

「基礎地盤の変形評価に関する研究小委員会」 活動報告

原子力土木委員会

2023年12月21日

1

設立趣意

1. 委員会の名称：

基礎地盤の変形評価に関する研究小委員会

2. 目的：

原子力土木委員会の地盤に関連した部会及び小委員会では、2009年に「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術」として技術資料を刊行している。それ以降も原子力発電所基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価手法の高度化および体系化を図ることを目的として、地盤安定性評価部会（2010～2012）、地盤安定性評価小委員会（2013～2014）、断層変位評価小委員会（2013～2015）地盤安定解析高度化小委員会（2015～2017）として活動を継続し、地盤安定性評価小委員会（2018～2020）で2021年に技術資料を刊行した。その中で、断層変位評価技術については、実サイトへの適用に関して、解析モデルの設定、不確かさの考慮、地震動の影響の考慮など課題が残されている。本フェーズでは、これらの課題を解決し、断層変位による基礎地盤の変形評価手法を構築することを目的とする。また、断層変位以外による地震時の基礎地盤の変形評価についても専門家による検討を行う。

3. 活動期間：

- 2021年度～2023年度

2

設立趣意（続き）

4. 活動方法：

- ワーキンググループ（WG）における議論・審議（断層変位、液状化）
- 小委員会におけるWG報告、技術紹介に基づく議論・審議

5. 検討項目：

- 断層変位（地殻変動）による基礎地盤の変形評価技術の体系化
 - 数値解析，地表地震断層データ，不確かさの考慮，地震動との重畳効果
- 基礎地盤の変形評価のクライテリア
 - 傾斜，建屋間の相対変位（地殻変動・断層変位と地震動に起因）
- 液状化の影響評価 ※2022年度から追加された項目，地震工学委員会「地盤の過剰間隙水圧上昇と消散に伴う変形の評価小委員会」との共同

6. 成果

- 委員会報告（技術資料）を作成する。
- 報告書，関連研究の成果報告のシンポジウムを実施する

3

小委員会名簿

役職	氏名	勤務先名称	備考
委員長	谷 和夫	東京海洋大学	
委員	今林 達雄	九州電力株式会社	
委員	大島 靖樹	東京都市大学	
委員	岡田 哲実	一般財団法人電力中央研究所	
委員	小野 祐輔	鳥取大学	
委員	金戸 俊道	東京電力ホールディングス株式会社	
委員	河井 正	東北工業大学	
委員	岸田 潔	京都大学大学院	
委員	古関 潤一	ライト工業株式会社	
委員	篠田 昌弘	防衛大学校	
委員	高尾 誠	原子力エネルギー協議会	
委員	壇 一男	熊本大学	
委員	中村 晋	日本大学	
委員	久田 嘉章	工学院大学	
委員	堀 宗朗	海洋研究開発機構	
委員	松島 亘志	筑波大学	
委員	三橋 祐太	株式会社構造計画研究所	
委員	森 勇人	中部電力株式会社	
委員	山田 正太郎	東北大学	
委員	吉見 雅行	産業技術総合研究所	
委員	若井 明彦	群馬大学	

4

幹事長	澤田 昌孝	一般財団法人電力中央研究所
幹事	荒川 武久	東京電力ホールディングス株式会社
幹事	石丸 真	一般財団法人電力中央研究所
幹事	泉 信人	北海道電力株式会社
幹事	伊藤 耀	九州電力株式会社
幹事	伊藤 陽祐	日本原子力発電株式会社
幹事	家島 大輔	中国電力株式会社
幹事	加藤 一紀	株式会社大林組
幹事	工藤 直洋	日本原燃株式会社
幹事	小早川 博亮	一般財団法人電力中央研究所
幹事	小林 孝彰	鹿島建設株式会社
幹事	沢津橋 雅裕	一般財団法人電力中央研究所
幹事	鈴木 俊輔	四国電力株式会社
幹事	徳永 仁志	九州電力株式会社
幹事	中村 武史	一般財団法人電力中央研究所
幹事	中村 秀樹	中部電力株式会社
幹事	中村 洋一	電源開発株式会社
幹事	西本 真也	北陸電力株式会社
幹事	橋本 澄明	東北電力株式会社
幹事	羽場 一基	大成建設株式会社
幹事	兵頭 順一	東電設計株式会社
幹事	山口 和英	一般財団法人電力中央研究所
幹事	吉田 泰基	一般財団法人電力中央研究所
常時参加者	小川 健太郎	東京電力ホールディングス株式会社
常時参加者	菊地 裕	東北電力株式会社
常時参加者	佐々 和樹	電源開発株式会社
常時参加者	両角 浩典	関西電力株式会社

活動実績

- ◆ 2021年度
 - 第1回：10月5日（火）9:00～12:00 オンライン
 - 第2回：12月17日（金）13:30～17:00 オンライン
 - 第3回：3月17日（木）13:30～17:00 オンライン
- ◆ 2022年度
 - 第4回：7月4日（月）13:30～17:00 オンライン
 - 第5回：11月16日（水）13:30～17:00 主婦会館プラザエフ+オンライン
 - 第6回：3月27日（月）13:30～17:00 土木学会A会議室+オンライン
- ◆ 2023年度
 - 第7回：7月20日（木）13:30～17:00 主婦会館プラザエフ+オンライン
 - 第8回：11月13日（月）13:30～17:00 土木学会A会議室+オンライン
 - 技術資料ドラフト確認
- ◆ 断層の数値解析WG（2022年度以降6回開催）
- ◆ 液状化の影響評価WG（2022年度以降3回開催）
- ◆ 幹事会（4回開催）

技術資料の作成

- ◆ 下記の3部構成
 - 第1部 基礎地盤の変形評価
 - 第2部 断層変位の影響評価
 - 第3部 液状化の影響評価
- ◆ 2023年11月15日 初稿締め切り（その後、小委員会内でレビュー、修正）
- ◆ 2023年12月15日 技術文書審議タスクへ報告書ドラフトの提出
- ◆ 2024年1月19日 第2回技術文書審議タスク

第1部 基礎地盤の変形評価

第1部（基礎地盤の変形評価）の概要と目次 （1章を除いて：91ページ）

- ◆ 第1部の概要
 - 第1部では主に地震の発生により生じる地震動が原因で基礎地盤に生じる変形の評価技術や基礎地盤の変形評価のクライテリアの検討内容について記載した（断層変位の影響評価技術については第2部参照）。
 - 2章ではJEAG4601に記載の基礎地盤の評価フロー、等価線形解析によるすべり安全率評価や動的非線形解析手法やその妥当性の確認事例について記載した。また、地殻変動起因の変形評価手法についても記載した。
 - 3章では動的非線形解析を用いた際の安定性の評価に必要なクライテリアの検討を行った。3.1では原子力分野における評価規準レビューを行った。3.2では原子力土木以外の分野における評価規準レビューを行った。さらに3.3では今後の取り組みの方向性について短期と長期に分けて示した。
- ◆ 第1部の目次
 - 1 基礎地盤の変形評価に関する研究小委員会の活動の概要
 - 2 地震動による基礎地盤の変形評価
 - 2.1 背景
 - 2.2 地震時に想定される基礎地盤の変形
 - 2.2.1 地震動起因の変形
 - 2.2.2 地殻変動・断層変位起因の変形
 - 2.3 基礎地盤の安定性評価技術
 - 2.3.1 基礎地盤安定性評価の流れ
 - 2.3.2 等価線形解析とすべり安全率評価
 - 2.3.3 動的非線形解析
 - 2.3.4 地殻変動解析
 3. 基礎地盤の変形評価のクライテリアの検討
 - 3.1 原子力分野の評価事例による評価規準レビュー
 - 3.2 他分野の評価規準
 - 3.3 変形評価のクライテリアに関する今後の方向性

現状の評価規準と課題

- ◆ 現状の評価規準は、2013年に施行された「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、新規制基準）
 - 主たる作用として、基準地震動 S_s に加えて地震発生に伴う地殻変動を考慮
 - 性能照査型設計（図1）における要求性能としては、安全性を考慮
- ◆ 今後、新しい知見を取り入れていくにつれて予想される基準地震動 S_s の増大
 - 地盤の応答は弾性域を超えて塑性域に入る可能性が高い
 - この状態を照査するためには、解析手法の高度化（例えば、2.3.3 動的的非線形解析）が必要であるため、研究が進められている（図2）
- ◆ 高度な解析手法を用いて要求性能ないし性能規定を照査するためのクライテリア

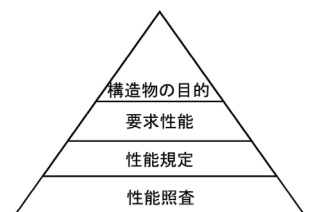


図1 性能照査型設計の階層構造

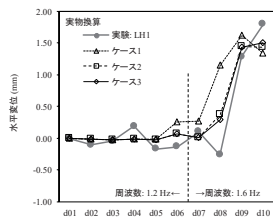


図2 動的的非線形解析による建屋の水平変位の評価

今後原子力土木分野で 必要な取り組みの短期的な方向性について

- ◆ 短期的には、これまでの照査指標であるすべり安全率評価との関係性から性能を規定する方法
 - 1つは港湾分野の事例を参考にすべり安全率と変形の期待値の関係を分析して性能を規定する方法（図1）
 - もう1つは信頼性設計法の理論（表1）を基に不確かさを考慮して、すべり安全率を用いた破壊確率 P_f （または信頼性指標 β_f ）と変形を用いた破壊確率 P_d （または信頼性指標 β ）の関係から性能を規定する方法

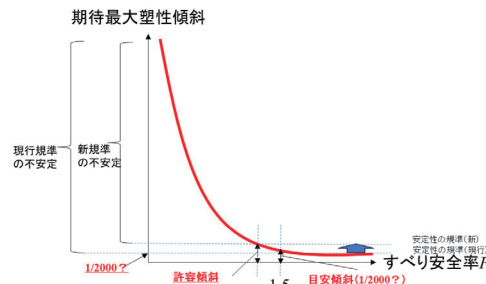


図1 すべり安全率と変形（期待値）の関係

表1 信頼性設計における3つの安全性水準

設計水準	性能照査式	評価パラメータ
レベル3	$P < P_a$	破壊確率
レベル2	$\beta_f < \beta$	信頼性指標
レベル1	$R_s \geq S_s$	設計用値

今後原子力土木分野で 必要な取り組みの長期的な方向性について

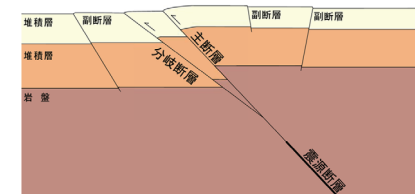
- ◆ 長期的には、要求性能から性能を規定する方法
 - ここでは、構造物の特徴に応じて独立基礎を持つ構造物と長大構造物（防潮堤の様な津波防護施設）に分けて示し、後者では、限界応対を超える大規模地震の可能性に対応するために復旧性を念頭にいた性能について言及（表1）

表1 長大構造物基礎におけるクライテリアの方向性

対象	要求性能	性能項目	想定する境界状態	照査指標	作用	照査値
設計基準対象施設（長大構造物基礎）の基礎地盤	使用性	■ 支持することかできる	■ 地震力が作用した場合においても十分に支持できること ○ OSクラス機器・システムを支持する建物および構築物の安全機能が重大な影響を受けない	■ 接地圧 ○ 基礎の支持力 ■ 支持性能 ○ 基礎地盤のすべり ○ 基礎底面の傾斜量 ○ 許容傾斜は要求性能に応じて設定 目安として1/2000以下 → 要求性能に応じて設定	■ 地震力	○ 動的解析におけるすべり安全率 $F_s \geq 1.5$ → 基礎地盤のすべり安全率に代わる傾斜量、変形量 ○ 許容傾斜は要求性能に応じて設定 目安として1/2000以下 → 要求性能に応じて設定
	使用性	■ 変形	■ 変形した場合においても安全機能が損なわれない ○ 地盤の変状による建物・構築物間の不等沈下、液状化、ゆすり込み・沈下等により、当該建物および構築物の安全機能が重大な影響を受けない	■ 建物・構築物間の不等沈下、液状化及びゆすり込み・沈下などの地盤変状		○ 施設の安全機能が重大な影響を受けないよう所要の対策を講じる
	使用性 → 復旧性	■ 変形	■ 変形した場合においても安全機能が損なわれない ○ 基礎地盤の傾斜および構造物の安全機能を有する施設が重大な影響を受けない	■ 支持地盤の傾斜及びゆすり込み・沈下 ○ 隣接する建物及び構築物の間で生じる不等沈下（揺すり込み・沈下、液状化による沈下）及び地表面の不陸（液状化等）	■ 地殻変動	○ 支持力 ○ 動的解析におけるすべり安全率 $F_s \geq 1.5$ → 基礎地盤のすべり安全率に代わる傾斜量、変形量 ○ 許容傾斜は要求性能に応じて設定 目安として1/2000以下 → 要求性能に応じて設定
	使用性	■ 変位	■ 変位（将来滑動する可能性が有る断層等が活動することにより、地盤に与えるずれ）が生ずるおそれがない	■ 将来活動する可能性のある断層等の確認がないことを確認した地盤に設置する		■ 断層更新世以降（約12〜13万年前以降）の活動性の有無

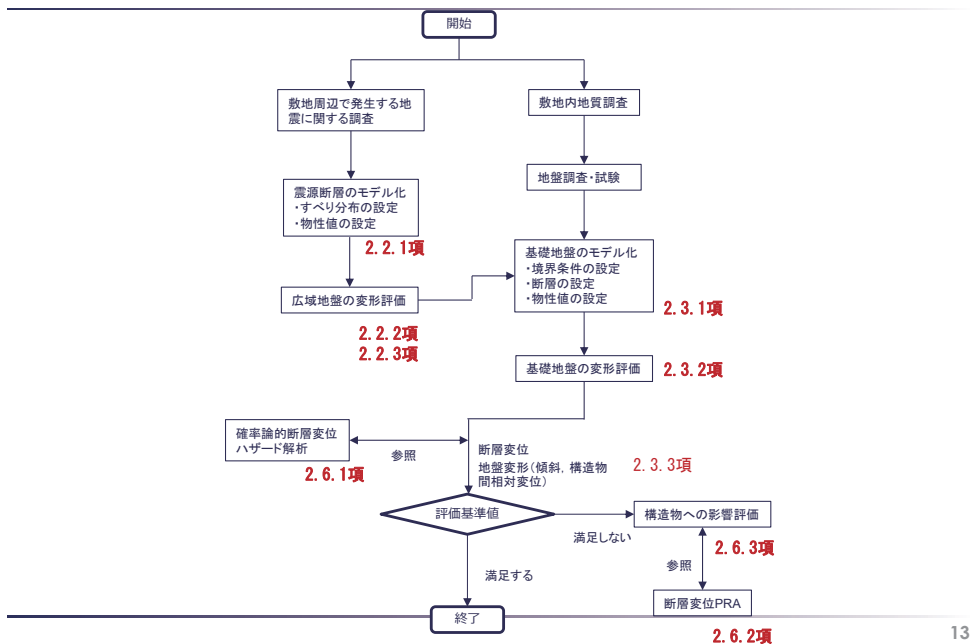
第2部 断層変位の影響評価 目次 （全体：128ページ）

- はじめに
- 地殻変動・断層変位による基礎地盤の変形評価
 - 評価の手順
 - 地盤及び断層のモデル化
 - 広域地盤の変形評価
 - 基礎地盤の変形評価
 - 断層変位解析
 - 入力ずれ変位の設定
 - 評価基準
 - 断層変位解析事例
 - 連続体（基礎地盤の変形評価）
 - 連続体
(広域地盤および基礎地盤・広域地盤一体の変形評価)
 - 不連続体
 - 解析技術の評価・課題
 - 地震動、地殻変動・断層変位を考慮した基礎地盤の変形評価
 - 断層変位評価に関する関連技術
 - 確率論的断層変位ハザード解析
 - 断層変位PRA
 - 断層変位影響評価手法



- ◆ 主断層が動いたときの副断層の変位を評価する数値解析手法の体系化
- ◆ 2.1〜2.3節は体系化案として書籍き+解説のフォーマットで記述
- ◆ 2.4節の解析事例を記述の根拠として参照

断層変位の影響評価フロー



第2部 目次 (2.4節の詳細)

2.4 断層変位解析事例

2.4.1 連続体 (基礎地盤の変形評価)

- (1) 並列有限要素法を用いた断層変位解析
- (2) 地盤の速度依存性考慮した変位形成解析
- (3) 欧州QUAKERプロジェクト
- (4) 複数の破碎帯を有する基礎地盤変形評価に関するパラメータスタディ

各解析事例に含める内容

- a) 数値解析手法の概要
- b) 断層変位評価手順
- c) シナリオの設定
- d) 断層のモデル化
- e) 断層物性, 地盤物性の設定
- f) 解析結果
- g) 適用が有効な問題, 適用限界

2.4.2 連続体 (広域地盤および広域地盤・基礎地盤一体の変形評価)

- (1) 波数積分法による永久変位・強震動計算
- (2) 差分法・相反定理を用いた動的・静的変位評価
- (3) 動力学シミュレーションによる断層変位の評価
- (4) 並列FEMを用いた運動学的地震動解析による副断層発生領域の評価

2.4.3 不連続体 (基礎地盤変形評価)

- (1) 三次元DEM
- (2) DEMを適用した副断層変位量の距離減衰式策定の試み

2.4.4 解析技術の評価・課題

- ・問題の難しさ(局所化解析, 分岐問題, 材料の不均質性, 確率評価)
- ・連続体的手法, 不連続体的手法それぞれのメリット・デメリット

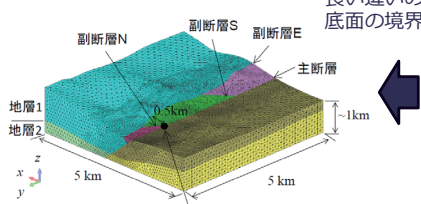
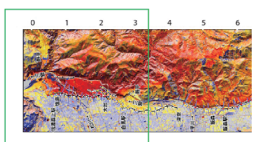
解析事例 (抜粋)

2.4.1(1) 並列有限要素法を用いた断層変位解析

- ◆ 解析手法: 有限要素法 (高性能計算: 大規模三次元解析, 条件の異なる多ケース解析)
- ◆ 副断層での地表ずれ変位の発生有無, 変位量を評価
- ◆ 副断層を含む詳細モデル←境界条件 (広域解析: 食い違い弾性論, 動的FEM)
- ◆ 適用事例: 2014年長野県北部の地震, 2016年熊本地震

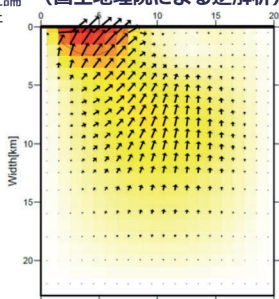
2014年長野県北部の地震 解析モデル

モデル化領域

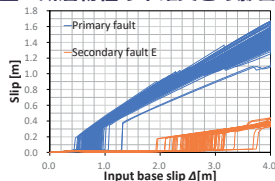


地表地震断層(主断層)北端
(y=3854.77m)

ずれ変位分布 (国土地理院による逆解析)



岩盤・断層物性の不確かさの影響評価



解析結果

予測解析の場合は主断層のずれ変位分布を設定する必要がある。
⇒強震動レシビに基づいて設定
浅部のすべりの影響の議論

第3部: 液状化の影響評価 目次 (全体: 96ページ)

1. はじめに

- 1.1 背景
- 1.2 原子力サイトの液状化影響評価の現状整理
- 1.3 目的
- 1.4 密な岩ざり地盤の調査・試験
 - 1.4.1 岩ざりの特徴
 - 1.4.2 密な岩ざり地盤の調査・試験事例
- 1.5 天然の固結砂地盤の調査・試験
 - 1.5.1 天然の固結砂の特徴
 - 1.5.2 天然の固結砂地盤の調査・試験事例

2. 密な岩ざり地盤の数値解析事例

- 2.1 室内土質試験
- 2.2 振動台実験
- 2.3 数値解析

3. 固結砂地盤の数値解析事例

- 3.1 室内土質試験
- 3.2 振動台実験
- 3.3 数値解析

4. まとめ

- 4.1 過剰間隙水圧上昇の影響評価の考え方
 - 4.1.1 過剰間隙水圧上昇の影響評価フロー
 - 4.1.2 密な岩ざり地盤
 - 4.1.3 天然の固結砂地盤
- 4.2 今後の課題

「液状化の影響評価WG」の活動内容

◆ 目的

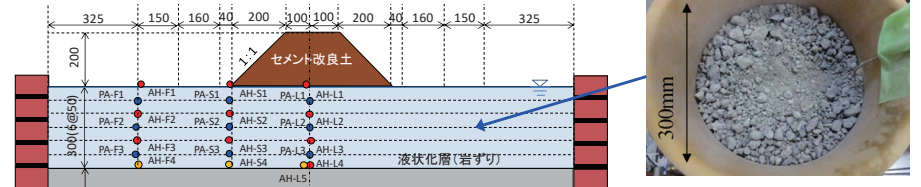
- 密な岩ずり，第四紀中期更新世に堆積した固結砂（以下，固結砂）を対象に，液状化の影響評価に係る事例の収集を行うとともに，物性値設定のあり方や，数値解析手法の適用に当たっての考え方をとりまとめる。
 - ✓ 注）本WGでは，広義の液状化に分類される現象（繰返し軟化，サイクリックモビリティ等）を主対象とする。 ※狭義の液状化：緩い砂の液状化

◆ 内容

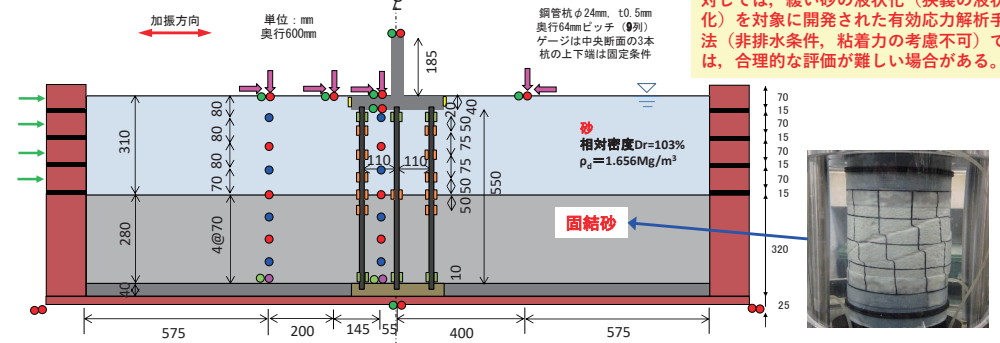
- ① 原子力サイトの液状化の影響評価に係る地盤調査・室内力学試験・数値解析の現状整理
- ② 岩ずり，固結砂の既往の振動台実験事例や数値解析事例の調査，意見交換
 - ✓ 砂質地盤は他分野でも事例が多いことから，岩ずり，固結砂地盤を対象とする。
 - ✓ 2018～2020年度の電力会社の共同研究では，岩ずり，固結砂の液状化影響評価について，遠心力模型実験を対象とした複数の解析コードによる数値解析を実施。
 - ✓ 上記以外の事例についても，文献調査や話題提供等による情報収集，意見交換を行う。
- ③ 物性値設定や数値解析の適用（妥当性確認）に関する議論
 - ✓ 岩ずり，固結砂地盤を対象として，液状化の影響評価に係る物性値設定のあり方や，数値解析手法の妥当性確認・適用に当たっての考え方について議論する。

密な岩ずり地盤及び天然の固結砂地盤を対象とした遠心力場（50G場）振動台実験と数値解析

● 盛土を支持する密な岩ずり地盤

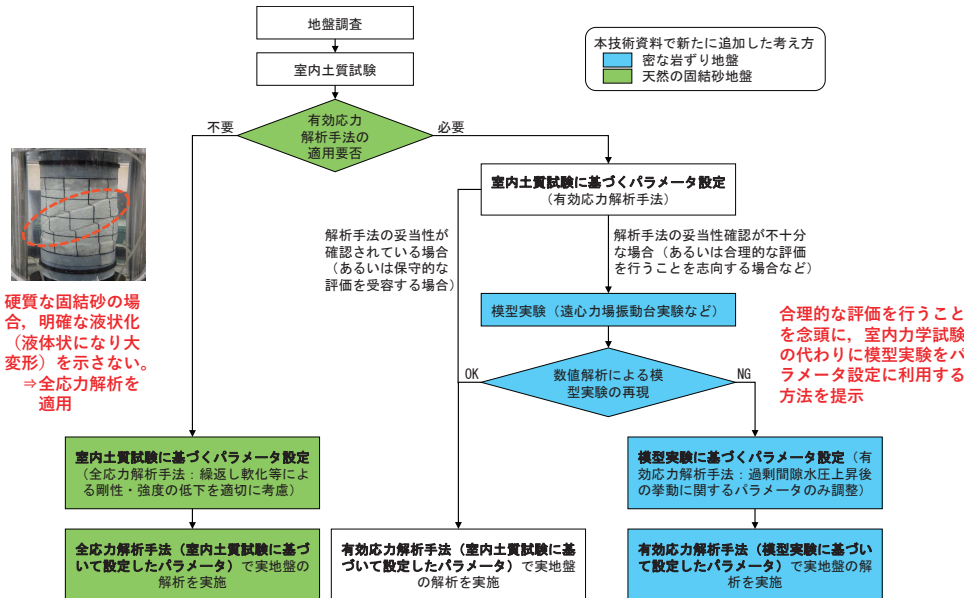


● 防潮堤杭基礎の周辺地盤（砂・固結砂）



密な岩ずり地盤や，硬質な固結砂地盤に対しては，緩い砂の液状化（狭義の液状化）を対象に開発された有効応力解析手法（非排水条件，粘着力の考慮不可）では，合理的な評価が難しい場合がある。

過剰間隙水圧上昇の影響評価フロー （密な岩ずり地盤，天然の固結砂地盤）



付録

断層の数値解析WGメンバー (全12名, 敬称略)

氏名	所属	小委員会における役職
澤田 昌孝	電力中央研究所	幹事長
小野 祐輔	鳥取大学	委員
高尾 誠	原子力エネルギー協議会	委員
久田 嘉章	工学院大学	委員
堀 宗朗	海洋研究開発機構	委員
松島 亘志	筑波大学	委員
三橋 祐太	構造計画研究所	委員
山田 正太郎	東北大学	委員
若井 明彦	群馬大学	委員
中村 武史	電力中央研究所	幹事
羽場 一基	大成建設	幹事
山口 和英	電力中央研究所	幹事

液状化の影響評価WGメンバー (全15名: 五十音順, 敬称略)

氏名	所属	基礎地盤の変形評価に関する 研究小委員会における役職
石丸 真	電力中央研究所	幹事
小川 健太郎	東京電力ホールディングス	常時参加者
加藤 一紀	大林組	幹事
河井 正	東北工業大学	委員
菊地 裕	東北電力	常時参加者
古関 潤一	ライト工業	委員
小林 孝彰	鹿島建設	幹事
佐々 和樹	電源開発	常時参加者
沢津橋 雅裕	電力中央研究所	幹事
高尾 誠	原子力エネルギー協議会	委員
中村 晋	日本大学	委員
中村 秀樹	中部電力	幹事
兵頭 順一	東電設計	幹事
山田 正太郎	東北大学	委員
若井 明彦	群馬大学	委員