

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
 - 評価事例集
 - 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：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：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

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WG 1
(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

構造物の地震応答解析
V&V WG3

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

2018年度までの体制

令和元年度(2019)の活動状況

■委員会

第1回：2019年6月6日 土木学会 15名参加(V&Vの認証や斜面崩壊挙動に関するV&Vの取り組み紹介, ガイドラインの作成と今後のスケジュール)

➤幹事会

第1回幹事会：2019年4月25日 法政大学 5名参加(ガイドラインの構成と作成スケジュール)

➤WG4 1次元解析V&V

- ・第1回WG4：10月3日 土木学会7名参加 (ガイドラインの構成と概要, 作成スケジュール)
- ・第2回WG4：2020年1月9日 土木学会11名参加 (ASMEのV&Vについて, ガイドラインの見直し案, 作成スケジュール)
- ・第3回WG4：2020年3月17日 富山大学工学部7名参加 (話題提供, ガイドラインの見直し案, 事例)

令和2年度(2020)の活動計画

■WG4によるV&Vの手順書と事例集の作成

- 評価指標, 解析モデルに応じた不確かさの同定と評価, 再現性予測性能などの妥当性確認事例の調査とその方法論の検討
- 対象に応じた検討事例の検討

■報告書の作成と出版対応(応用力学委員会との合同出版)

- 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-ガイドラインとその実践事例(案) -

■シンポジウムの開催 :2021年10月頃予定

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- ガイドラインとその実践事例(案) -

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

1. 解析手法と数値・数理モデルについて
2. 創成解について
3. 再現性と予測性能について
4. 不確かさの評価と定量化

第2編 資料および事例集

2.1 資料

1. 既往の評価指標の整理
2. 地盤材料特性モデルの不確かさとモデル化の留意点

2.2 妥当性確認事例集

1. 初期地盤構造モデル
2. 成層地盤における非線形地震応答解析
3. 斜面の非線形地震応答解析
4. 護岸構造物の非線形地震応答解析
5. 地盤-基礎-構造物系の非線形地震応答解析
6. 個別要素法による非線形解析
7. 支持力解析 (応力委)
8. 粘性土地盤の変形解析 (応力委)
9. コンクリート梁の曲げ試験 (応力委)

1.適用範囲

■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地震作用などを含む種々の作用に対する解析モデルを用いた数値解析の信頼性を確保するための基本的考え方と手順を示す。

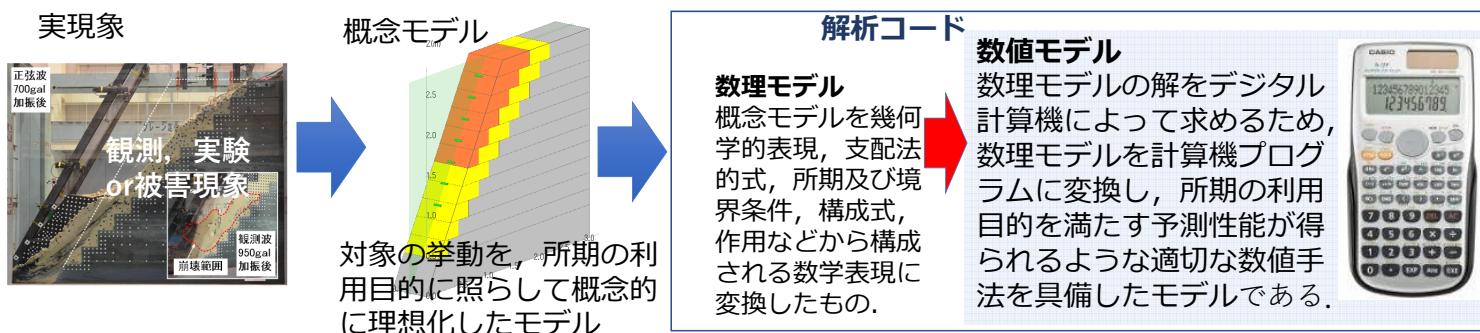
解説

- 数値解析の対象は，地震作用の評価，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などである。
- 解析モデルは，解析の対象となる地盤や構造物の挙動を，所期の利用目的に即して必要となる力学系の概念モデル*のことである。例として，次元（1，2および3次元）に応じた地盤モデル，橋脚-基礎-地盤系のモデルとしてSRモデル，地盤バネ-杭基礎-構造物モデル，有限要素-杭基礎-構造物モデルなどを挙げるができる。

1.適用範囲：解説(2)

■解析モデルには，概念モデルを構成する地盤および構造物のモデルも含まれる。ここで，地盤および構造物のモデルとは，実対象となる地盤や構造物の構造や材料特性のモデルのことである。

*概念モデルは数値モデルとして数学的に表現され，数値モデルとしてデジタル計算機に実装される。デジタル計算機に実装されたプログラムが解析コードである。

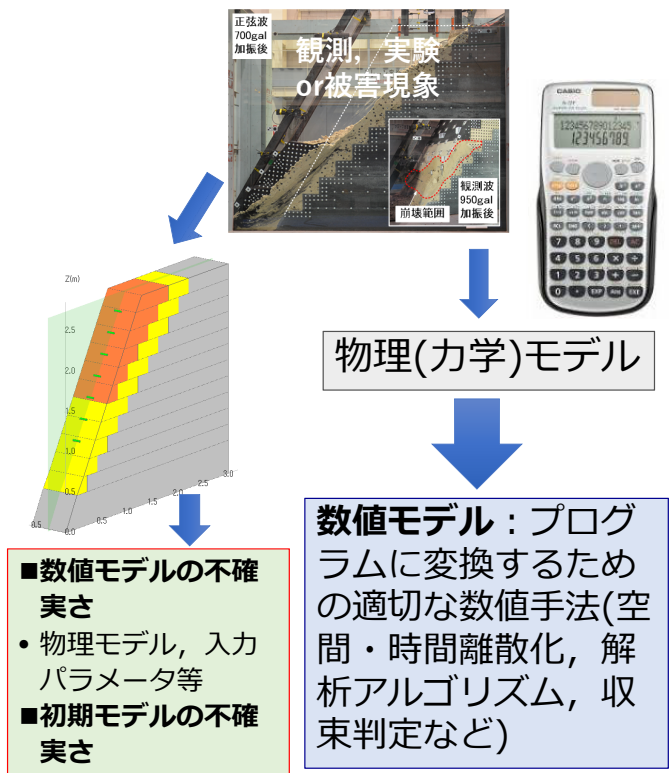


1.適用範囲：解説(3)

- 数値解析の信頼性を確保とは，解析モデルとそれ用いて計算するための解析コードを用いて，対象とする実現象の計算を実施した結果が所期の利用目的に照らして満足できることを示すことである。
- 所期の利用目的とは，数値解析結果の用途である．対象としている現象は単純なものから複雑なものまであり，その特性を表す物理量また指標の精度は用途に応じて異なることになる。

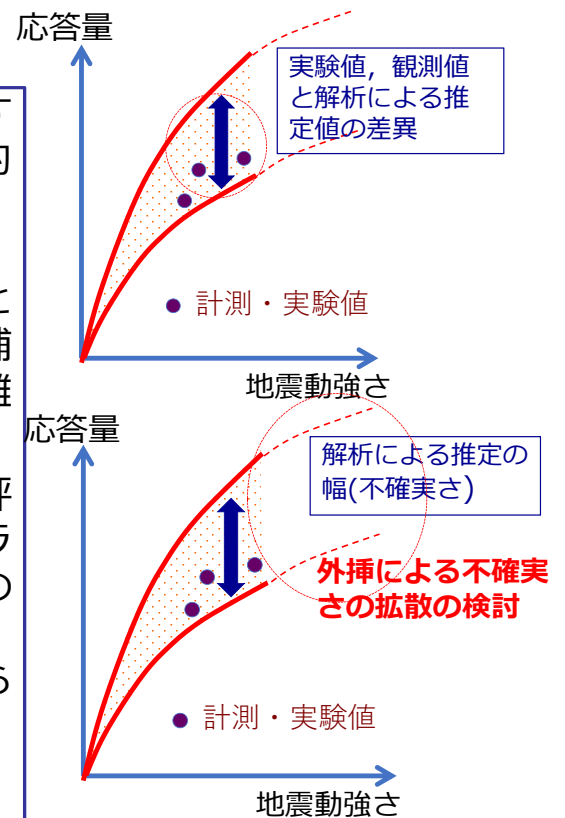
2.用語

- 検証**：数値モデルが，その基礎となる数理モデルを忠実に表現し，かつ数値モデルの解をデジタル計算機の性能の範囲において導くことを確認する実施プロセス
- 妥当性確認**：解析モデルがその再現性と予測性能から，対象とする実現象の数値解析結果が所期の利用目的に照らして満足できる幅で予測できることを確認するための実施プロセスと定義する



2.用語(2)

- 推定誤差**：シミュレーションの結果を合理的表す評価指標(標本)と測定値との差についての統計的な推定量(測定値を真値と仮定)
 - 誤差：計測量から真値を差し引いたものであり、また、特定の要因による誤差が、符号と大きさとして定量化されているものを意味する。これを補正により除くことが可能である。(丸め誤差、離散化など)：(ASME V&V20)
- 不確かさ**：シミュレーション結果を合理的表す評価指標(標本)のばらつきの幅を特徴づけるパラメータ:日本原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」参照
 - 要因が分からない、または符号、大きさが分からない誤差に対して設定したもの(ASME V&V20)



2.用語(3)

- 再現性**：既存観測、実験結果と不確か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不確かさの程度
- 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(BE)の評価指標に関するシミュレーション結果の不確かさの程度
- BEPU**：複雑な現象を現実的に予測(Best Estimate)できる解析手法を評価する。さらに、そのパラメータ等の不確かさを定量評価し、事象発生時の挙動について現実的に取り得る幅を統計的に評価(Plus Uncertainty)する
- 評価指標他**

2.用語(4)

- コード検証**：計算モデルにプログラミングミスなどの誤りがなく、計算機に正しく実装されていることの確認に加え、採用した数値アルゴリズムが所期の性能を発揮することを確認するプロセスでもある。
- 解析検証**：入出力データなどの扱いと図化等について人為的な誤りがないことの確認に加え、時間・空間に関する離散化誤差や繰り返し計算の収束誤差などの定量的な推定により、誤差が妥当性確認の要件に対して十分小さいことを検証するプロセスである。

3.検証と妥当性確認の基本方針

- 検証の対象とする解析コードは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独自に開発した非線形解析コード、またABQUS、ADYNAなどの既存の解析コードに構成モデルを組み込んだ解析コードを対象とする。
- 解析モデルは対象とする地盤、地盤-構造物の力学モデルである。また、その解析モデルとその解析に用いる解析コードを合わせて解析手法と呼ぶ。
- 検証は、解析コード自体の検証(Code verification;数理vs数学)と入力データに応じた精度に関する検証(Calculation verification;数学Vs入力データ)があり、適切な方法でそれらを実施する。
- 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数値解析の結果について、実験データや実被害状況との比較による再現性、さらに予測性能の確認により、実施する。

3. 検証と妥当性確認の基本方針：解説

解説

■解析モデルとは、以下の挙動の評価対象となる地盤、地盤-構造物に関する力学モデルについて、その解析に用いる解析コードによる計算を実施するためのモデルのことである。

- 地震作用の評価
- 地盤の崩壊挙動、地盤の変形挙動
- 地盤-基礎-構造物の応答挙動(SRモデル、地盤バネ-杭基礎モデル、有限要素-杭基礎モデルなど)
- 地盤-地中構造物の応答挙動

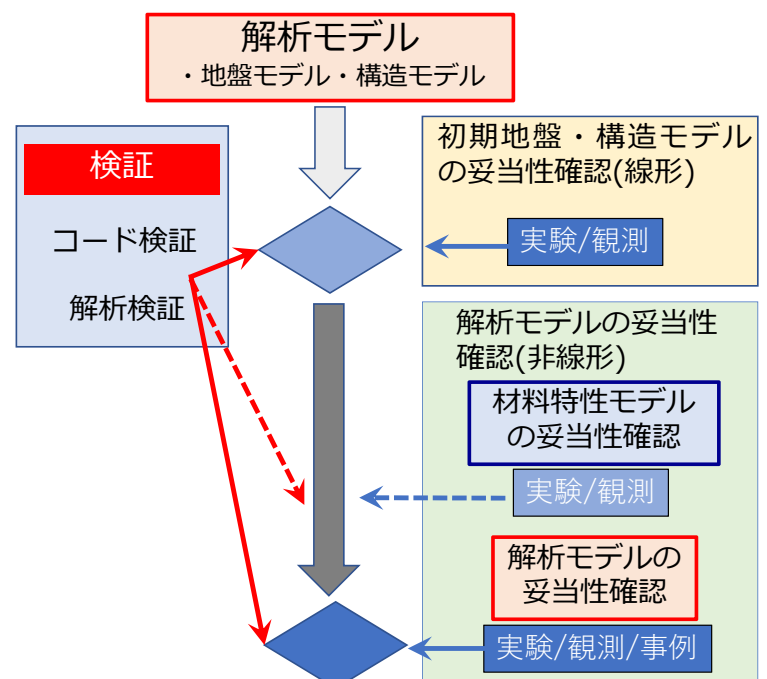
■検証は、以下の3つの方法のうち適切な方法を用いて実施する。

- 理論的に検証された解析コードとの比較
- 理論解との比較
- 創生解による検証

3. 検証と妥当性確認の基本方針:解説(2)

■ここで示す検証と妥当性確認の手順は、図に示すように、まず対象とする解析モデルの解析に用いる解析コードの検証を行う。次に、検証された解析コードを用いて以下の手順で妥当性確認を実施する。

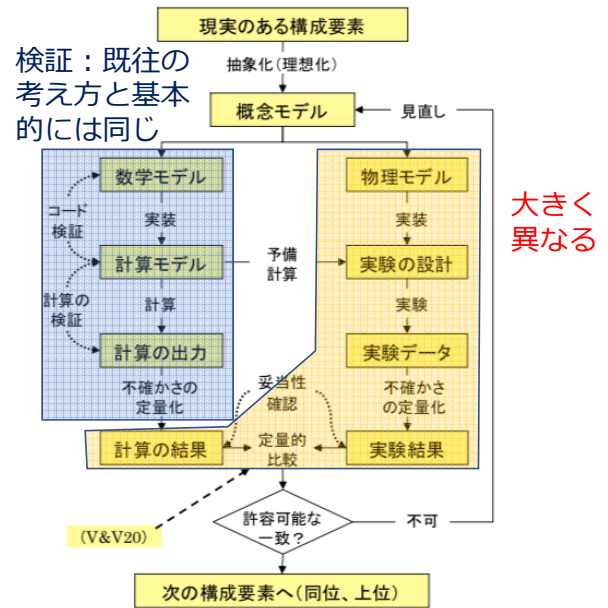
- 初期地盤・構造モデルの妥当性確認（BEモデルの選定）
- 解析モデルの妥当性確認：材料特性モデル/応答解析モデルと妥当性確認
- 各段階における妥当性確認は、地盤・構造モデル、材料特性モデルの不確かさ、実験データの不確かさを考慮した解析モデルを設定して、以下のいずれかにより実施する。
- 実験データとの比較による対象解析手法による解析結果の再現性の確認、予測性能の評価
- 実対象の観測データ・実被害状況との比較による対象解析手法による解析結果の再現性の確認と予測性能の評価



3. 検証と妥当性確認の基本方針: 解説(3)

■ ASME V&V10および20に示されたフローとの差異

- ▶ 概念モデルに相当する解析モデルは地盤と構造物系のモデルもふくまれていることから、妥当性確認に際して既往の資料や調査データに含まれるそれら地盤と構造物の不確かさの影響を除くことが重要となり、初期地盤/構造モデルの妥当性確認を最初に実施する。
- ▶ 地盤・構造材料の非線形性に係わる構成モデルは材料試験レベルの妥当性確認と応力経路や変形挙動が試験れべるとことなる全体系での実挙動ベースの妥当性確認が必要となる。



日本機械学会2012年次大会先端技術フォーラム F01200産学連携と計算力学「シミュレーションの品質保証とV&V 中村均 CTC」

3. 検証と妥当性確認の基本方針: 解説

- ▶ 妥当性確認における再現性は既存観測，実験結果と解析モデルのシミュレーション結果との推定誤差 Δ_{model} により表される。
- その推定誤差は(1)式のようにシミュレーション結果 Y_{Sym} ，観測/実験結果 Y_{Exp} との差異が真値からの①シミュレーション結果のばらつき δ_{sym} と②真値からの観測/実験結果のばらつきの差異として表すことができる。後者は主として観測/実験の計測誤差などに起因し，それは真値に対して小さいつまり観測/実験で得られた結果を真値と仮定すると，(1)のように Δ_{model} は解析モデルの不確かさを表す δ_{model} と考えることができる。

$$\Delta_{model} = Y_{Sym} - Y_{Exp} = \delta_{Sym} - \delta_{Exp} \doteq \delta_{model} \quad (1)$$

- δ_{model} は地盤や構造材料の特性を表すモデルやそのパラメータの不確かさ，解析モデルと解析コードによる解析手法の不確かさを含むモデルの不確かさであると考えられる。観測/実験，特に実験においては材料特性に関するモデルやパラメータを設定できる場合には主として，解析モデル自体の不確かさと考えることができる。

3. 検証と妥当性確認の基本方針:解説

- ▶予測性能は、再現性に基づき妥当性を確認した条件を超える地震作用に対する数値解析結果の不確かさの程度を表す。その程度は、強非線形領域における解析モデルの不確かさが計算結果に及ぼす影響、例えば極端な値の変化を含む不安定性に関する確認などの把握を目的として、その感度解析に基づいて評価する。
- 対象とする解析モデルには再現性の確認に際して設定した最良モデル(Best estimate model)を用い、構成材料特性の不確かさおよび地震作用の不確かさ（波形、強度特性など）を考慮した数値解析による評価指標の不確かさの程度により評価する。
- 予測性能の感度は、その結果に解析モデル自体の不確かさも加味して総合的に評価し、所期の使用目的に整合していることを確認する。

4. 評価指標：本文+解説

- 評価指標は、対象とする解析モデルに対する解析手法を用いた数値解析より得られた物理量のうち、所期の利用目的とする物理量、またはその数値処理により得られたスカラー量とする。
- 評価指標は、利用目的に対応する量のみならず、対象とする現象に関する数値解析より得られた物理量のうち、再現性の評価に一般的に用いられる物理量を複数選定することが必要である。

解説

- 対象が地震作用に対する地盤系であれば数値解析により得られたPGA、PGVなどの最大値指標やスペクトル強度を含む周波数特性が評価指標として、一般的に用いられる。それに加え、安定性、変形、崩壊挙動などが対象となる場合には、すべり安全率、変位、移動量などの所期の利用目的に応じた指標が設定される。
- 対象が地震作用に対する地盤-構造物系であれば所期の利用目的に応じた指標として、構造物の応答に関する指標、断面力や変形、損傷に係わるひずみ指標などが、まず設定される。それに加えて、数値解析により得られた地盤の一般的に用いられる応答としてのPGA、PGVなどの最大値指標やスペクトル強度を含む周波数特性も評価指標として用いられる。

5.不確実さとその定量化

- 解析手法の妥当性確認に当たっては、解析結果の再現性、予測性能に影響を及ぼす要因（以下、これらを総称して、不確実さ要因という。）を分析・抽出する。
- 不確実さは、データ又は現象が持つ固有のランダム性による不確実さ（偶然的な不確実さ）と解析手法又はモデル化における知識及び認識にかかる不確実さ（認識論的な不確実さ）に可能な範囲で分離して、整理し、定量化することが望ましい。
- 抽出された不確実さ要因の中から、再現性、予測性能に対して有意に影響する主要な不確実さ要因を抽出し、その要因を対象として再現性、予測性能の評価を行ってもよい。

5.不確実さとその定量化：解説(1)

解説

- 不確実さ要因には、解析手法と作用に係わる以下の要因および比較対象とする実験データや、実被害状況の不確実さの要因が考えられる。
 - 地盤および構造物の構造モデル
 - 材料特性の非線形特性/部材特性の非線形特性
 - 被害状況分析に用いる入力地震動の評価
 - 解析手法
- 地盤および構造物の構造モデルには、調査・探査手法に起因した不確実さや解析モデルの作成に関する不確実さが含まれている。いずれにも偶然的な不確実さと認識論的な不確実さ、両方の影響が含まれるが、前者は測定精度などに起因した偶然的な不確実さ、後者は成層近似を含む認識論的な不確実さの影響が卓越していると考えられる。

5.不確実さとその定量化：解説(2)

- 材料特性の非線形特性，構造部材特性の非線形特性には，非線形モデル自体の応力-ひずみ関係，断面力-変形関係などの履歴との整合性に係わる認識論的不確実さや，そのパラメータ設定に係わる実験データなどの偶発的不確実さの影響などが含まれている．一般に，前者を定量的に評価することは困難であり，解析モデルの不確実さとして，総合的に評価される場合が多い．
- 被害状況分析に用いる入力地震動の評価は，近傍で観測された地震観測記録を用いる場合，近傍での観測記録はないが被害をもたらした地震による観測記録を用いる場合，観測記録がない場合で不確実さの影響や程度は異なるものの，いずれも推測であることに留意が必要である．
- 解析手法，つまり解析モデルおよびその数値解法の不確実さは主として認識論的不確実さであり，異なる解析モデルの比較などを通じた相対的な評価は可能であるが，直接的な評価は困難となっている．

6. 検証

■コード検証

■解析検証

➤テスト問題の例

- 解析解
- **創生解**
- 半解析解
- コード間比較
- その他のベンチマーク問題
- 産業界の標準問題

➤収束条件・反復条件などの許容条件

➤感度解析などの分析

7. 妥当性確認:

7. 1 初期地盤・構造モデルの妥当性確認

- 解析モデルのうち、初期地盤モデルおよび構造モデルに用いる最良の地盤構造および材料特性、構造物の構造・材料特性モデルの設定を行うために、再現性を評価し、妥当性確認を行う。
- 再現性の評価には、地盤材料や構造材料・部材の非線形挙動が顕在化しない作用に対する実験/観測データを用いる。
- 再現性は、所期の使用目的に即した評価指標について、初期地盤モデルおよび構造モデルに関する不確かさを考慮した計算より得られる応答量と実験/観測データの差異から、適切な指標を用いて評価する。
- 再現性が最良の初期地盤モデルおよび構造モデルを**初期解析モデル**とする。

- 解析モデルを構成する地盤、構造物
- 再現性の評価は、入力の不確かさを考慮した評価指標の確率分布と複数の実験や観測より得られた評価指標に関する確率分布のSRQ(System Response Quality:システム応答品質)の平均(M^{SQR})などを用いて評価する。

7. 妥当性確認:

7. 2 解析モデルの妥当性確認

- 解析モデルの妥当性確認は、それを構成する地盤材料や構造材料・部材の非線形挙動が生じる計算を実施し、所期の利用目的に即して適切な再現性、および予測性能を有していることの確認により行う。
- 初期解析モデルは、7.1で得られたモデルを用いる。
- 再現性の評価は、地盤材料や構造部材の非線形特性モデルの不確かさを考慮した評価、それらを含む解析モデルの挙動に関する評価の2段階で実施することを基本とする。解析モデルによっては、地盤材料や構造部材の挙動と解析モデルの挙動を一体として、再現性の評価を実施してもよい。
- 予測性能の評価は、解析モデルの挙動を対象とし、地震作用など不確かさを考慮して実施する。

8. 評価過程の文書化

- 対象とする解析モデルとその数値解析に用いる解析手法の検証と妥当性確認を実施し、それが所期の使用目的に整合している
と判断した過程を文書化することは、解析モデルとその数値解
析に用いる解析手法の信頼性を確保する上で重要である。
- 文書化は、検証と妥当性確認の実施過程が追跡可能なものとし
なければならない。

解説

- 妥当性確認に関する文書の作成に際して、それら以下の過程を適切
に記述することが必要である。
 - 解析モデルの作成過程
 - 解析コードへの入力データ作成過程
 - それらの過程における不確かさの定量化過程
 - 所期の使用目的に応じた再現性の評価過程
 - 予測性能に関する感度分析の評価過程

今後のスケジュール

- 2020年5月末 第4回ガイドライ/事例集WG(資料/事例集素案)
- 2020年7月末 第5回ガイドライ/事例集WG(ガイド原案:V&V小委版)
- 2020年8月上旬 V&V小委員会(&応用力学委員会小委)への基本案報告
- 2020年9月上旬 第6回ガイドライ/事例集WG(暫定版(1):ガイド+事例集)
- 9月中 V&V小委, 応用力学委員会小委における意見徴集
- ◆2020年9月末 **出版企画書の提出**
 - 10月中 地震工学委員会, 応用力学委員会における意見徴集
- 2020年11月 V&V小委員会報告会 (小委員会)
- 2021年1月末 第7回ガイドライ/事例集WG(暫定版(2):V&V小委版+応力
小委)
- 2021年3月末 第8回ガイドライ/事例集WG(最終版)
- 2021年X月 ガイドライ/事例集発刊報告会