

二次元盛土地盤の有効応力解析の信頼性評価に関する考察 —地震時の応答応力を踏まえた要素挙動の妥当性検証に関する提案—

数値解析の妥当性検証 応力状態

東北大学 学生会員 ○安達 夏紀

東北大学 国際会員 風間 基樹, 河井 正, 金 鍾官

名古屋大学 国際会員 野田 弘弘

1. 研究の背景と目的

地盤は不均質な材料であり、境界条件も複雑であることから、地震時の挙動を予測するためには数値解析が不可欠であり、そこで得られた結果が信頼できるものでなければならない。そこで、室内試験より得られた物性パラメータを設定し解析を行うが、その結果の妥当性検証は検討者個人の判断に委ねられており、普遍化した共通する検証方法は存在せず、原位置での実被災例や模型実験結果を念頭に各部の最大応答や液状化範囲などをイメージして、感覚的に処理されることが多いのではなかろうか。その場合、土の解析要素個々の挙動について具体的に検証される例は非常にまれであり、室内試験が等方応力状態で実施された液状化試験結果のみであった場合、盛土地盤のような解析対象であれば、そもそも検証するためのデータが存在すらしていないことになる。ところで、厳密に言えば、個々の要素挙動の信頼性を実験結果との比較により検証する場合、全要素それぞれに合わせて応力状態を変えた室内試験結果を用意するべきであるが、何千もある解析要素に対して事実上それは不可能であるため、地盤工学的課題ごとに着目する要素の挙動を概略分類し、それぞれのパターンに対していくつかの検証用データを用意することが現実的であろう。そこで本研究では、液状化する可能性のある盛土と原地盤という地盤工学的課題を対象にして、まずは地震応答解析結果から、要素ごと、ある程度の解析領域のブロックごとに地震時の応力変化特性の違いを把握していくつかのパターンに集約し、さらに、その特性ごとに比較に用いる実験条件の提案を行った。

2. 解析概要および解析条件

本研究では、数値解析コード：GEOASIA を用いて二次元有効応力解析を行った。GEOASIA は、土の骨格構造（構造・過圧密・異方性）の変化を記述可能な上下負荷面修正 Cam-clay model (SYS Cam-clay model) を搭載している。解析モデルは図 1 に示す左右対称の盛土地盤モデルを採用し、入力地震動は 2016 年 4 月 16 日熊本地震（K-net：熊本県菊池の観測データ、NS、UD）を採用し、鉛直・水平の 2 方向に地震動を入力することとした。また、今回は飽和地盤を対象とするため、地下水位は地表面に沿った位置に設定している。地震動入力時の境界条件は、同深度の左右端部の節点同士を水平・鉛直方向ともに等変位境界に設定することで、水平成層地盤を模擬し、また底面部の節点すべての水平・鉛直方向を粘性加速度境界に設定している。

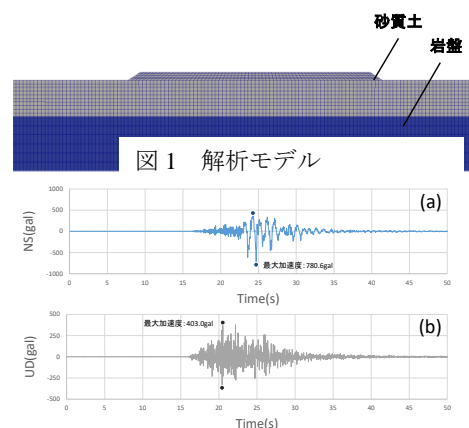


図 1 解析モデル

図 2 入力地震動 (a：水平，b：鉛直)

3. 解析結果および考察

既往の研究によって、等方応力状態では有効応力がゼロとなり完全に液状化し、地震後の過剰間隙水圧の消散に伴う塑性体積圧縮を除いては、残留変形はほとんど発生しないが、異方応力状態もしくはせん断応力が常に作用している状態においては、液状化は発生せず、地震中に非排水変形による沈下や側方へのはらみ出しなど、大きな残留変形が生じると報告されている²⁾。したがって、盛土モデルの地震時における応力変化特性を把握するにあたり、(1) 過剰間隙水圧が十分蓄積し液状化が発生するか (2) 残留変形が生じるか (3) 地震中に異方応力状態が維持されているか (4) 初期せん断応力 (σ_{xy0}) の影響が大きいのかの 4 点に着目し、分類を行った。ここで、異方応力状態や初期せん断応力 (σ_{xy0}) に着目したのは、実務においては空間に座標を固定し、水平変位や鉛直変位といった方向の固定された物理量の評価が必要になるため、それとの対応関係で検証を行う方が良いと判断したためである。さらに、分類したそれぞれの応力変化特性をもつ要素の分布範囲を把握するため、最終時刻における過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma'_m$ 、最終時刻のせん断ひずみ $\gamma(\text{End})$ と全時刻におけるせん断ひずみの最大値 $\gamma(\text{Max})$ の比 $|\gamma(\text{End}) / \gamma(\text{Max})|$ 、初期土圧係数 K_0 およびせん

断応力 σ_{xy} と最大せん断応力（モール円の半径） τ_{max} の比 $|\sigma_{xy}/\tau_{max}|$ のコンター図を作成した。ここで、 $|\gamma(\text{End})/\gamma(\text{Max})|$ は 1.0 に近いほど、最大せん断ひずみが最終時刻に発生しており、つまり大きな残留せん断変形が生じていることを表している。また、 $|\sigma_{xy}/\tau_{max}|$ は 1.0 に近いほど、せん断応力 σ_{xy} が異方応力状態の影響よりも大きいことを表している。これらの客観的指標により分類した結果を、図 3 に示すとともに、以下に各エリアの特徴を示す。

【エリア A】この領域は、地震動が入力されると過剰間隙水圧が蓄積し、最終的に液状化状態に至る(図 4 参照)。要素の初期応力状態は異方応力状態（土圧係数 $K=0.5$ ）であっても、水圧が蓄積するのに十分なせん断応力（振幅、繰返し回数）が作用したことで液状化が発生し、等方応力状態（ $K=1.0$ ）に至る。また、せん断ひずみや鉛直ひずみは主要動入力時に最大値を記録し、地震動がおさまった後に残留ひずみはほとんど発生しない。このように地震動の作用により液状化が発生し、かつ残留ひずみが発生しない要素の場合、一般的に行われている等方応力状態下における液状化試験との比較により解析要素の挙動の検証が可能である。

【エリア B】エリア A と同様に繰返しせん断応力が作用することで水圧が蓄積し、液状化に至る。ただし、エリア A と異なり、残留せん断ひずみが発生する領域である。そのため、要素応答の検証の際は、初期せん断応力をわずかに作用させた状態で過剰間隙水圧比が 1.0 付近まで蓄積する実験を実施し、その時の残留せん断ひずみの発生量に着目して比較を行う必要がある。

【エリア C】異方応力状態が地震中も維持されるため、液状化に至るほど大きな過剰間隙水圧は蓄積しない(図 5 参照)。異方応力状態が維持されると、主応力空間においてモール円がその大きさを維持したまま破壊線に接してしまい、平均有効応力がそれ以上小さくなることが出来ないためである。また、残留せん断ひずみはほとんど生じていないが、残留鉛直ひずみの発生量が大きいことから、液状化よりも沈下量に着目した評価が必要である。要素の応答の検証では、異方応力状態下で繰返し载荷を行った実験と比較し、対象地盤の残留ひずみを詳細に把握しなければならない。その際、境界条件や水理条件に合わせて、鉛直に圧縮し水平に伸長するせん断変形による沈下と塑性体積ひずみ（圧縮）による沈下を区別して評価する必要がある。

【エリア D】初期せん断応力の影響が大きいいため、モール円が破壊線に接し、平均有効応力がゼロに達しないため完全に液状化することはない(図 6 参照)。また、大きな残留せん断ひずみが生じていることから、要素の応答の検証の際にも、残留せん断ひずみの評価が重要となる。また、比較に用いる実験は、初期せん断応力を作用させて繰返し载荷を行う必要があるが、初期せん断応力の大きさに残留せん断ひずみが大きく異なるため、初期せん断応力の大きさをパラメータとする一連の実験を行い、解析結果と比較することが必要となる。

【エリア E】このエリアは応力状態の変化が激しく、一般的に行われている要素試験との比較が困難な領域である。そのため、要素の応答については、解析結果から得られた応力状態に合わせた状態で、解析に用いた地震動を入力して確かめる必要がある。または、そのような多様な応力変化を統一的に解釈する方法についてのさらなる実験的検討が必要となる。但し、全体の変形にほとんど影響しない表層の一部がこのエリアに該当する場合など、そもそも検証の必要性自体を検討することで上記のような個別の検証実験を実施しないで良い可能性もある。

4. 結論

二次元有効応力解析を用いて盛土地盤モデルにおいて、過剰間隙水圧の蓄積の程度、異方応力状態および初期せん断応力の影響度、残留変形の発生の有無に着目し、地震時の応力変化特性を分類し、それぞれの特性を持つ要素がどのような条件の下で行なわれた実験と比較し、数値解析結果の妥当性検証を行うべきかについて提案を行った。

5. 参考文献

- 1) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008) : Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, Vol. 48, No. 6, pp. 771-790.
- 2) 日下拓哉, 國生剛治, 新井良太郎: 初期せん断応力を受ける細粒分含有砂の液状化特性—繰返し・単調载荷ねじりせん断試験による検討—, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.1, pp.80-90, 2013.

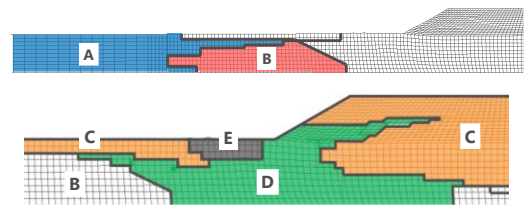


図 3 応力変化特性の異なる要素ごとの分布範囲

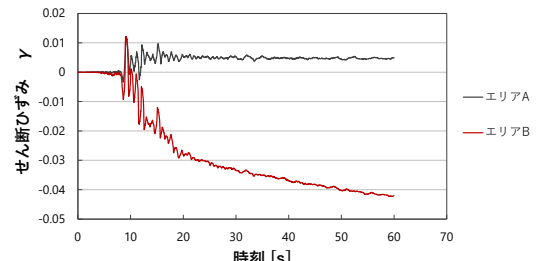


図 4 エリア A, B の典型的なせん断ひずみ時刻歴

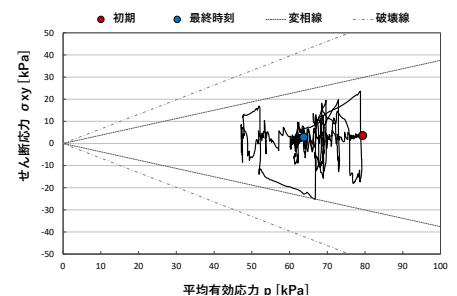


図 5 エリア C の有効応力経路

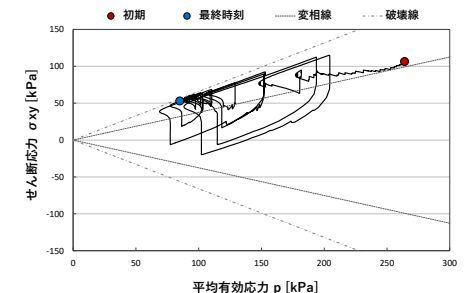


図 6 エリア D の有効応力経路