

土木学会平成29年度全国大会
研究討論会 研-18 資料

非線形地震応答解析の品質保証と そのあるべき姿について考える

—非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の
体系化について—

| | | |
|-------|-------|--------------|
| 座長 | 中村 晋 | 日本大学 |
| 話題提供者 | 堀 宗朗 | 東京大学地震研究所 |
| | 室野剛隆 | (財)鉄道総合技術研究所 |
| | 大矢陽介 | 港湾空港技術研究所 |
| | 矢部正明 | (株)長大 |
| | 若井明彦 | 群馬大学 大学院理工学府 |
| | 佐竹亮一郎 | 群馬大学 大学院理工学府 |

| | |
|-----|---------------------------|
| 日 時 | 平成29年9月13日(水) 13:00~15:00 |
| 場 所 | 九州大学伊都キャンパス |
| 教 室 | センター2号館 2303 |

地震工学委員会

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向けて

1

1

963-8642

1

E-mail: s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

研究小委員会は、数値解析の品質や信頼性向上のための妥当性確認(Validation)と検証(Verification)に関する他学協会の取り組みを参考にし、地盤・構造物の非線形地震応答解析に関する妥当性確認と検証(以後V&Vと呼ぶ)の課題を整理し、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、体系的にガイドラインとしてとりまとめることを目的として設立した。

V&V

Key Words: verification and validation, nonlinear dynamic response analysis

1. 委員会設立の目的

を目的として設立した。

%-)

2. 委員会構成と実施概要

(1)委員会構成

28

89A

() () ()
() () (()
) ()
(()) (()
) (()) ()
) () () ()
) () () (()
) () () () ()
()) () ()
) () () (()
) (()) ()
) (()) ()
(()) () ()
) () ()
(()) () ()

本研究小委員会は、数値解析の品質や信頼性向上のための妥当性確認 Validation Verification に関する他学協会の取り組みを参考にし、地盤・構造物の非線形地震応答解析に関する妥当性確認と検証(以後 & L の課題を整理し、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、体系的にガイドラインとしてとりまとめること /

(2)実施概要

現在、構造解析、流体解析など様々な分野のドラフトが準備され、ASME Standardとして発行されつつある。

(2) 我が国の流れ

2009年に日本計算工学会は「シミュレーションの品質・信頼性研究分科会」を組織し、海外動向、産業界における取組みの状況等について調査を実施し始めた。その後、2014、2015年に我が国の実情にあった実務的な品質マネジメントや標準手順に関する標準が作成され、発刊されている。

2015年には日本原子力学会/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」を発刊している。その中では、原子力シミュレーション全般に対するModel V&Vの基本的な考え方の提示し、原子力学会標準「統計的安全評価の実施基準:2008」をふまえBEPU(Best Estimate Plus Uncertainty)計算のV&Vを指向している。ここでは、妥当性確認されていない領域へのシミュレーションモデルの適用(外挿、スケールリング)に伴う不確かさの拡大の定量評価、総括不確かさ(誤差&不確かさを統合)等の概念を導入している。

4. 非線形地震応答解析のV&Vの基本方針(案)

まず、V&Vの定義案を既往のガイドラインを参考に示す。検証と

妥

当性確認

V&V

&

V&V

V&V

&

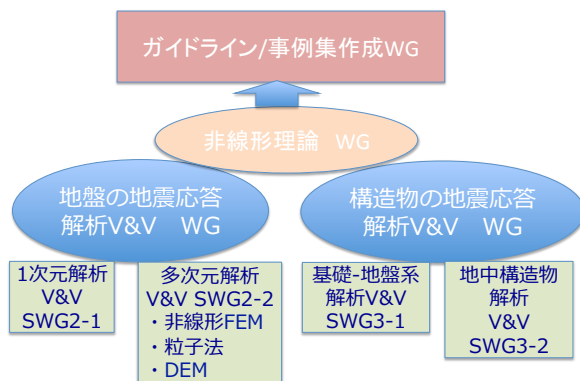
&

3

fi 七

(3)活動体制

小委員会の活動は、図-1に示す様に大きく地盤の地震応答解析V&Vと構造物の地震応答解析V&Vの2つにわけ、前者は解析次元に応じ、1次元と多次元に分かれて事例検討を実施する。後者は、地盤との動的相互作用として、基礎-地盤系および地中構造物の2つに分けて事例検討を実施する。本小委員会を含む土木学会で取り扱うV&Vの特徴は不確定性の大きな地盤材料のV&Vを示すことが、他学協会で示されているV&Vとの大きな違いであり、その基礎理論に関するWGも設けている。それら3つのWG活動集大成として、ガイドライン作成WGを設けている。



-1

3. シミュレーション品質保証に関する現状

(1)世界の流れ

1980年代からEUでは英国のNAFEMS(National Agency for Finite Element Methods and Standards)が、以下のような取り組みを実施している。

- 汎用構造解析プログラムの精度向上のため、多くのベンチマークテストを作成・実施
- 各種教育用テキストの作成,各種セミナーの実施等
- NAFEMSの品質保証システム(QMS: Quality Management System)の策定
- 工学シミュレーションを実施する組織の品質マニュアル,工学シミュレーションの品質保証に資する種々のマニユ

高性能計算を用いた 構造物地震応答シミュレーション

堀 宗朗¹・本山 紘希²・秋葉 博³

¹フェロー会員 東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学研究員 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
E-mail: motoyama@eri.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学研究員 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
E-mail: akiba@eri.u-tokyo.ac.jp

設計時より大きい入力地震動に対する耐震性の評価が必要とされる重要構造物では、高性能計算を地震応答解析に利用する研究開発が進められている。この研究開発での、高性能計算を用いた構造物地震応答シミュレーションの品質保証の考え方と、品質保証のための具体的な方法を紹介する。具体的な方法は、1) 数値解析の収束性の確認に基づく数値解析手法の検証と、2) 解析モデルの不確定性に起因する予測性能の低下を定量的に評価することも考慮した解析モデルの妥当性確認である。この研究開発の経験を基にした、今後、必要とされる研究開発の方向を議論する。

Key Words: high performance computing, large scale finite element method, wave equations, quality assurance

1. 高性能計算を用いた構造物地震応答シミュレーションの目的

地震学の最新の知見を基にすると、設計時に想定された地震動より相当に大きい地震動に対して、重要構造物の耐震性を評価することが必要とされる場合がある。このような地震動に対する地震応答は、設計時に使われた地震応答シミュレーション手法の適用範囲内に収まらないことが懸念される。

上記を背景に、物理的により適切な波動方程式を解く構造物地震応答シミュレーションの開発^{1,2)}が進められている。なお、線形の場合、波動方程式は次式である。

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) + \nabla \cdot (\mathbf{c}(\mathbf{x}) : \nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)) = \mathbf{0}. \quad (1)$$

ここで \mathbf{x} と t は空間座標と時間、 ρ と \mathbf{c} は密度と弾性、 \mathbf{u} は(未知の)変位関数、ドットと ∇ は時間と空間の微分である。地盤と構造物の解析モデルと動的3次元非線形有限要素法を使うが、解析モデルの自由度が100万自由度を超えるため、高性能計算(High Performance Computing, HPC)の利用が前提となる。

著者が提案するメタモデリング理論に基づけば、構造物地震応答として定式化される物理問題に対し、数理的

近似によって異なる数理問題が導出される。従来のシミュレーション手法は、この数理問題を解く手法である。従来のシミュレーションと、HPCを用いたシミュレーションの整合性を明確にすることは重要な課題である。

2. 高性能計算を用いた構造物地震応答シミュレーションの品質

対象とする重要構造物に応じて、シミュレーションによって計算される物理量は異なり、さらに必要とされるその物理量の計算精度も異なる。所定の物理量に対する計算精度はシミュレーションの品質の最重要要因である。

計算力学の分野は、ある部位の応力の最大値が必要となるため、精度の対象は応力関数となることが多い。一方、重要構造物の地震応答解析では、ある部材全体の最大の変位や断面力を計算することが必要である。HPCを用いたシミュレーションもこのような物理量を計算する。

HPCを用いたシミュレーションの解析モデルでも、物性値には相応の安全を見込んだ値が使われる。シミュレーションの計算そのものは、数値的に十分収束したものであるが、計算された結果には物性値等に起因する解析モデルの不確定性が加味されてしまう。このため、必

要とされる解析精度を正確に見積もることは難しい。

解析モデルの不確定性が計算結果に及ぼす影響が小さければ、解析精度の見積もりは可能である。不確定性の影響を定量的に評価することが重要であり、シミュレーションと実験を並行した研究開発や、解析モデルの不確定性が計算結果に与える影響を理論的かつ定量的に分析する研究が必要とされる。

3. 高性能計算を用いた構造物地震応答シミュレーションの品質保証のための取組

前述のように、数値解析で必要とされる物理量をどのような精度で計算しているかは、数値解析の品質保証の根幹に関わる問題である。HPC を用いたシミュレーションも同様であり、品質保証の手段として検証と妥当性確認を使っている。

検証はシミュレーションの有限要素法プログラムを対象とする。要素はソルバの動作を確認した後、100 万を超える自由度の解析モデルに対し、数値的収束性を確かめることを検証の主な作業とする。要素サイズや時間ステップを小さくする場合、実装されたアルゴリズム通りの正しい速さで収束を確かめることが数値的収束性の確認である。

妥当性確認は解析モデルを対象とする。物性値等の設定に関する不確定性があるため、妥当性確認は検証より難しい。そもそも有限要素法に実装する材料構成則には、シミュレーションの目的に見合った十分高度な構成則を実装し、かつ、動作検証が必要である。部材実験の再現等から、不確定性が計算結果に与える影響を調べることも必要である。この準備をして物理量の計算精度を見積もり、その上で、解析モデルの妥当性を確認することになる。

構造物地震応答解析の場合、地盤を含む解析モデルの妥当性の確認には特段の注意が必要となる。材料物性の他、部材の接合状態や地盤-構造物の接触状態を設定し

なければならず、これはシミュレーション結果に少なからぬ影響を与える。実際の構造物に対して妥当性確認を行った、従来のシミュレーション手法との整合を考えることが必要である。

4. 今後の課題

HPC を用いた構造物地震応答シミュレーションは、従来、不可能であった地盤と構造物の式(1)のような波動方程式を数値解析するシミュレーションである。なお、相互作用を正確に評価する「物理」が相互作用の項を含まない式 (1) であること、そして式 (1) を解くには HPC が必要であること、に注意してほしい。

今後も、計算機の性能は向上し、費用は減少する。工学全般において、HPC の利用は避けては通れない課題であり、特に、実験が難しい重要構造物の地震応答シミュレーションでは、「いかに HPC を利用するか」が課題となるとも考えられる。このための具体的な課題として、1) 計算規模・速度の向上、2) 大規模解析モデルの自動構築、3) 解析モデルの不確定性の定量的評価、が挙げられる。1) と 2) の課題は HPC には不可欠であり、計算科学・計算機科学の研究者との共同研究が必要である。3) の課題は、実験研究との連携を強化することは当然であるが、解析モデルの不確定性が地震応答の予測に与える影響を理論的に評価する研究も必要である。上記の課題を解決することで、合理的な品質保証が可能な地震応答シミュレーションを実現することが望まれる。

参考文献

- 1) Yoshimura, S., Hori, M. and Ohasaki, M. (Eds.): High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake/Tsunami Engineering, Springer, 2016.
- 2) Hori, M.: Introduction to computational earthquake engineering, 2nd edition, Imperial College, 2011.

(2017. 7.25 受付)

HIGH PERFORMANCE COMPUTING FOR SEISMIC STRUCTURAL RESPONSE ANALYSIS Muneo HORI, Hiroki MOTOYAMA and Hiroshi AKIBA

Research and development for the use of high performance computing is being made for an important structure the seismic safety of which needs to be evaluated for ground motion larger than designed one. This paper explains the quality assurance of the structural seismic response analysis using high performance computing. Verification and validation are used for this purpose, and actual procedures of verification and validation are discussed. Future works for the use of high performance computing are explained.

鉄道構造物の耐震設計における地震応答解析

室野 剛隆¹

¹ 正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

1. 対象とする解析の目的、その背景

鉄道構造物の耐震設計は、「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」(以下、耐震標準)¹⁾に基づいて行われている。耐震標準では、原則的な方法と実務的な方法の2つが用意されている。表1にその概要をまとめる。耐震設計においては、要求性能に応じた力学的な照査指標を設定し、それに対応した応答値と限界値を算定・比較することで、構造物が要求性能を満足していることを確認しなければならない。この中で、与えられた地震作用に対する構造物の性能照査指標に応じた応答を求めることが求められており、設計条件に応じて動的非線形解析法または静的非線形解析法が設計実務で用いられている。なお、ここでは紙面の都合もあり、橋梁・高架橋系を解析の対象として話を進める。

表1 耐震標準で用いられる解析法

| 項目 | 原則的な方法 | 実務的な方法 |
|------------|--|---|
| 設計地震動(基盤) | <ul style="list-style-type: none"> 考慮する断層を特定して設定する 表現形式としては時刻歴波形 | <ul style="list-style-type: none"> 標準地震動 表現形式は応答スペクトル |
| 解析モデル | 地盤・構造物一体型 | 地盤・構造物分離型 |
| 値 応 評 答 | 地盤 | 基盤位置での設計地震動に対する動的非線形解析 |
| | 構造物 | 静的非線形解析 |
| 照査 | 断面力、変形 etc | 同左 |

2. 耐震設計における解析に要求される予測性能

地震時に地盤や構造物に起きている実現象は非常に複雑であり、そのような複雑な現象を可能な限り厳密に評価するための応答解析法も開発されている。しかし、耐震設計では、必ずしもそのような手法を必要とする訳ではない。応答解析の目的は、設計地震動に対する照査指標に関する応答値を得ることであり、この値を基に要求性能の照査を行う。ただし、構造計画の段階等で想定すべきシナリオが設定されるので、耐震設計における応答解析は、自然現象や構造物に起こる実現象をある仮定

の下にモデル化して進められるものであり、実現象そのものを捉える必要があるわけではない。設計で考慮すべき現象、支配的となる現象を抽出し、それを合理的にモデルに組み込むことが要求される。特に重要なものは、(i)地震作用の表現形式と対応していること、(ii)土や部材の非線形性の影響を表現できること、(iii)地盤と構造物との相互作用を表現できること、(iv)隣接構造物との相互作用が表現できること、である。そこで、耐震標準では、地震作業が波形で与えられた場合の動的解析法に対して、図1に示すように地盤と構造物を一体でモデル化した解析モデルを標準的なモデルとして設定している。

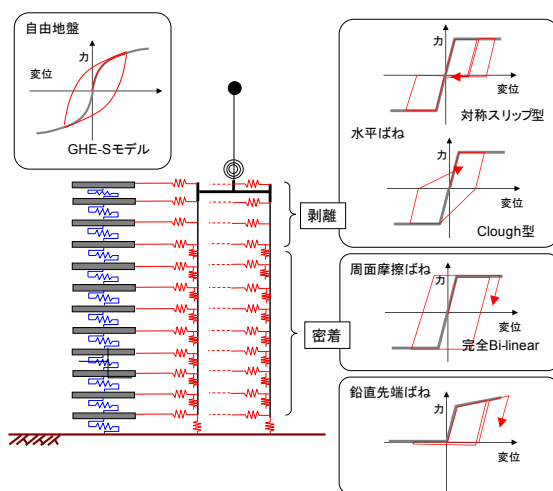


図1 橋梁・高架橋の一体型モデルの標準的な例

また、耐震設計においては、まだ地震も発生しておらず、構造物も建設されていない。よって、材料パラメータとしては公称値を用いることになる。地盤条件についても、建設地点もしくは近傍において深さ数十メートルの物性値しか得られていないことがほとんどである。さらに、設計では、①構造計画、②断面寸法、配筋、形式などの仮定、③応答解析、④性能の照査(評価)、という一連行為を繰り返すので、上記のような曖昧な部分が残された中で応答解析があまりに“厳格”なものだと、対象とする構造物の何をどのように変更したらよいのか迷ったり、設計の解が安定しないことがあり得るかもしれない。解析にはある種の“寛容さ”が求められる。

さらに、①作用、②応答値、③限界値がバランスしていることが重要である。例えば、耐震標準では部材の性能照査指標とその制限値は、部材の曲げモーメント-回転角関係で規定されており、梁モデルを前提としたものになっている。FEM で詳細にモデル化して応答値を評価したとしても、その結果は直接使えない場合もある。

以上に鑑みると、あるシナリオ下において設計で必要とされる性能照査指標を限界値の設定方法とのバランスの中で予測できることが、耐震設計で用いる応答解析法として要求される予測性能であると言える。

3. 耐震設計における解析の妥当性の現状

耐震標準では、「目的および構造物の種類に応じて、信頼性と精度があらかじめ検証された解析法による」と規定されている¹⁾。そのためには、模型実験や数値解析（できるだけ経験則を排除した自然現象を高度に評価し得るシミュレーション）により事前に検証することが求められる。耐震標準に示されている標準的な手法は、設計標準の制定段階で各種の検討がなされているので、設計実務においては、耐震標準に示された手法の中から適宜選択することで、この検証作業を省略している。

耐震標準に示されている応答解析手法の妥当性については、設定されたシナリオを模擬した動的振動実験や静的載荷実験との比較により検証されることが多い。

部材の非線形性については、例えば RC 部材であれば負勾配を有するテトラニアモデルを用いているが、これは、多くの試験体の載荷実験との比較により、包絡線形状と履歴吸収エネルギーに着目してその妥当性を判断している²⁾。一方、地盤については、GHE-S モデル³⁾を標準的なモデルとして採用している。室内試験結果があれば、任意の動的変形特性に合致した骨格曲線と履歴曲線を作ることが出来き、扱いも容易であることから、設計実務の分野でも浸透している。多数の要素試験データ、大型のせん断土層の振動実験や鉛直アレー記録のシミュレーションにより、その妥当性を判断した³⁾。

動的相互作用現象のモデルについては、現象が複雑であるが故に、設計における解析法と実現象を再現するための解析法との差が大きい。図1のモデルでは、杭頭変位が10mm程度の時の等価線形的な剛性を載荷試験から経験的に設定し、その値を初期剛性としたバイリニアモデルを用いている。ローカル非線形性とサイト非線形性のうち、前者を念頭に置いていることになる。エラー! 参照元が見つかりません。 さらに、周波数依存性を考慮していない。しかし、様々な振動実験や被害解析を通して、L1、L2地震動に対して要求される杭の損傷状態や上部構造物への有効入力動を固有周期帯域で概ね再現できることを確認

している。万能ではないが、限られたシナリオ下において設計で必要とされる予測性能（2章参照）を満足している。

4. 今後の課題

耐震標準では、動的解析法と静的解析法の両者を応答解析法として示しているが、鉄道分野の設計技術者の間では、動的解析はまだ市民権を得られていない。それには、高い専門知識や専用の解析コードが必要であったり、時間とコストが必要だったり、様々な理由があると思うが、著者はさらに2つの理由があると思う。

1つは減衰に関する明瞭な物理モデルがないことが大きい。図1の各要素に与える減衰定数の設定と、そこから応答解析に用いる減衰マトリクスの[C]を作る過程に対して、明瞭なモデルの構築がなされていない。その結果、減衰の設定により解析結果がコロコロと変化し、設計技術者に対する動的解析法の信頼性を失わせている要因になっている。この反省に鑑み、著者らは近年、160基の鉄道橋梁・高架橋の1次のモード減衰を実測するとともに、減衰マトリクスの構成方法について検討を加えている⁵⁾。

もう1つは、動的解析を用いた時の構造解析係数の設定に関する課題である。動的解析の厳密さ、寛容さについて先述したが、本来、静的解析法のような寛容な手法では、誰がやってもほぼ同じ解を得られる事が多いが、厳密さが要求される解析では、少しの設定条件の差異が大きく解に影響する。一方、設計では構造解析の不確実性に対応するために構造解析係数を導入しており、一般にはデータが多く、厳密な手法を用いた場合は1.0とするとされている。しかし、上記のことに鑑みると、むしろ逆ではないかと思える。この辺りについて真剣に議論するべきであろう。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）、丸善、2012。
- 2) 玉井真一、瀧口将志、佐藤勉：RC部材の復元力特性、鉄道総研報告、Vol.13、No.4、pp.15-20、1999。
- 3) 室野剛隆、野上雄太：S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力-ひずみ関係、第12回日本地震工学シンポジウム、pp.494-497、2006。
- 4) 室野剛隆、西岡英俊、野上雄太：地盤の非線形性を考慮した杭の地震時の水平抵抗特性、鉄道総研報告、Vol.24、No.7、pp.35-40、2010。
- 5) 和田一範、坂井公俊、室野剛隆：実測に基づく鉄道構造物の減衰特性の概略評価概要、鉄道総研報告、Vol.30、No.5、pp.35-40、2016。

港湾構造物の地震応答解析

大矢 陽介¹

¹ 正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: ooya-y@pari.go.jp

港湾分野において地盤・構造物の非線形地震応答解析法が活用されている、レベル 2 地震動に対する耐震性能照査手法について、これまでの経緯と検証に関する現状を報告する。

Key Words: seismic response analysis, port structures, quay wall, pile-supported wharf, liquefaction

1. 解析の目的や用途、その背景など

(1) 近年の耐震設計の遷移

平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震によって、神戸港をはじめとして阪神・淡路地域に甚大な被害が発生した。この地震被害を契機に、港湾構造物の耐震設計も見直しがなされ、性能設計の概念が取り入れられた。

「港湾の施設の技術上の基準」においては、平成 11 年の改訂以降、地震レベルを 2 段階とした耐震設計が取り入れられている¹⁾。耐震強化施設の設計では、レベル 1 地震動については震度法、レベル 2 地震動についてはシミュレーションを実施する。シミュレーションは、数値解析や振動実験で行うものとして、対象施設の地震時挙動を把握し、「所期の機能保持」が可能かどうかを確認することとしている。2007 年の基準改訂では耐震強化施設について、レベル 2 地震動に対してサイト特性を考慮した地震動を用いた数値解析や振動実験による耐震性能照査を実施することになった²⁾。

(2) 解析の目的

港湾分野においては、地震応答解析が様々な目的で用いられている。レベル 2 地震動に対する耐震性能照査においては、具体的に施設の変形量等を算定する目的に地震応答解析が用いられている。なお、レベル 2 地震動に関する偶発状態における変形量の標準的な限界値については、施設の要求性能に応じて設定することになるが、例えば、耐震強化施設においては、残留変形量の限界値として 100cm、残留傾斜角の限界値として 3 度程度が用いられている²⁾。これらは、1995 年兵庫県南部地震直後の緊急支援物資等の運搬実績が参考となっている。

(3) 解析手法

設計実務では、港湾施設が甚大な被害を受けた 1995 年兵庫県南部地震の際の神戸港の被災状況や、被災メカニズムの解明のために実施された振動実験データとの比較から適用性の確認が行われた非線形地震応答解析による照査が行われることが多い。1995 年の地震被害が地震動による慣性力と地盤内の過剰間隙水圧の上昇に起因するものであったため、これらを考慮するため地盤の有効応力を考慮した定式化、有限要素法、逐次積分法を用いた地震応答解析 (有効応力解析) が岸壁や棧橋の照査に用いられることが多い。

有限要素法を用いる理由として、境界条件や地震動の設定が容易であること、液状化地盤の応力-ひずみ関係や鋼管杭等の構造部材の曲げモーメント-曲率関係等を表現するための数値モデルを取り入れることが他の数値解析手法よりも容易であることが挙げられる。また、岸壁は奥行き方向に一様とみなすことができるので二次元解析が一般的である。一方、杭のような構造物は三次元解析を用いるべきであろうが、杭と地盤の相互作用ばね³⁾を用いた二次元解析で実施されることが多い。ただし、ジャケット式棧橋のような三次元構造を対象とした場合、二次元解析で求めた地盤の変位を、地盤ばねを介して三次元の棧橋構造へ与える応答変位法などの解析手法も用いられている⁴⁾。

2. 解析に要求される予測性能について

レベル 2 地震動に対する耐震性能照査のために地震応答解析を行うには、解析手法の適用性が被災事例の再現解析等により確認されている必要がある。例えば、重力

式係船岸などの港湾構造物に対して適用性が確認されている手法として、1988年に運輸省港湾技術研究所において開発された有効応力法に基づく二次元地震応答解析プログラム FLIP⁹⁾がある。1995年の兵庫県南部地震における被災事例などの再現解析により、実被害と整合の取れた変形モード、平均的な変形量が得られた^{例えは、⁶⁾}。また、直杭式横棧橋を対象とした事例では、棧橋の残留水平変位とともに、杭頭部と地中部で発生した鋼管杭の座屈位置を再現することができた⁷⁾。なお、実被害の変形量は各ケーソンによってばらつきがあり^{例えは、⁸⁾}、解析より求まる変形量にも、ばらつき程度の誤差が含まれていると考えられる。

3. 解析の検証や妥当性確認の現状

港湾の分野では、V&Vという言葉が生まれるはるか以前から、V&Vを指向した取り組みが行われてきた。特に数値解析の検証には、被災事例データや強震記録の蓄積が不可欠であり、先人達は地震後の被災調査や港湾地域強震観測網⁹⁾の整備に尽力した。

強震記録を対象とした検証の事例として、1993年釧路沖地震の際の釧路港の記録と、1995年兵庫県南部地震の際のポートアイランドの記録の例がある。どちらも解析結果のひずみが1%を超えた事例であり、FLIPによって特徴的な加速度波形を再現できた^{10, 11)}。また、解析結果の信頼性および精度は、解析結果の項目(加速度、速度、変位等)および地震動の規模によって異なることが多いため、前述の強震記録について、6種類の地震動指標について比較した結果、有効応力解析が全応力解析や等価線形化法より多くの指標で再現精度が高いことを確認した事例¹²⁾もある。

被災事例データを対象とした検証の事例として、前述のように1995年の地震被害を中心に実施されているが、その他にも様々な港湾施設の地震被害に対して検証が行われている^{例えは¹³⁾}。

新規に考案された構造形式などで、解析手法の適用性を確認できるだけの被災事例が存在しない場合、地震動がこれまでに被害経験が無い場合、適切な振動実験の結果の再現解析により適用性を確認している。

4. 今後の課題

これまでの耐震設計が新たな地震による被害を解明することによってより良い設計体系へ進化してきたように、数値解析も高度化してきた。それゆえ、過去に経験が無

い特徴的な地震動に対する解析の精度は不明確な点もある。また、個々の被災事例において、実被害と解析結果の比較はこれまで実施されているが、多数のデータに対する計算誤差の評価は、今後の課題である。

さらに、港湾施設では種々の地盤改良工法が適用されているが、その効果が数値解析のなかで正しく捉えられているのか、部分的な検討が行われているのみで、包括的な検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 2) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 3) 小堤治，溜幸生，岡由剛，井合進，梅木康之：2次元有効応力解析における杭-液状化地盤の動的相互作用のモデル化，土木学会第58回年次学術講演会梗概集，第Ⅲ部門，pp.569-570，2003.
- 4) 沿岸開発技術研究センター：沿岸開発技術ライブラリーNo.7 ジャケット工法技術マニュアル，294pp.，2000.
- 5) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 6) 一井康二，井合進，森田年一：兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析，港湾技術研究所報告，Vol.36, No.2, 1997.
- 7) 塩崎禎郎，長尾毅，小堤治，宮下健一郎：二次元有効応力解析による直杭式横棧橋の被災事例の再現計算，土木学会地震工学論文集，Vol.30, pp.881-891，2009.
- 8) 稲富隆昌，善功企，外山進一，上部達生，井合進，菅野高弘，寺内潔，横田弘，藤本健幸，田中祐人，山崎浩之，小泉哲也，長尾毅，野津厚，宮田正史，一井康二，森田年一，南兼一郎，及川研，松永康男，石井正樹，杉山盛行，高橋信彦，小林延行，岡下勝彦：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技術研究所資料，No.857，1997.
- 9) 港湾空港技術研究所：港湾地域強震観測システム，<http://www.eq.pari.go.jp/kyosin/>（参照2017.7.26）
- 10) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K.: Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-oki earthquake, Soils and Foundations, Vol.35, No.1, 1995, pp. 115-131.
- 11) 野津厚：非線形パラメタと有効応力解析を併用した強震動評価手法，土木学会地震工学論文集，Vol.29, 2007年，pp. 114-122.
- 12) 大矢陽介，野津厚，吉田望，小濱英司，菅野高弘：地盤の地震応答解析の精度評価ツールとしてのレーダーチャートの提案と各種解析手法の適用限界の検証，日本地震工学会論文集，第14巻，第1号，pp.97-116，2014.
- 13) FLIP研究会14年間の検討成果のまとめWG：FLIP研究会の14年間の研究成果【事例編】，2011，<http://www.flip.or.jp/file/jirei.pdf>（参照2017.7.26）.

道路構造物の地震応答解析－橋梁を中心に－

矢部 正明¹

¹正会員 株式会社長大 構造事業本部 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚 730)

E-mail:yabe-m@chodai.co.jp

1. 解析の目的や用途とその背景

図-1 は、構造物やそれを構成する各構造要素を対象に、水平方向荷重と水平方向変位の関係と地震応答解析の関係を模式的に表したものである。新たに建設される橋の耐震設計に用いる地震応答解析は、設計基準に示された定型的な地震応答解析法を用いて行われる領域 I を対象とした地震応答解析である。E-Defense に代表される大型モデルを用いた加震実験の再現性や地震によって橋に生じた被害を分析するための地震応答解析は領域 II を対象とした非定型的な地震応答解析法である。領域 III を対象とした地震応答解析は、この領域での再現性を検証した地震応答解析法がないことから、領域 II で用いられる地震応答解析法を用いて外挿することになる。外挿とは、コンピュータより出力される地震応答解析結果だけでなく、その結果を参考に、信頼できる技術者が丁寧な考察を行うことを指している。

社会的インフラストラクチャーである橋梁を対象とした地震応答解析は、ものづくりのために行われるため、その解析の目的は、地震に対して安全な橋を設計するために必要な地震応答値（断面力や変位等）を算出することにある。誤解を恐れずに書くと、ここでは、実現象に対する再現性は議論されない。入力地震動は、基準に規定される設計地震動であり、それが各基礎構造位置からまた各水平方向から独立に作用するという極めて特異な条件下での地震応答解析である。実現象は、作用する地震動も多次元であり、構造物の地震応答も多次元である。さらに、橋梁のような線状構造物では、各基礎構造位置から作用する地震動はローカルサイトエフェクトによって異なるため、地震応答解析は、多点異入力問題となる。領域 I の地震応答解析は、実現象を簡略化して橋梁の耐震設計に用いる地震応答値を求めている。

領域 II の地震応答解析は、解析法の検証を目的に行われることや、地震動の作用によって橋に生じた被害を分析するために行われることがある。領域 I で用いられる地震応答解析法は、領域 II でその解析法が加震実験や地震動による被害を再現できることを検証したものが用いられる。

既設構造物の耐震補強設計のための地震応答解析は、

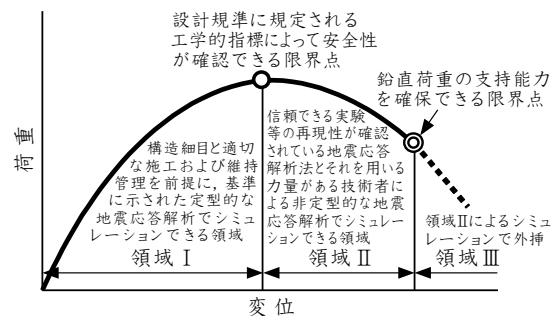


図-1 荷重－変位関係と地震応答解析法の関係

領域 I で述べた簡略化の条件下で領域 II の地震応答値や領域 III での状態を推測するために行われることもある。

2. 解析に要求される予測性能

領域 I では、設計基準に示された定型的な地震応答解析法を用いるため、予測精度が議論となることはほとんどない。求められるのは、適切なモデル化と正しく解析を実行することおよび得られた地震応答値への正しい理解と利用である。設計基準に示された定型的な地震応答解析法は、その適用範囲を守っている限りは、領域 I の範囲での予測精度が保証されるとみなされている。

耐震補強設計において領域 II での地震応答値を求める場合には、得られた地震応答値が、工学的指標によって安全性が確認できる限界点を超過している定量的な度合いや、鉛直荷重の支持能力を確保できる限界点に対する定量的な余裕度合いが予測できることが求められる。

全ての場合に対して予測精度が保証（確認）されているわけではないため、ものづくりのための地震応答解析法に求められる予測性能は、対象とする構造物に生じる損傷分布や損傷モードが正しく求められることである。そうすれば、地震の影響によって橋梁がどう損傷するかを見誤ることはない。なお、上部構造と支承構造および橋脚構造に比較して、遙かに不明な点が多いことから、基礎構造－地盤系は詳細にモデル化されることは少なく、Sway-Rocking モデルでモデル化されることが多い。これは、損傷が発見し難く、復旧も困難な基礎構造には、損傷を許容しない（損傷を進展させない）というキャパシティデザイン（損傷制御設計）の考えによるものである。

3. 解析の検証や妥当性確認の現状

解析の検証が行われていることを前提に地震応答解析法を選択しており、常に解析の検証が行われているわけではないのが現状である。過去に行われた検証が、現在対象とする事象に関連するものであるかどうか重要であるが、そのことを確認しない技術者もいる。妥当性確認は、技術者の責任で行われるべきものであるが、妥当であることを確認している場合でも、どのように妥当であると判断したかが、報告書に記載されることは少ない。地震応答解析法の適用範囲や、妥当性を確認せずに、地震応答解析法より得られた地震応答値を盲目的に耐震設計や耐震補強設計に用いている事例もある。

特殊橋梁の耐震補強設計では、当該橋梁で実施されている地震応答の観測記録と耐震補強設計に用いる動的解析モデルより得られる固有振動特性を比較することで動的解析モデルの質量分布と剛性分布および境界条件が適切にモデル化されていることを検証した橋梁もいくつかある。耐震補強設計に用いる非線形地震応答値の妥当性は、複数の解析コードを用いた比較解析を行うことで確認している事例が多い。特殊橋梁の耐震補強設計では、線形域に限定されるが、地震応答の観測記録の再現性を耐震補強設計に用いる動的解析モデルと地震応答解析法で確認している事例もある。

図-2 は、E-Defense で実施された現行設計基準で耐震設計された実大 RC 橋脚の 1995 年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録 3 成分（加震強度 100%）での最初の加震と 3 回目の加震（加震強度 125%）の地震応答解析結果と実験の比較結果である。地震動の作用回数が増すにつれて、地震応答解析結果の再現性が低下している。

図-3 は、免震支承と RC 橋脚がともに非線形域に至った加震実験（水平一方向加震）の再現性を示したものである。水平一方向加震であるため、免震支承と RC 橋脚ともに、非線形地震応答の再現性が高い。

図-4 は、首都高速道路湾岸線東扇島高架橋での 2011.3.11 東北地方太平洋沖地震による地震応答の観測記

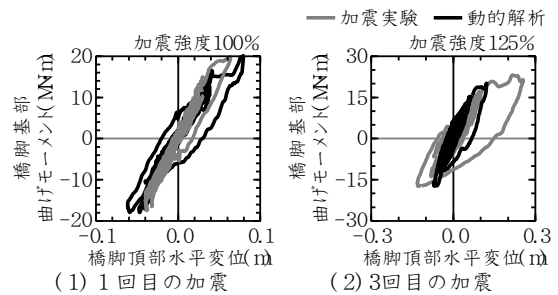


図-2 E-Defense C1-5（現行設計基準）実験の再現性

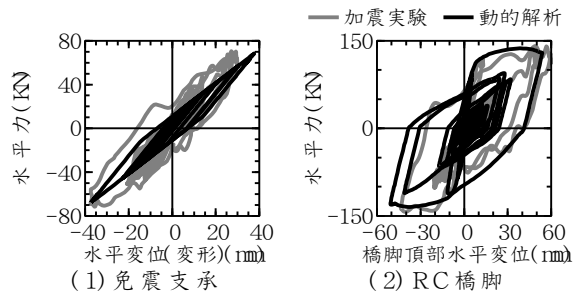


図-3 免震支承-RC 橋脚系の加震実験の再現性

録と地震応答解析結果を比較したものである。線形域の地震応答であるが、地震応答解析結果の再現性が高い。

4. 今後の課題

構造物の地震応答解析法や解析モデルの検証は、構造物の地震応答観測記録を用いて行うことが基本である。地震応答観測記録から得られた固有振動特性と動的解析モデルの固有値解析結果から得られた固有振動特性が一致することは、動的解析モデルの質量分布と剛性分布および境界条件が適切であることを確認したことになる。

構造物の地震応答に大きな影響を与える減衰の解明には、数多くの地震応答の観測記録をベースとした分析が必要であるが、現状では建築分野のように、地震応答の観測記録から耐震設計に用いる減衰に関して有用な情報を導き出すことはできていない。この点を解決しない限り、土木構造物の地震応答解析法の予測精度を定量的に議論できるようにはならない。

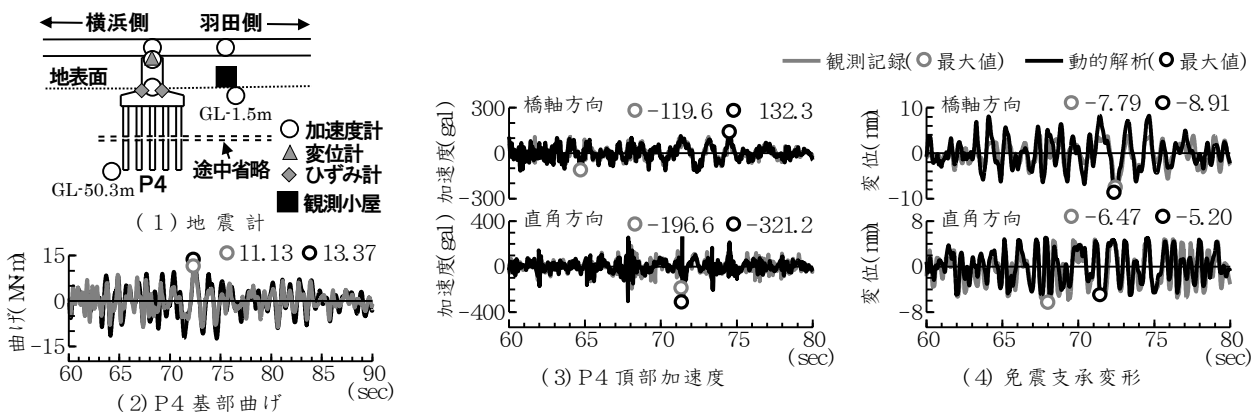


図-4 首都高速道路湾岸線東扇島高架橋（免震支承使用）での地震応答観測記録と地震応答解析による再現

地盤工学分野での数値解析

若井 明彦¹・佐竹 亮一郎²

¹ 正会員 群馬大学教授 大学院理工学府 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
E-mail: wakai@gunma-u.ac.jp

² 学生会員 群馬大学大学院生 博士後期課程 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
E-mail: t15807005@gunma-u.ac.jp

工学シミュレーションの品質保証に関する標準化を目指す動きが近年にわかに活発化しており、土木学会の地盤工学関連分野においても、2014年に応用力学委員会で「土木分野の数値解析におけるV&Vに関する小委員会」(委員長: 渦岡良介先生)が、2016年に地震工学委員会で「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」(委員長: 中村 晋先生)がそれぞれ活動を開始し、V&V (Verification and Validation)に関する広汎な議論が始められている。

本稿では、こうした委員会の活動動向等を踏まえ、地盤工学分野での数値シミュレーションの品質保証を考える際に克服しなくてはならない技術的課題の一つとして、構成材料の不均質性がもたらす解析結果のばらつきについての解析的評価の事例を紹介する。

Key Words: verification and validation, geotechnical problems, material heterogeneity, finite element simulation

1. 地盤工学分野でのモデルV&Vの難しい課題

例えば白鳥他¹⁾に詳述されているように、2016年10月に発表されたASME V&Vの枠組みによれば、物理現象を数学的モデル化して得た解析結果を、同現象を物理的モデル化して得た実験結果と定量的に比較することによって、計算の妥当性検証を行うことが求められている。しかも、“数学モデルを離散化して解析モデルを構築し、実際に解析結果を得る過程で生じた結果の不確かさ”と、“物理モデルを具体化させた実験計画を構築し、実際に実験結果を得る過程で生じた結果の不確かさ”の双方を適切に考慮して両者を比較しなくてはならない。

すでに先行してV&Vに関する検討の進みつつある他分野と比較して地盤工学分野のそれが必ずしも容易ではないと考えられる理由の一つは、上述の過程で考慮しなくてはならない結果の不確かさが、地盤を構成する材料の不均質性に強く支配されるためである。多くの人工材料と異なり、地盤構造物をモデル化する際にはまず材料物性を推定することから始めねばならない点、その推定に用いる調査手法やサンプル数などが推定結果に及ぼす信頼性の相違を考慮しなくてはならない点、現実には微視的構造に至るまで不均質な場を単純化して解析モデルを構築せざるを得ない点など、モデルV&Vを実現するために必要な不確かさに関する検討項目は少なくない。

次章では、こうしたモデルV&Vの可能性を議論する

上での一助となりうる計算事例として、材料の不均質性を考慮した現象予測の一例を紹介する。

2. 不均質な材料から成る盛土の地震応答解析

仮定の盛土を対象に、地震応答解析を各試行とするモンテカルロシミュレーション(MCSと呼称)を実施し、材料物性値の不均質性が盛土の天端における地震後の残留沈下量の不確かさへ与える影響を検討する。

(1) 材料物性の不確かさのモデル化

本検討では、土のせん断強度に支配的である内部摩擦角 ϕ の不確かさを考慮し、 $\tan\phi$ を確率変数とした。一般に確率変数はトレンド成分とランダム成分という2つの確率場の和として記述される。簡単化のため、

- (a)トレンド成分は空間座標に依らない確定値とする
- (b)ランダム成分は正規確率場とし、その分散は空間内の位置に依らず一定とする

という仮定のもと検討を行う。今回は材料が有する不確かさに着目したため、物性値推定に係る不確かさは考慮していない。

不均質性を表す指標として重要なのは、空間内のある点同士の物性の相関性を表す自己相関関数である。本検討ではランダム成分の自己相関関数として、代表的な関数型である指数型を採用した。

$$\rho = \exp \left[- \sqrt{ \left(\frac{r_x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{r_y}{L_y} \right)^2 } \right] \quad (1)$$

ここで ρ は自己相関係数, r は 2 点間の距離, L は自己相関距離である. L が大きいほど距離が離れても相関性が低下しにくくなる. 添え字 x, y はそれぞれ水平, 鉛直方向を示す. 水平積層地盤であれば水平方向の相関性が高いと考えられることから, 本検討では $L_x=5m$, $L_y=1m$ として設定した.

また ϕ は地盤内の密度に依存する定数であるが, 同様の性質を持つ定数としてヤング率 E が挙げられる. そこで, $\tan\phi$ と E が完全に相関するものと仮定し, 文献²⁾³⁾を参考に, 以下の式に共通する定数を順次代入することにより E を算出した.

$$\phi = \sqrt{15N} + 15 \quad (2)$$

$$V_s = 80.6N^{0.331} \quad (3)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (4)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (5)$$

ここで N : N 値, V_s : せん断波速度, G : せん断弾性係数, ρ : 密度, ν : ポアソン比である.

(2) 解析概要

2次元弾塑性有限要素解析を各試行とした MCS を実施した. 試行回数は 100 回である. 図 1 に解析対象の有限要素分割図を示す. 下端は x, y 方向固定, 左右端は x 方向固定とした. 要素は辺長 1m を標準としている. 表 1 に解析に使用した主要なパラメータを示す. ϕ, E の値は設定した平均値を示している. ばらつきをばらつきを表す変動係数は 0.3 とした. 次に入力地震波形を図 2 に示す. 周期 0.5 秒, 加速度振幅 $3.0m/s^2$ の正弦波とし, 地震終了後に 2.0 秒の無加振時間を設けた. また比較のため材料に均質を仮定した解析(均質ケース)を実施した. 材料定数は表 1 に示した値と同一である.

(3) 解析結果

図 3 に MCS から得られた天端中央の残留沈下量の確率分布を示す. 試行回数が十分でなく, 分布の論理的解釈は難しいが, 期待値付近を最頻値とする正規型,あるいは対数正規型の形状が推察される. また, 均質ケースの結果と分布の期待値は乖離しており, その差は 0.18m であった. さらに, 均質ケースの結果は分布の最小値側に位置しており, 分布の大半が均質ケースの結果を上回っている. 以上のことから, 材料が均質であると仮定することは設計照査上危険側の判定となり, 発生しうる被害を適切に予測出来ない可能性が高いことが示された.

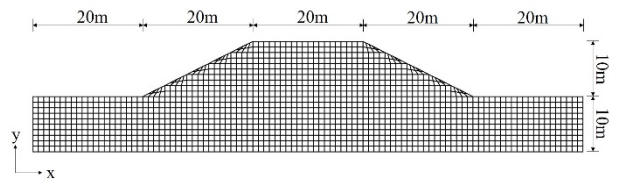


図 1 有限要素分割図

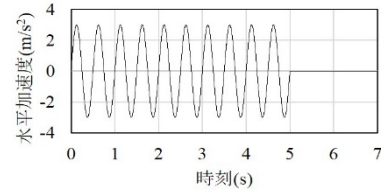


図 2 入力地震波形

表 1 主要なパラメータ一覧

| c (kN/m^2) | ϕ (deg) | E (kN/m^2) | ν | γ (kN/m^3) |
|---------------------|-----------------|---------------------|-------|--------------------------|
| 1 | 30 | 190000 | 0.35 | 18 |

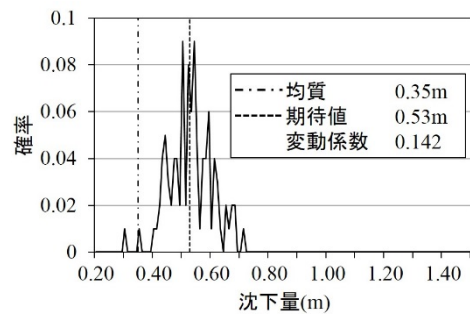


図 3 MCS 結果(天端の残留沈下量)

3. まとめ

他の工学分野のシミュレーションにおいても, 材料の不均質性に伴う予測結果の不確かさは存在する. しかしながら地盤工学分野と比較すると, 他分野のそれは材料の品質管理の範疇に入る程度の極めて小さな不確かさである. 地盤工学分野における V&V を真に完成度の高い枠組みにするためには, こうした材料の不均質性といかに向き合うかの議論が欠かせない.

参考文献

- 1) 白鳥正樹, 越塚誠一, 吉田有一郎, 中村均, 堀田亮年, 高野直樹: 工学シミュレーションの品質保証と V&V, pp.13-15 および pp.95-115, 丸善, 2013.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 1996.
- 3) Imai, T.: P and S wave velocities of the ground in Japan. Proc. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol.2, pp.257-260, 19