

# 令和6年度 地震工学委員会第1回研究会

## 地盤の過剰間隙水圧上昇と消散に伴う 変形の評価に関する小委員会

### —活動報告—



委員長：仙頭 紀明（日本大学）

○幹 事：三上 武子（一般財団法人 **GRI財団**）

## 【背景】

- ♣ 耐震性能設計の普及に伴い、動的解析を用いた地盤の変形量照査が実務で導入されるようになった
- ♣ 砂質地盤の照査では、繰返しせん断による過剰間隙水圧の発生を考慮した有効応力解析が普及している
- ♣ ただし、過剰間隙水圧上昇とその後の水圧消散に伴う地盤沈下や流動変形といった変形量の評価方法については課題が残る
- ♣ 地盤材料は砂質土のみならず礫質土、岩ずり、固結した土（洪積土）等といった多種多様な材料を含み、それらの材料特性や解析パラメータの設定に関する知見は蓄積が不足している

## 【目的】

- ♣ 地盤の過剰間隙水圧上昇と消散に伴う変形量照査に必要な地盤調査および室内力学試験方法を調査技術者・室内試験技術者・解析技術者・設計者の枠を超えて議論し、合理的な評価のプロセスを明らかにし、その評価事例と併せて示す（⇒ガイドラインとしてまとめる）
- ♣ 礫質土，固結土については，原子力土木委員会 液状化の影響評価WGと合同で活動を進める

# 2. メンバーと活動期間

♣ 委員長 : 仙頭 紀明, 幹事 : 三上 武子

♣ メンバー : 25名

♣ 活動期間 : 2022.4~2025.3 (3年間) ⇒1年間の延長を申請中

氏名	所属	氏名	所属
仙頭 紀明	日本大学	加藤 一紀	大林組
三上 武子	GRI財団	金田 一広	千葉工業大学
家田 浩之	エイト日本技術開発	久木留 貴裕	オリエンタルコンサルタンツ
石川 敬祐	東京電機大学	栗間 淳	東京大学生産技術研究所
石丸 真	電力中央研究所	佐藤 誠一	日本工営
一井 康二	関西大学	塩見 忠彦	マインド
伊吹 竜一	鉄道総合技術研究所	富澤 幸一	北武コンサルタント
上田 恭平	京都大学防災研究所	中村 晋	日本大学
植村 一瑛	応用地質	兵頭 順一	東電設計
渦岡 良介	京都大学防災研究所	山本 大輝	伊藤忠テクノソリューションズ
海野 寿康	宇都宮大学	吉田 望	関東学院大学
大矢 陽介	海上・港湾・航空技術研究所	和田 昌大	基礎地盤コンサルタンツ
岡本 順平	シオ・サーチ		

# 3. 委員会開催

- ♣ 年4回のペースで開催
- ♣ 2022年度はオンライン，2023年度はハイブリッド
- ♣ 委員会内外からの話題提供により情報収集

	2022年度（オンライン）	2023年度（ハイブリッド）
1回目	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2022/6/28</li><li>• 話題提供1件</li><li>• 委員会活動の進め方について</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2023/6/16</li><li>• 話題提供2件</li><li>• 委員会活動の進め方について</li></ul>
2回目	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2022/8/25</li><li>• 話題提供3件</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2023/9/29</li><li>• 話題提供2件</li><li>• ガイドラインの構成について</li></ul>
3回目	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2022/12/23</li><li>• 話題提供3件</li><li>• 委員会活動の進め方について</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2023/12/26</li><li>• 話題提供3件</li><li>• ガイドラインの構成について</li></ul>
4回目	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2023/2/28</li><li>• 話題提供3件</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2024/3/21</li><li>• 話題提供2件</li><li>• ガイドラインの構成について</li></ul>

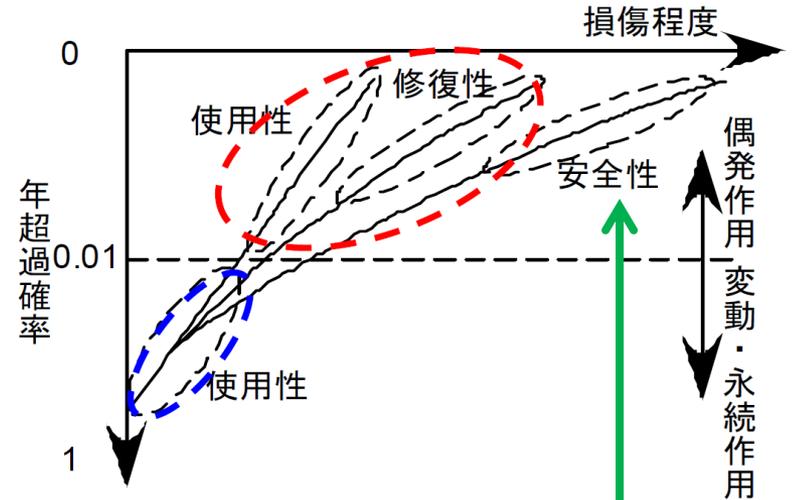
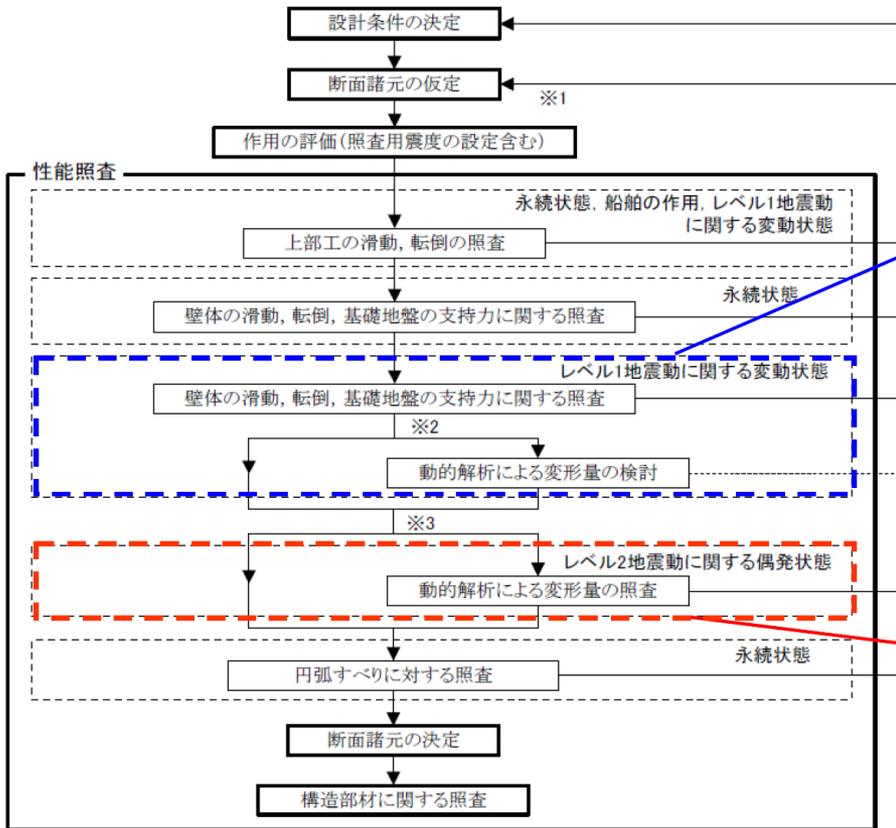
# 4. 「話題提供」の紹介

- ♣ 岩ずり地盤の液状化影響評価
  - ♣ 固結した砂地盤における過剰間隙水圧上昇の影響
  - ♣ SCP工法による改良効果の評価事例
  - ♣ FLIPの非排水／排水モデルの概要とLEAP-ASIA-2019の紹介
  - ♣ 等価線形解析（SHAKE）の背景と理論・改良の歴史
  - ♣ マルチハードニングによる土の構成式
  - ♣ サンプリングの種類と採取試料の品質評価例
  - ♣ 人工地震波による液状化実験
  - ♣ 重力場模型振動実験による液状化地盤中のせん断・体積ひずみの評価
  - ♣ 地中構造物の模型実験
  - ♣ ため池の地震被害と耐震設計
  - ♣ 港湾・空港分野の性能設計
  - ♣ 電力分野の性能設計
  - ♣ 鉄道分野の性能設計
- 材料
- 解析
- 調査
- 実験
- 設計

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【港湾・空港分野の性能設計】

### ♣ 重力式岸壁を例として



レベル1地震動に関する変動状態

安全性は考慮しない

レベル2地震動に関する偶発状態

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【港湾・空港分野の性能設計】

### ♣ 重力式岸壁を例として

	地震動	照査	
		通常施設	耐震強化施設
レベル1	再現期間75年程度の強度を持つ地震動	滑動, 転倒, 支持力等の照査 震度法ベースの安定解析	
レベル2	既往・将来に渡って発生する最大級の地震動	変形照査 有限要素解析 (FLIP他)	

### 性能規定

要求性能	設計状態			照査項目	限界値を定める標準的な指標
	状態	主たる作用	従たる作用		
修復性 使用性	偶発状態	レベル2 地震動	自重, 土圧, 水圧, 軸荷重	法線の変形	岸壁天端の 残留変形量

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【空港・空港分野の性能設計】

### レベル2地震動に対する空港土木施設の耐震性能（評価項目）

施設	大規模地震発生後に必要とされる輸送形態		
	固定翼機による 旅客輸送	固定翼機による 緊急物資輸送	回転翼機による 緊急物資輸送
滑走路 誘導路	• 地盤の液状化の有無 • 地盤の変形（勾配・段差） • 地盤の支持力 • ひび割れ発生状況		• （護岸，高盛土を含む場合） 地盤の変形
エプロン			• 地盤の液状化の有無 • 地盤の変形（勾配・段差） • 地盤の支持力

- ✿ 空港分野では過剰間隙水圧 $\Delta u$ を直接的に使用（cf. 港湾分野では $\Delta u$ を直接的には使用せず、変形のみを使用）
- ✿ 耐震性能（評価項目）に沈下は入っていない。これは、全体的に沈下する分には着陸可能となるため。ただし、排水勾配1.5%以上の勾配はoutとなる。

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【港湾・空港分野の性能設計】

- ♣ 沿岸センターがチェック機能を果たす
- ♣ FLIPのチェックは国総研が担当
- ♣ 港空研は相談窓口を担当

### ♣ 参考図書

港湾の施設の技術上の基準・同解説  
国土交通省港湾局監修，日本港湾協会，2018.

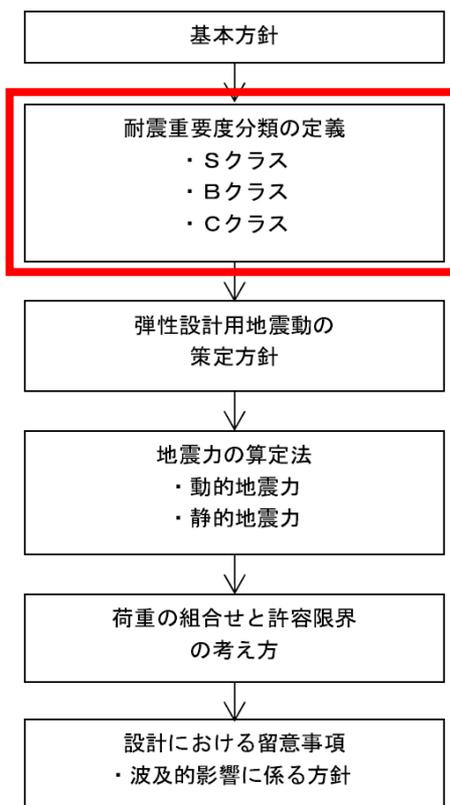
港湾構造物設計事例集  
沿岸技術研究センター，2019.

空港土木施設設計要領及び設計例（耐震設計編）  
港湾空港総合技術センター，2019.



## 【電力分野の性能設計】

♣ 重要度に応じてクラス分けし、クラスごとに照査を行う。



審査フロー

### 3. 耐震重要度分類

耐震重要度分類の定義が下記を踏まえ妥当であることを確認する。また、施設の具体的な耐震重要度分類の妥当性について確認する。

#### 3.1 Sクラスの施設

- ・ 地震により発生する可能性のある事象に対して、原子炉を停止し、炉心を冷却するために必要な機能を持つ施設。
- ・ 自ら放射性物質を内蔵している施設。
- ・ 当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設。
- ・ これらの施設の機能喪失により事故に至った場合の影響を緩和し、環境への放射線による影響を軽減するために必要な機能を持つ施設。
- ・ これらの重要な安全機能を支援するために必要となる施設。
- ・ 地震に伴って発生する可能性のある津波による安全機能の喪失を防止するために必要となる施設。

#### 3.2 Bクラスの施設

- ・ 安全機能を有する施設のうち、機能喪失した場合の影響がSクラスと比べ小さい施設。

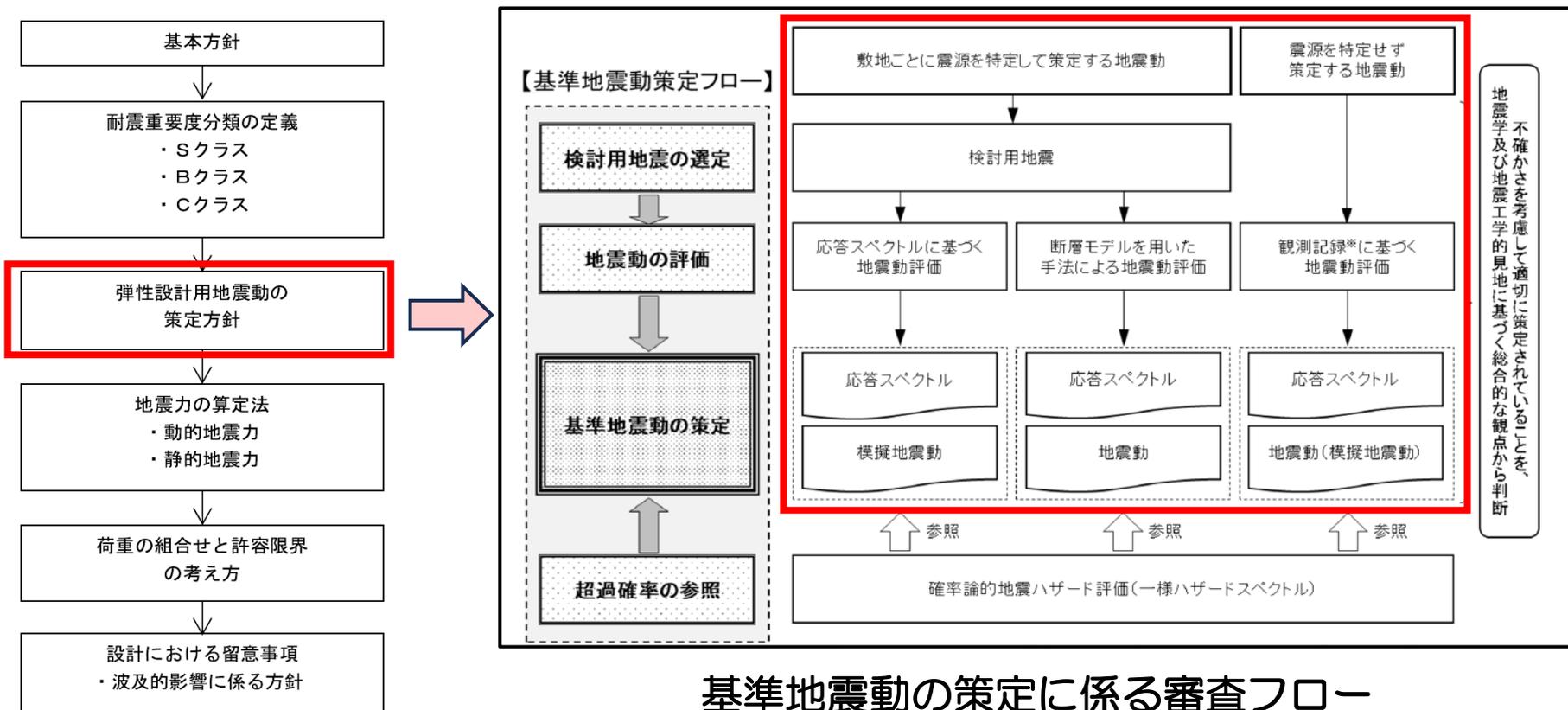
#### 3.3 Cクラスの施設

- ・ Sクラスの施設及びBクラスの施設以外の一般産業施設、公共施設と同等の安全性が要求される施設。

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【電力分野の性能設計】

♣ 地震動についても照査を行う。



基準地震動の策定に係る審査フロー

審査フロー

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【電力分野の性能設計】

### ♣ 地震応答解析の手法が記載されている。

#### 5.4 地震応答解析

##### 5.4.1 地震応答解析手法及び地震応答解析モデル

###### 【審査における確認事項】

屋外重要土木構造物の地震応答解析においては、適切な地震応答解析手法及び地震応答解析モデルを設定していることを確認する。

###### 【確認内容】

地震応答解析手法及び地震応答解析モデルについては以下を確認する。

##### (1) 地震応答解析手法

- ① 地震応答解析手法は、規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601の規定を参考に設定していること。
- ② 原則として屋外重要土木構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる連成系の地震応答解析手法を用いていること。
- ③ 地震応答解析手法は、地盤及び屋外重要土木構造物の地震時における非線形挙動の有無や程度に応じて、線形、等価線形、非線形解析のいずれかによること。

##### (2) 屋外重要土木構造物及び地盤の地震応答解析モデル

- ① 線形又は等価線形の地震応答解析手法を用いる場合の屋外重要土木構造物及び地盤の地震応答解析モデルは、規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601の規定を参考に設定していること。
- ② 非線形の地震応答解析手法を用いる場合の屋外重要土木構造物及び地盤の地震応答解析モデルは、既往の研究等に基づき、地震時の非線形挙動の程度に応じた応答性状を表現できるものを設定していること。
- ③ 地盤の地震応答解析モデルは、屋外重要土木構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる有限要素等を用いていること。

## 【電力分野の性能設計】

### ♣ 水平2方向の問題も規定している。

#### 5.5.2 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ

##### 【審査における確認事項】

屋外重要土木構造物については、水平2方向及び鉛直方向の地震力による応答値の組合せを適切に行っていることを確認する。

##### 【確認内容】

水平方向及び鉛直方向地震力の組合せについては以下を確認する。

- (1) 線形又は等価線形の地震応答解析手法を用い、水平2方向及び鉛直方向の応答値の組合せを簡易的に行う場合は、各方向の入力地震動の位相特性や地盤、屋外重要土木構造物の応答特性に留意していること。

なお、各方向の入力地震動の位相特性や地盤、屋外重要土木構造物の応答特性により応答の同時性を考慮する必要がある場合は、各方向の各時刻歴での応答値を逐次重ね合わせる等の方法により、応力や変形等の応答値の同時性を考慮していること。

- (2) 非線形の地震応答解析手法を用いる場合は、各方向の入力地震動を同時に入力して応力や変形等の応答値を算定していること。

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【電力分野の性能設計】

### ♣ 耐力や変形による設計方法を規定している。

(1) 屋外重要土木構造物の構造部材の耐震設計においては、基準地震動  $S_s$  を用いた動的解析を実施し、以下に示す設計方法に応じて耐力や変形あるいは応力度による評価を行っていること。

#### ① 耐力や変形による設計方法

耐力や変形による耐震設計を基に評価する場合は、以下に示す照査項目ごとに、基準地震動  $S_s$  による応答値が限界値を超えていないこと。なお、照査項目ごとの限界値については、JEAG4601、原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）又はコンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（（社）土木学会，2002 年制定）の規定を参考に、構造物やその荷重状態の特徴及び構造物に要求される機能に応じた評価式等を用い設定していること。

照査方法	照査項目
部材の耐力で照査する方法	曲げモーメント、軸力
	せん断力
構造物の変形で照査する方法	層間変形角や圧縮縁コンクリートひずみ
	せん断力

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【電力分野の性能設計】

♣ 許容応力度に関する規程も記載されている。

### ② 応力度による設計方法

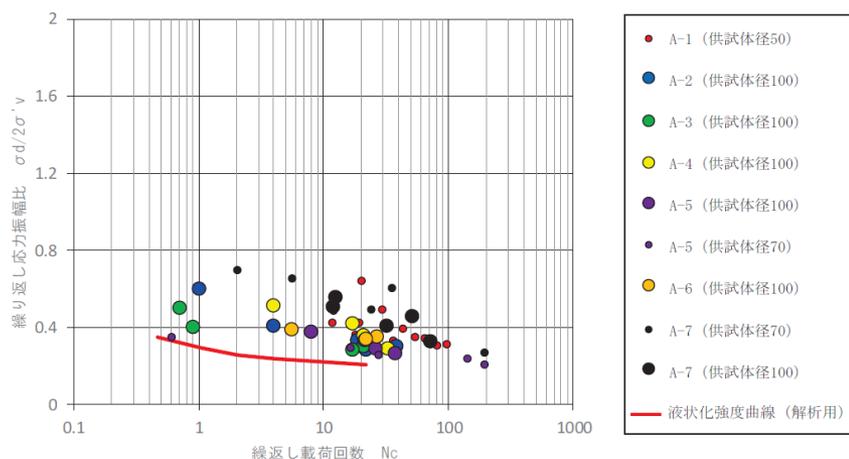
応力度による耐震設計を基に評価する場合は、基準地震動  $S_s$  を用いて算定した設計荷重により発生する部材の応力が、JEAG4601、建築基準法・同施行令、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 — 許容応力度設計法 — ((社)日本建築学会, 1999 改定)、原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社)日本建築学会, 2005 制定) 又はコンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ((社)土木学会, 2002 年制定) の規定を参考に設定されている許容限界 (許容応力度) を超えていないこと。

- (2) 基礎地盤の支持性能についての「安全上適切と認められる規格及び基準等に基づく限界値」として、JEAG4601、地盤工学会規準 (JGS 1521-2003) 地盤の平板載荷試験方法又は地盤工学会規準 (JGS 3521-2004) 剛体載荷板による岩盤の平板載荷試験方法に定める調査・試験等を参考に設定されている地盤の極限支持力度を用いていること。

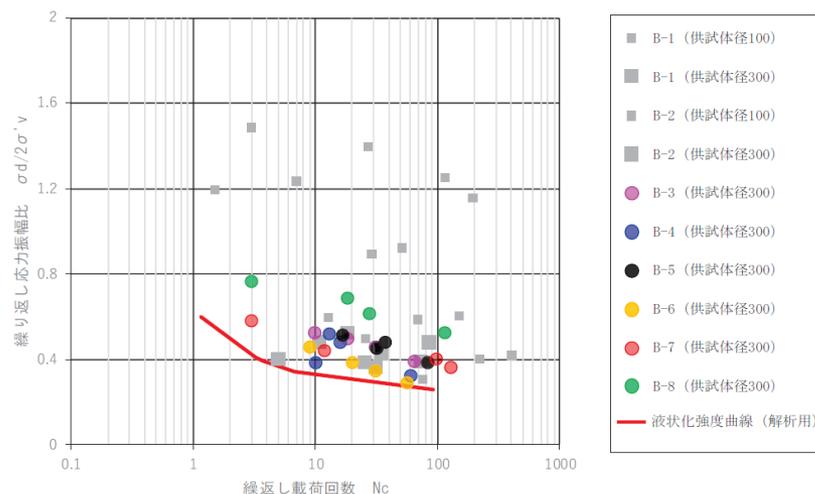
# 4. 「話題提供」の紹介

## 【電力分野の性能設計】

- ♣ 液状化を考慮する場合は、有効応力解析が広く使われている。
- ♣ 現地土を採取して液状化試験を行い、解析用の液状化強度曲線を設定する（固い試料は中空ねじり試験を採用）。
- ♣ このとき、試験値の下限に設定することが特徴的。



(旧表土)



(盛土)

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【電力分野の性能設計】

♣ 事業者の方でダブルチェックを行っている

♣ 規格・基準類（他分野からの引用が多く、独自性はあまりない）

### ◆ 原子力規制委員会の審査ガイド

基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド

基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド

耐震設計に係る工認審査ガイド

基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド

### ◆ 日本電気協会

原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601

原子力発電所耐震設計技術規程JEAC4601

火力発電所の耐震設計規程JEAC3605

### ◆ 土木学会原子力土木委員会

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・照査例2021

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【鉄道分野の性能設計】

### ♣ 構造物の要求性能

要求性能	対象構造物	説明
安全性	全ての構造物	構造物が使用者や周辺の人々の <b>生命を脅かさないための性能</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• L1地震動：機能上の安全性（<b>車両走行安全性</b>） 構造物変位を安全走行できる範囲に留める、<b>脱線しない</b></li><li>• L2地震動：構造体としての安全性 <b>全体系が破壊しない</b></li></ul>
復旧性	重要度の高い構造物 <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>新幹線</b></li><li>• <b>大都市</b>旅客鉄道の構造物</li><li>• 開削トンネルなど被害が生じた場合に<b>復旧が困難な構造物</b></li></ul>	構造物の機能を <b>使用可能な状態</b> に保つ、あるいは <b>短期間で回復可能な状態</b>

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【鉄道分野の性能設計】

### ♣ 設計地震動

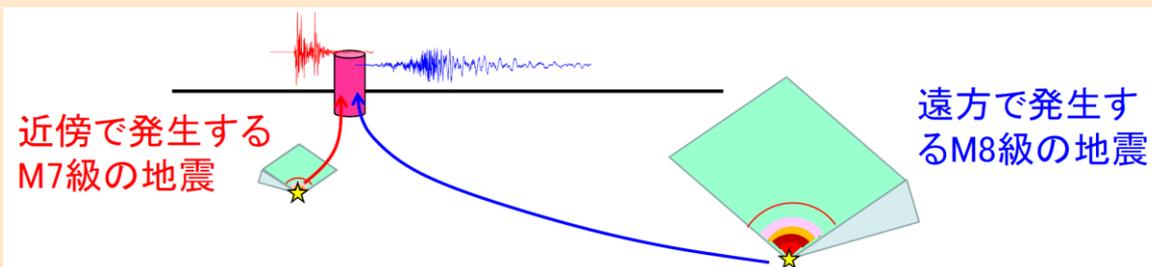
#### L1地震動

- 構造物の建設地点で設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動
- 走行安全性に関する安全性照査に用いる

#### L2地震動

- 構造物の建設地点で想定される最大級の地震動
  - 構造物の破壊に関する安全性照査に用いる
- スペクトルⅠ：陸地近傍で発生する大規模な海溝型地震  
スペクトルⅡ：内陸活断層型地震  
発生確率/地域別係数は考慮しない

最大級とは、加速度や震度といった指標ではなく「対象とする構造物に最大級の影響を与える地震動」である⇒構造物の周期や振動特性によってL2地震動の対象地震が異なる可能性がある



# 4. 「話題提供」の紹介

## 【鉄道分野の性能設計】

### ♣ 液状化を考慮した耐震設計

#### ◆ 液状化を4つの段階に分けて考慮

①発生前段階	過剰間隙水圧が上昇する前の段階	液状化しない通常地盤
②発生段階	過剰間隙水圧が上昇する段階	考慮が困難（省略可）
③持続段階	過剰間隙水圧が維持されている段階 ⇒地盤剛性や地盤強度の低下を考慮	設計の実施
④収束段階	過剰間隙水圧が消散する段階 ⇒地盤全体の沈下や不動沈下を考慮	考慮が困難 （「耐震構造計画」の段階で考慮）

#### ◆ 液状化の程度は液状化指数 $P_L$ により評価（深度20mまでを対象）

- 1)  $P_L < 5$ の場合：過剰間隙水圧の上昇による影響は小さい  
非液状化地盤として扱う
- 2)  $P_L \geq 5$ の場合：過剰間隙水圧の上昇による影響は大きい  
液状化地盤として扱う

# 4. 「話題提供」の紹介

## 【鉄道分野の性能設計】

♣ チェック機関がないため有効応力解析はほとんど使わない

### ♣ 鉄道構造物等設計標準・同解説

◇ コンクリート構造物・・・性能規定化2004

◇ 鋼・合成構造物・・・同2009

◇ 鋼とコンクリートの複合構造物・・・同2016

◇ 基礎構造物・・・同2012

◇ 土構造物・・・同2007

◇ 土留め構造物・・・同2012

◇ 開削トンネル

◇ 都市部山岳工法トンネル } ... 同2021~2022

◇ シールドトンネル

◇ 耐震設計（全構造物共通）・・・同2012

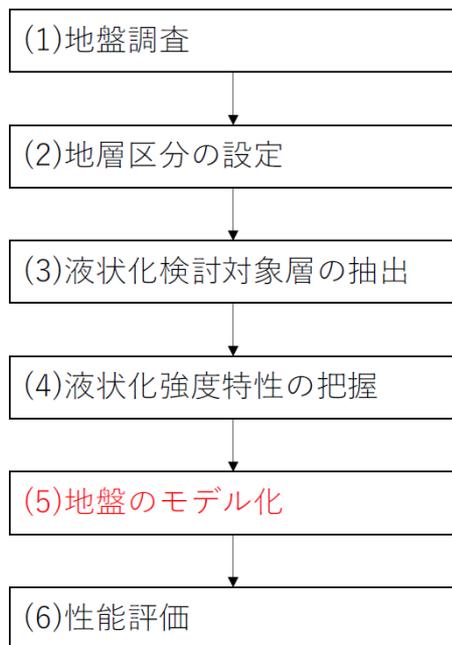
◇ 変位制限（走行安全性（トンネル適用外））・・・同2006

当時は最新であったが制定から10年以上経過しており、いろいろ課題が見えてきているところである。

# 5. 成果の取りまとめ

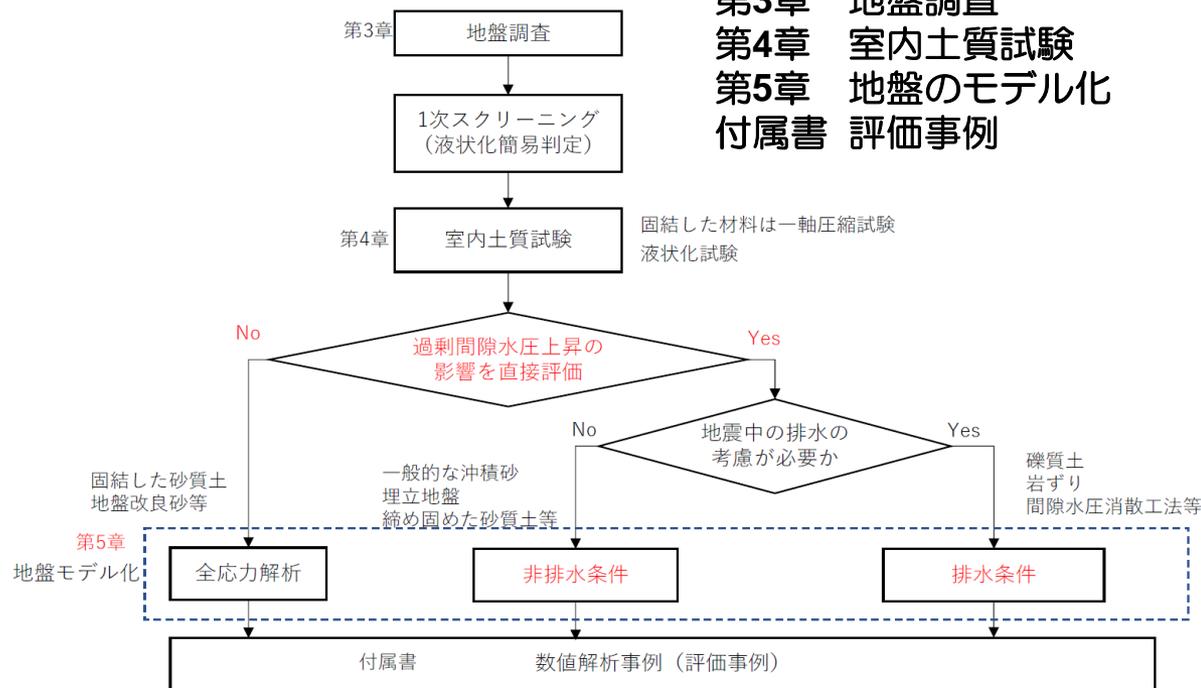
♣ 地盤の過剰間隙水圧上昇と消散に伴う変形について、合理的な評価のプロセスを明らかにし、その評価事例と併せてガイドラインとしてまとめる

## ♣ 構成案



基本的な変形照査のフロー

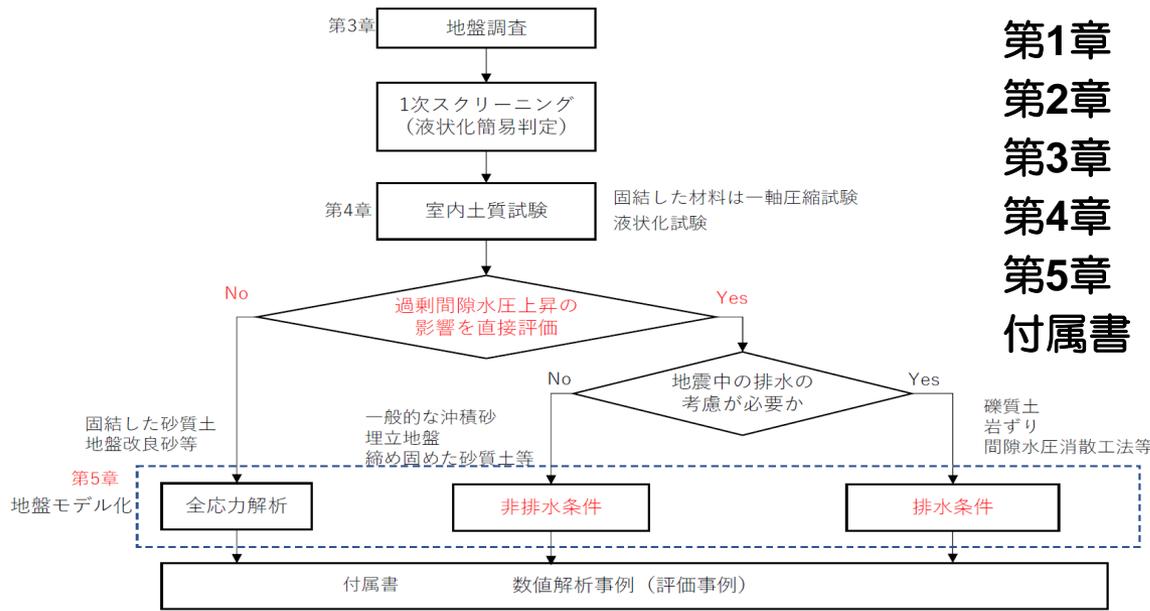
第1章	総則
第2章	基本方針
第3章	地盤調査
第4章	室内土質試験
第5章	地盤のモデル化
付属書	評価事例



ガイドラインの構成案

# 5. 成果の取りまとめ

- ♣ L2レベルの検討をメインに取り扱う
- ♣ 第3章「地盤調査」， 第4章「室内土質試験」を充実させる
- ♣ 第5章「地盤のモデル化」で示す評価方法について，優劣は議論しない
- ♣ 実務の参考になり，今後の研究の発展に資するものを目指す



第1章	総則
第2章	基本方針
第3章	地盤調査
第4章	室内土質試験
第5章	地盤のモデル化
付属書	評価事例

## ガイドラインの構成案

# 6. 2024年度の活動計画

- ♣ 年4回程度の委員会開催
- ♣ ガイドラインのコンセプト，構成，収録する事例等について議論を進め，確定する…**2024年度の前半ぐらいまで**
- ♣ 構成（目次）と分担を決めて執筆…**2024年度の後半以降**
- ♣ ガイドライン案のパブリック・コメント…**2025年度後半**
- ♣ ガイドラインの発行…**2025年度末**