

液状化地盤上の住宅沈下予測解析における解析次元の影響

余川 弘至*, 森 悠斗**, 野々山 栄人***, 杉井 俊夫****

Effect of Analysis Dimension on Settlement Prediction of Houses on Liquefiable Ground

Hiroshi YOKAWA*, Yuto MORI**, Hideto NONOYAMA*** and Toshio SUGII****

(Received 16 February 2026)

This study examines the effectiveness of dimensional analysis on predicting building settlement on liquefiable ground using the Material Point Method (MPM). A stiffness-degradation model based on the Yasuda framework was implemented and verified by simple shear tests. Three models were analyzed: a two-dimensional model, a three-dimensional plane strain model, and a full three-dimensional model. The two-dimensional and three-dimensional plane strain models showed similar settlements, whereas the full three-dimensional model produced larger settlements for low F_L , indicating significant three-dimensional deformation effects.

Keywords: Liquefaction, house settlement, material point method, three-dimensional effects

1. 背景

地震時の液状化に起因する住宅沈下は、地盤の支持力低下や側方変形の進展など、複数の三次元的要因が複合して生じる現象である。二次元平面ひずみ解析(以下、二次元解析)は計算負荷が比較的小さく、設計実務でも広く利用されているが、三次元的な側方流動や変形領域の空間的広がりを十分に表現できない場合があることが指摘されている¹⁾。一方、近年では三次元液状化解析の適用も増加しており、大規模解析における有効性が報告されている²⁾。

このように、二次元解析と三次元解析の間にどのような差異が生じ、どのような場面で三次元化が必要となるかを整理することは、液状化被害の評価において重要な課題である。特に、比較的小さな変形領域を扱う場合には二次元解析でも妥当な結果が得られる可能性がある一方、液状化による大変形が生じる場合には、三次元的な変形の広がりや側方拘束の効果が沈下挙動

に強く影響を及ぼす可能性がある。したがって、変形規模に応じて二次元解析と三次元解析の整合性を検討し、両者の違いを定量的に明らかにすることが求められる。

本研究では、液状化地盤上の住宅沈下を対象として、Material Point Method(以下、MPM)³⁾を用いた多次元解析を段階的に実施する。まず、理論的には同一の結果が得られるはずの二次元解析と、三次元モデルで平面ひずみ条件を設定した解析の整合性を検証し、三次元側で生じ得る要素形状やメッシュ密度の影響を確認する。そのうえで、三次元解析を実施し、液状化に伴う大変形が発生した場合に、二次元モデルと三次元モデルで沈下量や変形分布にどの程度の差が生じるかを明らかにする。以上の検討を通じて、解析次元が沈下予測に与える影響および三次元解析を適用すべき条件を整理することを目的とする。

*都市建設工学科 (Department of Civil Engineering)

**建設工学専攻大学院生 (Graduate Student, Civil Engineering)

***防衛大学校建設環境工学科 (National Defense Academy, Department of Civil and Environmental Engineering,)

****都市建設工学科 (Department of Civil Engineering)

2. 解析概要

2.1 解析手法

本研究では、液状化に伴う大変形および流動変形を安定的に再現するため、MPMを用いた。MPMは、マテリアルポイントが応力・ひずみなどの内部情報を保持し、運動方程式は背景格子上で解くという二重構造を特徴とする数値解析手法である。背景格子は各計算ステップで再初期化されるため、大変形下においてもメッシュの歪みに起因する数値的不安定性が生じにくく、液状化に伴う大変形や流動変形を扱う上で有利である。

MPMにおける計算の流れは、「粒子情報を背景格子に写す→格子点で運動方程式を解く→計算結果を粒子に戻す」という最小限のステップで構成されており、詳細はAnura3Dのマニュアルおよび関連文献に示されている⁴⁾。

液状化地盤では、地震動に伴う繰返しせん断変形により、過剰間隙水圧の上昇、有効応力の低下、およびせん断剛性の低下が逐次的に進行するため、本来は地震動を入力した動的解析による評価が望ましい⁵⁾。しかし、動的解析では計算負荷が大きく、大変形を伴う三次元解析を実務に適用することは容易ではない。

そこで本研究では、解析対象を地震時の動的過程そのものではなく、地震動によって地盤のせん断剛性が低下した状態を前提とし、自重解析を行うことで液状化に伴う大変形挙動を簡便に評価することを試みた。その一手法として、構成式に安田モデル⁶⁾を導入した。安田モデルは、液状化安全率 F_L や細粒分含有率 F_c などの物性値に基づいて液状化中の剛性低下量を与えることができ、さらに等価せん断ひずみと微小抵抗領域ひずみの関係を通じて、ひずみが大きくなった段階で剛性が回復する挙動を表現できる。

本研究では、地震時に動的解析によって逐次的に進行する剛性低下状態を、 F_L に基づく剛性低下量として代表的に評価し、その状態を初期条件として自重による静的MPM解析を実施する。これにより、地震動を直接入力しなくとも、液状化後に進行する大変形、流動変形、および住宅沈下挙動を、数値的に安定した形で再現することが可能となる。図1に動的解析と静的解析の解析フローの概要を示す。

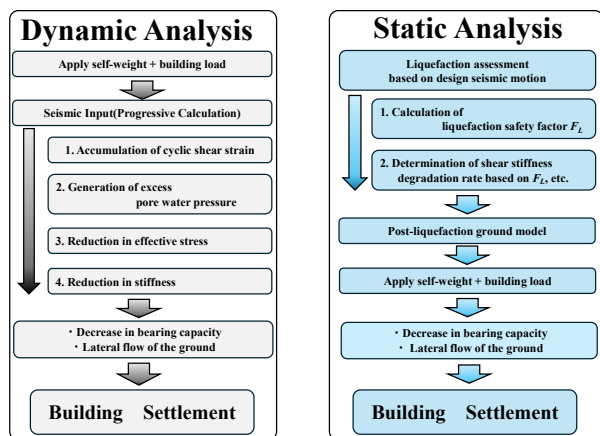


図1 両手法の解析フロー

2.2 解析モデル

液状化地盤上の住宅沈下を評価するため、 N 値15に相当する初期せん断剛性をもつ均質な砂質土を対象として解析モデルを構築した。地盤の F_c は0%とし、地下水面は地表面に一致させた。初期ポアソン比 ν_0 は0.333とし、液状化判定に基づく F_L は0.4, 0.6, 0.7, 0.8の4種類を設定し、剛性低下量に反映した。住宅は木造2階建て相当の質量をもつ弾性モデルとしてモデル化し、接地圧が約15kPaとなるように密度を調整した。解析次元の影響を検討するため、以下の3種類のモデルを用いた。

【二次元モデル】:奥行方向の変形を拘束した平面ひずみ二次元モデル

【三次元平面ひずみモデル】:住宅を帯基礎状とし、奥行方向の変形を拘束することにより、理論上は二次元モデルと等価な三次元モデル

【三次元モデル】:対称条件を仮定したハーフモデルであり、地盤および住宅を三次元とし、面外の変形を自由とするモデル

境界条件はいずれのモデルでも統一し、地盤底面は鉛直・水平方向を完全拘束とした。側方境界は鉛直方向に変形を許容しつつ、境界面法線方向変位を拘束することで平面外方向への変形を防いだ。これにより、二次元および三次元解析間の条件差を極力排除し、解析次元の違いに起因する沈下挙動の差異を適切に比較できるモデルとした。

3. 構成式およびその検証

3.1 構成式の概要

本研究では、液状化に伴う剛性低下および大ひずみ域での剛性回復を簡易に表現するため、安田モデルに基づくせん断応力-せん断ひずみ関係を構成式として用いる。安田モデルは、液状化状態におけるせん断応力-せん断ひずみ関係をバイリニア的に近似したモデルであり、 F_L や F_c に応じて、初期せん断剛性 G_0 が液状化後の剛性 G_1 まで低下する挙動を与えることができる。さらに、ひずみが増加して等価せん断ひずみ γ が微小抵抗領域ひずみ γ_L に達した場合には、せん断剛性が G_2 へ回復するように設定されている。この剛性回復は、液状化後に大きな変形が進行した際に土骨格が再び抵抗を示す現象を簡易的に表現したものである。図2にせん断ひずみ-せん断応力関係の概念図を示す。

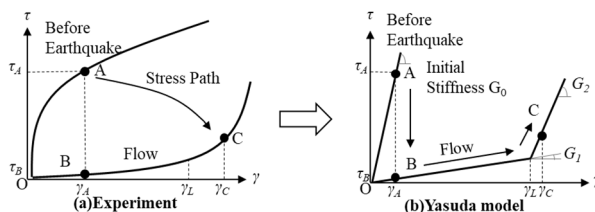


図2 せん断応力-せん断ひずみ関係

本研究で用いる構成式は、一次元のせん断応力-せん断ひずみ応答を基礎としたモデルであるが、既往の研究では、これを二次元状態に適用するための拡張が提案されている⁹⁾。本研究でもこの方針に従い、まず二次元ひずみを仮定した場合の応

力-ひずみ関係を整理し、その関係式を式(1)に示す。このとき、体積弾性係数 K は土骨格と間隙水が一体で変形する非排水条件を反映しており、土骨格の体積弾性係数 K_s 、水の体積弾性係数 K_w と間隙率 n を用いて式(2)のように与えられる。また、 γ_L に達したかどうかの判定に用いる γ については、式(3)に示すせん断ひずみ成分によって定義している。

次に、構成式を三次元場へ適用するための拡張を行う。三次元状態では、複数のせん断ひずみ成分が存在するが、本研究では液状化後の剛性低下を方向によらず等価に扱うため、全方向のせん断成分に対して同一のせん断弾性係数 G を適用した。三次元での応力-ひずみ関係式を式(4)に示す。体積弾性係数については、二次元と同様に等体積条件を仮定し、式(2)によって統一的に与えている。さらに、三次元場における微小抵抗領域ひずみの判定には、三次元ひずみテンソルを用いて定義した等価せん断ひずみを採用し、その算定式を式(5)に示す。これにより、一次元で定義された剛性低下および回復の関係を、多次元解析においても矛盾なく反映させることが可能となる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$K = K_s + \frac{K_w}{n} \quad (2)$$

$$\gamma = \gamma_{xy} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2} \quad (5)$$

3.2 単要素解析による構成式の検証

構成式の多次元実装の妥当性を確認するため、二次元モデルおよび三次元モデルの単純せん断条件における単要素解析(1辺1m)を実施し、せん断応力-せん断ひずみ関係が理論的に整合するかを検証した。図3に二次元単純せん断で用いたメッシュ、図4に三次元単純せん断で用いたメッシュを示す。両者は要素形状(2D:三角形要素, 3D:三角錐要素)が異なるものの、解析領域および境界条件は可能な限り一致させた。解析に用いた材料パラメータは、 $G_0=11,520\text{kPa}$ 、 $\nu=0.333$ 、 $F_c=0.0\%$ 、密度 $\rho=1.8\text{Mg/m}^3$ 、 $F_L=0.9$ 、間隙率 $n=32.0\%$ 、 $K_w=2.25 \times 10^6\text{kPa}$ である。単純せん断を与えるため、メッシュ領域上面の粒子に水平方向 5m/s の強制速度を付与し、底面を固定するこ

とで一樣なせん断ひずみを発生させた。

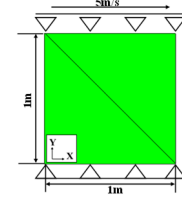


図3 解析メッシュ(二次元単純せん断)

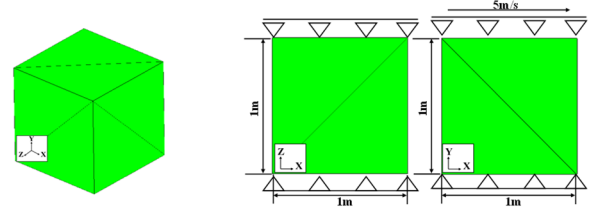


図4 解析メッシュ(三次元単純せん断)

図5に、二次元モデルおよび三次元モデルの応力-ひずみ関係と、構成式に基づく理論曲線との比較を示す。二次元・三次元のいずれの解析結果も、微小抵抗領域ひずみ到達前の剛性 G_1 に対応する応力-ひずみ関係および、到達後の剛性 G_2 に対応する応力-ひずみ関係のいずれについても、理論曲線と極めて良好な一致を示している。この結果から、本研究で実装した構成式は、二次元・三次元のいずれの次元においても安定的に動作し、多次元解析における剛性低下および剛性回復を含む剛性変化の取り扱いが妥当であることが確認された。

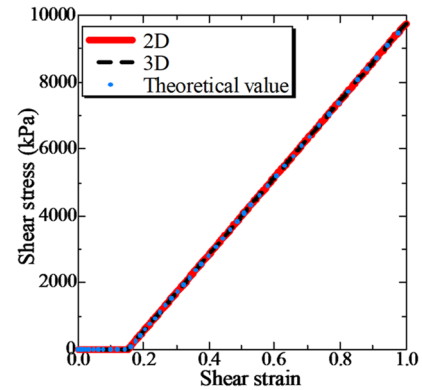


図5 せん断応力-せん断ひずみ関係

4. 解析ケース

本研究では、解析次元の違いが液状化地盤上の住宅沈下を与える影響を比較するため、二次元モデル、三次元平面ひずみモデル、および三次元モデルの3種類の解析モデルを用いた。これまでに述べた材料パラメータや構成式はすべてのモデルで共通とし、本章では各解析のメッシュ構成と境界条件について示す。図6に二次元モデルのメッシュ(節点数1,671, 要素数

3,194), 図 7 に三次元平面ひずみモデルのメッシュ(節点数 33,439, 要素数 48,019), 図 8 に三次元モデルのメッシュ(節点数 370,480, 要素数 268,415)を示す. 境界条件はすべてのモデルで統一し, 地盤底面は鉛直・水平方向を完全拘束とした. 側方境界については, 鉛直方向変位を許容しつつ, 境界面法線方向の変位を拘束することで, 平面外方向への変形を防ぐ設定とした. これらの条件により, 解析次元以外の影響を最小化したうえで, 各モデルにおける変形挙動および沈下特性を比較可能な解析ケースを構成した.

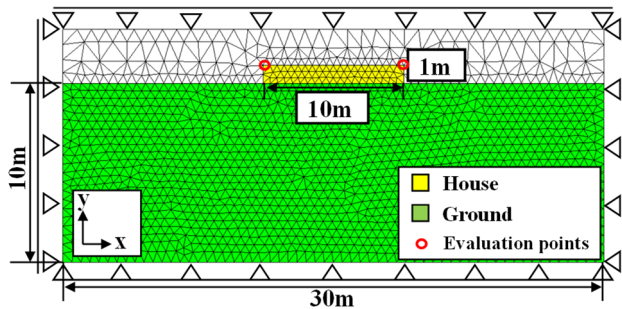
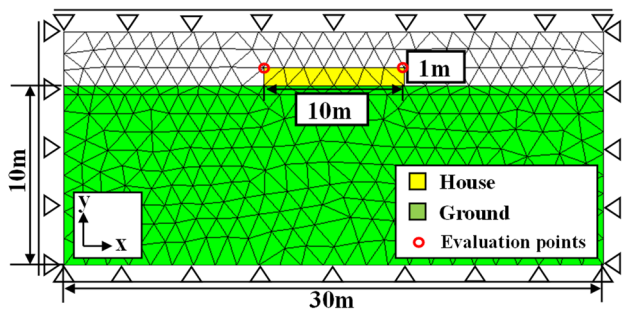
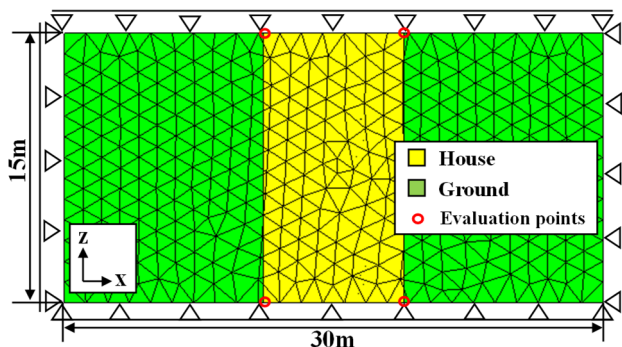


図 6 二次元モデル

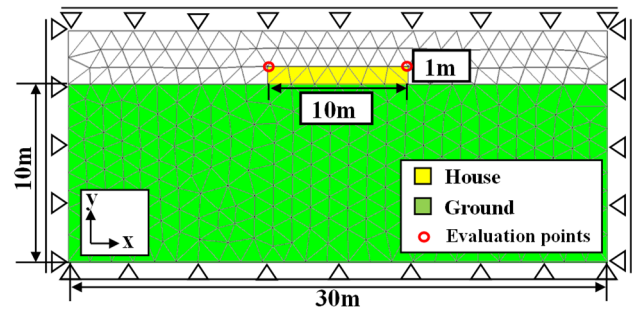


(a) 立面図

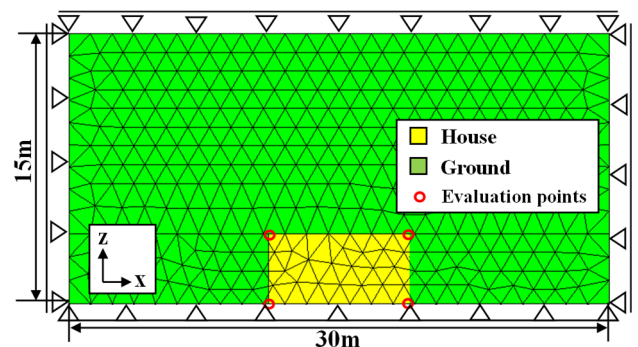


(b) 平面図

図 7 三次元平面ひずみモデル



(a) 立面図



(b) 平面図

図 8 三次元モデル

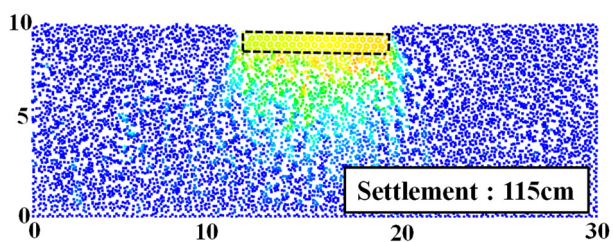
5. 解析結果および考察

5.1 二次元モデルと三次元平面ひずみモデルの比較

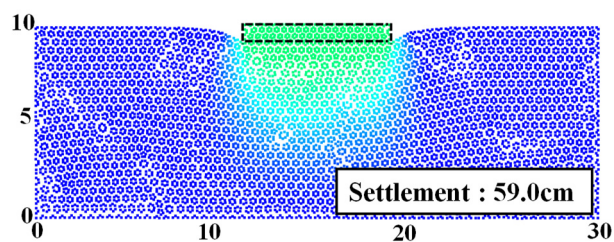
図 9～図 12 に, F_L を 0.4, 0.6, 0.7, 0.8 と変化させた場合の二次元モデルおよび三次元平面ひずみモデルの最終変形図(コンターは鉛直変位量)を示す. また図中には住宅の沈下量を示す. 図 6～8 中の赤丸で示す評価点における鉛直下向きの変位量を抽出し, それらの平均値を住宅沈下量として定義した.

いずれの F_L においても, 二次元モデルと三次元平面ひずみモデルの住宅沈下量はきわめて近い結果を示しており, 本研究で用いた構成式の多次元拡張は, 平面ひずみ条件の範囲内で妥当な応答を与えていることが確認された. 一方で, 三次元平面ひずみモデルにおいて, 鉛直変位分布には, 奥行方向にわずかなばらつきが認められた.

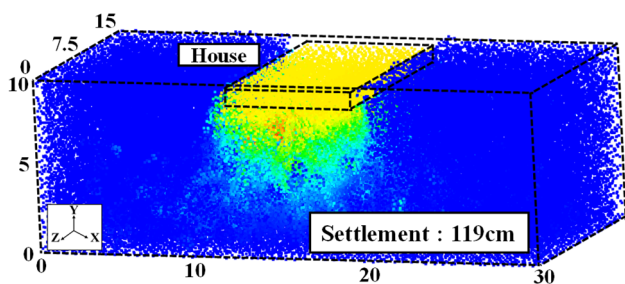
この差異の要因として, 二次元モデルと三次元平面ひずみモデルでは数値解析における離散化条件が完全には一致していないことが挙げられる. 具体的には, 二次元解析では三角形要素を用いているのに対し, 三次元解析では三角錐要素を用いており, 要素形状が異なる. また, 計算効率を考慮し, 三次元解析では二次元解析に比べてメッシュサイズを大きく設定している. さらに, 各要素内に配置されるマテリアルポイント数についても, 解析次元の違いにより完全には一致していない. これらの離散化条件の差異に加え, 奥行方向(z 方向)のモデル境界面にのみ拘束条件を与えていることが, 沈下量および鉛直変位分布に生じたわずかな差異の要因であると考えられる.



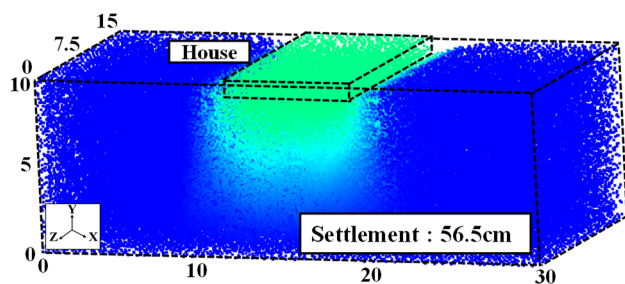
(a)二次元モデル



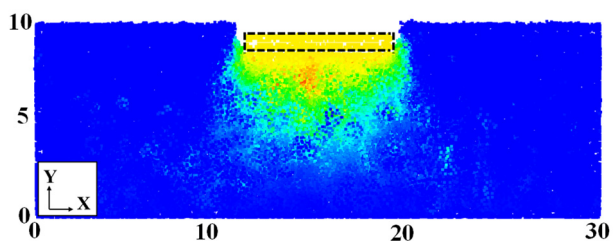
(a)二次元モデル



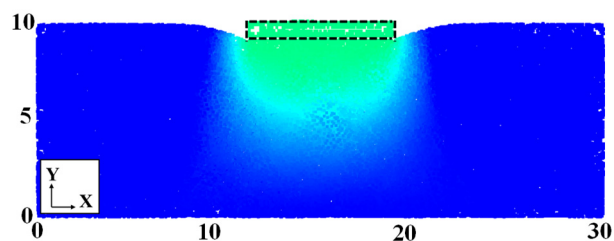
(b) 三次元平面ひずみモデル



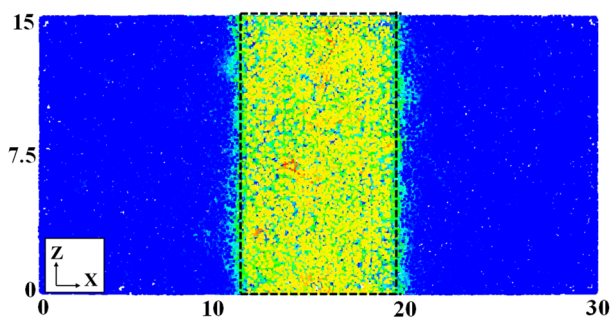
(b) 三次元平面ひずみモデル



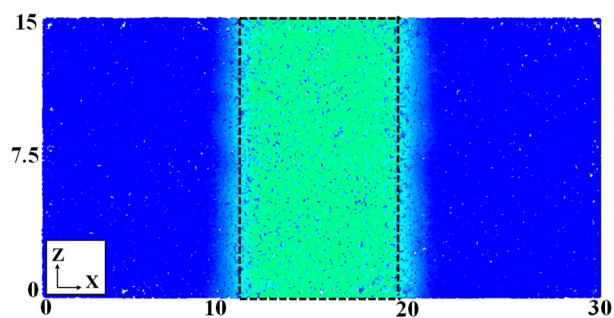
(c)三次元平面ひずみモデル 立面図



(c)三次元平面ひずみモデル 立面図



(d) 三次元平面ひずみモデル 平面図



(d) 三次元平面ひずみモデル 平面図



図9 $F_L=0.4$ の最終変形図(コンター:鉛直変位量)

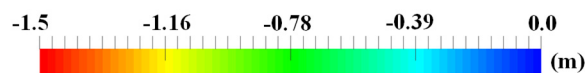
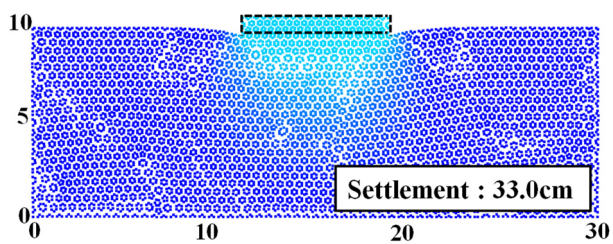
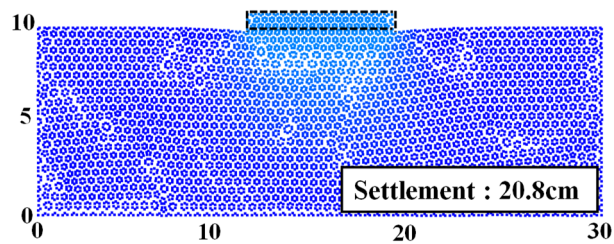


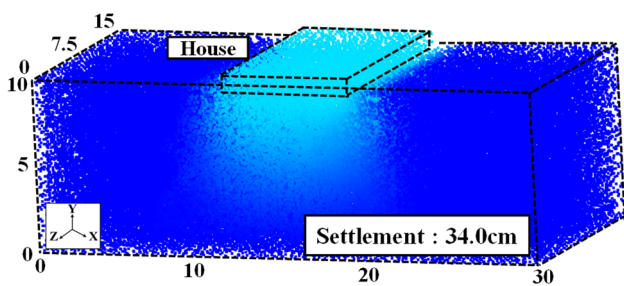
図10 $F_L=0.6$ の最終変形図(コンター:鉛直変位量)



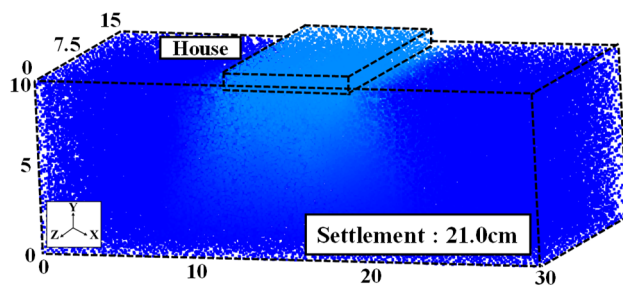
(a)二次元モデル



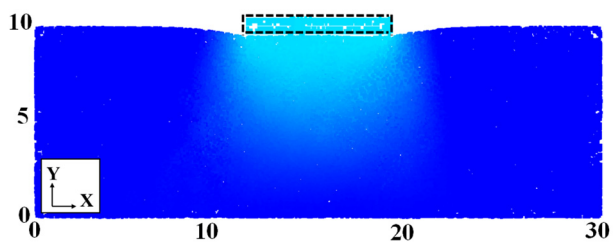
(a)二次元モデル



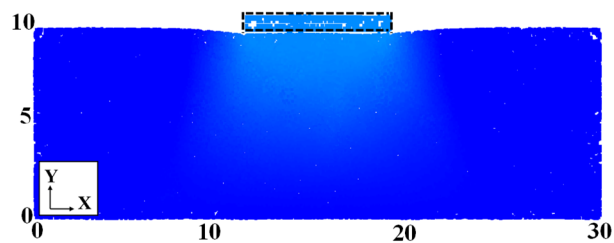
(b) 三次元平面ひずみモデル



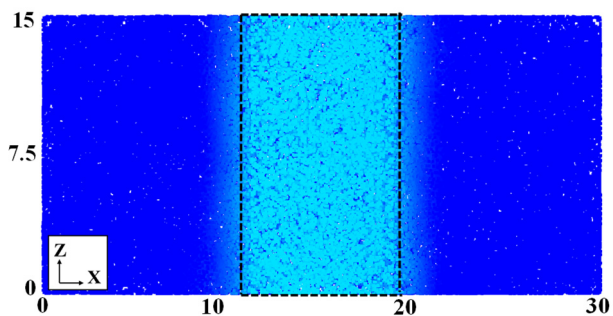
(b) 三次元平面ひずみモデル



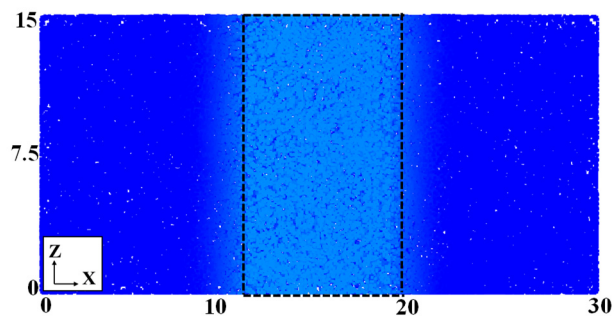
(c)三次元平面ひずみモデル 立面図



(c)三次元平面ひずみモデル 立面図



(d) 三次元平面ひずみモデル 平面図



(d) 三次元平面ひずみモデル 平面図



図 11 $F_L=0.7$ の最終変形図(コンター:鉛直変位量)

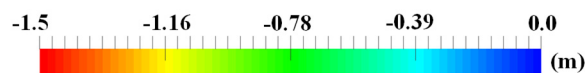


図 12 $F_L=0.8$ の最終変形図(コンター:鉛直変位量)

5.2 三次元モデルとの比較

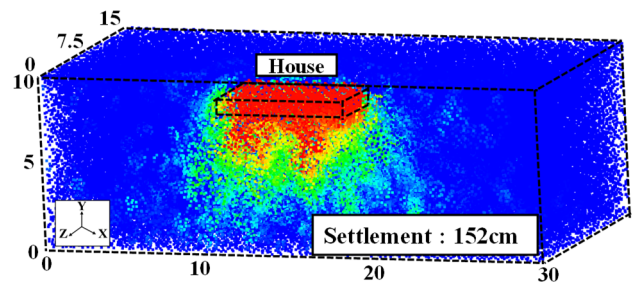
図 13 に三次元モデルの最終変形図(コンターは鉛直変位量)を示す。また、図 14 に各解析モデルにおける F_L と住宅沈下量の関係を示す。図 14 より、 F_L が 0.6, 0.7, 0.8 の範囲では、二次元モデルと三次元平面ひずみモデルの住宅沈下量はほぼ一致しており、三次元モデルも含めて大きな差は生じていない。一方で、 $F_L=0.4$ のケースでは様相が異なり、三次元モデルの住宅沈下量が他のモデルに比べて明確に大きくなった。これは、液状化により剛性が著しく低下した状態では、三次元的な側方変形の自由度が増すことで沈下が促進される可能性を示唆している。すなわち、 F_L の小さい軟弱化した地盤においては、二次元解析では表現しきれない三次元効果が支配的となり、解析次元の違いが沈下量に直接影響を与えることが明らかとなった。この特徴は、液状化時の建物沈下が三次元的な側方変形に強く影響されることを示した既往研究⁷⁾と整合的である。一方、 F_L が比較的高いケースでは、二次元モデル、三次元平面ひずみモデル、三次元モデル間の住宅沈下量の差は小さく、剛性低下が限定的な範囲では、平面ひずみ解析によって沈下量の概略評価が可能であるといえる。

以上より、三次元解析は、特に液状化により剛性が大きく低下した条件において、沈下の進行に寄与する立体的な変形を評価する上で有効であることが確認された。

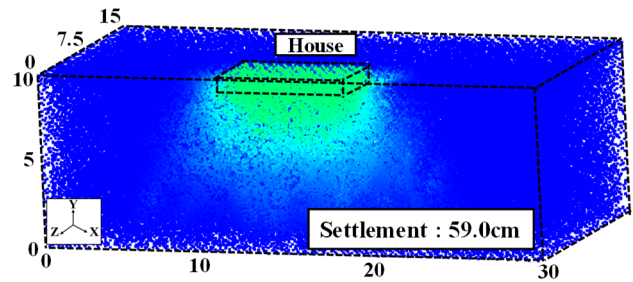
5.3 計算コストと解析精度

本研究で使用した MPM 解析では、計算コストはメッシュ数に大きく依存するほか、液状化によって大変形が生じるケースでは、収束のために多数の繰り返しステップが必要となる。本解析条件において、二次元解析はおおむね 1 日程度で計算が完了したのに対し、三次元解析では 1 週間程度を要した。変形の立体的な広がり进行评估するという点では三次元解析が最も適切であり、特に剛性が大きく低下する F_L の小さいケースでは、三次元効果が沈下挙動に顕著に現れることが確認された。しかし、実務的な観点では、三次元解析は計算負荷が非常に大きく、時間的制約や計算資源の面から適用が難しい場合も多い。

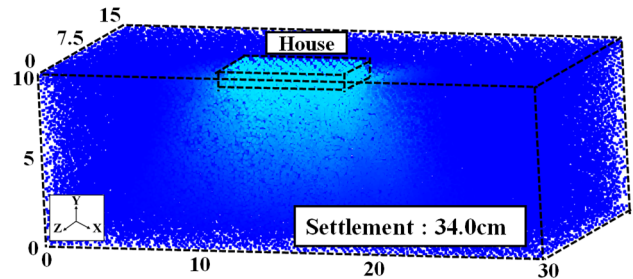
この結果より、三次元変形が支配的となる状況と、二次解析で十分に評価可能な状況を適切に見極め、解析目的に応じて次元を選択することが重要である。沈下量の概略評価には二次元解析が有効であり、変形分布や立体的な側方変形を精密に把握する必要がある場合に三次元解析を用いるなど、計算コストと解析精度のバランスを考慮した運用が求められる。



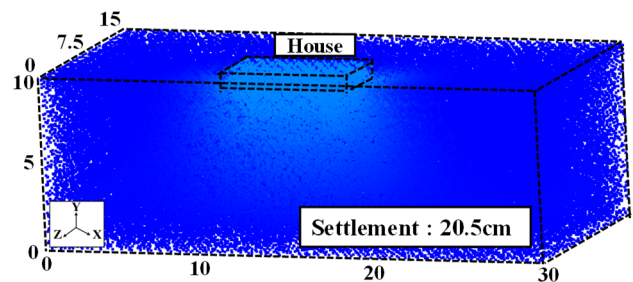
(a) $F_L=0.4$



(b) $F_L=0.6$



(c) $F_L=0.7$



(d) $F_L=0.8$



図 13 三次元モデルの最終変形図(コンター:鉛直変位量)

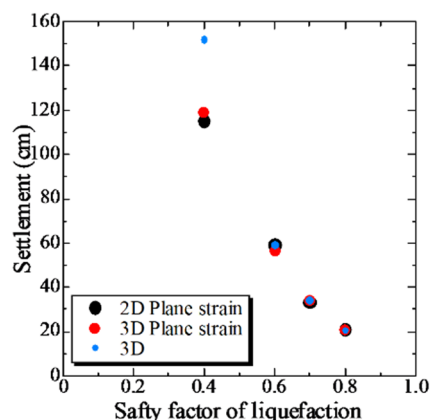


図 14 F_L と住宅沈下量の関係

6.まとめ

本研究では、液状化地盤上の住宅沈下を対象として、Material Point Method (MPM)を用いた二次元モデル、三次元平面ひずみモデル、三次元モデルの解析を実施し、構成式の多次元実装の妥当性と解析次元が沈下挙動に与える影響について検討した。

まず、単要素解析により、構成式によって得られるせん断応力-せん断ひずみ関係が二次元モデルと三次元モデルで一致することを確認し、安田モデルを多次元場へ拡張した実装が妥当に機能することを示した。

次に、二次元モデルと三次元平面ひずみモデルを比較したところ、 F_L の異なる複数のケースにおいて沈下量および変形分布がほぼ一致し、平面ひずみ条件下では両モデルが等価に取り扱えることが確認された。一方、三次元モデルでは、 $F_L=0.4$ と剛性低下が著しい条件において沈下量が他のモデルに比べて大きくなる傾向が見られた。このことは、地盤が大きく軟化した場合には、三次元的な側方変形の自由度が沈下挙動に直接寄与し、二次元モデルでは表現しきれない三次元効果が支配的となる可能性を示している。

さらに、計算時間に関しては、二次元モデルが約 1 日で計算可能であるのに対し、三次元モデルは 1 週間程度を要し、実務上の適用には計算負荷が大きいことが明らかとなった。したがって、沈下量の概略評価には二次元解析の利用が有効であり、一方で立体的な変形分布や側方変形を詳細に把握する必要がある場合には三次元解析を適用するといった、解析目的に応じた次元選択が重要となる。

以上の結果から、液状化地盤における沈下挙動は解析次元に依存し、特に地盤剛性が大きく低下する状況では三次元解析の重要性が高まることが示された。今後は、三次元モデルを用いて地盤改良などの対策工を導入した場合の効果を検討し、三次元的な変形挙動を踏まえた沈下抑制手法の検証を進める予定である。

謝辞

本研究は、科研費基盤研究(C) (課題番号 25K08013)および日比科学技術財団の助成を受けて実施したものである。ここに記して関係各位に深く謝意を表する。

参考文献

- 1) Popescu, R., Prevost, J.H. and Deodatis, G.: Three-dimensional effects in seismic liquefaction of stochastically variable soil deposits, *Géotechnique*, 55(1), pp.21–31, 2005.
- 2) Kusakabe, R., Fujita, K., Ichimura, T., Hori, M. and Wijerathne, L.: A Fast 3D Finite-Element Solver for Large-Scale Seismic Soil Liquefaction Analysis. In *Lecture Notes in Computer Science (ICCS 2019)*, pp. 349-362, 2019.
- 3) Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H.: A particle method for history-dependent materials, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 118, pp.179–196, 1994.
- 4) Anura3D MPM Research Community: Anura3D MPM Software Manual, Version 2022, 2022.
- 5) Zabala, F. and Manzari, M. T.: Dynamic modeling of cyclic mobility with the Material Point Method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(8), pp.814–828, 2010.
- 6) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, *土木学会論文集*, No. 638/III-49, pp. 71–89, 1999.
- 7) Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M. and Wilson, D.: Mechanisms of seismically induced settlement of shallow foundations on liquefiable soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), pp.151–164, 2010.