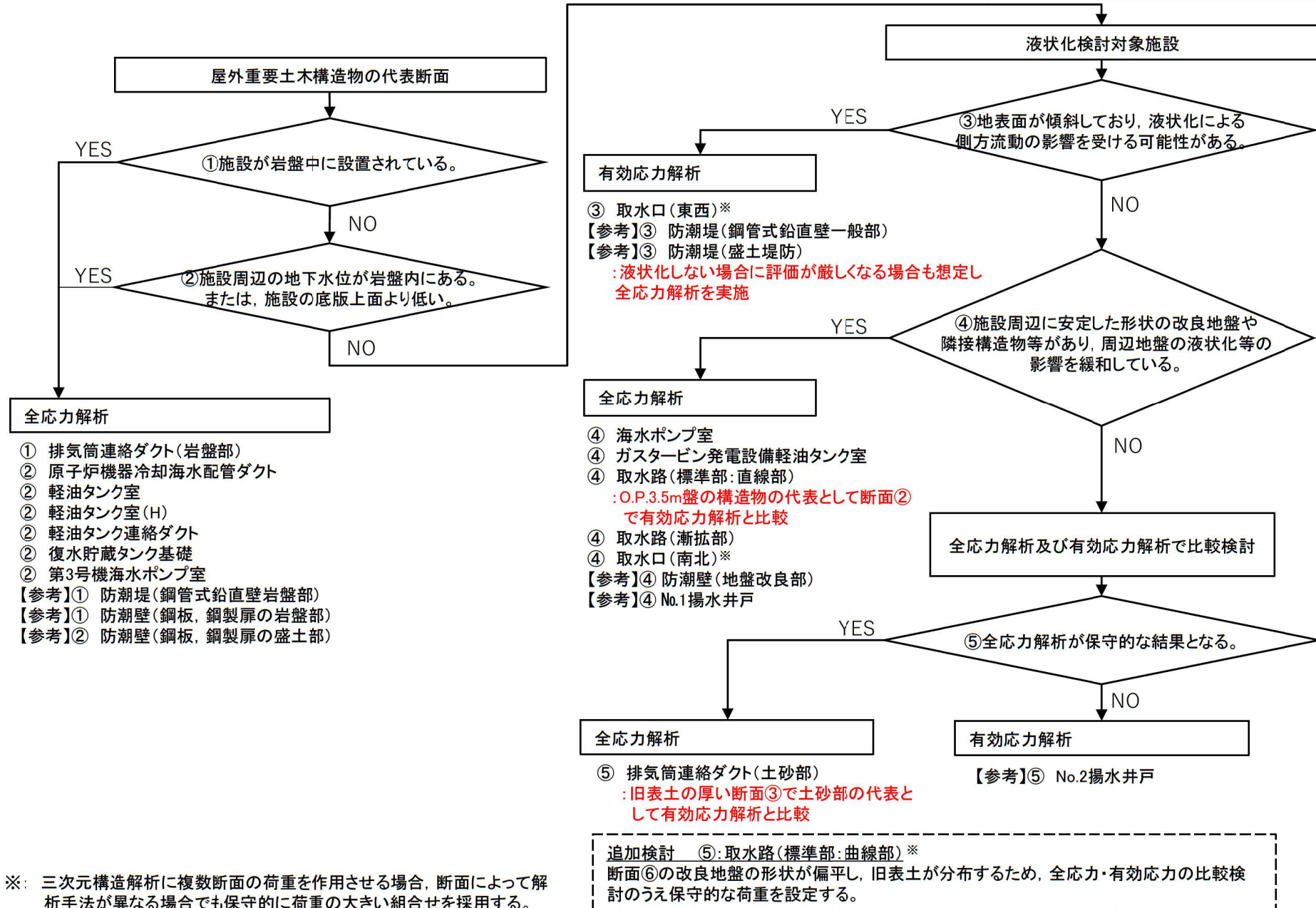


屋外重要土木構造物の解析手法の選定フローについて



※: 三次元構造解析に複数断面の荷重を作用させる場合、断面によって解析手法が異なる場合でも保守的に荷重の大きい組合せを採用する。

構造物毎の解析手法の選定結果(1/5)

解析手法の選定フローに基づき検討した結果を以下に示す。

【屋外重要土木構造物等(1/2)】

構造物	断面	弱軸	① 岩盤	② 水位 低	③ 傾斜 あり	④ 地盤 改良等	⑤ 解析手法の 比較検討	備考	申請
原子炉機器 冷却海水 配管ダクト	水平部	○	×	○	—	○			全応力
	鉛直部	○	×	○	—	○			全応力
排気筒連絡 ダクト	岩盤部	○	○		—	—			全応力
	土砂部 断面① 断面② 断面③	○	×	×	—	×	液状化強度が小さい旧表土が分布する断面③を代表に有効応力解析と比較検討し、耐震性のクリティカルとなるせん断照査値が全応力解析の方が厳しいため、全応力解析とする。	・設計水位と実水位の差が大きくなる可能性のある断面①において水位が低い場合の影響検討を実施	全応力
	軽油タンク連絡ダクト	○	×	○	—	—			全応力
取水路	標準部 (直線)	○	×	×	—	○		・O.P.3.5m盤の構造物(取水路, 取水口)の代表として、土被りが小さく、液状化しやすい断面②で液状化に対する改良範囲の十分性を確認	全応力
	標準部 (曲線)				—	△	断面⑥の改良地盤が扁平のため比較検討し、保守的な荷重を算定		有効 応力
	漸拡部	○	×	×	—	○			全応力
海水 ポンプ室	横断	○	×	×	—	○			全応力
	縦断		×	×	—	○			全応力

構造物毎の解析手法の選定結果(2/5)

解析手法の選定フローに基づき検討した結果を以下に示す。

【屋外重要土木構造物等(2/2)】

構造物	断面	弱軸	① 岩盤	② 水位 低	③ 傾斜 あり	④ 地盤 改良等	⑤ 解析手法の 比較検討	備考	申請
軽油 タンク室	南北	○	×	○	—	—			全応力
	東西		×	○	—	—			全応力
軽油 タンク室(H)	南北		×	○	—	—			全応力
	東西	○	×	○	—	—			全応力
取水口	南北	○	×	×	—	○		・ O.P.3.5m盤の構造物(取水路, 取水口)の代表として, 土被りが小さく, 液状化しやすい取水路②断面で液状化に対する地盤改良範囲の十分性を確認	全応力
	東西		×	×	○	—			有効応力
復水貯蔵 タンク基礎	南北	○	×	○		—			全応力
	東西	○	×	○		—			全応力
ガスタービン 発電設備軽 油タンク室	南北		×	×	—	○			全応力
	東西	○	×	×	—	○			全応力
第3号機 海水ポンプ室	横断	○	×	○	—	—			全応力
	縦断		×	○	—	—			全応力

構造物毎の解析手法の選定結果(3/5)

解析手法の選定フローに基づき検討した結果を以下に示す。

【津波防護施設】

構造物	断面	弱軸	① 岩盤	② 水位 低	③ 傾斜 あり	④ 地盤 改良等	⑤ 解析手法の 比較検討	備考	申請
防潮堤	鋼管式鉛直壁 (一般部)	○	×	×	○	—		・水位が低い場合の影響検討を実施	有効応力
	鋼管式鉛直壁 (岩盤部)	○	○	—	—	—			全応力
	盛土堤防	○	×	×	○	—		・水位が低い場合の影響検討を実施 (鋼管式鉛直壁(一般部)で代表)	有効応力
防潮壁	鋼板(岩盤部)	○	○	—	—	—			全応力
	鋼板(盛土部 <地下水位 岩盤内>)	○	×	○	—	—			全応力
	鋼板(盛土部 <地盤改良>)	○	×	×	—	○			全応力
	鋼桁		×	×	—	○			全応力
	鋼製扉(岩盤部)	○	○	—	—	—			全応力
	鋼製扉(盛土部 <地下水位 岩盤内>)	○	×	○	—	—			全応力
	鋼製扉(盛土部 <地盤改良>)	○	×	×	—	○			全応力

構造物毎の解析手法の選定結果(4/5)

解析手法の選定フローに基づき検討した結果を以下に示す。

【津波防護施設／地下水位低下設備】

構造物	断面	弱軸	① 岩盤	② 水位 低	③ 傾斜 あり	④ 地盤 改良等	⑤ 解析手法の 比較検討	備考	申請
取放水 路流路 縮小工	1号機取水路	○	○	—	—	—			全応力
	1号機放水路	○	○	—	—	—			全応力
地下水位低下 設備	揚水井戸 NO.1		×	×	—	○		・解析用断面図はp.9参照	全応力
	揚水井戸 NO.2		×	×	×	×	全応力解析と比較の結果、構造物への影響が大きい有効応力解析とする。	・解析用断面図はp.9参照	有効応力
	ヒューム管	○	○	—	—	—			全応力
	鋼管	○	○	—	—	—			全応力
	接続柵		○	—	—	—			全応力
浸水防 止蓋の 間接支 持	揚水井戸(第3号 機海水ポンプ室 防潮堤区画内)	○	×	×	—	○			全応力
	3号機 補機 放水 ピット	南北	○	×	○	—	—		全応力
		東西		×	○	—	—		全応力

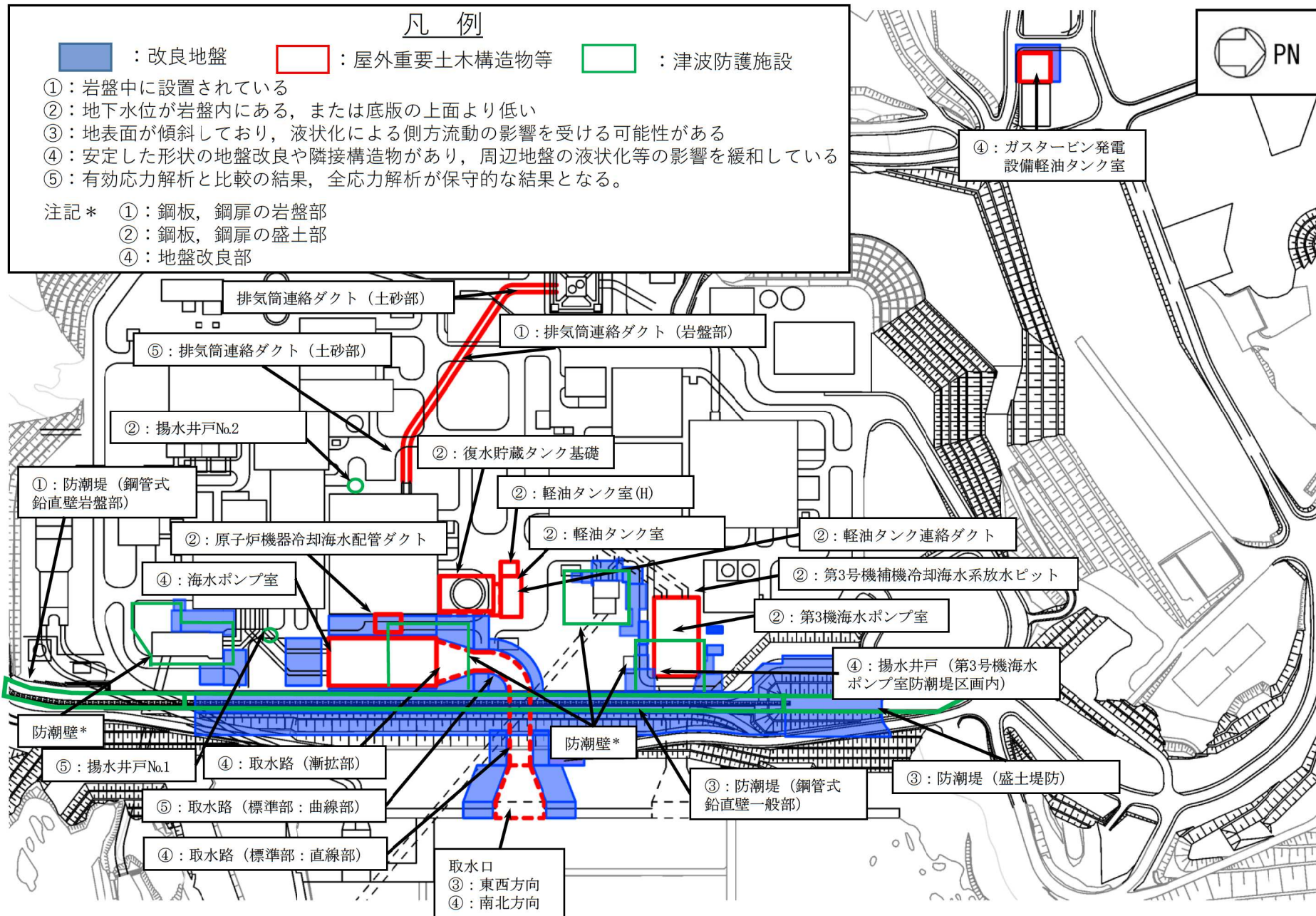
構造物毎の解析手法の選定結果(5/5)

p.2～p.5の検討結果から、全応力解析と有効応力解析を実施する構造物と評価の概要を以下に示す。

【全応力解析と有効応力解析を実施する構造物まとめ】

構造物	断面	評価条件等	備考1	備考2
排気筒連絡ダクト	土砂部 断面③	<ul style="list-style-type: none"> 申請は全応力解析。 比較検討のため実施する有効応力解析は、全応力解析と同様の水位(設計用地下水位)とする。 		
取水路	標準部 (曲線)	<ul style="list-style-type: none"> 申請は有効応力解析。 比較検討のため実施する全応力解析は、有効応力解析と同様の水位(設計用地下水位)とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 断面⑥の改良地盤が偏平のため比較検討し、保守的な荷重を算定 	
	標準部 (直線)	<ul style="list-style-type: none"> 申請は全応力解析。 比較検討のため実施する有効応力解析は、全応力解析と同様の水位(設計用地下水位)とする。 	<ul style="list-style-type: none"> O.P.3.5m盤の構造物(取水路, 取水口)の代表として、土被りが小さく、液状化しやすい断面②で液状化に対する改良範囲の健全性を確認 	
地下水位低下設備	揚水井戸 NO.2	<ul style="list-style-type: none"> 申請は有効応力解析。 比較検討のため実施する全応力解析は、有効応力解析と同様の水位(設計用地下水位)とする。 		設計用地下水位はp.9参照
防潮堤	鋼管式鉛直壁 (一般部) 盛土堤防	<ul style="list-style-type: none"> 申請は有効応力解析。 液状化しない場合に評価が厳しくなる場合も想定し実施する全応力解析は、有効応力解析と同様の水位(設計用地下水位)とする。 		設計用地下水位はp.10参照

解析手法と構造物の配置図



屋外重要土木構造物の解析手法の選定フローについて

地盤の液状化特性

- OP14.8m盤の盛土は基準地震動Ssに対し、設計上、液状化(過剰間隙水圧比95%:繰返し軟化)は発生しない。
- OP14.8m盤の旧表土は基準地震動Ssに対し、設計上、敏感に過剰間隙水圧が上昇し、液状化(過剰間隙水圧比95%:繰返し軟化)が発生する。
- OP3.5m盤の盛土は基準地震動Ssに対し、設計上、過剰間隙水圧は上がるが、ねばり強い変形を示す。ただし、地下水位が高いことから、詳細確認が必要。
- OP3.5m盤の旧表土は基準地震動Ssに対し、設計上、敏感に過剰間隙水圧が上昇し、液状化(過剰間隙水圧比95%:繰返し軟化)が発生する。

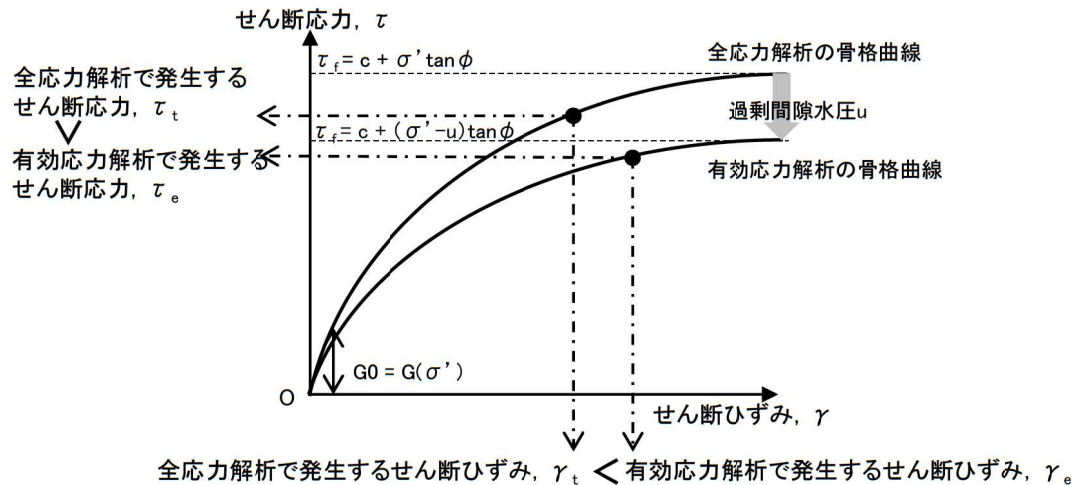
屋外重要土木構造物等の耐震性

- 屋外重要土木構造物等は、岩盤上に設置され、周囲を盛土で埋め戻された地中構造物である。
- 屋外重要土木構造物等の耐震性に支配的な要因は、土圧と慣性力である。
- 地中構造物の耐震性に支配的な要因は、土圧であり、ピット構造の場合は、慣性力及び土圧が支配的な要因である。
- 土圧の大きさは、地盤のせん断応力の大きさに相関する。

【参考】杭基礎やシャフト

- 防潮堤、防潮壁、および地下水位低下設備揚水井戸の鋼管杭や鋼製シャフト等は岩盤上、あるいは岩盤内に設置され、周囲を盛土や改良地盤で囲まれた地中構造物である。
- 鋼管杭や鋼製シャフト等の耐震性に關し支配的な要因は地盤変形である。
- 地盤変形の大きさと地盤のせん断ひずみの大きさには相関性がある。

- 屋外重要土木構造物等の耐震性が厳しくなる地盤は、せん断応力が大きく作用する地盤である。
- 構造物周辺の地盤が液状化すると、せん断応力は小さくなり、構造物の耐震裕度は大きくなることから、せん断応力を大きく評価する全応力解析の方が保守的な解析手法と考えられる。
- 周辺地盤が傾斜しており、地盤の剛性低下により片押し状態となる場合は、地盤の液状化により構造物の耐震性が厳しくなる可能性があるため、有効応力解析の方が保守的な解析手法となると考えられる。



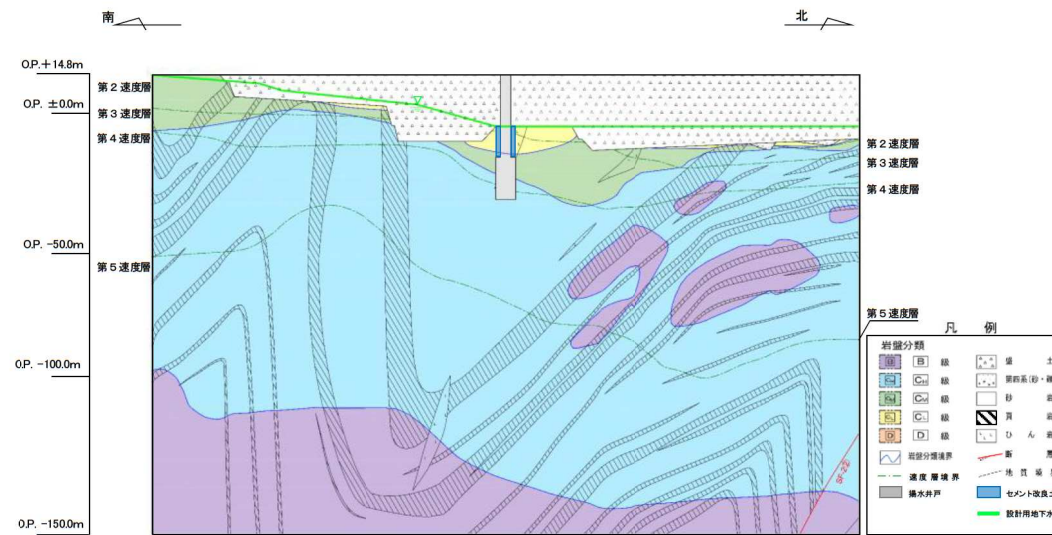
全応力解析における地下水位の高低に対する考察

全応力解析において盛土の地下水位が構造物の耐震性に及ぼす影響について、支配的な要因である土圧に着目して考察した結果、**地下水位が高い方が単位体積重量が増加する分、土圧が大きくなり、耐震設計上厳しい評価になると見込まれる。**

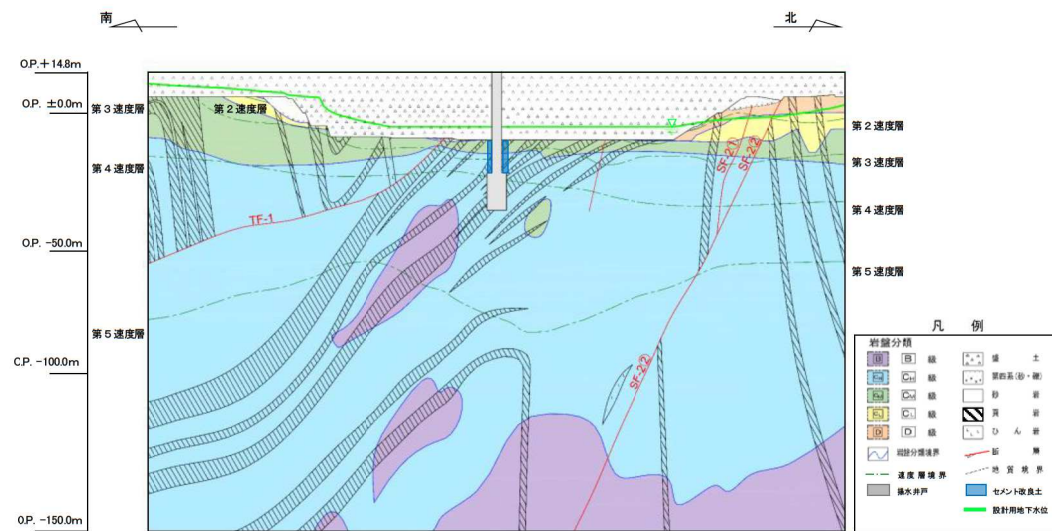
地下水位が高い方が、発生せん断応力は小さくなると想定されるが、土被り厚が大きい場合、低下度の影響は小さいと思われる。

地下水位	地盤		躯体
	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断応力 (応力-ひずみ)	加速度
高い	飽和: 20.6	小さい	同程度
低い	湿潤: 18.6	大きい	同程度
考察	地下水位が高い方が重量が10%大きく土圧が大きくなる。	地下水位が低い方がせん断応力は大きくなる。(土被りが大きいと剛性が大きいひずみ領域になるため、差異は小さくなる。)	構造物は岩盤上なので差異は小さい。または、単位体積重量が大きく周囲の地盤の拘束圧が大きい地下水位高の方が大きい。

(参考) 地下水位低下設備(揚水井戸)の解析用断面図

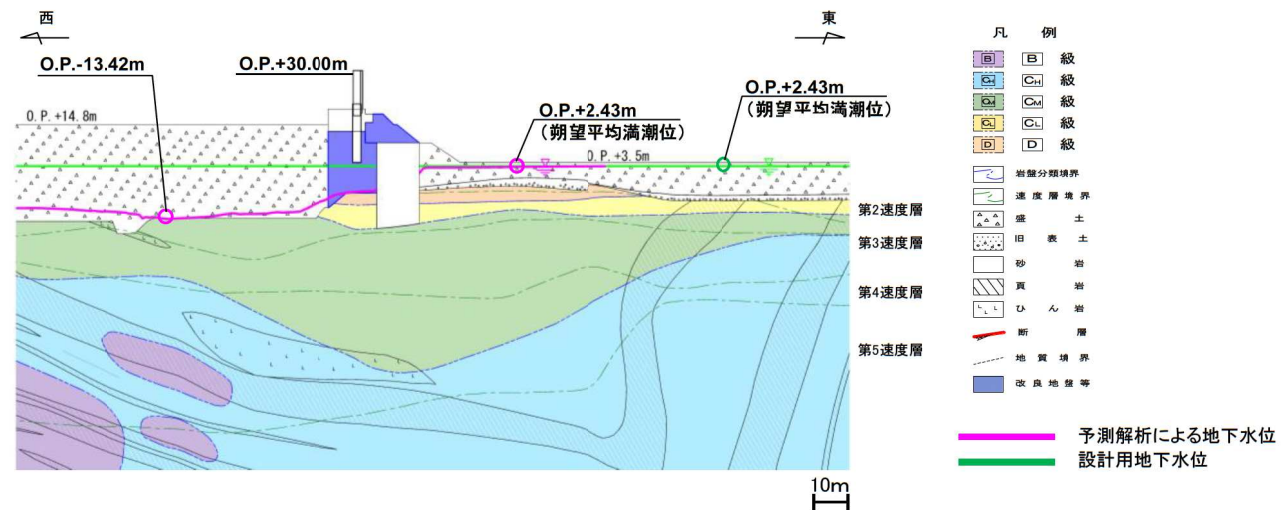


No.1揚水井戸

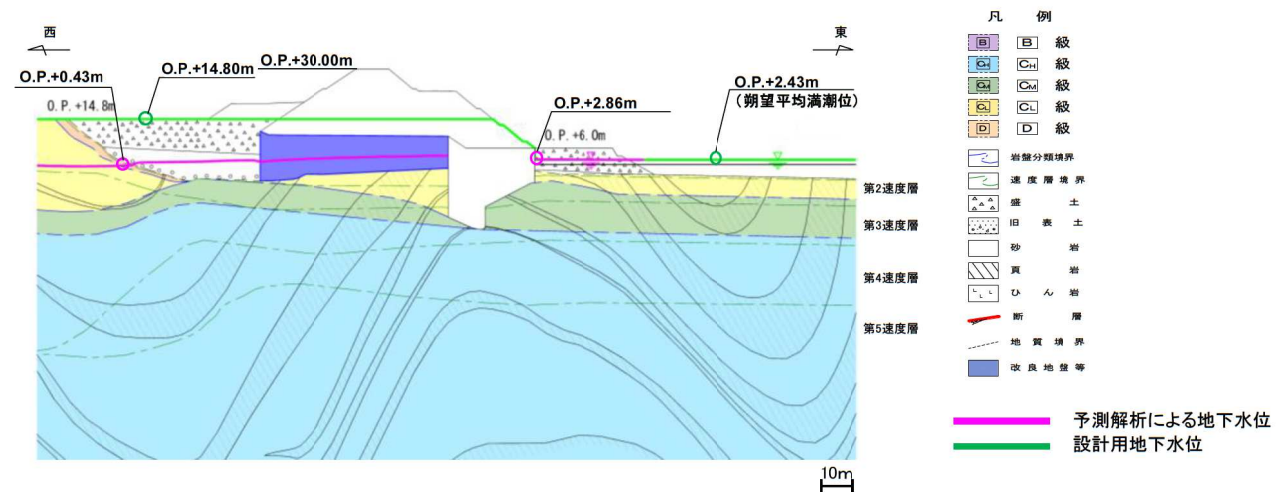


No.2揚水井戸

(参考) 防潮堤の設計用地下水位の設定例



防潮堤(鋼管式鉛直壁)の設計用地下水位(一般部①)



防潮堤(盛土堤防)の設計用地下水位

注) 防潮堤の設計用地下水位の設定の考え方や上記以外の断面における設計用地下水位の設定は、「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」を参照

1. ヒアリングでのコメント

- 水位が低い場合の影響確認方針について、3パターンを抽出しているプロセスを整理するとともに、各パターンに対する具体的な検討方針や、液状化の可能性を踏まえた土木構造物における有効応力解析実施の考え方を掘り下げて説明すること。(2021/1/13)

(関連コメント)

- 地下水位を高く設定することが保守的にならない事象を抽出した上で、その事象に対して設計において考慮する地下水位の考え方を整理して説明すること。(2020/10/5)
- 屋外重要土木構造物全般に関し、地下水位の高低が及ぼす評価への影響について、今後まとめて説明すること。(2020/11/11)
- 地下水位が低い場合の耐震安全性への影響確認について、評価対象施設と機能維持の方針を具体的に説明すること。(2020/11/18)

2. 対応方針

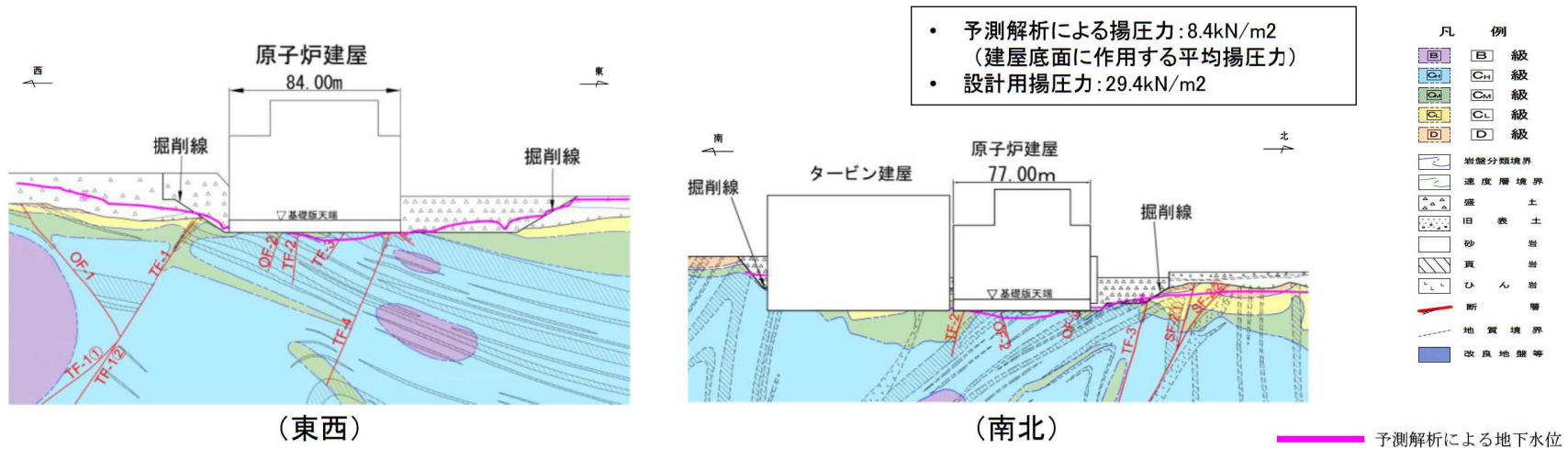
- 女川原子力発電所においては、液状化検討対象施設を幅広く抽出するために、水位が高めに算出されるような解析条件にて浸透流解析を実施し、これを上側に包絡するよう設計用地下水位を設定している。
- これに対し、地下水位低下設備の信頼性向上(多重化等)により、平常時の地下水位は設計用地下水位より低くなる可能性がある。
- 地下水位が低い場合に起こる現象としては、構造物(基礎版等)に作用する水圧の減少、地盤応答の変化(単位体積重量の変化、液状化を含めた周辺地盤の挙動の変化)、構造物周辺に水位差が生じることが考えられる。
- アクセスルートについては、液状化による段差や浮上りを評価するため、地下水位が高いことは保守的な評価となる。
- このことを踏まえ、地下水位が低い場合に耐震評価へ影響を与える可能性のある事象として以下の3パターンを抽出し、各パターンに対する影響検討を行う方針とする。
 - パターンA. 建屋基礎版等において、揚圧力の低減により、応力分布や応答の違いが想定されるケース
 - パターンB. 地下水の分布によって構造物周辺の地盤の応答に違いが生じると想定されるケース
 - パターンC. 構造物の両側面に作用する水位差が大きく、偏圧の影響が想定されるケース
- なお、影響検討に当っては、平常時に想定される地下水位を浸透流解析にて予測し、現実的な水位を確認する。
【解析実施中、今後説明予定】

【関連】 地下水位が低い場合の影響検討に係る対応方針について
各パターンにおける影響検討方針

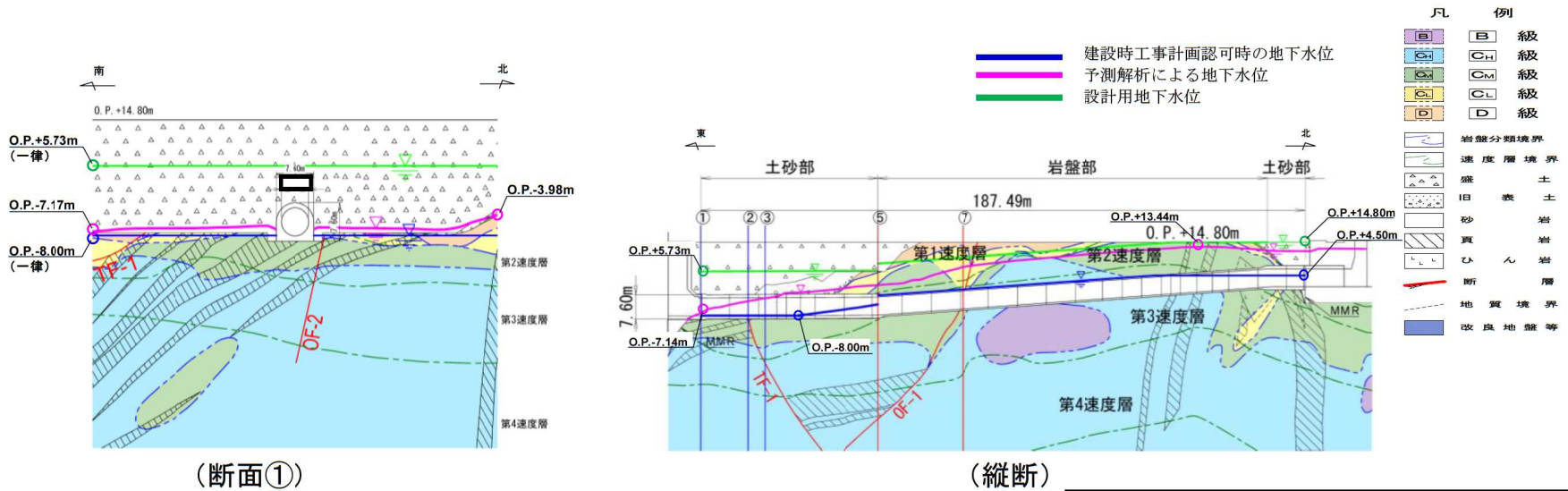
水位が低い場合に耐震設計へ影響を与える事象(パターン)	耐震設計へ影響する可能性がある施設	影響検討内容			
		検討対象施設	選定理由	検討条件等	申請
パターンA (揚圧力への影響)	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋 制御建屋 第3号機海水熱交換器建屋 緊急時対策建屋 緊急用電気品建屋 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋直下のドレーン(鋼管)新設により、平常時の建屋基礎版へ作用する揚圧力は大きく低減し、地震時の評価のうち地震力下向きの場合の評価が厳しくなる可能性がある。 設計用地下水位と浸透流解析結果の差が最も大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 浸透流解析結果を踏まえて揚圧力を0とした場合の地震力下向きの解析を実施して応力分布等への影響を確認する。(設計用揚圧力は29.4kN/m²) 	全応力 (静的弾塑性解析)
パターンB (地盤応答への影響)	<ul style="list-style-type: none"> 排気筒連絡ダクト(土砂部) 防潮堤 地下水位低下設備 揚水井戸No.2 浸水防止蓋の間接支持 NO.13揚水井戸 	<ul style="list-style-type: none"> 排気筒連絡ダクト(土砂部) 	<ul style="list-style-type: none"> 縦断方向の水位分布も考慮し設計用地下水位を設定する線状構造物であり、原子炉建屋接続部の断面①において、設計用地下水位と実水位の差が大きくなる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 断面①の地下水位を岩盤表面まで下げた全応力解析を実施する。 	全応力
パターンC (偏圧の影響)	<ul style="list-style-type: none"> 排気筒連絡ダクト(土砂部) 防潮堤 鋼管式鉛直壁(一般部) 盛土堤防 	<ul style="list-style-type: none"> 排気筒連絡ダクト(土砂部) 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤上に設置した線状構造物であり、地下水位を堰き止め、偏水圧が生じる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 断面①において、構造物片側の地下水位を頂版高さ、もう一方の地下水位を岩盤表面とした全応力解析を実施する。 	全応力
		<ul style="list-style-type: none"> 防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部)) 	<ul style="list-style-type: none"> 設置場所の特徴により防潮堤の前背面での盛土+旧表土の高さが異なるため、地震時に液状化の影響で地盤が片押しになる可能性がある。 設計用地下水位は、設置変更許可段階における構造成立性確認と同様(山側・海側ともに朔望平均満潮位)としているため、特に山側において浸透流解析による解析水位との差が顕著となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 山側水位を岩盤表面まで下げた有効応力解析を実施し、照査値への影響を確認する。 	有効応力

注) 原子炉建屋の解析水位と設計用揚圧力、および排気筒連絡ダクト(土砂部)の設計用地下水位は次頁を参照。
防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部))の設計用地下水位はp.10を参照。

【関連】 地下水位が低い場合の影響検討に係る対応方針について 検討対象施設の設計用地下水位(1/2)



原子炉建屋の解析水位と設計用揚圧力



(断面①)

(縦断)

排気筒連絡ダクト(土砂部)の設計用地下水位

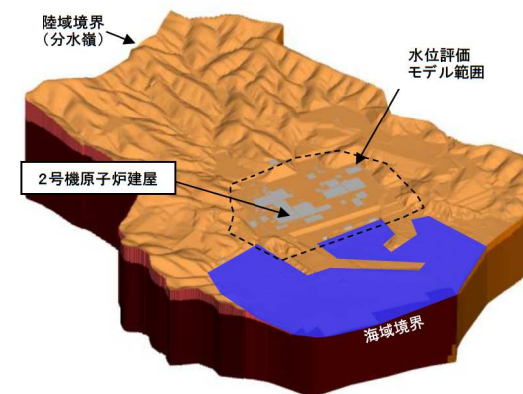
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

【関連】 地下水位が低い場合の影響検討に係る対応方針について 浸透流解析を用いた平常時水位の予測について

- ▶ 広域モデル(モデルの妥当性確認用)をベースに、将来的な安全対策工事を反映した「平常水位予測モデル」を作成し、平均的な降雨条件を付与した場合の解析水位の分布を確認する。【解析実施中、今後説明予定】

平常水位予測モデルの概要

項目	【参考】広域モデル	平常水位予測モデル
1.目的	<ul style="list-style-type: none"> モデル化の妥当性を確認(観測結果の再現性を確保) 	<ul style="list-style-type: none"> 設計用地下水位に対して想定される水位が低い場合の影響確認におけるインプットとして、安全対策工事完了後に想定される実際の水位を推定すること
2.解析コード	<ul style="list-style-type: none"> GETFLOWS Ver.6.64.0.2 	
3a.解析領域	<ul style="list-style-type: none"> 分水嶺を山側境界とし水位評価モデルを包絡する範囲 	
3b.格子数	<ul style="list-style-type: none"> 平面格子数:約33.4万 総格子数:約1600万 格子寸法:0.5~6m程度(構造物近傍は最小0.5m程度,山側領域は3~6m程度) 	
4.解析種別	<ul style="list-style-type: none"> 非定常解析 	<ul style="list-style-type: none"> 定常解析
5a.検証期間	<ul style="list-style-type: none"> 2006-2007年, 2013-2014年 	
5b.気象条件	<ul style="list-style-type: none"> 降水量・気温・日射量・相対湿度・風速:構内観測所データ(欠測値は,周辺気象庁データから欠測補間) 	<ul style="list-style-type: none"> 既往の観測記録に基づく平均的な降雨条件を定常的に付与 3.57mm/日(2001-2018年の日平均)
5c.蒸発散	<ul style="list-style-type: none"> 定常状態:ハーモン法*1 非定常状態:熱収支法 	
6a.モデル(地形)	<ul style="list-style-type: none"> 検証期間に対応した状態 	<ul style="list-style-type: none"> 安全対策工事完了段階に対応した状態
6b. " (地盤)	<ul style="list-style-type: none"> 検証期間に対応した状態 	<ul style="list-style-type: none"> 安全対策工事完了段階に対応した状態(施設周辺の地盤改良を考慮)
6c. " (構造物)	<ul style="list-style-type: none"> 検証期間に対応した状態 	<ul style="list-style-type: none"> 安全対策工事完了段階に対応した状態
6d. " (ドレーン)	<ul style="list-style-type: none"> 既設の全範囲を管路として考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 既設及び新設の全範囲を管路として考慮
7.境界条件	<ul style="list-style-type: none"> 実態に則した設定 <ul style="list-style-type: none"> 山側:閉境界 海側:平均潮位に水位固定 ドレーン:ドレーン計画高に水位固定 	
8.透水係数	<ul style="list-style-type: none"> 試験平均値 	
9.有効間隙率	<ul style="list-style-type: none"> 文献値*2 	
10.粗度係数	<ul style="list-style-type: none"> 文献値*3 	



平常水位予測モデルの鳥瞰図

- *1: 平均気温・平均降水量は発電所内観測値, 日照時間は地下水ハンドブックによる
- *2: 地下水ハンドブック(建設産業調査会), 水理公式集(土木学会)等を参照し設定
- *3: 水理公式集(土木学会), 河川砂防技術基準(国土交通省)等を参照し設定