

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-027-3 改4
提出年月日	2020年 6月 25日

資料3 燃料移送系配管ダクトの耐震安全性評価について

2020年6月

東京電力ホールディングス株式会社

目次

1. 評価方法	1
2. 評価条件	1
2.1 評価対象断面の方向	1
2.2 評価対象断面の選定	4
2.3 使用材料及び材料定数	8
2.4 地盤及び地盤改良体の解析用物性値	8
2.5 評価構造物諸元	11
2.6 地下水位	12
2.7 耐震評価フロー	13
2.8 適用規格	14
3. 地震応答解析	16
3.1 地震応答解析手法	16
3.2 地震応答解析モデルの設定	17
3.2.1 解析モデル領域	17
3.2.2 境界条件	22
3.2.3 解析奥行幅	26
3.2.4 構造物のモデル化	27
3.2.5 隣接構造物のモデル化	28
3.2.6 地盤改良体のモデル化	29
3.2.7 ジョイント要素の設定	32
3.2.8 非線形ばね要素の設定	35
3.2.9 杭-地盤相互作用ばねの設定	37
3.2.10 杭先端ばねの設定	39
3.2.11 材料特性の設定	41
3.3 減衰定数	44
3.4 荷重の組合せ	45
3.4.1 機器・配管荷重	46
3.4.2 外水圧	46
3.5 地震応答解析の解析ケース	47
3.5.1 耐震評価における解析ケース	47
3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度及び応答変位抽出のための解析ケース	50
4. 評価内容	51
4.1 入力地震動の設定	51
4.2 許容限界の設定	104
4.2.1 曲げに対する許容限界	104

4.2.2	せん断に対する許容限界	106
4.2.3	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	113
5.	評価結果	116
5.1	地震応答解析結果	116
5.1.1	解析ケースと照査値	117
5.1.2	層間変形角時刻歴波形（鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査）	127
5.1.3	断面力分布（鉄筋コンクリート部材のせん断力照査）	129
5.1.4	曲率分布（鋼管杭の曲げ軸力照査）	134
5.1.5	せん断力分布（鋼管杭のせん断力照査）	137
5.1.6	最大せん断ひずみ分布	140
5.1.7	過剰間隙水圧比分布	144
5.2	鉄筋コンクリート部材の耐震評価	148
5.2.1	鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力に対する評価結果	148
5.2.2	鉄筋コンクリート部材のせん断力に対する評価結果	150
5.3	鋼管杭の耐震評価	156
5.3.1	鋼管杭の曲げ軸力に対する評価結果	156
5.3.1	鋼管杭のせん断力に対する評価結果	158
5.4	基礎地盤の支持性能に対する支持力評価	160
5.4.1	基礎地盤の押込みに対する支持性能評価	160
5.4.2	基礎地盤の引抜きに対する評価	162
6.	まとめ	164

参考資料

(参考資料 1)	軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響について	参考 1-1
(参考資料 2)	杭頭部の耐震評価	参考 2-1
(参考資料 3)	積雪荷重の影響評価	参考 3-1
(参考資料 4)	燃料移送系配管ダクト接合部の健全性評価	参考 4-1
(参考資料 5)	杭先端の極限支持力度の設定について	参考 5-1
(参考資料 6)	静的地震力に対する耐震安全性評価	参考 6-1
(参考資料 7)	新設地盤改良体の物性値設定が構造物の耐震評価及び機器・配管系に対する応答加速度に与える影響確認	参考 7-1

5.1.7 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各地盤要素の過剰間隙水圧比の最大値分布を示す。表 5-17 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図を図 5-12 及び図 5-13 に、B-B断面における過剰間隙水圧比分布図を図 5-14 に示す。なお、周辺地盤に液状化が生じた場合でも、燃料移送系配管ダクトは鋼管杭によって西山層に支持される杭基礎構造物であることから、浮き上りは生じない。

表 5-17 最大照査値を示す解析ケース一覧

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

燃料移送系配管ダクトの耐震安全性評価に関する参考資料

目 次

(参考資料 1) 軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響について	参考 1-1
(参考資料 2) 杭頭部の健全性評価	参考 2-1
(参考資料 3) 積雪荷重の影響評価	参考 3-1
(参考資料 4) 燃料移送系配管ダクト接合部の健全性評価	参考 4-1
(参考資料 5) 杭先端の極限支持力度の設定について	参考 5-1
(参考資料 6) 静的地震力に対する耐震安全性評価	参考 6-1
(参考資料 7) 新設地盤改良体の物性値設定が構造物の耐震評価及び機器・配管系に対する応答加速度に与える影響確認	参考 7-1

(参考資料 7) 新設地盤改良体の物性値設定が構造物の耐震評価及び機器・配管系に対する応答加速度に与える影響確認

1. 概要

屋外重要土木構造物の周囲には、構造物の変形抑制対策として、地盤改良体を設置している。このうち 2018 年 12 月時点で施工中もしくは計画中の地盤改良体は「新設地盤改良体」と称し、その解析用物性値は設計値又は文献等に基づき設定している*。実施工における地盤改良体は設計値を上回るように施工されるため、ばらつきを考慮した解析ケースにおいても構造物評価の観点では地盤剛性を低く評価する方が地盤のせん断変形が生じやすいことから、設計値に基づき下限値相当の G_0 を設定している。

本項では、解析用物性値を設計値に基づき設定している新設地盤改良体について、現時点で得られている実施工の事後調査結果に基づく物性値設定が、構造物の耐震評価及び機器・配管系に対する応答加速度に与える影響を確認する。

注記* : KK7 補足-024-1「地盤の支持性能について」参照。

2. 影響確認の方針

既往解析ケース（以下「基本ケース」という。）における構造物の耐震評価結果と、新設地盤改良体の解析用物性値を実施工の事後調査結果に基づき設定した解析ケース（以下「追加ケース」という。）における構造物の耐震評価結果を比較し、構造物の耐震評価に与える影響を確認する。

また、追加ケースの加速度応答スペクトルについて、基本ケースの加速度応答スペクトル及び機器・配管系の設計用床応答曲線と比較し、機器・配管系に対する応答加速度に与える影響を確認する。

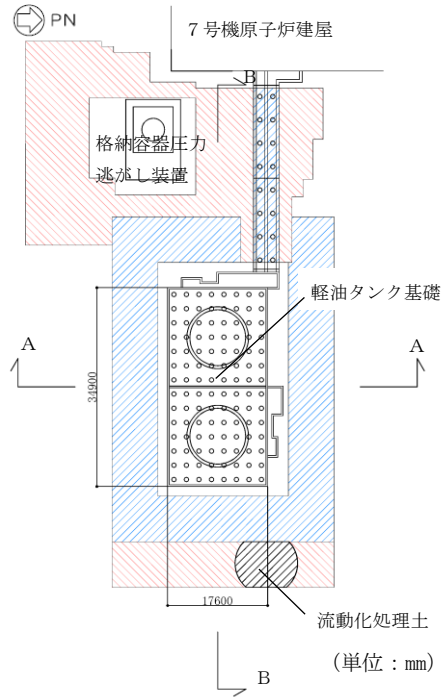
2.1 代表構造物の選定

屋外重要土木構造物のうち、機器・配管系を間接支持する機能が要求される構造物の地盤改良体配置図を図 2-1～**図 2-5**に示す。各構造物に対し、新設地盤改良体の物性値設定が構造物の耐震評価及び機器・配管系に対する応答加速度に与える影響の大きさの観点から、構造物と新設地盤改良体の位置関係について表 2-1 のとおり整理した。

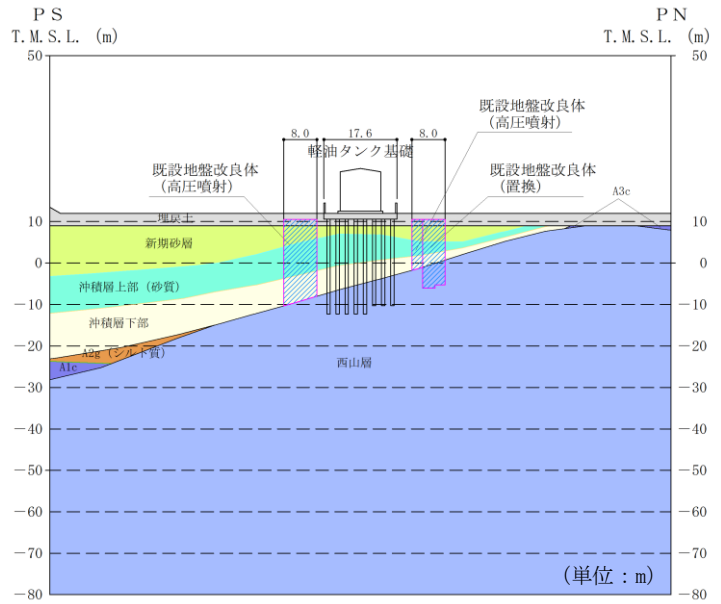
表 2-1 より、本検討は、解析断面中に新設地盤改良体の占める割合が大きく、かつ構造物近傍に新設地盤改良体が位置している燃料移送系配管ダクトを代表として実施する。

表 2-1 代表構造物の選定

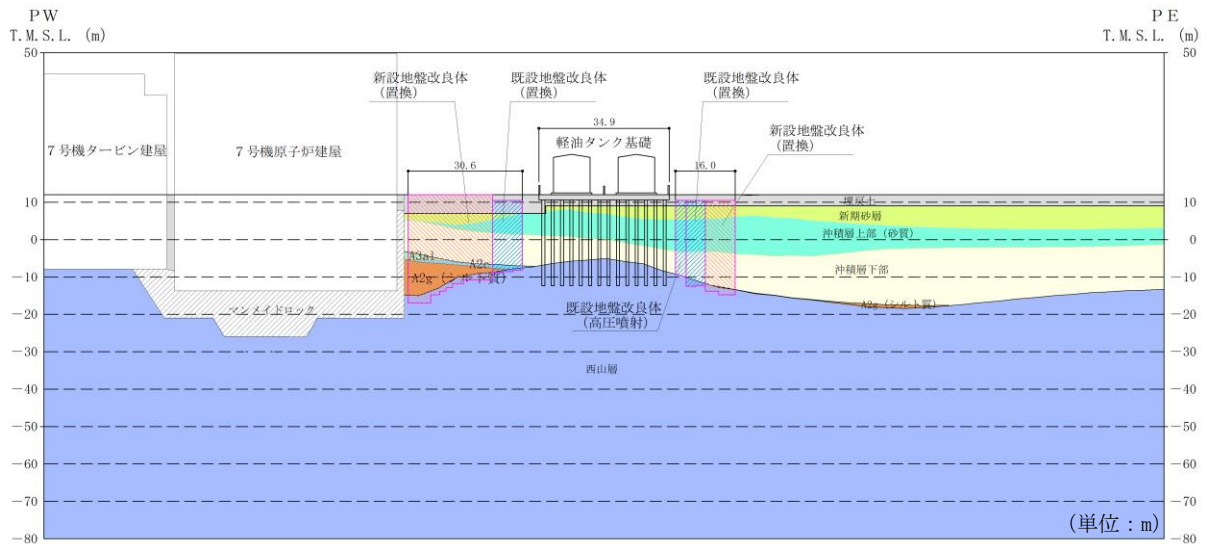
構造物名称	構造物と新設地盤改良体の位置関係	選定結果
軽油タンク基礎	解析断面中に地盤改良体が存在するが、構造物近傍に位置するのは既設地盤改良体のみである。	
燃料移送系配管ダクト	解析断面中に新設地盤改良体が占める割合が大きく、構造物近傍に新設地盤改良体が位置している。	○
常設代替交流電源装置基礎	解析断面中の一部に新設地盤改良体が存在するが、その地盤条件、施工方法及び設計強度が既設地盤改良体と同一であることから、既設地盤改良体の解析用物性値を用い、ばらつきを考慮している。また、大部分は既設地盤改良体である。	
軽油タンク基礎 (6号機設備)	<p>解析断面中の一部に新設地盤改良体が存在するが、大部分は既設地盤改良体である。</p> <p>基礎版直下に構造物と接する新設地盤改良体が存在するが、新設地盤改良体と西山層間の約 10m の深さには埋戻土Ⅱが分布している。A-A断面には構造物位置から西山層までの間に新設地盤改良体が存在するが、その平面的な設置範囲は基礎北東の一部の範囲のみである。</p> <p>また、既設地盤改良体が構造物を取り囲むように位置しているため、構造物の地震時の挙動は既設地盤改良体による影響が大きい。</p>	



(a) 平面図



(b) A-A断面図

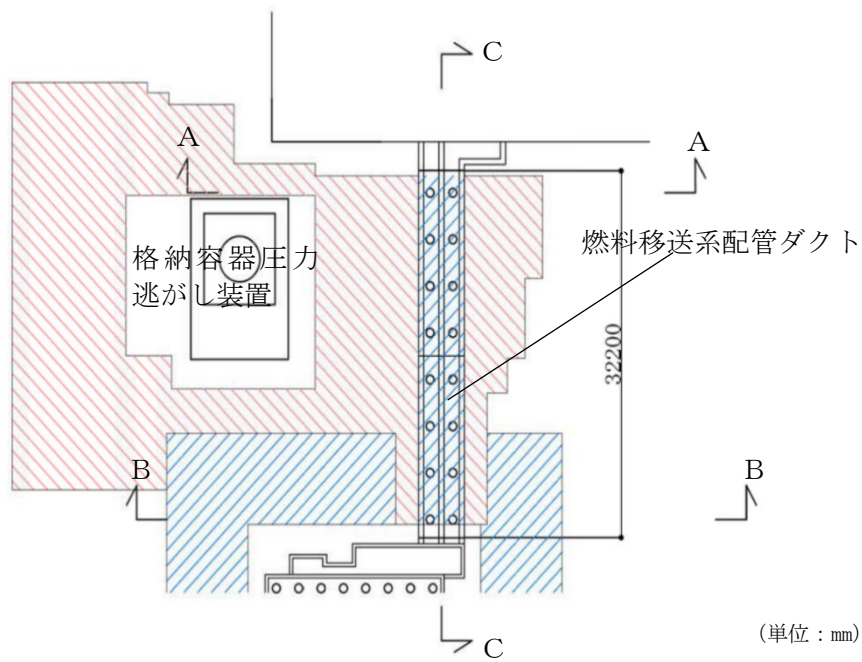


(c) B-B断面図

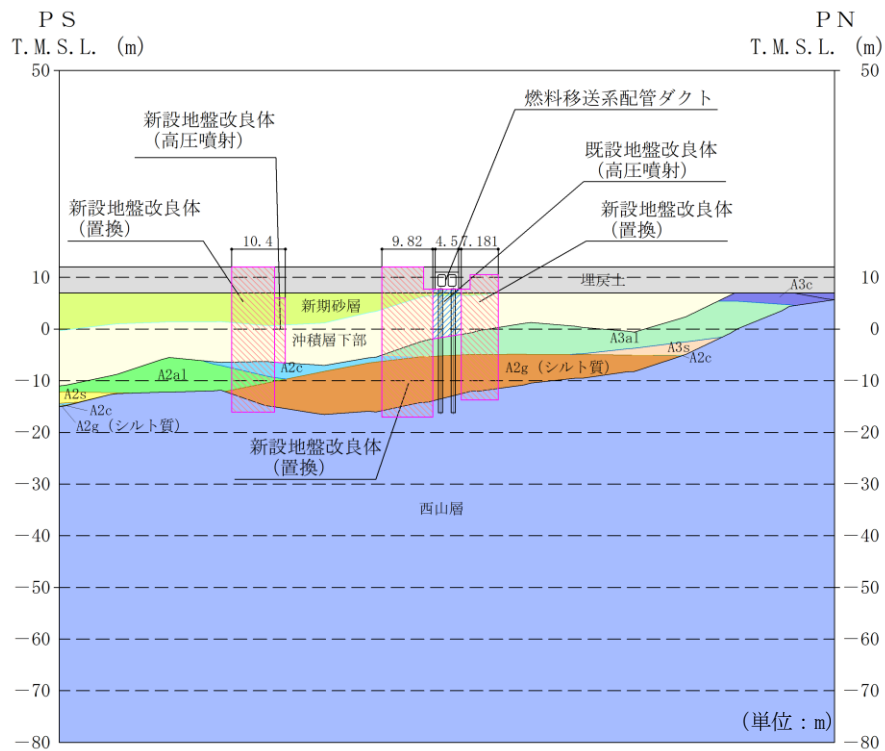
既設/新設	凡例	地盤改良工法
既設地盤改良体		置換 (CD掘削)
新設地盤改良体		置換 (CD掘削)

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

図 2-1 軽油タンク基礎の地盤改良体配置図



(a) 平面図

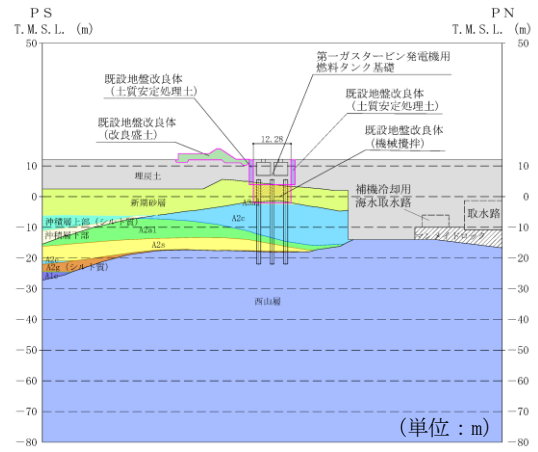
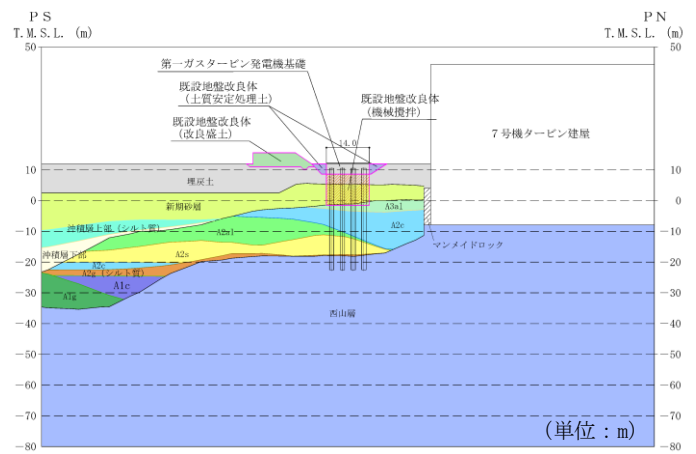
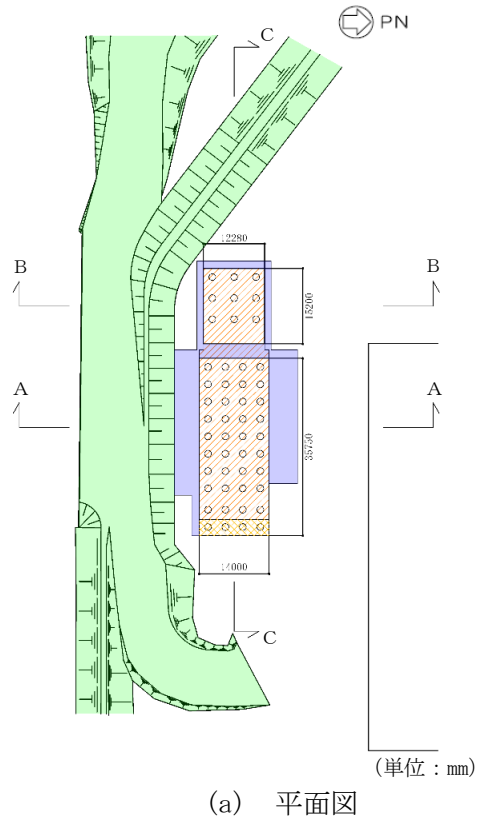


(b) A-A断面図

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 (CD掘削)

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、高圧噴射または置換 (開削) を適用

図 2-2 燃料移送系配管ダクトの地盤改良体配置図



既設/新設	凡例	地盤改良工法
既設地盤改良体		機械攪拌
		土質安定処理土
		改良盛土
新設地盤改良体		機械攪拌

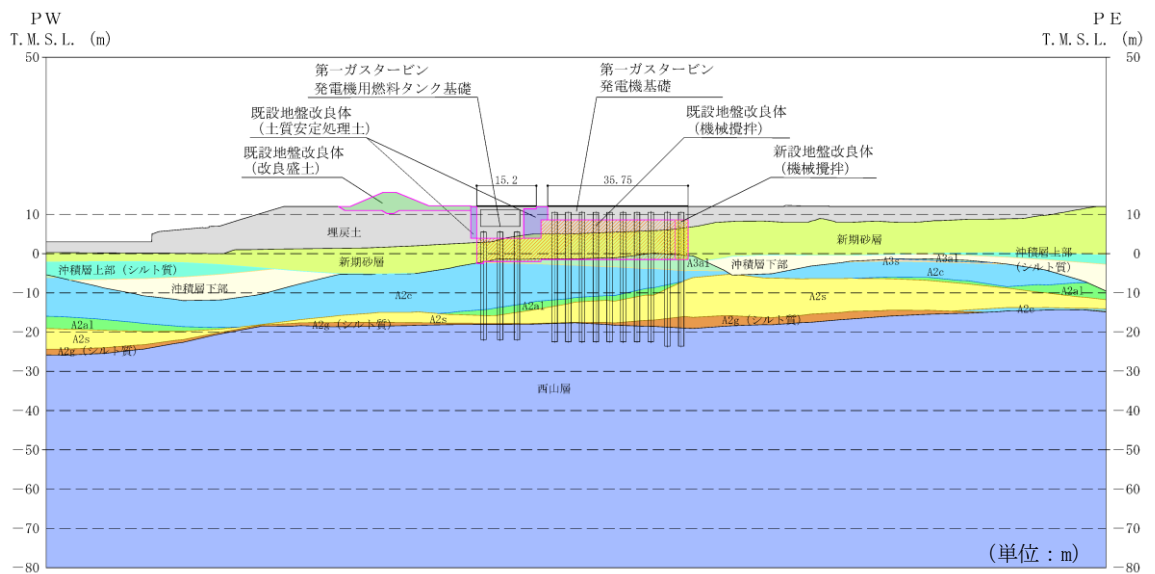
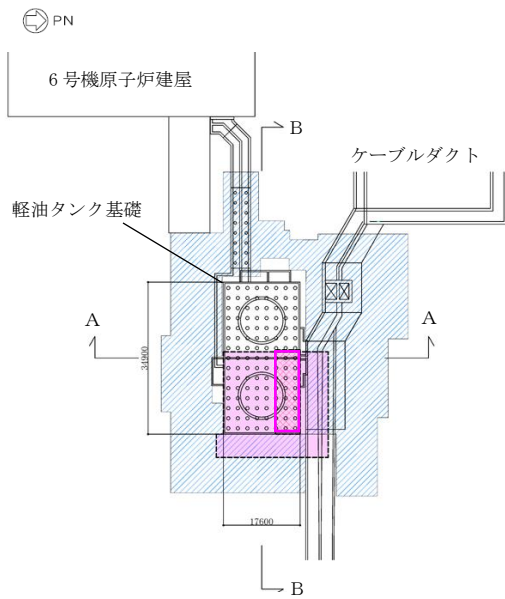
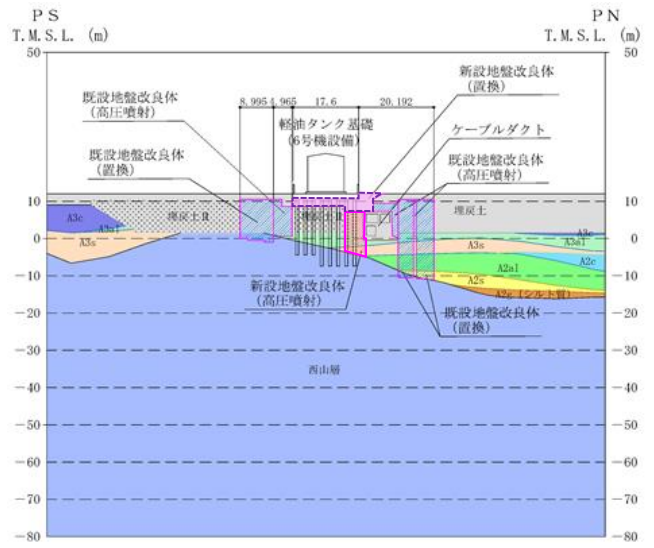


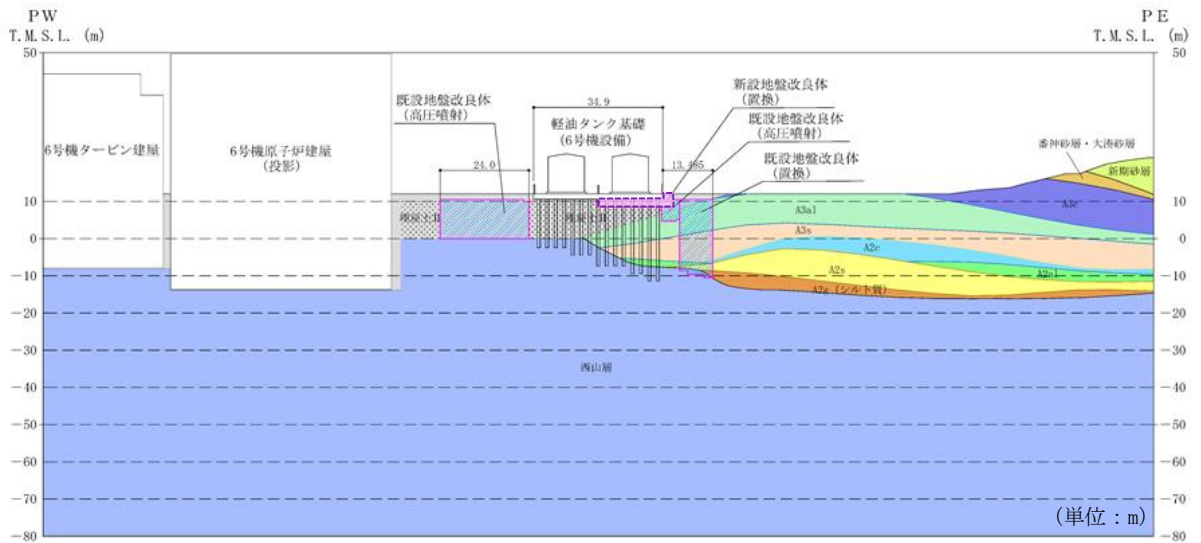
図 2-3 常設代替交流電源設備基礎の地盤改良体配置図



(a) 平面図 (単位：mm)



(b) A-A断面図 (単位：m)

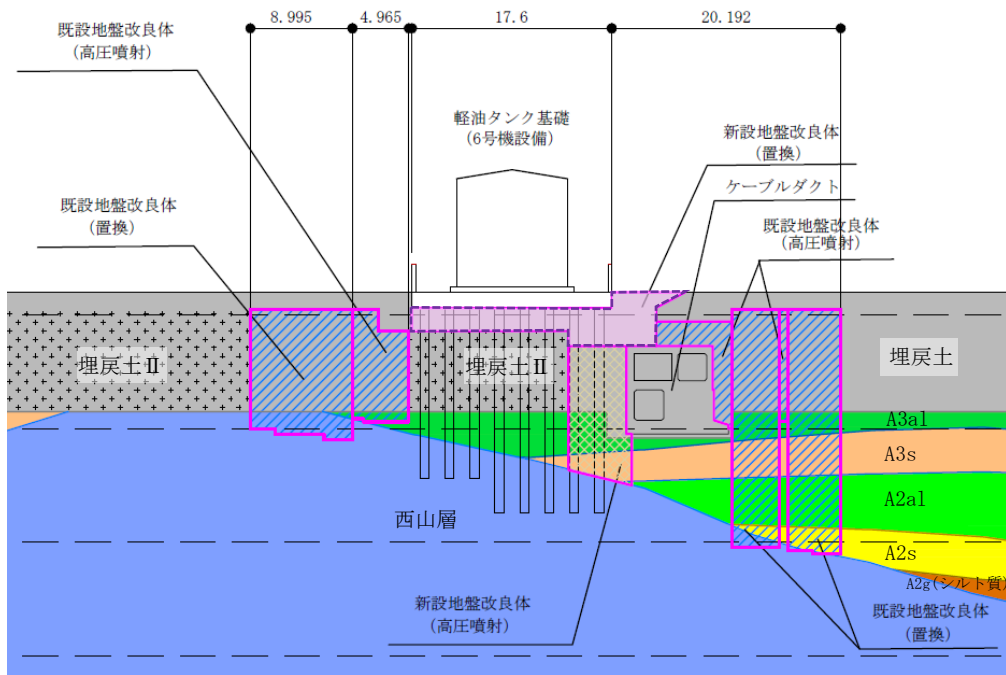


(c) B-B断面図

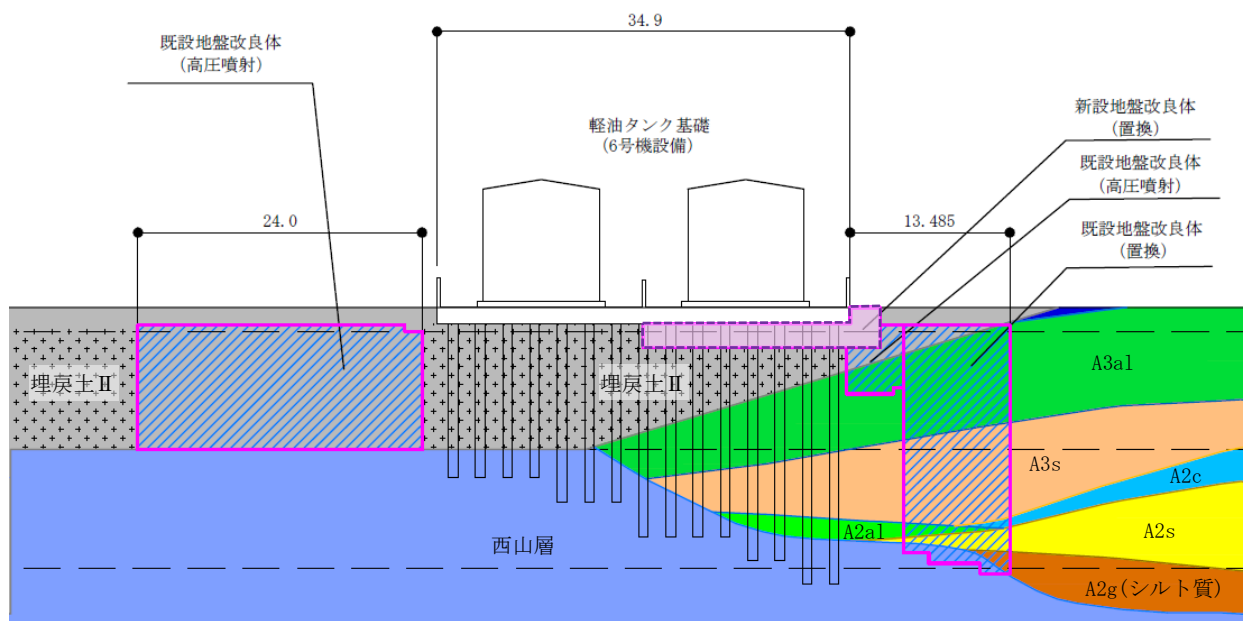
既設／新設	凡例	地盤改良工法
既設地盤改良体		置換 (CD掘削)
新設地盤改良体		置換 (開削)
		高圧噴射

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 2-4 軽油タンク基礎 (6号機設備) の地盤改良体配置図



A-A断面 構造物拡大図



B-B断面 構造物拡大図

- : 新設地盤改良体 (置換) の範囲
- : 新設地盤改良体 (高圧噴射) の範囲

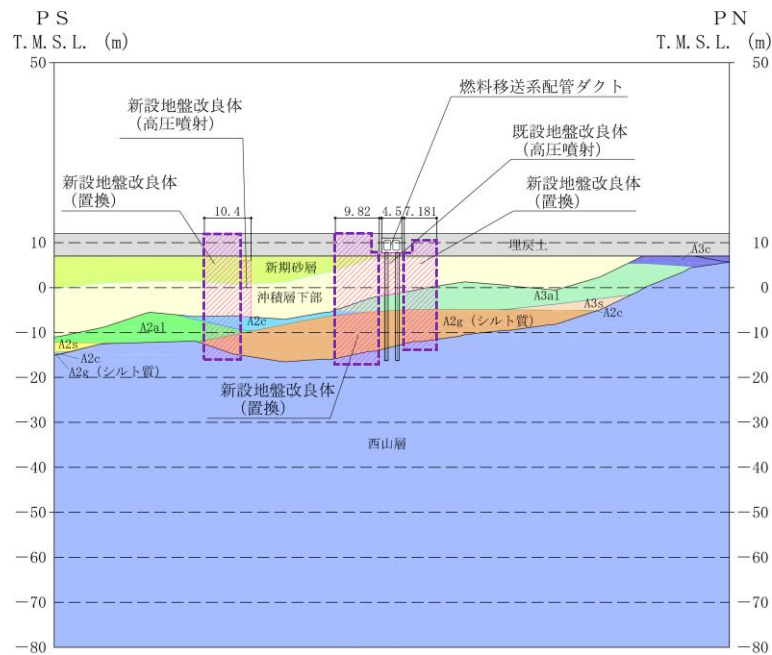
図 2-5 軽油タンク基礎 (6号機設備) の地盤改良体配置図 (構造物拡大図)

3. 検討条件

3.1 評価対象断面及び解析ケースの設定

評価対象断面は、燃料移送系配管ダクトの解析断面のうち、新設地盤改良体が占める割合が大きいA-A断面とする。A-A断面の断面図を図3-1に示す。

解析ケースは、構造物の耐震評価及び設計用床応答曲線作成に用いている解析ケースのうち、最も地盤剛性の高い設定である解析ケース⑤（地盤剛性+1 σ 、液状化パラメータを非適用）とする。また、検討に用いる地震動は、燃料移送系配管ダクトの耐震評価結果が最も厳しく、かつ応答加速度も大きい基準地震動Ss-1++、Ss-1-+、Ss-1+-及びSs-1--の4波とする。



□: 新設地盤改良体（置換工法（CD掘削））の範囲

図3-1 評価対象断面図（A-A断面）

3.2 解析用物性値の設定

燃料移送系配管ダクトの新設地盤改良体は、置換工法（CD掘削）の施工済みの箇所に対し事後調査を実施しており、当調査結果を用いて追加ケースの解析用物性値を設定する。表3-1に効果確認試験から得られたS波速度及び一軸圧縮強度の実測値について、設計値との比較を示す。

追加ケースの解析用物性値は、事後調査結果の平均値から、KK7 補足-024-1「地盤の支持性能について」の既設地盤改良体の解析用物性値の設定方法に基づき、表3-2に示すとおり設定する。

表 3-1 設計値と実測値の比較

試験項目	単位	設計値	実測値*			
			平均値	最大値	最小値	標準偏差
S 波速度	m/s	840	1643	1873	1508	83
一軸圧縮強度	kN/m ²	8000	12750	15664	9729	1959

注記* : S 波速度の試料数は 22, 一軸圧縮強度の試料数は 18 である。

表 3-2 解析用物性値の設定「新設地盤改良体（置換工法（CD掘削）」

パラメータ		基本ケース		追加ケース	
		設定根拠	物性値	設定根拠	物性値
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	既設地盤改良体の物理試験	1.85	物理試験	1.98
	間隙率 n	既設地盤改良体の物理試験	0.48	既設地盤改良体の物理試験	0.48
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ms} (kN/m ²)	設計 S 波速度, 密度に基づき設定	1.31×10^6	PS 検層による S 波速度, 密度に基づき設定	5.34×10^6
	基準平均有効拘束圧 σ_{ms}' (kN/m ²)	慣用値* ¹	98.0	慣用値* ¹	98.0
	ポアソン比 ν	慣用値* ¹	0.33	慣用値* ¹	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	文献に基づき設定* ²	0.050	動的変形特性に基づき設定	0.030
強度特性	粘着力 c (kN/m ²)	設計一軸圧縮強度 q_{ud} と粘着力 c との関係に基づき設定	4000.0	一軸圧縮強度 q_u と粘着力 c との関係に基づき設定	6375.0

注記*1: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定方法 (港湾技研資料 No. 869) (運輸省港湾技術研究所, 平成 9 年 6 月)

*2: 第 2 版 流動化処理土利用技術マニュアル (平成 19 年, 独立行政法人 土木研究所 編)

4. 検討結果

4.1 曲げ照査値の比較

A-A断面，解析ケース⑤，基準地震動 Ss-1++による鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査結果の比較を表 4-1 に，鋼管杭の曲げ軸力照査結果の比較を表 4-2 に示す。

表 4-1 鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力照査結果の比較

検討ケース	照査用層間変形角* R_d	限界層間変形角 R_u	照査値 R_d/R_u
基本ケース	2.20×10^{-4}	1.0×10^{-2}	0.03
追加ケース	2.16×10^{-4}	1.0×10^{-2}	0.03

注記* : 照査用層間変形角 R_d = 最大層間変形角 R × 構造解析係数 γ_a

表 4-2 鋼管杭の曲げ軸力照査結果の比較

検討ケース	照査用曲率* ϕ_d	終局曲率 ϕ_u	照査値 ϕ_d/ϕ_u
基本ケース	7.10×10^{-4}	1.30×10^{-2}	0.06
追加ケース	4.69×10^{-4}	1.43×10^{-2}	0.04

注記* : 照査用曲率 ϕ_d = 発生曲率 × 構造解析係数 γ_a

4.2 せん断力照査値の比較

A-A断面，解析ケース⑤，基準地震動Ss-1++による鉄筋コンクリート部材のせん断力照査結果の比較を表4-3～表4-6に，鋼管杭のせん断力照査結果の比較を表4-7に示す。

表4-3 頂版のせん断力照査結果の比較

検討ケース	照査用せん断力* V_d (kN)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
基本ケース	99	548	0.19
追加ケース	98	547	0.18

注記* : 照査用せん断力 V_d =発生せん断力×構造解析係数 γ_a

表4-4 側壁のせん断力照査結果の比較

検討ケース	照査用せん断力* V_d (kN)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
基本ケース	115	580	0.20
追加ケース	109	573	0.20

注記* : 照査用せん断力 V_d =発生せん断力×構造解析係数 γ_a

表4-5 隔壁のせん断力照査結果の比較

検討ケース	照査用せん断力* V_d (kN)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
基本ケース	119	393	0.31
追加ケース	118	392	0.31

注記* : 照査用せん断力 V_d =発生せん断力×構造解析係数 γ_a

表4-6 底版のせん断力照査結果の比較

検討ケース	照査用せん断力* V_d (kN)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
基本ケース	168	513	0.33
追加ケース	146	421	0.35

注記* : 照査用せん断力 V_d =発生せん断力×構造解析係数 γ_a

表4-7 鋼管杭のせん断力照査結果の比較

検討ケース	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
基本ケース	436	1677	0.26
追加ケース	260	1677	0.16

注記* : 照査用せん断力 Q_d =発生せん断力×構造解析係数 γ_a

4.3 加速度応答スペクトルの比較

基本ケースと追加ケースの加速度応答スペクトル及び燃料移送系配管ダクトの設計用床応答曲線Ⅱの比較を図 4-1 に示す。なお、燃料移送系配管ダクトに間接支持される設備は全て設計用床応答曲線Ⅱを用いて耐震評価を実施している。

基本ケースと追加ケースの加速度応答スペクトルは、基準地震動 S_s-1++ , S_s-1-+ , S_s-1+- , S_s-1-- の 4 波の各解析において、図 4-2 に示す 6 節点の各加速度応答スペクトル (減衰定数 2%) を包絡したものである。また、図中に基本ケースの全ての基準地震動 S_s の加速度応答スペクトル (上記 6 節点包絡) を参考として示す。基本ケースと追加ケースの加速度応答スペクトルを比較した結果、水平方向については基本ケースと追加ケースで概ね一致していることを確認した。鉛直方向については、短周期側で追加ケースが基本ケースを下回る傾向があることを確認した。

また、追加ケースの加速度応答スペクトルと設計用床応答曲線Ⅱを比較すると、全周期帯で追加ケースの加速度応答スペクトルが設計用床応答曲線Ⅱを下回っており、燃料移送系配管ダクトが間接支持する設備の耐震評価に影響がないことを確認した。

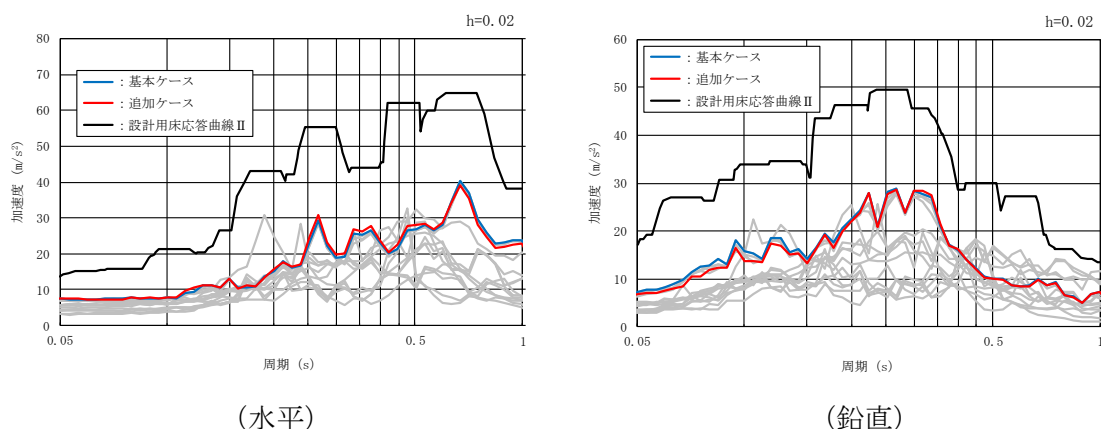


図 4-1 加速度応答スペクトルと設計用床応答曲線Ⅱの比較

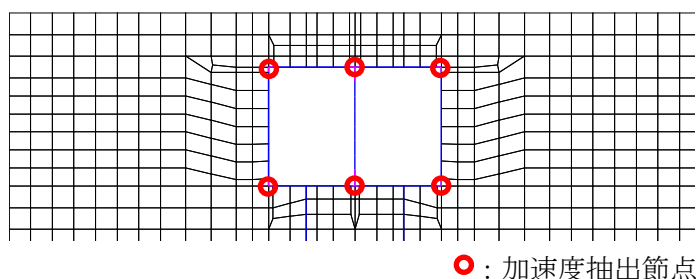


図 4-2 加速度抽出節点

5. まとめ

本項では、新設地盤改良体の解析用物性値を事後調査結果に基づき設定し、構造物の耐震評価、及び機器・配管系に対する応答加速度に与える影響を確認した。

構造物の耐震評価の観点では、基本ケースと追加ケースの耐震評価結果を比較した結果、追加ケースでは地盤改良体の強度が増したことから構造物の変形抑制効果が高まり、照査値が小さくなる傾向にあることを確認した。鉄筋コンクリート部材の底版については照査値が大きくなる結果となったが、基本ケースとの差は 0.02 であり、許容限界に対し十分余裕があることを確認した。

機器・配管系に対する応答加速度の観点では、基本ケースと追加ケースの加速度応答スペクトルを比較した結果、水平方向については基本ケースと追加ケースで概ね一致していることを確認した。鉛直方向については、短周期側で追加ケースが基本ケースを下回る傾向があることを確認した。さらに、追加ケースの加速度応答スペクトルと燃料移送系配管ダクトの設計用床応答曲線Ⅱを比較した結果、全周期帯で追加ケースの加速度応答スペクトルが設計用床応答曲線Ⅱを下回っていることから、燃料移送系配管ダクトが間接支持する設備の耐震評価に影響がないことを確認した。

なお、追加ケースの解析用物性値は、現時点で得られている事後調査結果の平均値から設定している。表 3-1 に示すとおり、事後調査結果は設計値に対し S 波速度で約 2 倍、一軸圧縮強度で約 1.6 倍に増大しているが、耐震評価については照査値が小さくなる傾向にあり、加速度応答スペクトルについては基本ケースと追加ケースの加速度応答スペクトルが同等であり、設計用床応答曲線Ⅱに対しても十分余裕があることから、これらのパラメータにばらつきを見込んだとしても、構造物及び機器・配管系の耐震安全性に影響を与える変動はないと判断した。