

2021年5月27日 土木学会地震工学委員会第1回研究会

地盤・構造物の非線形地震応答解析法の
妥当性確認/検証方法
の体系化に関する研究小委員会

活動終了報告

委員会の設立趣旨と期待される成果

- 趣旨**：地盤・構造物に関する非線形地震応答解析の品質や信頼性向上のため、妥当性確認（Validation）と検証（Verification）に関する課題を整理し、それを実施するための考え方を幾つかの事例を示しながら、体系的にとりまとめる。
- 活動期間**：平成28年10月から令和3年3月(1年延長)
- 期待される成果**：
 - V&Vの実施手順(ガイドライン)の評価事例集の作成と発行
 - 不確実さを考慮した再現性、予測性能の評価手法

小委員会委員(総数：28名)

■委員長：中村 晋 日本大学

■幹事長：酒井久和 法政大学

■幹事：

•中瀬仁(東電設計), 末富岩雄(エイト日本技術開発), 樋口俊一(大林組技術研究所), 西山誠治(日建設計シビル)

■委員：

•堀宗朗(海洋研究開発機構), 室野剛隆(鉄道総合技術研究所), 吉田望(関東学院大学), 小野祐輔(鳥取大学大学院), 一井康二(関西大学), 塩見忠彦(マインド), 梶田幸秀(九州大学大学院), 桐山貴俊(清水建設), 若井明彦(群馬大学大学院), 大矢陽介(港湾空港技術研究所), 鈴木孝洋(熊谷組), 藤原寅士良(東日本旅客旅客鉄道), 古川愛子(京都大学大学院), 矢部正明(首都高速道路技術センター), 西村学(パシフィックコンサルタンツ), 大竹省吾(オリエンタルコンサルタンツ), 渡邊学歩(山口大学大学院), 梅林福太郎(オリエンタルコンサルタンツ), 畑明仁(大成建設), 有賀義明(弘前大学大学院), 佐竹亮一郎(東急建設), 石丸真(電中研)

小委員会のこれまでの活動状況

- 基本活動方針**：WG構成案および活動計画案の提案，活動はWGによる活動を通じて実施する。WGは4回/年程度実施する。WGの活動，委員会の実施は**幹事会**を通じて実施する。
- 平成28年度(半年)**：基本方針，活動の実施体制と計画の議論
- 平成29年度**：1次元の非線形地震応答解析に関するV&Vの考え方，多次元地盤，地盤構造物形の対象と検討方針を議論/創成解に関する勉強会/**研究討論会**を開催し，地震応答解析に関するV&Vの現状と課題を把握する。
- 平成30年度**：各WGでV&Vの考え方[手順書(案)]と検討事例に関する調査と分析を実施し，それらを取り纏めてワークショップを開催
- 令和元年度**：ガイドライン/事例集作成WGによるガイド&事例集に関する検討の実施
- 令和2年度**：ガイドライン/事例集作成WGによる報告書「地盤・構造物の非線形応答解析法の妥当性確認/検証方法- ガイドラインとその実践事例 -」執筆

委員会の活動体制

2019/2020年度
体制

ガイドライン/事例集作成WG1
(応用力学委員会/土木分野の数値解析におけるV&Vに関する小委員会とV&V小委員(幹事団+a)の合同メンバー)

地盤の地震応答解析
V&V WG2

1次元解析V&V
SWG2-1

多次元解析V&V
SWG2-2

- ・非線形FEM
- ・粒子法
- ・DEM

構造物の地震応答解析
V&V WG3

2018年度までの体制

令和2年度(2020)の活動状況

■委員会

- 第1回：R210月15日 オンライン(Zoom) (ガイドライン/事例集原案の報告)
- 第2回(予定) R3年6月 オンライン(Zoom) (ガイドライン/事例集最終報告)

■ガイドライン/事例集作成WG

- 第1回WG 7月17日 オンライン(Zoom) 14名参加 (ガイドラインの基本方針他の審議)
- 第2回WG 9月14日 オンライン(Zoom) 14名参加 (ガイドライン/事例集素案の審議)
- 第3回WG 11月13日 オンライン(Zoom) 14名参加 (ガイドライン/事例集原案の審議)
- 第4回WG R3 12月7日 オンライン(Zoom) 3名参加 (事例集1章の方針に関する打ち合わせ)
- 第5回WG R3 3月23日 オンライン(Zoom) 14名参加 (ガイドライン/事例集最終案の審議)
- 第6回WG R3 5月13日 オンライン(Zoom) 11名参加予定 (最終案の読み合わせ)
- 第7回WG R3 5月20日 オンライン(Zoom) 8名参加予定 (最終案の読み合わせ)
- 第8回WG R3 5月31日 オンライン(Zoom) 8名参加予定 (最終案の読み合わせ)

■成果(2021年10月出版予定図書)の意見照会

- 小委員会における意見照会 (2020年10月15日～10月30日)
- 地震工学委員会/応用力学委員会における意見照会(2020年12月22日～1月16日)
- 構造工学委員会・示方書連絡会, 原子力土木委員会へ意見照会(2021年3月24日～4月14日)

■報告会の実施(2021年11月予定)

地盤・構造物の非線形解析法の検証/妥当性確認 - ガイドラインとその実践事例 -

2021年度出版：編集者：地震工学委員会・地盤・構造物の非線形地震応答解析法の検証と妥当性確認による研究小委員会と応用力学委員会・土木分野の数値解析におけるV&Vに関する小委員会

第1編 ガイドライン

1. 適用範囲
2. 用語
3. 検証と妥当性確認の基本方針
4. 評価指標
5. 不確かさとその定量化
6. 検証
7. 妥当性確認
 - 7.1 初期構造・材料特性の妥当性確認
 - 7.2 全体解析モデルの妥当性確認
8. 評価過程の文書化

付属書：参考

- A. 解析モデルと数理モデルの関係について
- B. 創成解について
- C. 再現性と予測性能について
- D. 不確かさの評価と定量化

解説

第2編 資料および事例集

1 資料

- 1.1 既往の評価指標の整理
- 1.2 地盤材料特性モデルの不確かさとモデル化の留意点
- 1.3 地盤構造のモデル化に及ぼす調査・探査の影響

2. 検証事例

3. 静的解析の妥当性確認事例

- 3.1 粘性土地盤の変形解析
- 3.2 個別要素法による非線形解析

4. 動的解析の妥当性確認事例

- 4.1 成層地盤における非線形地震応答解析
- 4.2 斜面の非線形地震応答解析
- 4.3 護岸構造物の非線形地震応答解析
- 4.4 地盤－基礎－構造物系の非線形地震応答解析

ガイドラインの適用範囲

■1章 総則

- このガイドラインは、社会基盤施設の建設、設計、維持管理および安全性評価に適用される地盤工学分野、構造工学分野における永続・変動作用、偶発作用（地震など）に対する解析モデルを用いたシミュレーションの信頼性を確保するための基本的考え方と手順を示す。
 - **対象挙動**：社会基盤施設を構成する地盤や構造物の挙動
 - **作用**：永続作用、変動作用、偶発作用
 - **挙動の例**：
 - 地盤の変形から崩壊に至る挙動
 - 地盤-基礎-構造物の応答挙動
 - 地盤-地中構造物の応答挙動

検証と妥当性確認の基本方針

- ① **検証の対象とする解析コード**は、解析対象とする解析モデルの非線形挙動を計算するために、有限要素法のみならず、粒子法や個別要素法などを用いて**独自に開発した非線形解析コード**、また**既存の解析コードに構成モデルなどを組み込んだ解析コード**を対象とする。
- ② **検証**は、解析コード自体の検証と入力データに応じた精度に関する検証の2つがあり、適切な方法でそれらを実施する。
- ③ **妥当性確認**は、対象とする解析モデルに対する解析手法を用いた**シミュレーションの結果と実験、観測や実被害状況との比較**により、**再現性**、かつ**予測性能**が所期の利用目的に則していることを確認する。

検 証

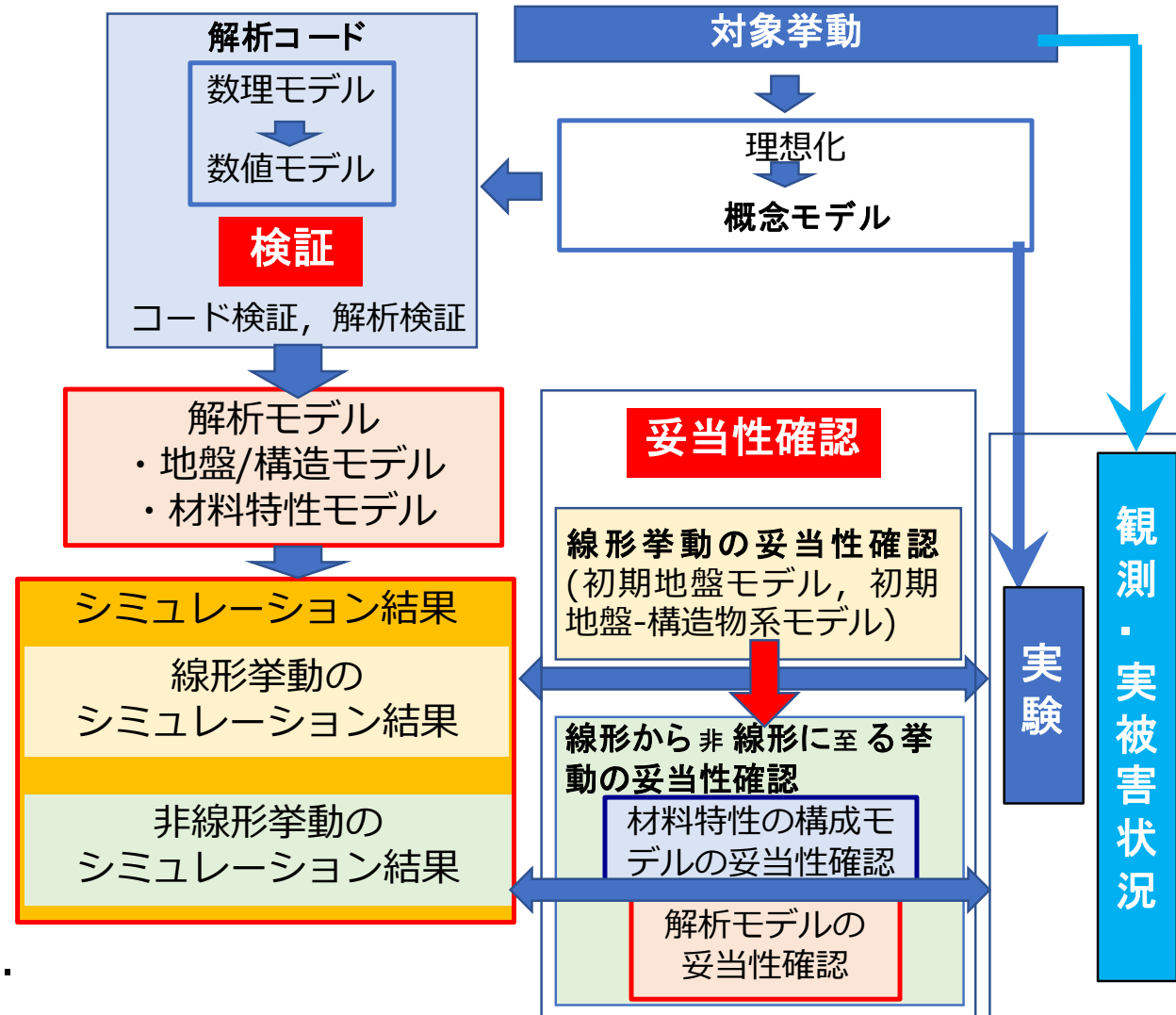
- コード検証(Code verification)**：概念モデルを表す数理モデルを計算機プログラムに変換するための数値モデルに用いる数値手法（空間・時間離散化，解析アルゴリズム，収束判定など）がプログラムとしてデジタル計算機に適切に実装していることを確認するためのプロセス。
 - 検証が既に行われている解析コード(ABAQUS, ADINAなど)との比較((第2編2章検証事例2.1)
 - 理論解との比較(第2編2章検証事例2.1)
 - 創成解による検証(付属書(参考)C, 第2編2章検証事例2.2)
- 解析検証(Calculation verification)**：入力データに対して所定の出力が得られていることおよび出力結果の精度について確認するプロセス(第2編2章検証事例2.3,2.4)

妥当性確認の実手順

■2段階で実施する。

●**線形域におけるの妥当性確認（初期地盤および初期地盤-構造物モデル）**：
地盤や構造物の構造や材料の基本的特性，例えば弾性定数の空間的な不確かさの影響を踏まえ，**再現性**の確認により基本的特性に関する地盤や構造物の適切なモデルを設定する。

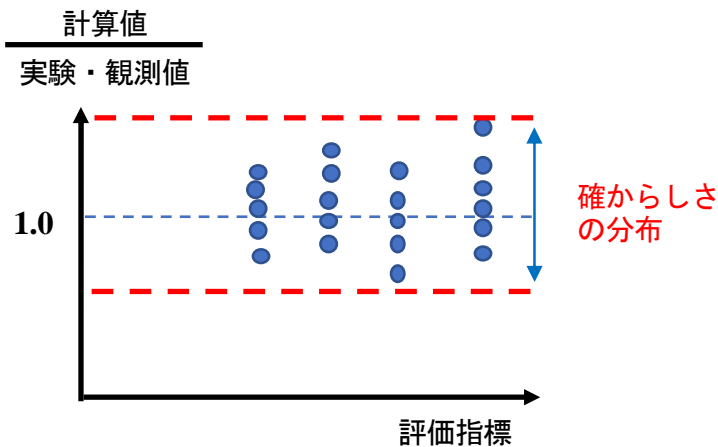
●**線形から非線形域に至る挙動の妥当性確認（構成モデル/解析モデルの妥当性確認）**：種々の作用の大きさが増すにつれ，対象を構成する**地盤・構造物材料の非線形性の影響が顕在化**することになる。そのことを踏まえ，地盤・構造物材料の非線形性を考慮する構成モデルおよび，それを用いた解析モデルについて，**再現性及び予測性能**の確認を行う。



再現性と評価指標

■ **再現性**：実験結果，既存観測，実被害状況と不確実さを考慮した解析モデルのシミュレーション結果との評価指標に関する推定の確からしさの程度のことと定義している。

■ **再現性の確認**には，**適切な評価基準を用いた精度の定量評価**が必要である。



■ **評価指標**：対象とする現象に関するシミュレーションより得られた応答量のうち，単一また複数の応答量を，所期の利用目的に応じて適宜選定することが必要である。

- 加速度/速度/変位などベクトル量のスカラー量(PGA, PGV, PGD, AIなど)
- ベクトル量の時刻歴
- 変位分布, 土圧分布/破壊形状, 破壊領域などの空間分布
- 固有周期, 伝達関数/周波数応答関数などの周波数領域の応答性状
- 鉄筋ひずみ, 破壊モードなどの構造損傷に関する状態量

評価指標の評価基準

■評価基準：再現性(確からしさ)の評価に用いる評価指標の評価基準

- ASMEの M^{SRQ}

- 計算値/実験値の比などの統計的な特性(例えば平均や変動係数)

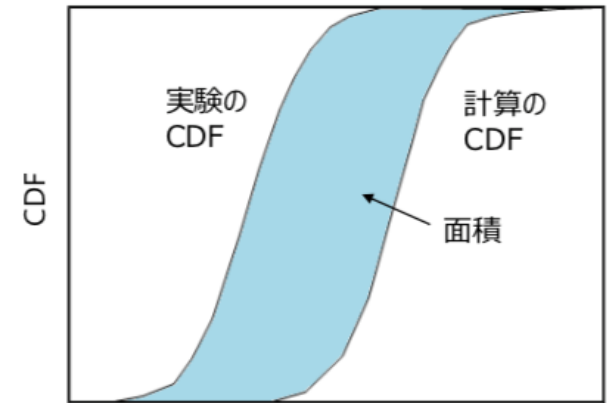
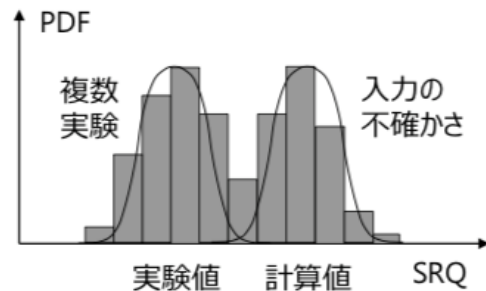
■ASME規準：2つのapproachが示されている。

➤**不確実さに関するデータがない場合**(実験, 計算値が1つ)：専門家が M^{SRQ} を推定し、評価する。

➤**不確実さを含むデータがある場合**(複数の実験データなどがある場合)： M^{SRQ} を推定し、評価する。

- M^{SRQ} : システム応答量の計測基準であり, 平均の相対誤差をほぼ正確に表している。

◇確率密度分布, 累積確率密度分布と M^{SRQ}



PDF: Probability density function
CDF: Cumulative distribution function

$$M^{SRQ} = \frac{1}{|\overline{SRQ}^{\text{exp}}|} \int_{-\infty}^{\infty} |F_{SRQ^{\text{mod}}}(y) - F_{SRQ^{\text{exp}}}(y)| dy$$

System Response Quantity
 $|\overline{SRQ}^{\text{exp}}|$ is the mean of the experimental outcomes

M^{SRQ} はCDFが同じ時ゼロ。交差しない場合、平均値の差。それ以外の場合は、実験値と計算値の分布の差の絶対値の最小期待値。

F_{SRQ} is CDF of SRQ(system response quantity)

ASME V&V 10.1-2012の
Validation Approach

不確かさとその定量化

■解析モデルの作成および解析モデル自体に関する不確かさ

- 離散化に起因するもの
- 材料特性や構造部材の特性の誤差に起因するもの(偶然的な不確かさ)
- 数理モデルの設定時における対象とする現象と差異(認識論的な不確かさ)

■解析モデル作成に携わる技術者の技量の影響

- 不確かさの評価とその定量化に関する知見を正しく修得することにより、**最良の解析モデル(Best estimate model)**をより合理的に設定することが可能になる

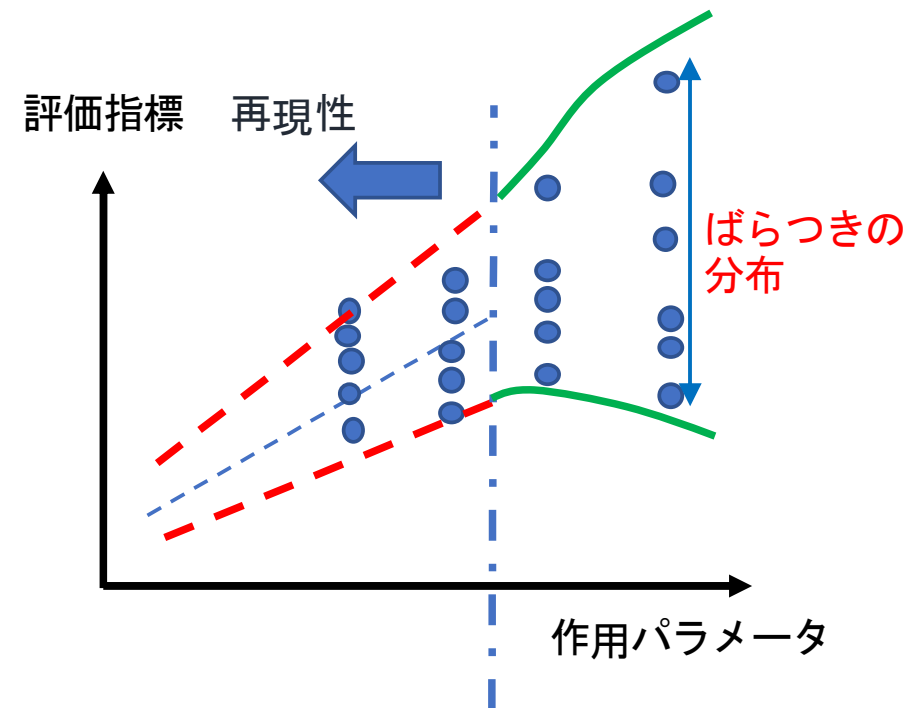
■付属書(参考)Bに基本特性な定量化について示している。

- その他：せん断耐力式の不確かさなどは土木学会，コンクリート技術シリーズ No.83「コンクリート構造物の信頼性設計法に関する研究小委員会(336委員会)成果報告書」，2008参照

予測性能

■再現性に基づき妥当性を確認した条件と異なる条件に対して、確認した解析モデル(Best estimate model)の評価指標に関するシミュレーション結果のばらつきの程度と定義する。

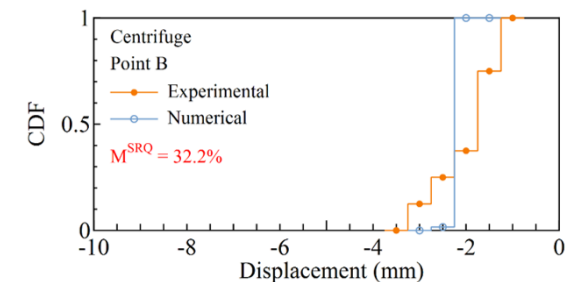
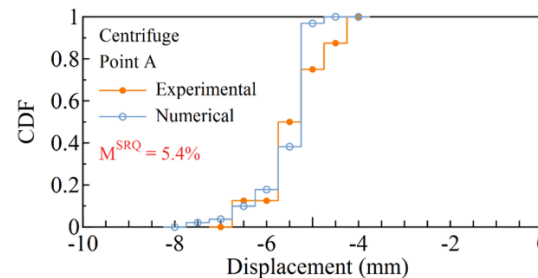
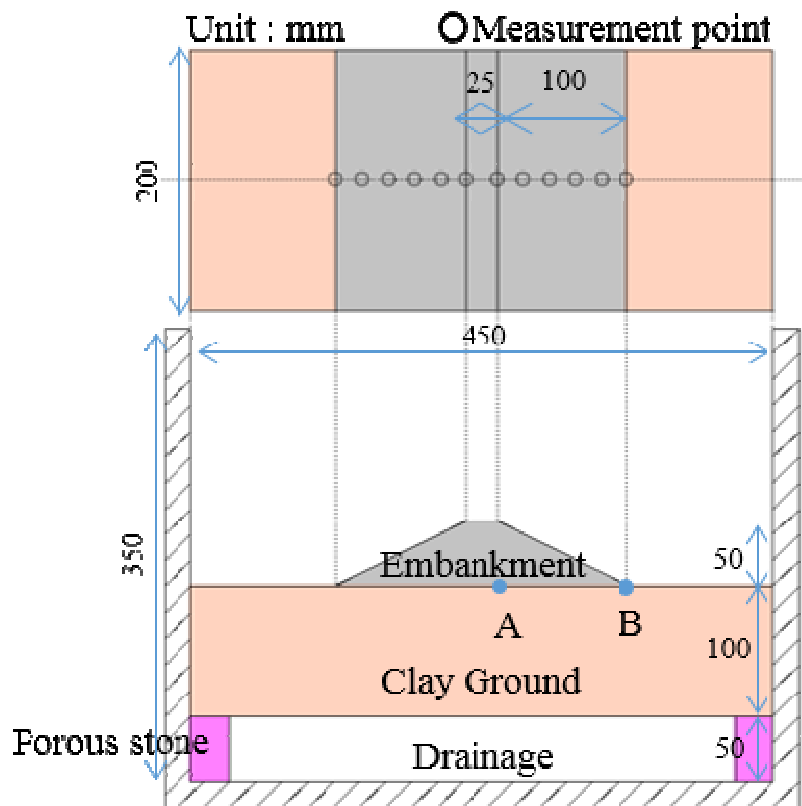
- 例：動的解析において再現性の確認で用いた地震動波形と異なる、より大きな強度を有する地震動波形に対するシミュレーションを実施し、評価指標のばらつきの程度を求め、そのパラメータの感度を把握
- ばらつきの分布形状の特性も踏まえた幅として評価



静的解析の妥当性確認事例 粘性土地盤の変形解析

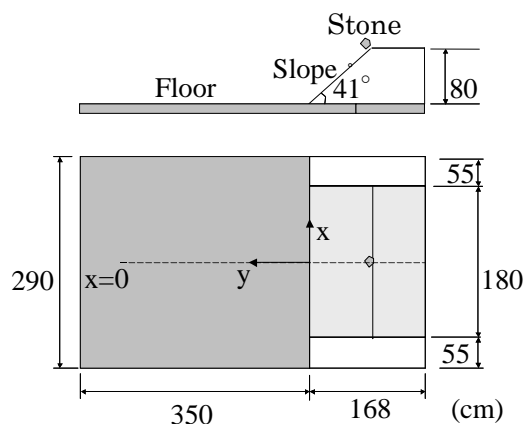
対象：粘性土地盤上の盛土の沈下に関する遠心模型実験(50G)

- 解析コード：既存の有限変形多孔質体理論に基づく有限要素法
- 不確かさ：
 - 実験：同一条件下の実験で得られた沈下量
 - シミュレーション：構成モデル(修正Cam-Clayモデル)のパラメータ
- 評価指標：粘性土地盤の沈下量
- 評価基準：A点の $M^{SRQ} = 5.4\%$
B点の $M^{SRQ} = 32.3\%$



静的解析の妥当性確認事例 個別要素法による非線形解析

対象：単一の小型岩塊模型の小型斜面模型の転動実験，単一の大型岩塊模型の実斜面の転動実験

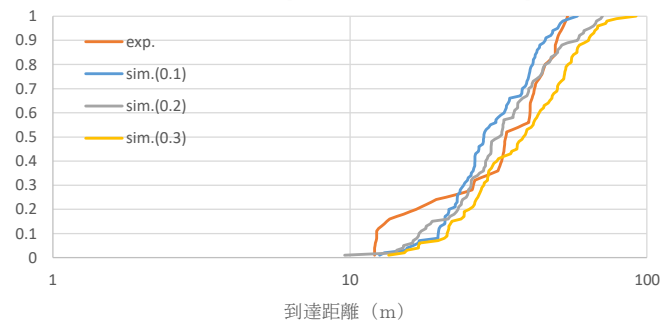


ライテック社 富山鉱山実験場



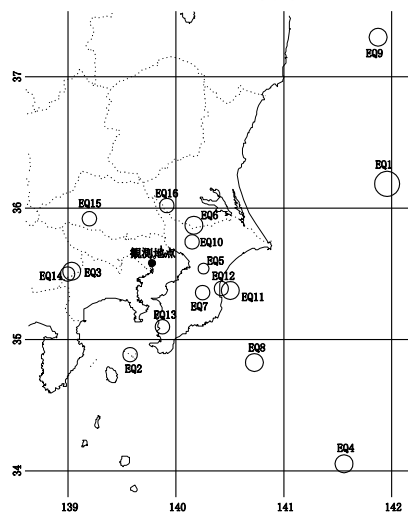
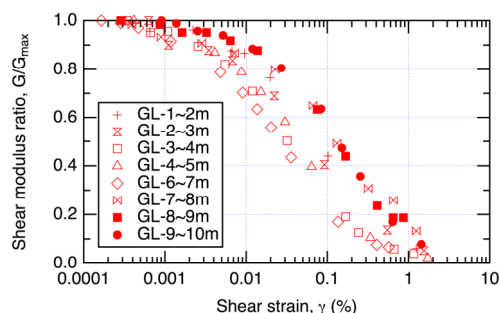
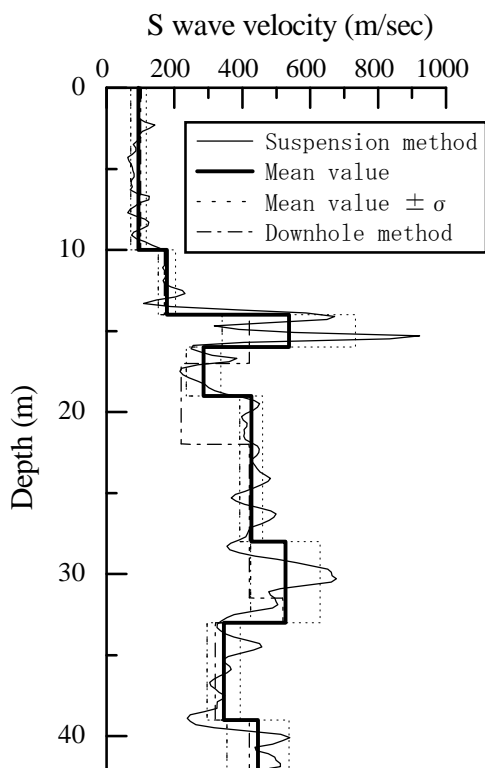
イオタ型試験体 (1.6t)

- 解析コード：個別要素法の解析プログラム[(独)海洋研究開発機構開発のHiDEM-2012]
- 不確かさ：
 - 実験：同一斜面実験で岩塊形状とサイズ，地表面性状(舗装，土)
 - シミュレーション：反発係数
- 評価指標：岩塊の到達距離
- 評価基準：最大反発係数0.1,0.2,0.3の $MSRQ = 14.5\%, 11.8\%, 20.7\%$



動的解析の妥当性確認事例 成層地盤における非線形地震応答解析

東京湾内の埋め立て地にて実施された地震観測により得られた観測記録および地震計設置と合わせて実施された詳細な地盤調査データ



■解析コード：時間領域における1次元非線形地震応答解析コード「DYNES3D」

■不確かさ：

•観測：複数の観測記録, PS検層法, サスペンション法, および同定により得られたS波速度構造

•シミュレーション：S波速度構造, 構成モデル(HD, RO, 吉田)

■評価指標：地表面応答のPGA, PGV, AI, SI, スペクトル振幅

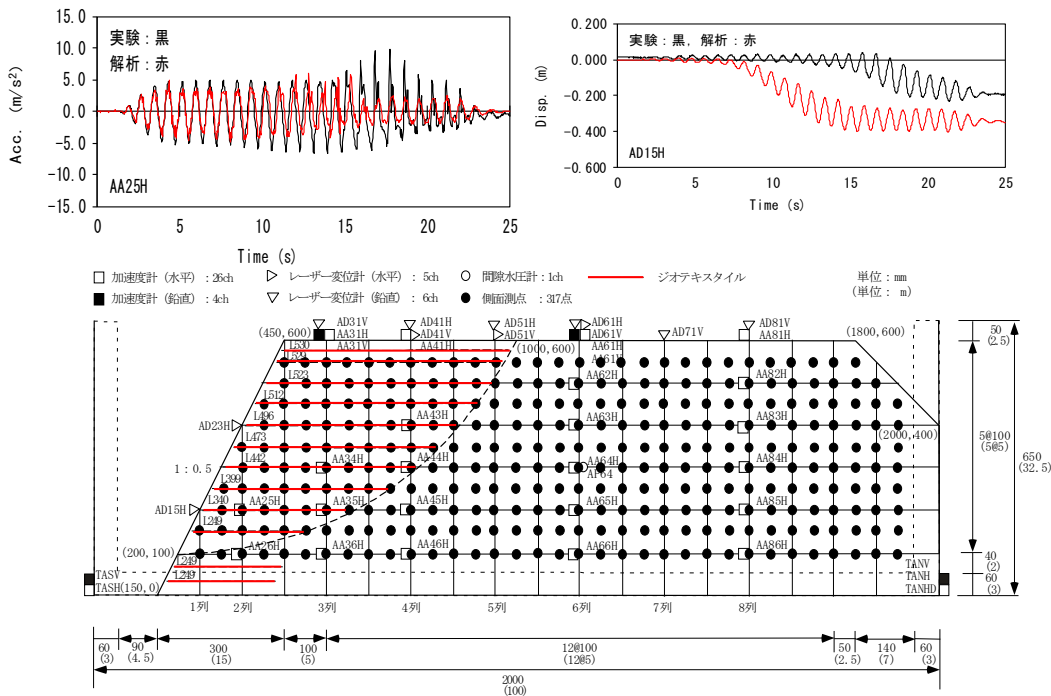
■評価基準：

•初期地盤モデルのPGV: $M^{SRQ} = 2\%$ (同定モデル)

•解析モデルのPGV: $M^{SRQ} = 3\%$ (ROモデル)

動的解析の妥当性確認事例 斜面の非線形地震応答解析

岩盤斜面を模擬した斜面模型の遠心模型
振動実験



■解析コード：ユーザー非線形要素(多重せん断ばねモデル)を組み込んだ非線形3次元動的応答解析プログラム TDAP III (Ver. 3.06.01)

■不確かさ：

- 実験：計測された加速度，法肩・法尻部の変位応答(時刻歴，残留変位)
- シミュレーション：ひずみ軟化係数

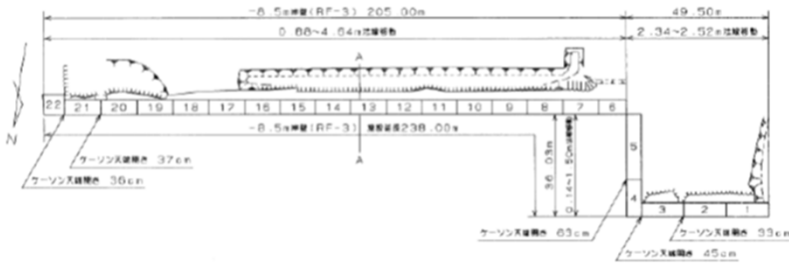
■評価指標：加速度応答，法肩・法尻部の変位応答(時刻歴，残留変位)

■評価基準：

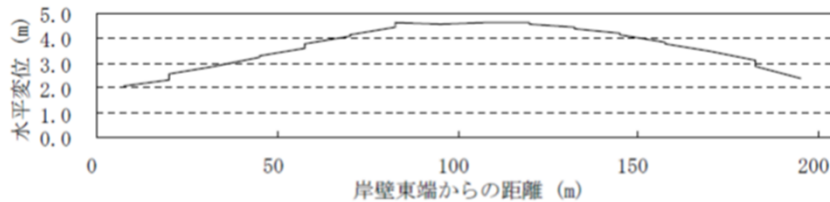
- 初期地盤モデルのスペクトル振幅平均誤差：加振ステップ05では法尻AA25Hで8.4%，法肩AA31Hで22.5%
- 解析モデルの残留変位:法尻水平変位で $M^{SQR} = 71.7\%$ ，法肩鉛直変位で $M^{SQR} = 20.1\%$

動的解析の妥当性確認事例 護岸構造物の非線形地震応答解析

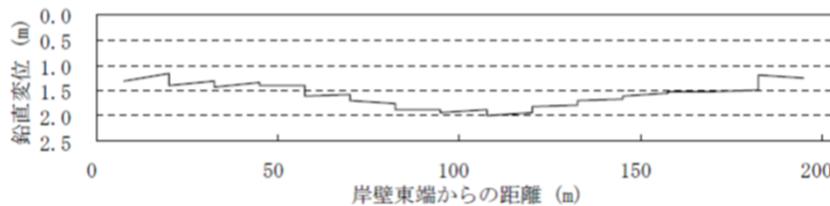
1995年兵庫県南部地震による神戸港RF3岸壁の被災状況



上部工前出し量：平均3.7m



上部工沈下量：平均1.6m



■解析コード：1988年に運輸省港湾技術研究所において開発された平面歪状態を対象とする有効応力法に基づく二次元地震応答解析プログラムFLIP ROSE

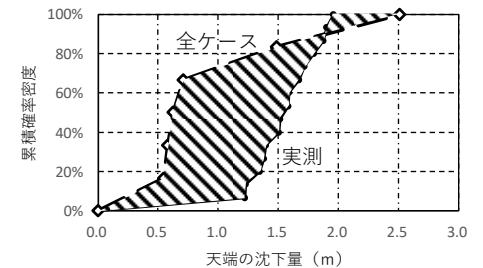
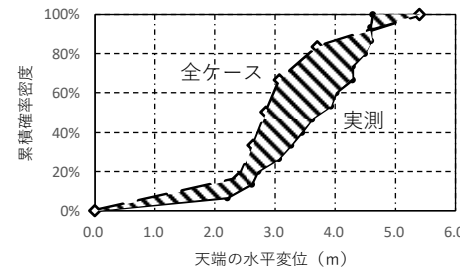
■不確かさ：

- 実被害状況：地震後に測定された六甲アイランドRF3岸壁の水平変位，沈下量
- シミュレーション：砂の力学モデル，応力ひずみ関係の反復法，Rayleigh減衰，捨て石の力学モデル

■評価指標：岸壁天端の変形量（水平変位及び沈下量）

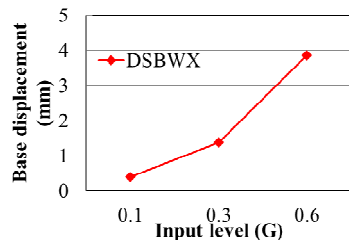
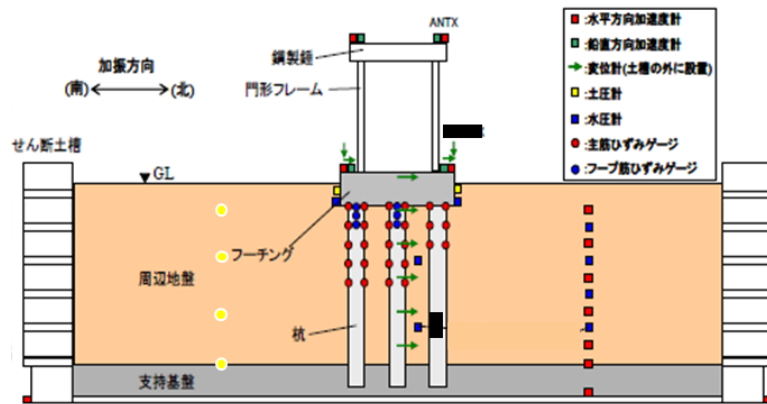
■評価基準：

- 解析モデルによる水平変位，沈下量:水平変位で $M^{SQR} = 19.8\%$ ，沈下量で $M^{SQR} = 44.5\%$

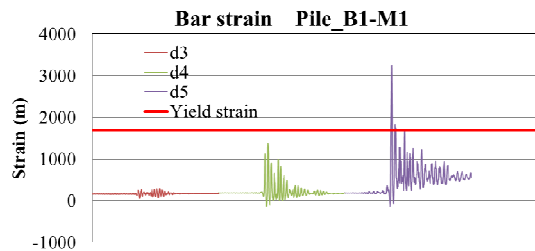


動的解析の妥当性確認事例 地盤—基礎—構造物系の非線形地震応答解析

地盤-杭-構造物系モデルの遠心振動実験



フーチングの沈下量



鉄筋ひずみ

■解析コード：有効応力地震応答解析コード「O-EFECT」

■不確かさ：

- 実験：地震後に測定された六甲アイランドRF3岸壁の水平変位，沈下量
- シミュレーション：減衰定数，地盤剛性，液状化強度に関するパラメータ

■評価指標：構造物および地盤の加速度，変位，地盤中の過剰間隙水圧比およびRC杭の鉄筋ひずみ

■評価基準：

- 解析モデルによるフーチングの最大水平変位， $M^{SQR} = 24\%$

課 題

- 妥当性確認に必要な実験，観測および実被害状況に関する情報の共有化が必要である。
 - 地盤・構造物の特性に関する不確かさの定量化が必要である。
 - 妥当性確認の手順も多様であり，柔軟な手順の明示とあわせて多様な評価事例が必要である。
- 意見照会に協力いただき，委員の皆様
に感謝申し上げます。