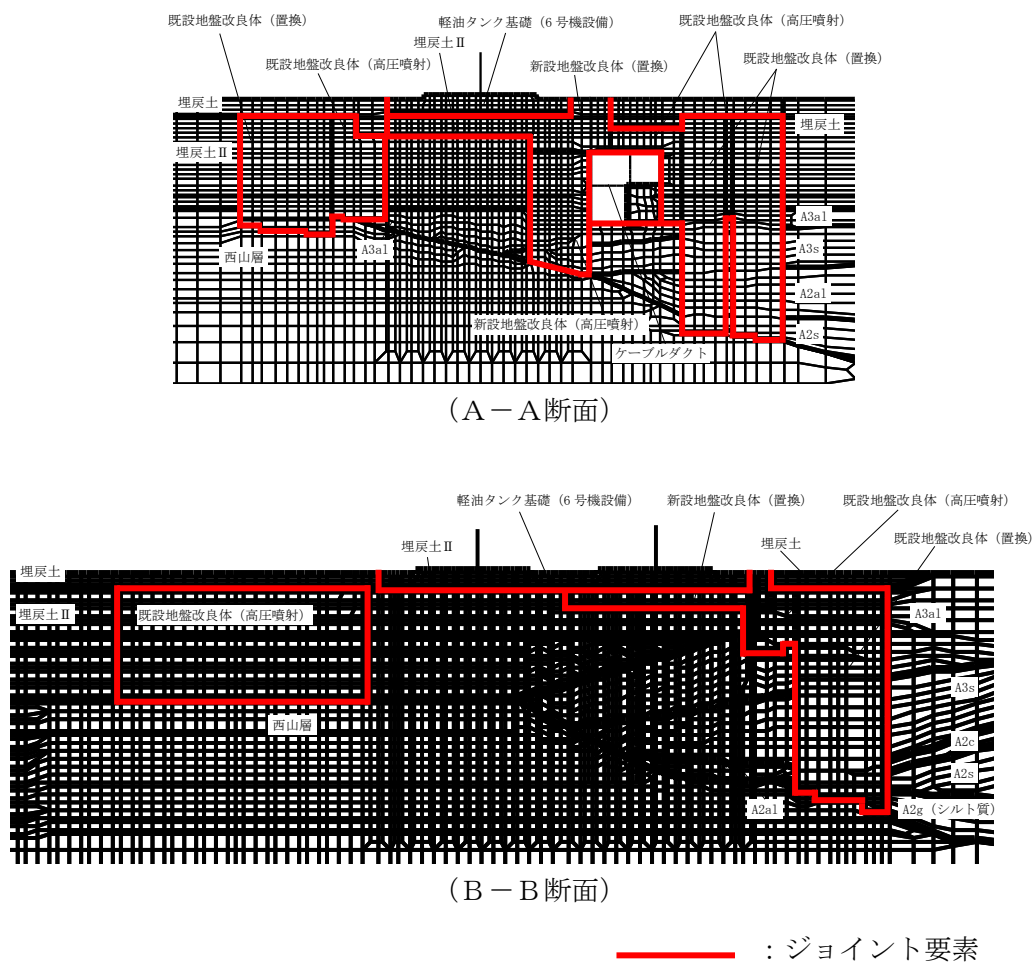
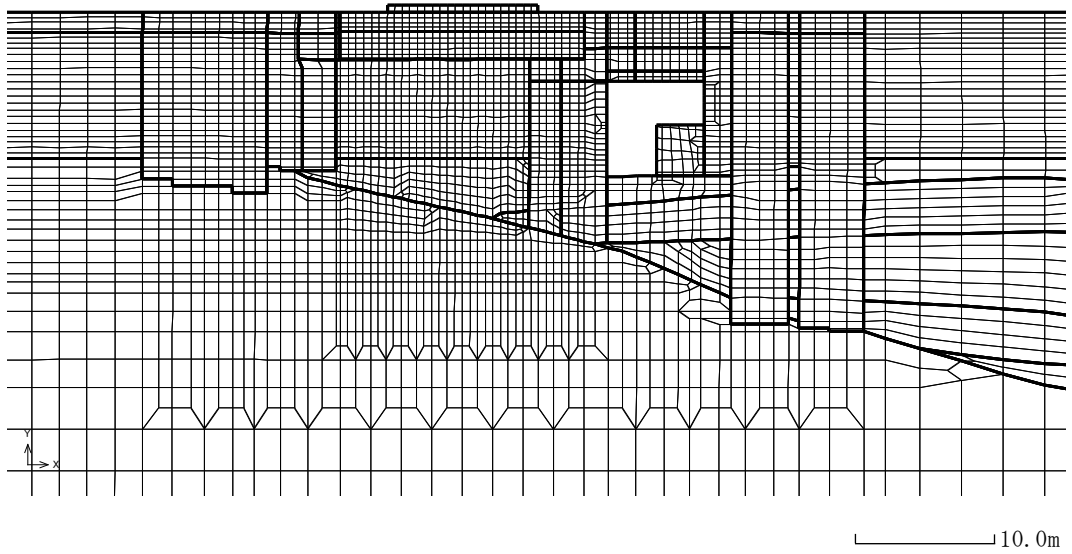
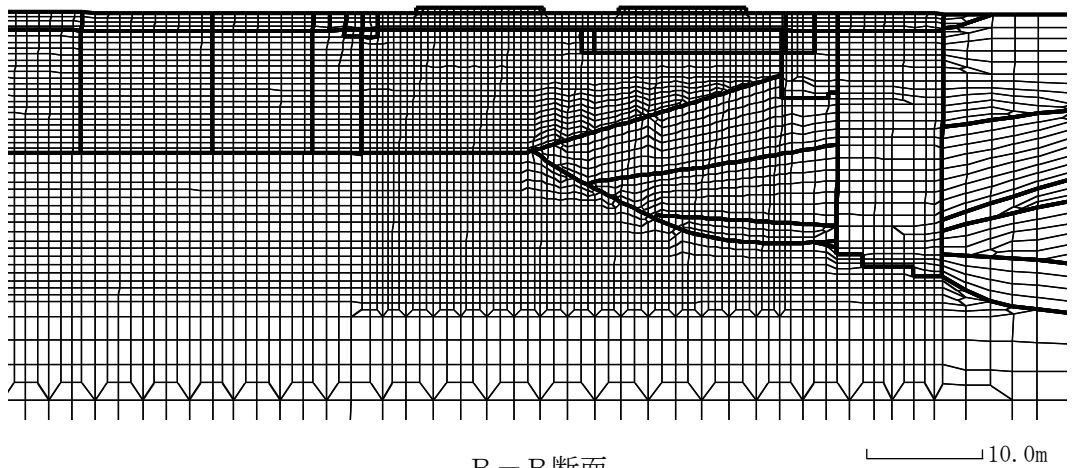


図 2-1 ジョイント要素の配置



A-A断面
 (解析ケース③, 地震動 Ss-8++, t=8.05s)



B-B断面
 (解析ケース③, 地震動 Ss-3--, t=36.60s)

図 2-2 変形図

注：変形スケールは構造スケールと同様

3. 転倒モーメントによる照査

地盤改良体の安定性を定量的に評価するため、道路橋示方書における直接基礎の転倒モーメントに対する安定性の照査方法を参考に、転倒モーメントによる照査を実施する。地盤改良体に作用する合力の作用位置は、地盤改良体の重心位置と見なし、図 2-2 の変形図を確認した解析ケースの全時刻歴における地盤改良体の回転角の最大値と、改良体高さから合力の作用位置を算定する。合力の作用位置が底面の中心から底面幅の 1/3 以内であれば、照査を満足すると判定する。地盤改良体の合力の作用位置の概念図を図 3-1 に示す。

照査結果を表 3-1 に示す。各地盤改良体について、転倒モーメントによる照査を満足し、許容限界に対して十分な裕度があることから、転倒は生じないと判断できる。

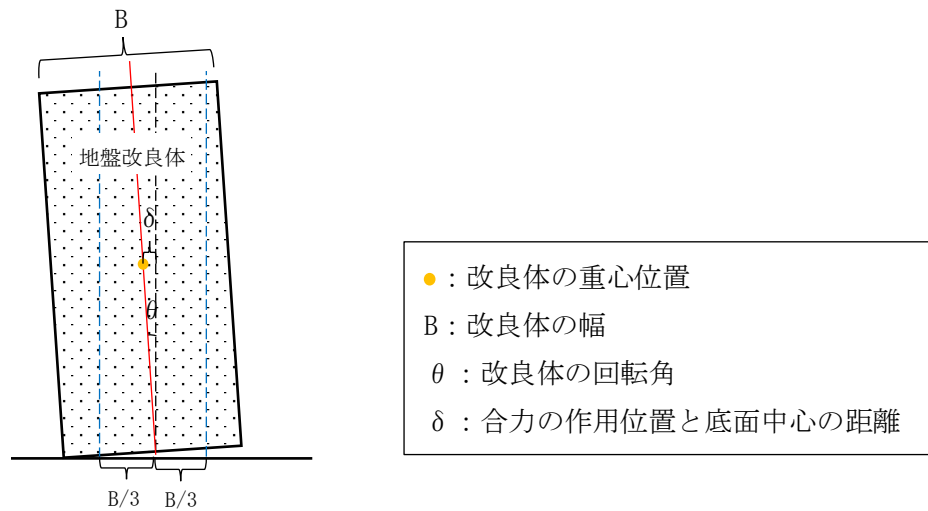


図 3-1 地盤改良体の合力の作用位置の概念図

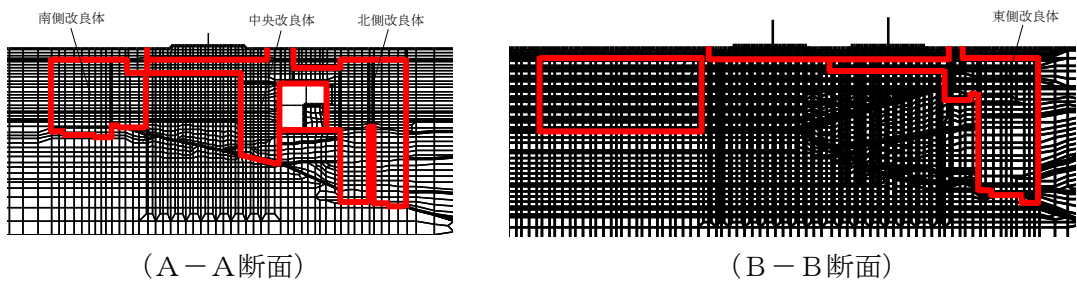


図 3-2 地盤改良体の名称

表 3-1 照査結果

改良体名称	回転角 θ (rad)	合力の作用位置と 底面中心の距離 δ^* (mm)	底面幅の 1/3 B/3 (mm)	照査値 $\delta / (B/3)$
南側改良体	1.97×10^{-3}	13	3853	0.004
中央改良体	2.78×10^{-3}	25	1866	0.014
北側改良体	2.41×10^{-3}	31	3191	0.010
東側改良体	3.69×10^{-3}	45	2998	0.016

注記*： 構造解析係数 1.2 を考慮

4. まとめ

軽油タンク基礎（6号機設備）周囲の地盤改良体の安定性について、変形図による評価及び転倒モーメントによる照査を実施したところ、地震時に滑動及び転倒により安定性を失うことは無いと判断した。

以上より、軽油タンク基礎（6号機設備）の地盤改良体は、地震時においても安定性を保ち、変形抑制としての機能を維持できることを確認した。