

| | |
|-----------------------|-------------------|
| 女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | O2-他-F-19-0017_改1 |
| 提出年月日 | 2021年2月15日 |

女川原子力発電所第2号機 地下水位の設定について

2021年3月●日
東北電力株式会社

目次

1. はじめに
2. 地下水位の設定について
3. 地下水位の設定に係る今後の説明事項
4. 追加液状化強度試験

1. はじめに

- 第876回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合(令和2年7月14日)において説明した主要説明項目における「詳細設計申送り事項 No.2-1 地下水位の設定, 耐震評価における断面選定」のうち, 設計用地下水位の設定結果として, 浸透流解析を用いた設計用地下水位の設定プロセス及び設定結果を説明。
- また, 地下水位の設定と関連する事項として, 工事計画認可で実施した追加の液状化強度試験結果を説明。
- なお, 詳細設計申送り事項 No.2-1のうち地下水位低下設備の設備構成等については今後説明予定。

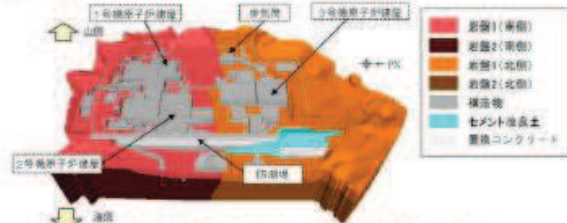
【2-1】地下水位の設定, 耐震評価における断面選定

10

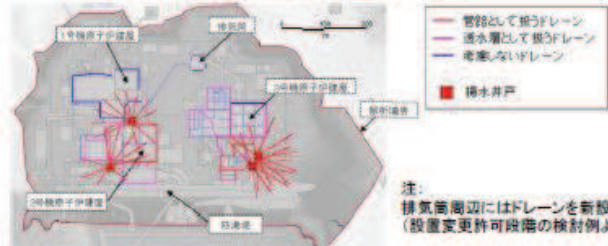
今回説明

1. 概要

- 各施設の耐震設計の前提条件となる設計用地下水位の設定について, 女川特有の地下水位低下設備の構成や地下水位低下設備の機能を考慮した三次元浸透流解析を用いた地下水位の設定結果について説明する。
- また, 設計用地下水位を踏まえた各施設の解析手法(全応力解析または有効応力解析)の選定結果及び地震応答解析断面の選定結果について説明する。



(a) 解析モデル概要 (盛土・旧表土を非表示)



(b) 揚水井戸・ドレーン配置

図1 三次元浸透流解析モデル

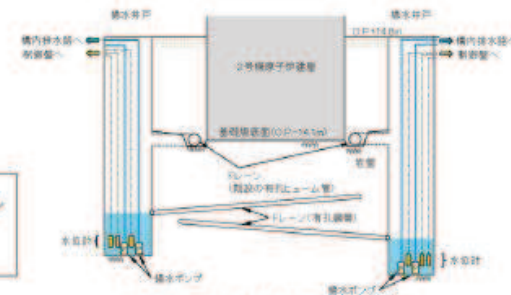


図2 地下水位低下設備の概要

2. 今後の説明予定

- 地下水位の設定, 各施設の解析手法・断面選定について, 2020年5月提出の説明書等にて説明予定。なお, 地下水位低下設備の耐震性は2020年9月・11月, アクセスルート評価^{*}は2020年11月資料提出し, 説明予定。
^{*}:アクセスルートは, 地下水位低下設備の機能喪失を想定しても, 地震時の液状化に伴う地下構造物の浮き上がりに対して通行性を一定期間確保する設計とする。

2. 地下水位の設定について(1 / 14)

【耐震評価に用いる設計用地下水位の設定方針】

- 工事計画認可では、設置変更許可における方針を踏まえ、液状化検討対象施設を幅広く抽出するため、高めに設計用地下水位を設定。
- 地下水位低下設備の効果が及ぶ範囲の設計用地下水位については、詳細設計結果を踏まえ設定した条件にて実施した浸透流解析結果に基づき設定。

設計用地下水位の設定に係る各審査段階の説明

| | 設置変更許可 | 工事計画認可 |
|--------------|---|---|
| 設計用地下水位の設定方針 | <ul style="list-style-type: none"> • 地下水位低下設備の効果が及ぶ範囲(O.P.+14.8m盤) 地下水位低下設備の機能を考慮し設定 (浸透流解析による) • 地下水位低下設備の効果が及ばない範囲 自然水位より保守的に設定した水位又は地表面に設定 | <ul style="list-style-type: none"> • 設置変更許可の内容を踏襲 • 設置変更許可の内容を踏襲 |
| 浸透流解析の取扱い | <ul style="list-style-type: none"> • 地盤等を適切にモデル化した浸透流解析を実施し、保守性を確保(水位を高めに設定) • 浸透流解析のうちモデルの妥当性を確認(広域モデル)。また、設計用地下水位の設定における保守性確保の方針を説明(予測解析結果は追而) | <ul style="list-style-type: none"> • 左記の方針を踏まえて、液状化検討対象施設を幅広く抽出するため水位を高めに設定 • 防潮堤の沈下対策や新設するドレーンの詳細設計結果を踏まえ、これらを水位評価モデルに反映した予測解析結果と、これに基づく設計用地下水位を設定 |

2. 地下水位の設定について(2/14)

【浸透流解析を用いた設計用地下水位の設定フロー】

- 浸透流解析を用いた設計用地下水位の設定フローと各審査段階での説明内容を示す。
- 設置変更許可段階で設定した広域モデルによるモデルの妥当性確認(地下水流動場の再現性確認)の結果を踏襲の上, 将来的な施設計画等を反映した水位評価モデルにより予測解析を行う。

浸透流解析を用いた設計用地下水位の設定フローと各審査段階での説明内容

| 設計用地下水位の設定フロー | 設置変更許可 | 工事計画認可 |
|---|--|---|
| <p>START</p> <p>↓</p> <p>モデル情報の入手</p> <p>← データの十分性を確認</p> | <ul style="list-style-type: none"> モデル構築に必要な基礎情報 (既往データ, 既設構造物等) | <ul style="list-style-type: none"> 設置変更許可の内容を踏襲 |
| <p>↓</p> <p>モデルの妥当性確認 (広域モデルによる非定常解析)</p> <p>← モデルの妥当性を確認</p> | <ul style="list-style-type: none"> 広域モデルの構築 解析結果 広域モデルの妥当性確認結果 (観測降雨との比較) | <ul style="list-style-type: none"> 設置変更許可の内容を踏襲 |
| <p>↓</p> <p>予測解析 (水位評価モデルによる定常解析)</p> <p>← 水位を高めに出算する条件設定(保守性)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・A. 境界条件 ・B. 透水係数 ・C. ドレイン有効範囲 | <ul style="list-style-type: none"> 水位評価モデルの設定方針 (境界条件, 透水係数, ドレイン有効範囲を限定し保守性を確保) | <ul style="list-style-type: none"> 水位評価モデルの構築 (詳細設計結果を踏まえ, 施設構造や地盤改良範囲等を設定。保守性確保の考え方は踏襲) 解析結果 |
| <p>↓</p> <p>設計用地下水位の設定</p> <p>← 設計用地下水位の余裕を確認</p> | <ul style="list-style-type: none"> 設計用地下水位の設定方針 (予測解析結果を包絡するよう設定) | <ul style="list-style-type: none"> 設計用地下水位の設定結果 (設置変更許可の方針に基づく) |
| <p>↓</p> <p>耐震評価</p> <p>↓</p> <p>END</p> <p>↓</p> <p>設計用地下水位の検証(今後)</p> | <ul style="list-style-type: none"> 地下水位の観測計画 | <ul style="list-style-type: none"> 地下水位の観測計画 将来的な地形改変等により設計用地下水位に変更が生じる場合の対応方法 |

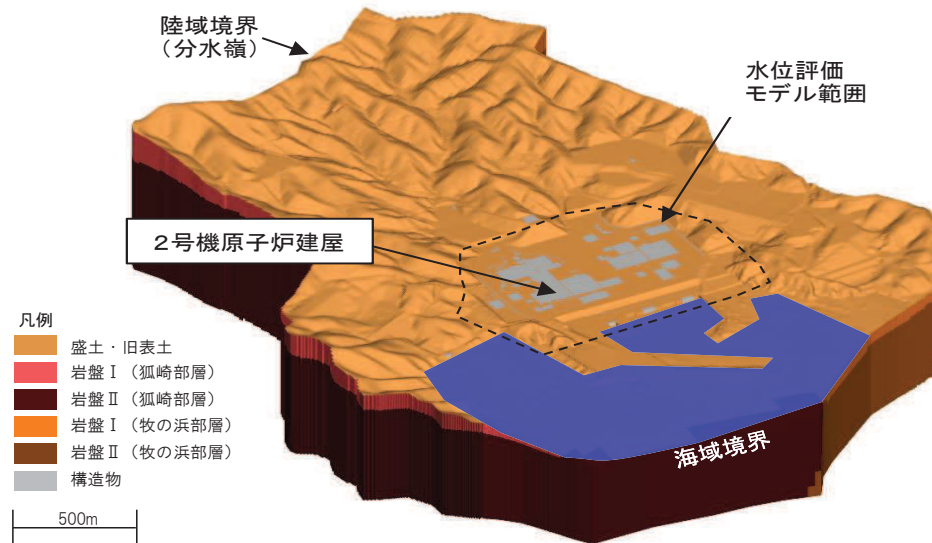
【凡例】 ○:設置変更許可の方針や解析結果を踏襲 ◎:詳細設計により具体化された浸透流解析条件や, この条件に基づく解析結果を説明

注) 本フロー作成にあたり, 基本的な考え方は「地下水流動解析のガイドラインに関する調査(長谷川琢磨, 地下水学会誌 第48巻第2号 75~86(2006)」を参照し米国ASTMガイドライン等を参考とした。

2. 地下水位の設定について(3 / 14)

【広域モデルによる非定常解析とモデルの妥当性確認(1)】

- 解析モデルの妥当性確認にあたり、設置変更許可では、広域モデルに観測降雨条件を付与した非定常解析を実施。
- 得られた解析水位は観測水位と整合的である。(p.5)



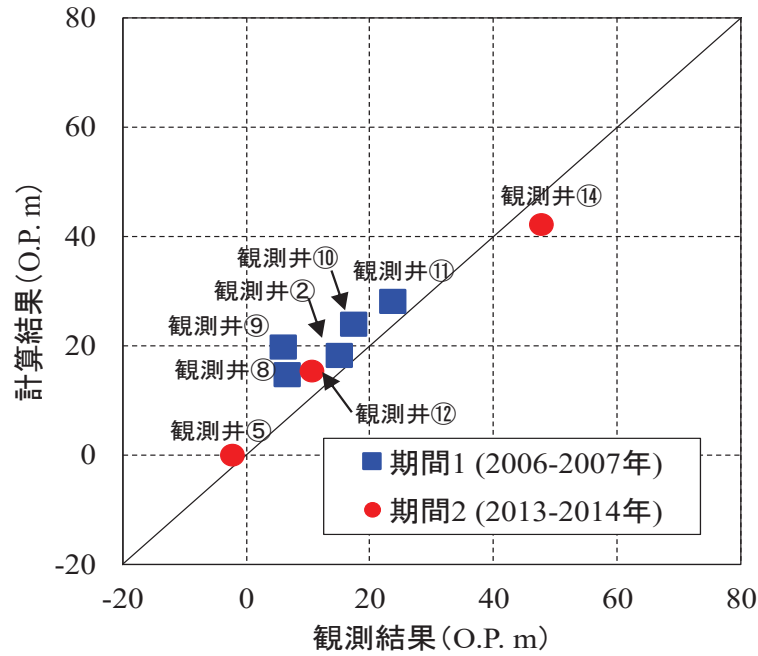
広域モデル鳥瞰図

広域モデルによる非定常解析の概要

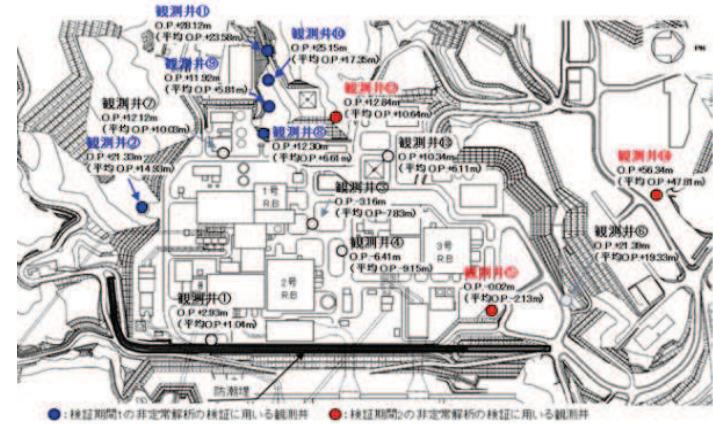
- 施設を含む分水嶺までの範囲をモデル化
(施設へ流入する地下水を適切に表現)
- 地下水位観測時の設備・造成状態をモデル化
- ドレーンは既設全てを考慮(地下水位観測時の状態を再現するため、新設は考慮しない)
- 地下水位観測時の降雨条件を付与した非定常解析
- 透水係数は試験平均値

2. 地下水位の設定について(4/14)

【広域モデルによる非定常解析とモデルの妥当性確認(2)】

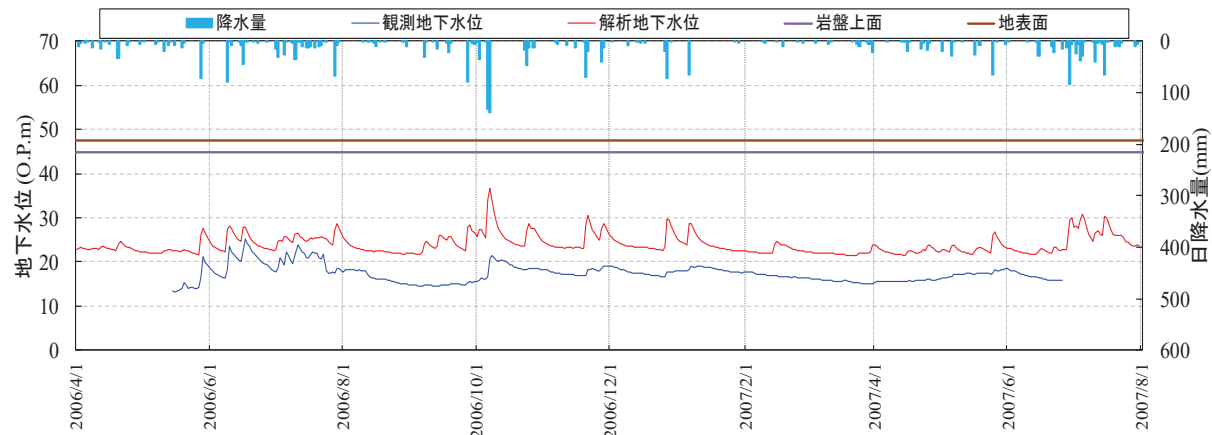


解析水位と観測水位の比較例1



観測井位置図

注)平均水位での比較

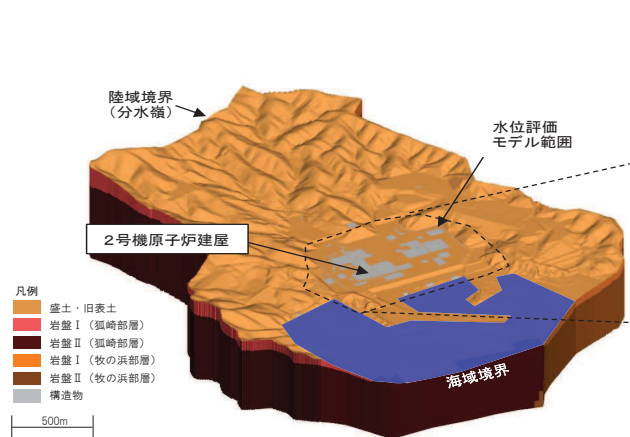


解析水位と観測水位の比較例2(観測井⑩)

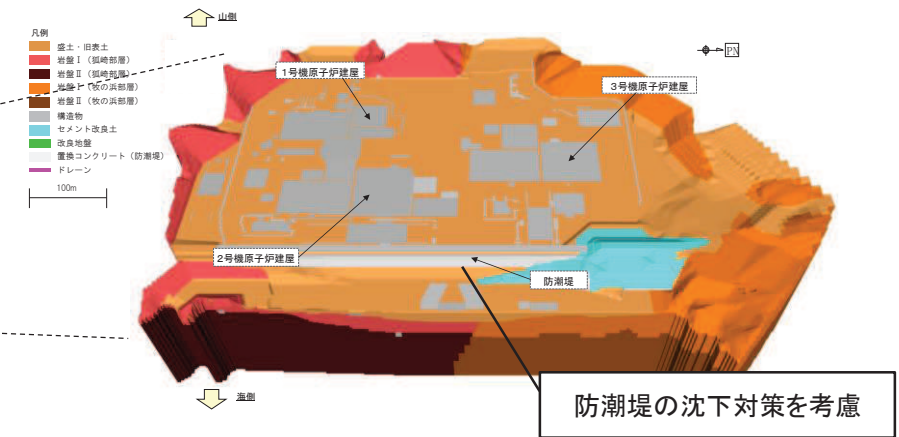
2. 地下水位の設定について(5/14)

【予測解析に用いる水位評価モデル】

- 予測解析に用いる水位評価モデルは、広域モデルをベースに、詳細設計結果を踏まえた防潮堤の沈下対策や新設ドレーンなどの将来的な施設配置等を反映し、施設が配置されるO.P.+14.8m盤周辺領域を切り出し設定。
- 水位を高めめに算出するような解析条件(p.7, p.8)を設定し、定常解析を実施。



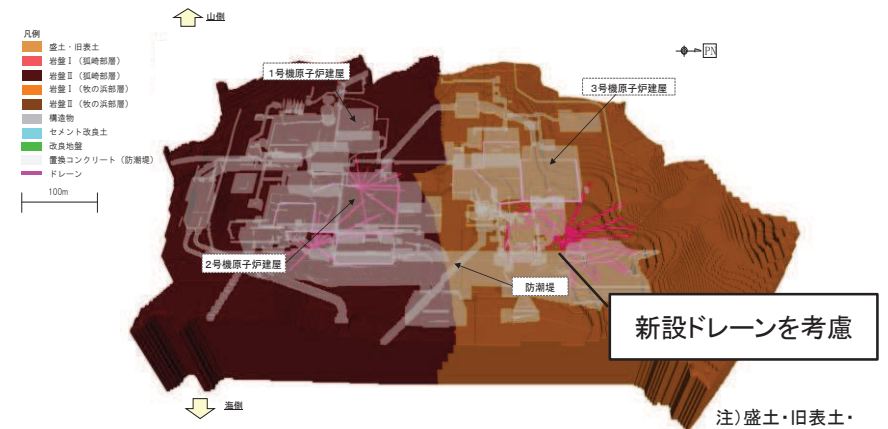
(広域モデル鳥瞰図)



水位評価モデル鳥瞰図

水位評価モデルによる定常解析の概要

- O.P.+14.8m盤周辺領域をモデル化 (広域モデルより切り出し)
- 詳細設計の結果を踏まえた工事完了段階の状態をモデル化
- 山側境界となる法肩位置に水位を固定した定常解析
- ドレーンは有効範囲を限定 (既設・新設のうち信頼性の確保された範囲を考慮)
- 透水係数は岩盤 I のみ試験平均値-1σ



構造物のモデル化状況

注)盛土・旧表土・岩盤Iを非表示

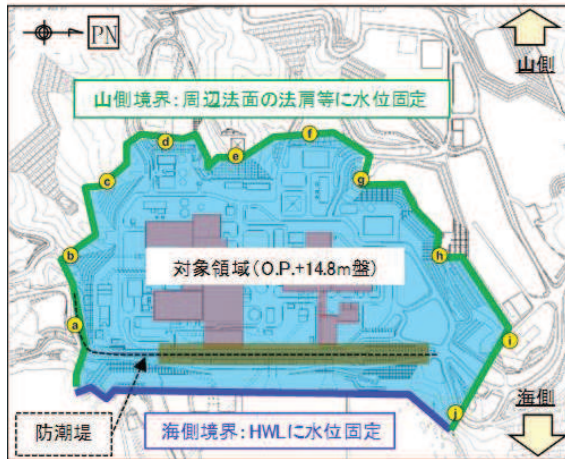
2. 地下水位の設定について(6/14)

【予測解析における保守的な解析条件の設定(1)】

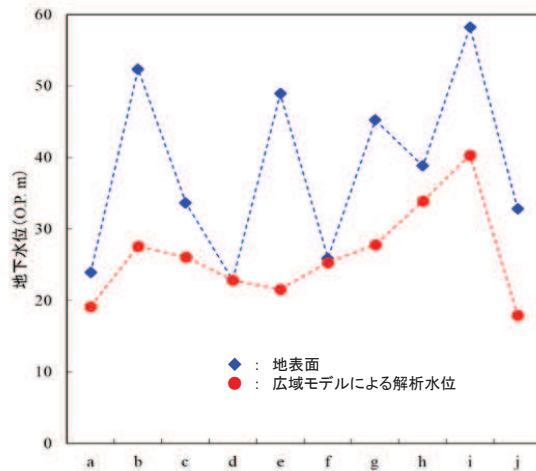
- 設置変更許可の方針と同様に、揚圧力や地下水位が高めに算出されるよう境界条件(以下A)、透水係数(以下B)を設定。

A. 解析境界の水位を高い位置に固定

- 山側: 地表面(法肩等), 海側: 朔望平均満潮位に設定



予測解析における境界条件の設定



境界条件の設定による余裕

- 水位評価モデルにおいては、地表面(◆)に水位を固定
- 広域モデルで算出した位置a.~j.の水位(●)は地表面と同等か下回る
- 地表面(◆)と広域モデル水位(●)の差が境界条件の設定による余裕に相当

B. 透水係数を小さめに設定

- 揚圧力や水位への感度が大きい浅部岩盤(岩盤I)の透水係数を平均値-1σとして設定

予測解析に用いる透水係数

| 地層 | 設定値 (m/s) | 設定根拠 | |
|------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| 盛土・旧表土 | 3.0×10^{-5} | 試験結果の平均値 | |
| 狐崎部層 | 岩盤 I | 7.0×10^{-7} | 試験結果の平均値-1σ |
| | 岩盤 II | 5.0×10^{-7} | 試験結果の平均値 |
| 牧の浜部層 | 岩盤 I | 2.0×10^{-6} | 試験結果の平均値-1σ |
| | 岩盤 II | 1.0×10^{-7} | 試験結果の平均値 |
| セメント改良土・改良地盤 | 2.0×10^{-7} | 試験結果の平均値 | |
| 透水層(砕石) | 1.0×10^{-2} | 試験結果の平均値 | |
| コンクリート構造物(MMR含む) | (不透水) | - | |

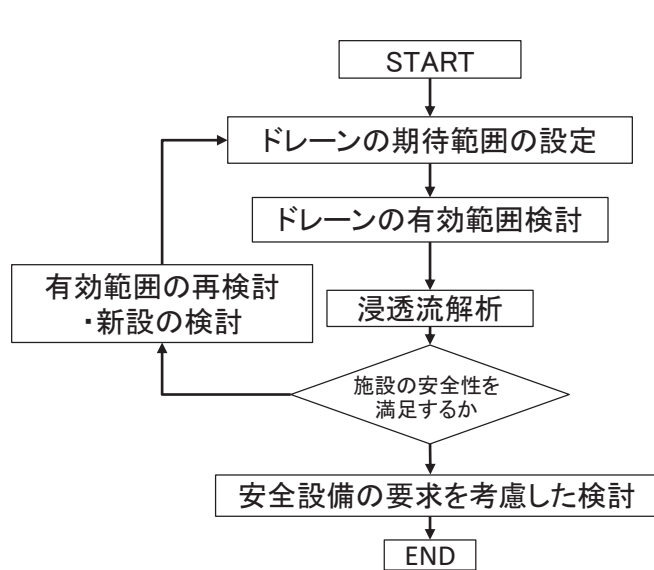
2. 地下水位の設定について(7/14)

【予測解析における保守的な解析条件の設定(2)】

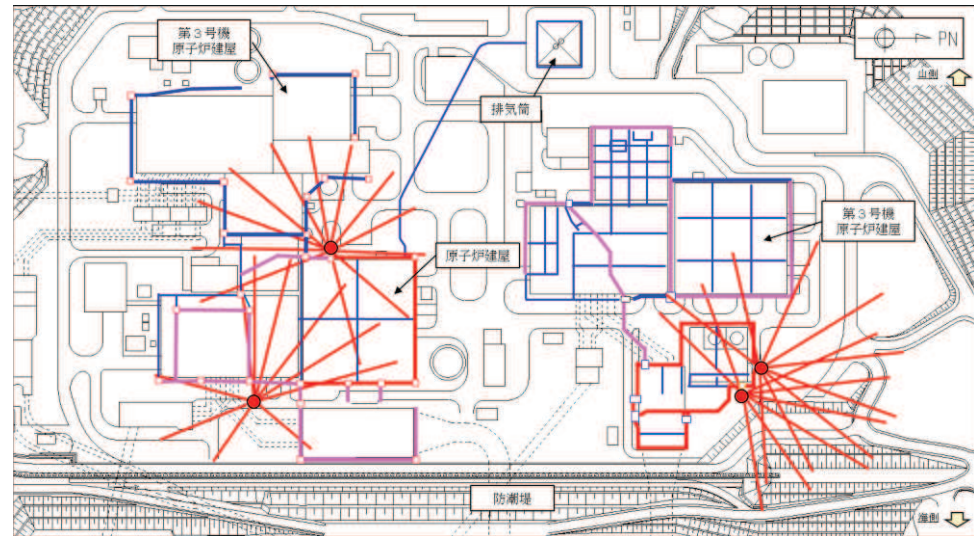
- 設置変更許可の方針と同様の考え方(フロー)に基づき, 工事計画認可では有効ドレーン範囲を詳細検討(以下C)。
- ドレーンを信頼性の確保された範囲に限定し設定することで, 揚圧力や地下水位を高めに出算。

C. ドレーンの有効範囲を限定(縮小)

- 既設・新設ドレーンのうち信頼性の確保された範囲に有効範囲を限定



ドレーンの有効範囲設定フロー



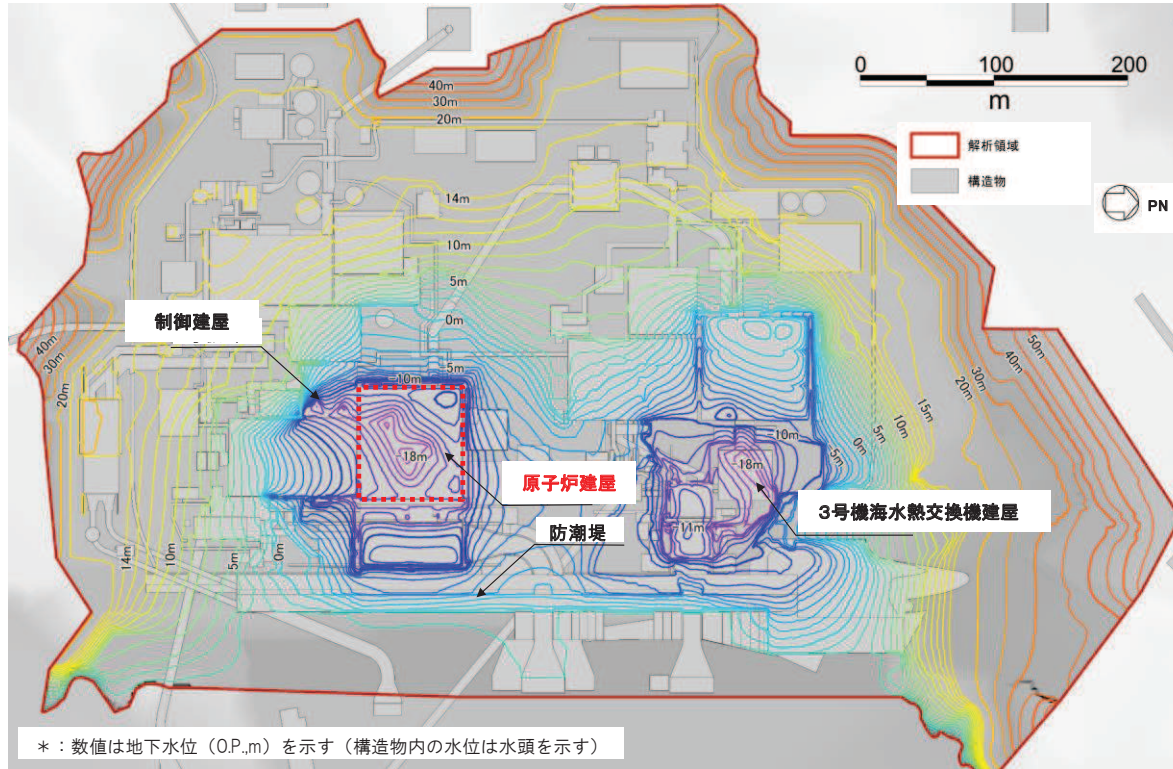
予測解析に用いるドレーンの有効範囲

注) 排気筒周辺にはドレーンを新設しない(設置変更許可の検討例より変更)

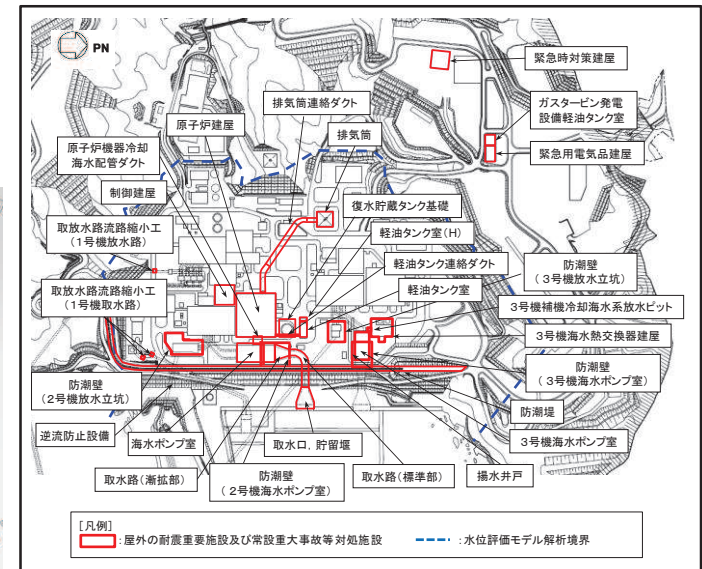
2. 地下水位の設定について(8 / 14)

【予測解析(定常解析)】

➤ 予測解析にて得られた解析水位を示す。



予測解析結果(各施設の耐震評価用)

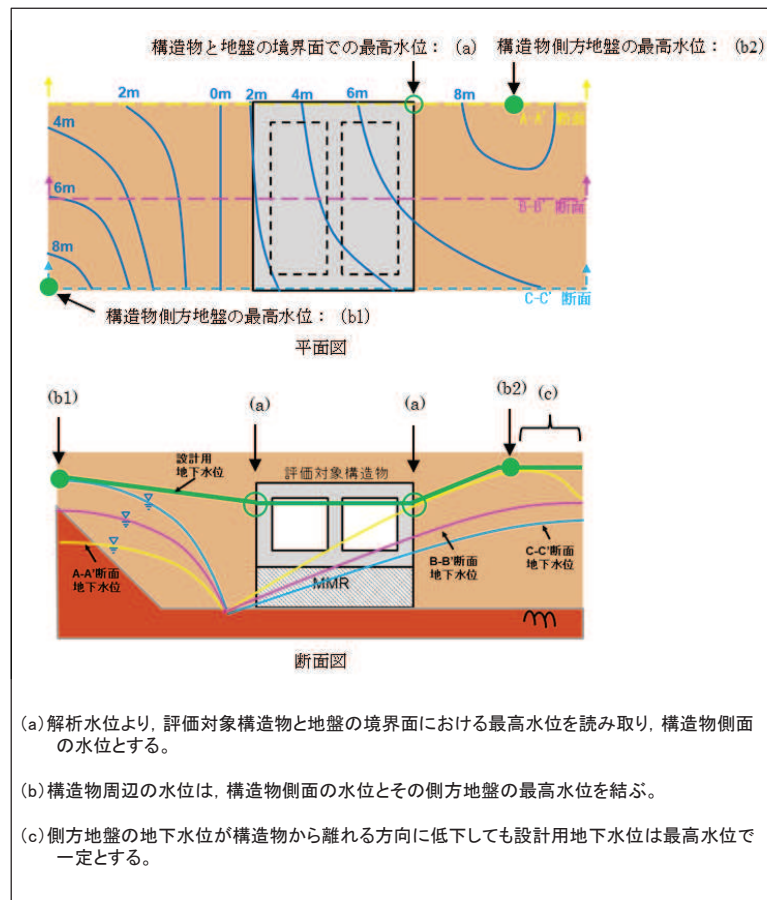


施設の配置

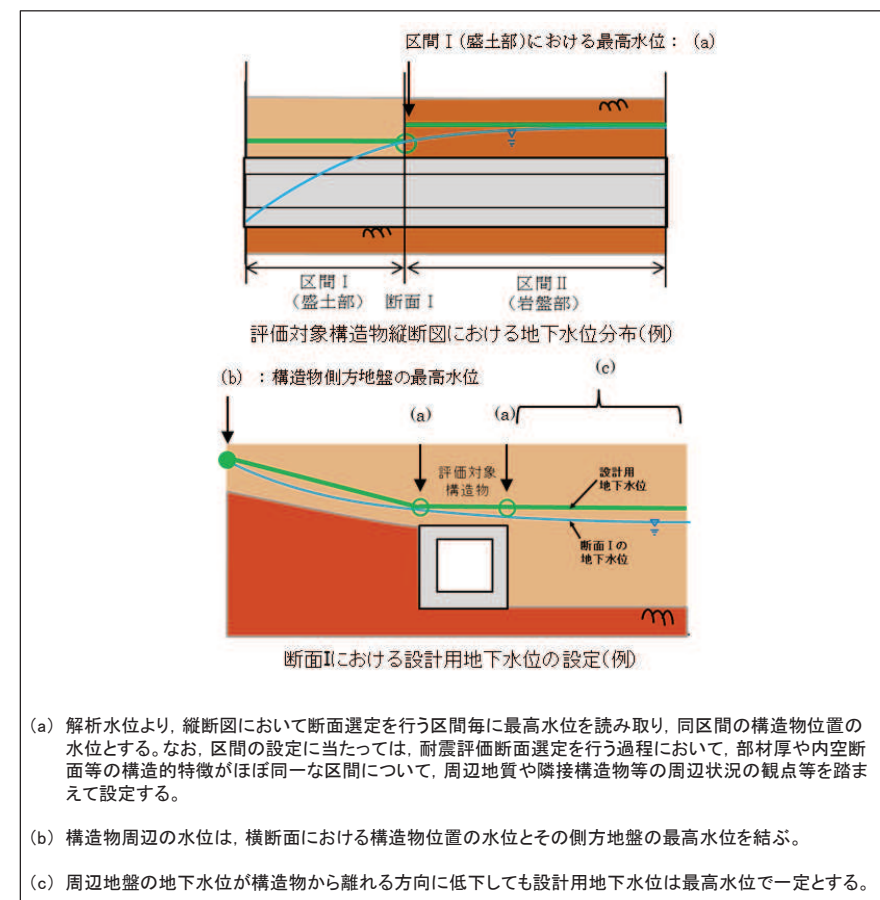
2. 地下水位の設定について(9/14)

【屋外重要土木構造物における設計用地下水位の設定方法】

- 設計用地下水位は、設置変更許可で検討した設定方法により、予測解析により得られた解析水位を上側に包絡するよう、構造物側面や解析断面境界等の各点での最高水位を結んで設定。
- なお、平常時の地下水位は設計用地下水位より低いことから、その影響についても耐震設計において考慮する。



(箱形構造物の場合)



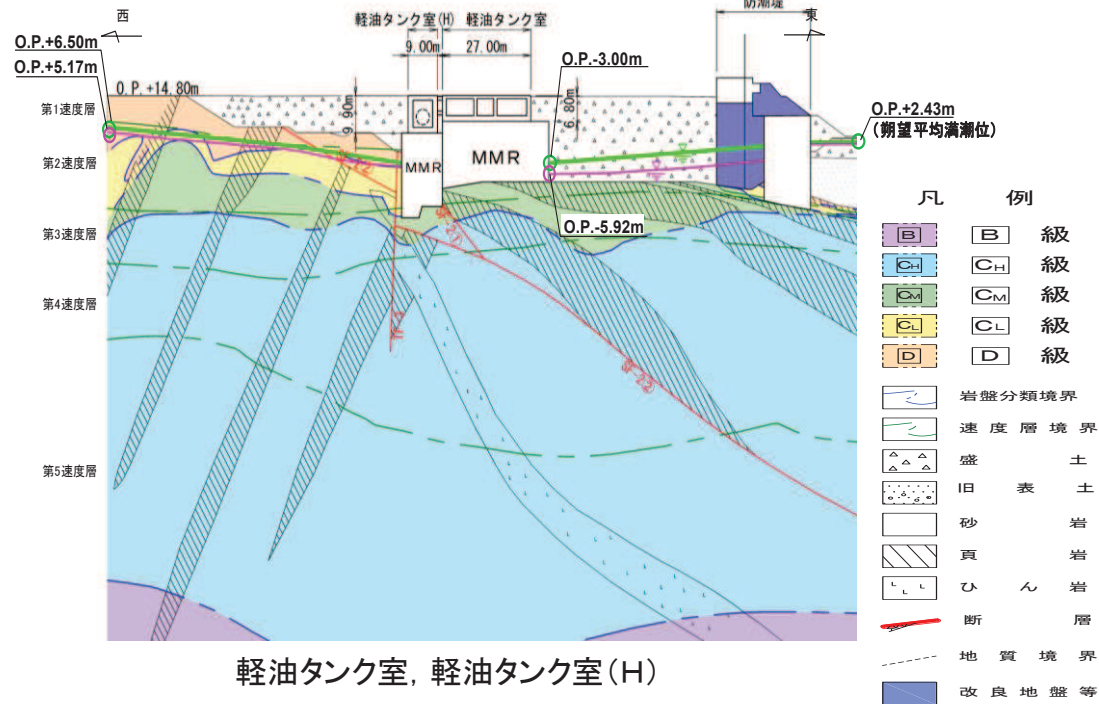
(線状構造物の場合)

予測解析結果を参照した設計用地下水位の設定方法

2. 地下水位の設定について(10/14)

【設計用地下水位の設定(箱型構造物)】

- 軽油タンク室, 軽油タンク室(H)の設計用地下水位の設定を以下に示す。
- 耐震評価に用いる設計用地下水位は, 得られた解析水位を高めめに包絡するよう設定。



軽油タンク室, 軽油タンク室(H)

- 予測解析による地下水位
- 設計用地下水位

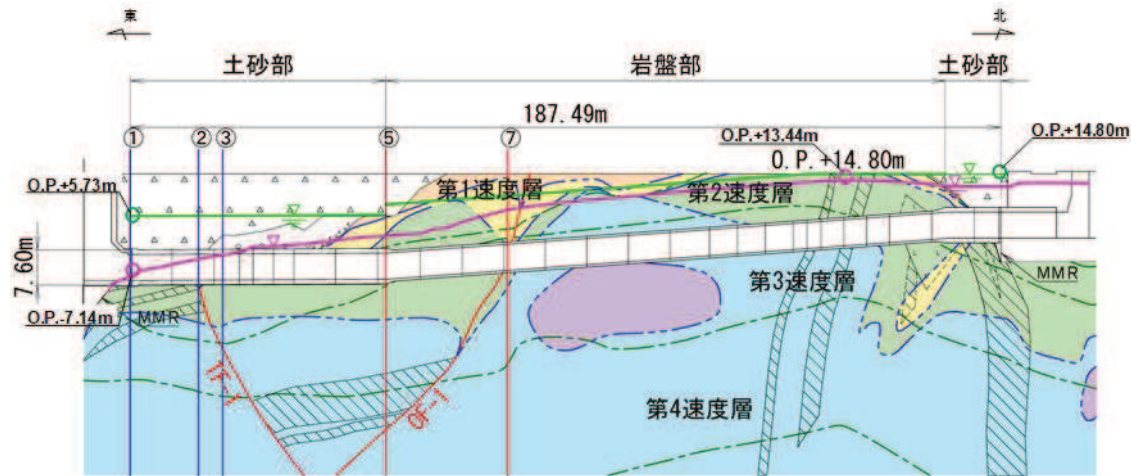
同様の考え方で設定した構造物

- 原子炉機器冷却海水配管ダクト
- 軽油タンク連絡ダクト
- 海水ポンプ室
- 取水口
- 復水貯蔵タンク基礎
- 第3号機海水ポンプ室
- 揚水井戸
(第3号機海水ポンプ室防潮壁区画内)
- No.1, No.2揚水井戸
- 第3号機補機冷却海水系放水ピット
- 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤南側)

2. 地下水位の設定について(11/14)

【設計用地下水位の設定(線状構造物)】

- 排気筒連絡ダクトの設計用地下水位の設定を以下に示す。
- 耐震評価に用いる設計用地下水位は, 得られた解析水位を高めめに包絡するよう設定。



同様の考え方で設定した構造物

- 取水路
- 防潮壁

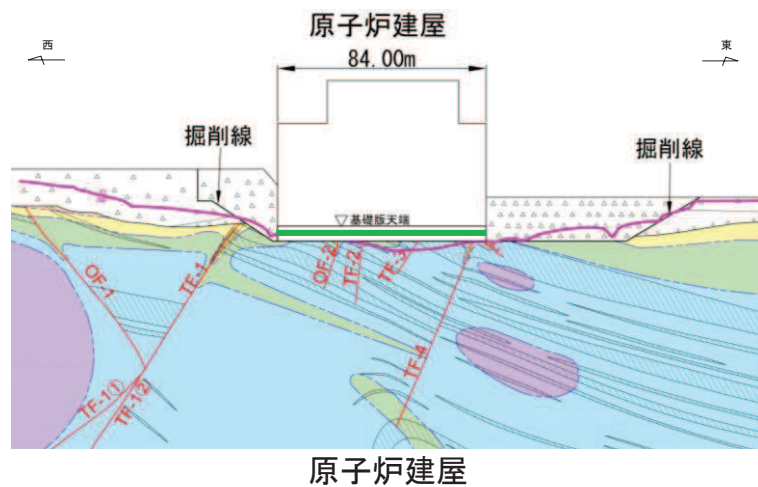
排気筒連絡ダクト(縦断)

- 予測解析による地下水位
- 設計用地下水位

| 凡 | 例 |
|---|--------|
| | B 級 |
| | C-H 級 |
| | C-M 級 |
| | C-L 級 |
| | D 級 |
| | 岩盤分類境界 |
| | 速度層境界 |
| | 盛土 |
| | 旧表土 |
| | 砂岩 |
| | 頁岩 |
| | ひん岩 |
| | 断層 |
| | 地質境界 |
| | 改良地盤等 |

2. 地下水位の設定について(12/14) 【設計用揚圧力の設定(建物・構築物)】

- 原子炉建屋の設計用揚圧力の設定を以下に示す。
- 耐震評価に用いる設計用揚圧力は、予測解析による平均揚圧力を高めに包絡するよう設定。



— 予測解析による地下水位
(建屋底面の平均揚圧力 8.4kN/m^2)

— 設計用揚圧力 29.4kN/m^2 *

| 凡 例 | |
|-----|---------|
| | B 級 |
| | CH 級 |
| | CM 級 |
| | CL 級 |
| | D 級 |
| | 岩盤分類境界 |
| | 速度層境界 |
| | 盛 土 |
| | 旧 表 土 |
| | 砂 岩 |
| | 頁 岩 |
| | ひ ん 岩 |
| | 断 層 |
| | 地 質 境 界 |
| | 改良地盤等 |

同様の考え方で設定した建物

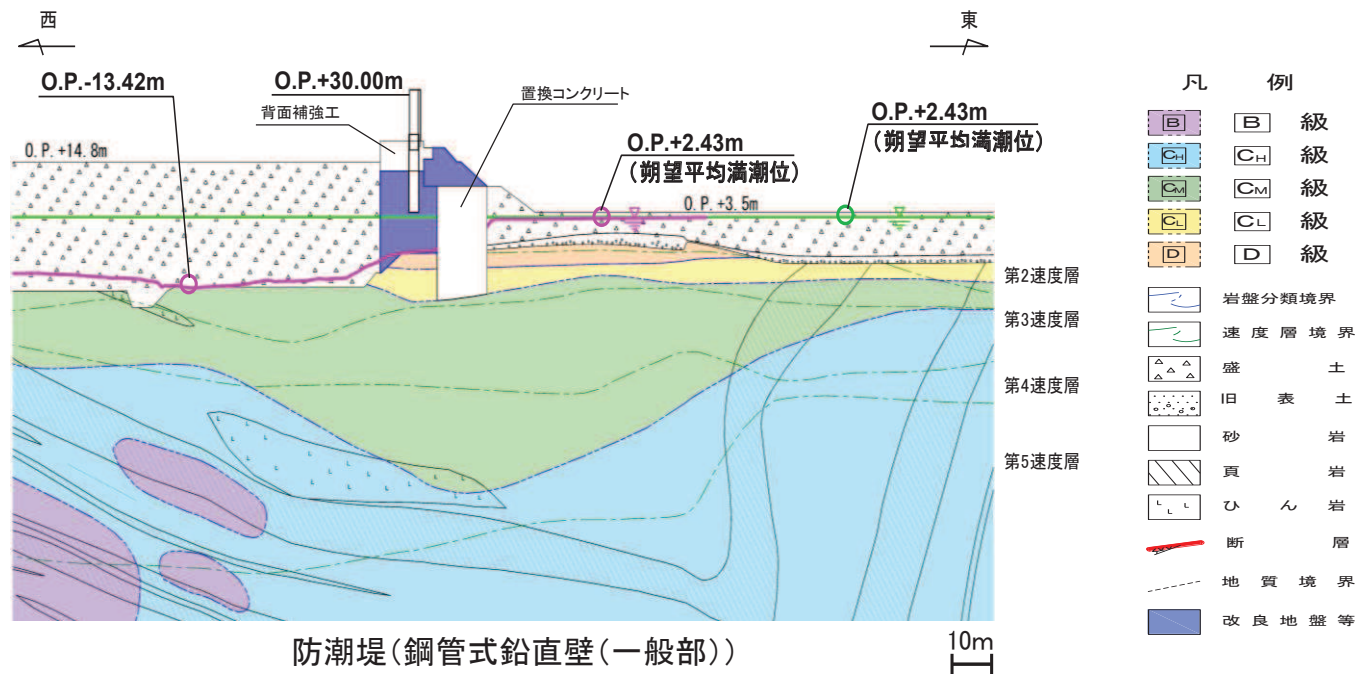
- 制御建屋
- 第3号機海水熱交換器建屋

* : 原子炉建屋は、今回解析で得られた揚圧力を上回る建設時
工事計画認可時の設計用揚圧力と同値に設定。

2. 地下水位の設定について(13/14)

【設計用地下水位の設定(防潮堤)】

- 防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部))の設計用地下水位の設定を以下に示す。
- 防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部))の設計用地下水位は、設置変更許可における方針と同様、海側・敷地側とも朔望平均満潮位としており、解析水位より高めに設定されていることを確認。



防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部))

- 予測解析による地下水位
- 設計用地下水位

注) 防潮堤(盛土堤防)の設計用地下水位は、海側を朔望平均満潮位、敷地側を地表面に設定。屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)も同様に設定。

2. 地下水位の設定について(14/14) 【(参考)浸透流解析モデルの諸元】

広域モデルと水位評価モデルの諸元対比

| 項目 | 広域モデル | 水位評価モデル |
|--------|--|--|
| 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"> 設計用地下水位の設定において参照 液状化影響検討対象施設を幅広く抽出するため、高めの水位を算定 |
| 2.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 | <ul style="list-style-type: none"> O.P.+14.8m盤及びO.P.+14.8m周辺の法面 |
| 3.解析種別 | <ul style="list-style-type: none"> 非定常解析 (検証期間の降雨条件を付与) | <ul style="list-style-type: none"> 定常解析 |
| 4.検証期間 | <ul style="list-style-type: none"> 期間1: 2006-2007年 期間2: 2013-2014年 | — |
| 5.モデル | <ul style="list-style-type: none"> 検証期間に対応した状態 | <ul style="list-style-type: none"> 詳細設計の結果を踏まえた工事完了段階に対応した状態 |
| 6.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"> 水位が高めに算出されるよう集水機能への寄与範囲を限定 <ul style="list-style-type: none"> 既設・新設のうち信頼性が確保された範囲を管路相当 信頼性の確保状況に応じ透水層相当 |
| 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 | <ul style="list-style-type: none"> 水位が高めに算出されるよう設定 <ul style="list-style-type: none"> 山側: 地表面に水位固定 海側: H.W.L.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 | <ul style="list-style-type: none"> 水位が高めに算出されるよう設定 (岩盤 I を-1σ) |

■ 地下水位低下設備の設備構成

- 浸透流解析による地下水流入量の評価を踏まえた地下水位低下設備の設備構成（揚水ポンプ，配管，水位計等）について説明。

■ 設計用地下水位を踏まえた各施設の解析手法及び地震応答解析断面の選定結果

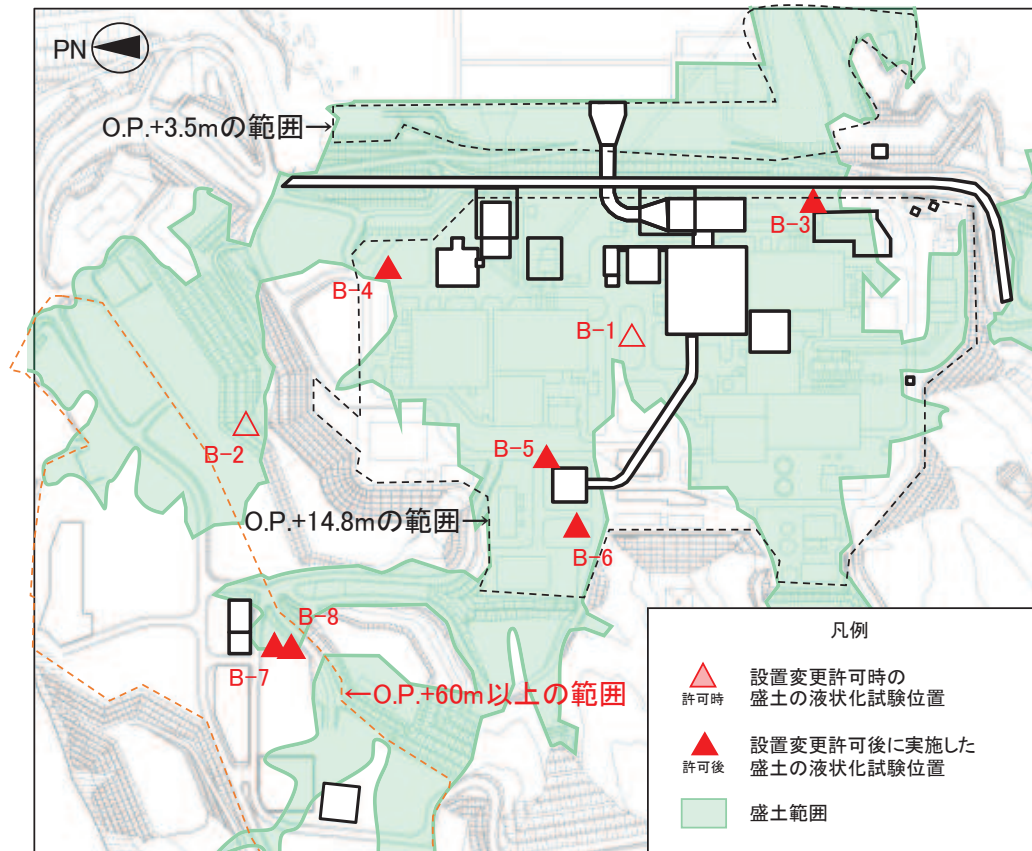
- 屋外重要土木構造物等の耐震評価を行うための評価対象断面の選定，地盤の液化特性を踏まえた解析手法の選定の方針について説明。

4. 追加液状化強度試験(1／6)

- 工事計画認可においては、設置変更許可時点でお示した調査・試験結果に加え、データ拡充の観点から盛土の追加液状化強度試験を実施。

4. 追加液状化強度試験(2/6)

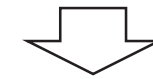
- 設置変更許可では, 盛土について, 2箇所(B-1, B-2)から試料採取して液状化強度試験を行い, 液状化強度特性を設定。
- 工事計画認可においては, 盛土を対象に, 液状化試験のデータ拡充のために, 設置変更許可で示した方針に基づき追加液状化強度試験を実施。



盛土の液状化強度試験箇所

【盛土の試料採取箇所選定方針】

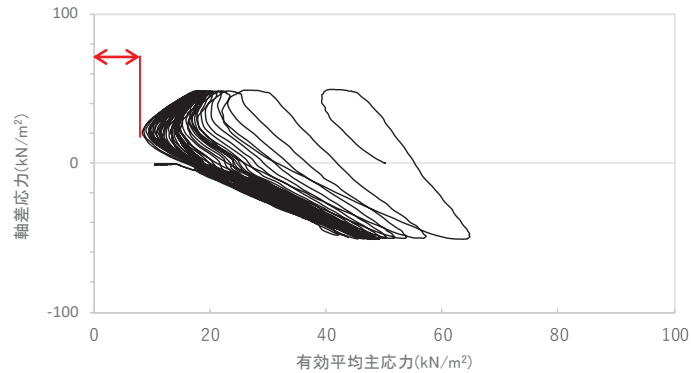
各施設・設備は, O.P.+14.8m以下の範囲とO.P.+60.0m以上の範囲の2つのエリアに分散して設置されていることを踏まえ, 各施設・設備を網羅できるように選定する。



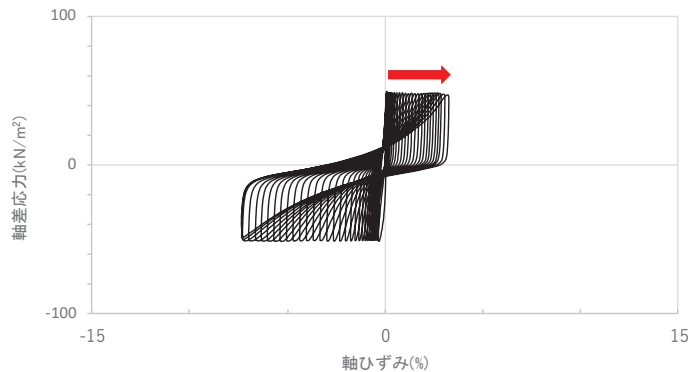
追加液状化強度試験: 6箇所

4. 追加液状化強度試験(3/6)

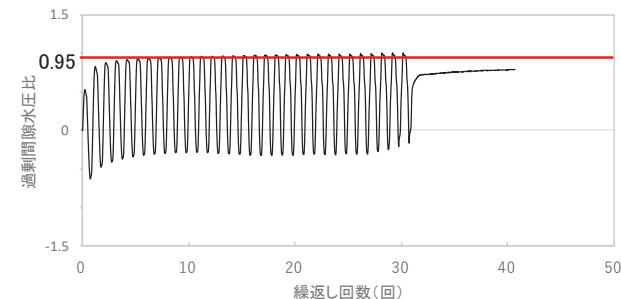
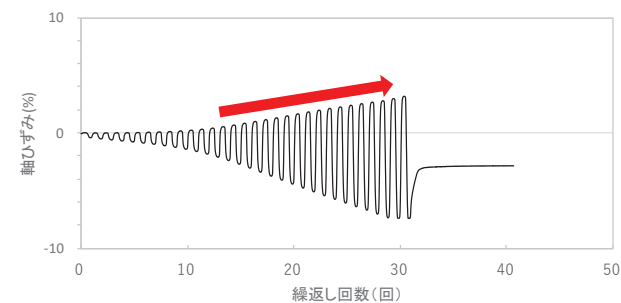
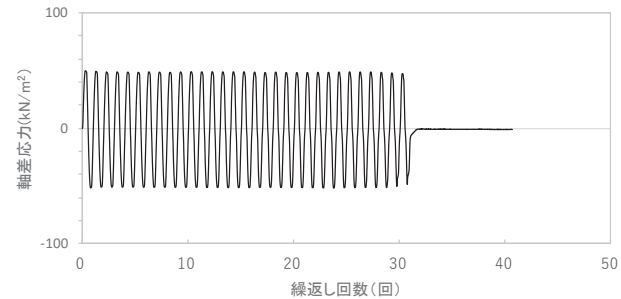
- 盛土の追加液状化試験結果の例を示す(B-3試料, 供試体No.3)。
- 設置変更許可でお示した液状化強度試験結果と同様に, 繰返し軟化を示すことを確認。



繰返し荷重を載荷しても, 有効応力がゼロになることはなく, 液体状になることはない。また, せん断応力(軸差応力)作用時に, 有効応力は回復し, ねばり強い挙動を示す。



ひずみは徐々に大きくなるが, 急に増大しないため, 脆性的な破壊は生じず, ねばり強い挙動を示す。



試験後の供試体

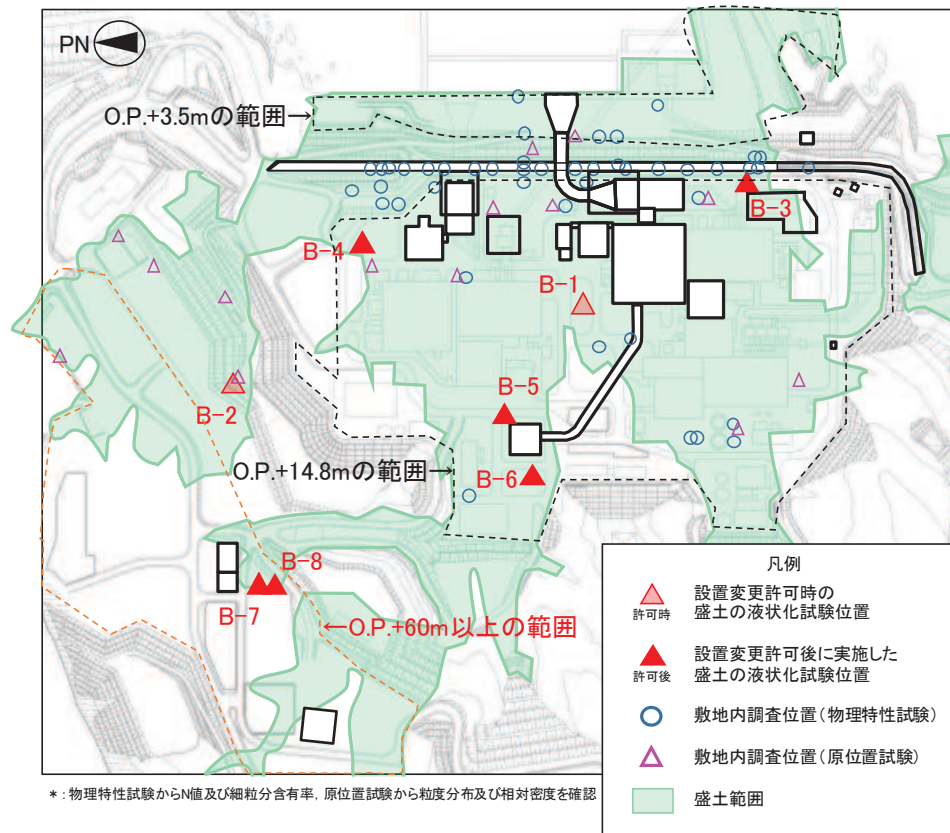
供試体が試験前後とも自立するほどの強度がある。

ひずみは徐々に大きくなるが, 急に増大しないため, 脆性的な破壊は生じず, ねばり強い挙動を示す。

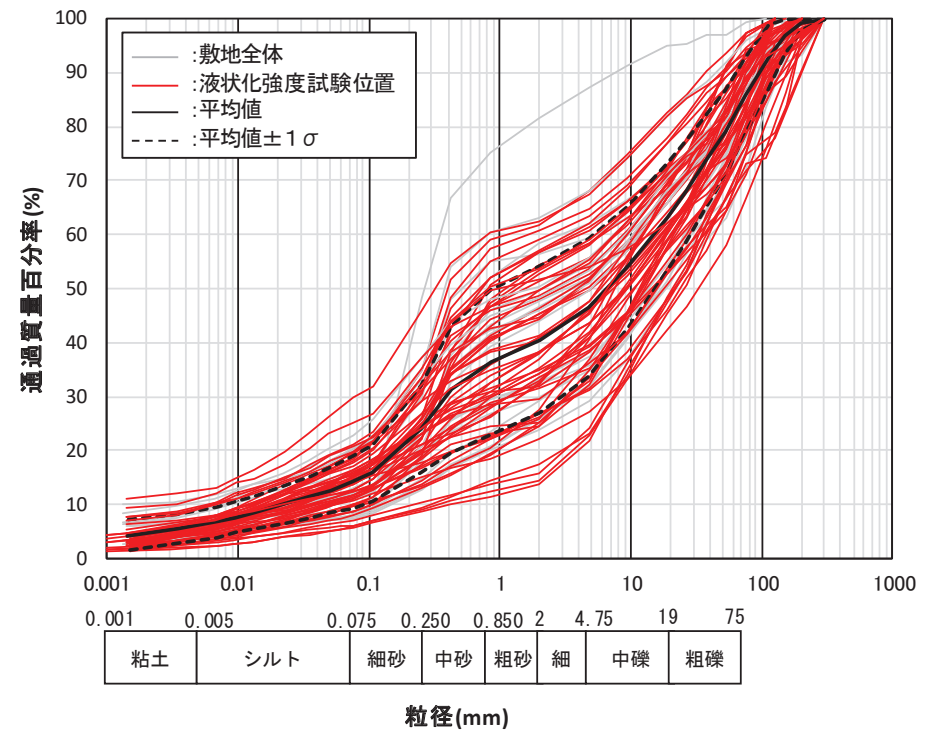
過剰間隙水圧比は95%を超過するものの, 頭打ちとなり, 100%にはならず, せん断応力作用時には, 正のダイレイタンスー効果により, 過剰間隙水圧は低下し(さらに負になる), 有効応力が回復する。

4. 追加液状化強度試験(4/6)

- 追加で実施した試験を含め、盛土の液状化試験に用いた供試体と、敷地全体から採取した盛土の粒度分布、細粒分含有率、相対密度及びN値を比較することにより、液状化強度試験の代表性及び網羅性を確認。
- 粒度分布については、液状化強度試験に用いた供試体は敷地全体から採取した盛土の供試体のばらつきの範囲内にあることを確認。



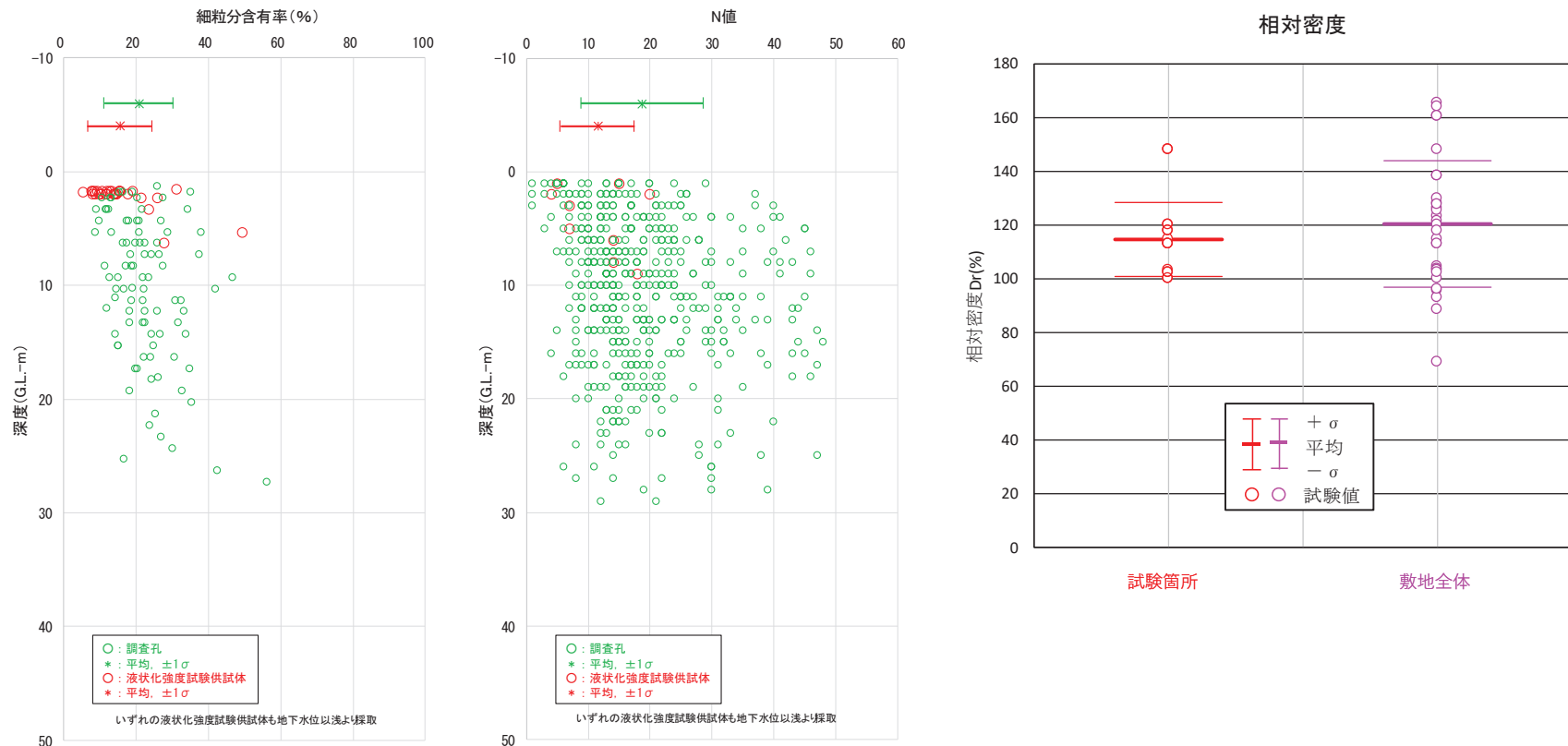
盛土の液状化強度試験の試料採取位置



粒度分布の確認結果

4. 追加液状化強度試験(5/6)

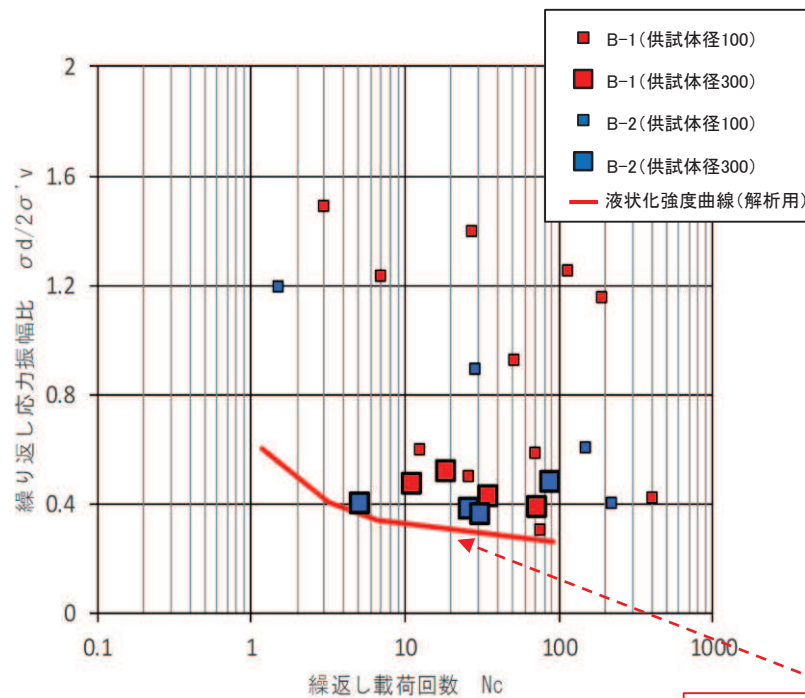
- 細粒分含有率, N値及び相対密度については, 液状化強度試験に用いた盛土の供試体は敷地全体から採取した盛土の供試体よりも低い範囲にあることを確認。
- これらの結果は, 敷地全体から採取した盛土の供試体に比べ, 液状化強度試験に用いた盛土の供試体が同程度あるいはやや液状化しやすい傾向があることを示している。
- 以上から, 液状化強度試験に用いた盛土の供試体は, 追加実施した液状化強度試験の結果を含めても敷地内の盛土に対して代表性及び網羅性を有すると判断できる。



細粒分含有率, N値, 相対密度の確認結果

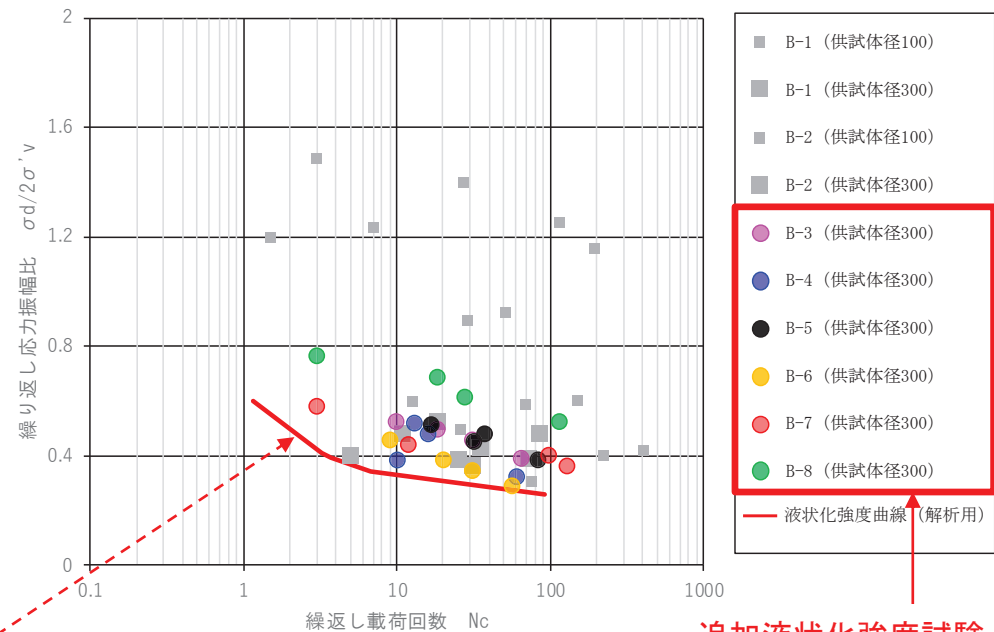
4. 追加液状化強度試験(6/6)

- 設置変更許可の液状化強度特性は，得られた液状化強度試験結果の下限値に設定。
- 工事計画認可の液状化強度特性は，設置変更許可の設定方針と同様に，追加の液状化強度試験を含めた盛土の液状化強度試験結果の下限値に設定。
- その結果，工事計画認可に追加実施した盛土の液状化強度試験結果を考慮しても，設置変更許可の液状化強度特性から変更がないことを確認。



盛土の液状化強度特性
(設置変更許可)

変更がないことを確認



追加液状化強度試験

盛土の液状化強度特性
(工事計画認可)