

3次元非線形地盤震動解析を用いた 堆積層における地盤ひずみの集中効果の検証

宮本 崇¹・入原 渉²・鈴木 猛康³・藤田 航平⁴・市村 強⁵

¹正会員 山梨大学 地域防災・マネジメント研究センター (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail: tmiyamoto@yamanashi.ac.jp

²正会員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail: g14mh002@yamanashi.ac.jp

³正会員 山梨大学 地域防災・マネジメント研究センター (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail: takeyasu@yamanashi.ac.jp

⁴正会員 理化学研究所 計算科学研究機構 (〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町7-1-26)

E-mail: kohei.fujita@riken.jp

⁵正会員 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail: ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp

甲府盆地は、1kmを超える深い盆状の不整形地盤構造を呈する。火山活動や山体崩壊に伴う岩屑流、斜面崩壊等による礫質土が深く堆積し、さらに最表層に近年の河川氾濫堆積物による不整形地盤表層構造が形成されている。したがって、地震時には局所的な地震エネルギーや地盤ひずみの集中により、ローカルサイト効果に起因する震災の帯の発生が懸念される。このような現象は、通常の被害想定で用いられる1次元解析では評価できないため、表層地盤を3次元かつ高精細なメッシュを広い領域で作成する必要があり、計算負荷の問題からこれまで解析が行われていなかった。しかし、近年の計算科学技術の発達により、大規模な解析が実現可能となった。そこで本稿では特に地震時地盤ひずみの集中に着目し、まず最初に、甲府盆地の表層地盤と同様の物性値を有する仮想的な地盤モデルに対する3次元地震応答解析から、不整形表層地盤における地盤ひずみ集中のローカルサイト効果を検討する。つぎに、甲府盆地の地盤モデルに対する3次元地震応答解析を実施し、実地盤における地震時地盤ひずみの定量的評価を試みる。

Key Words : seismic ground strain, local site effect, 3D nonlinear ground response analysis

1. はじめに

甲府盆地は周囲を山で囲まれた非常に深い盆地である。かつては駿河湾とつながった入り江であったが、盆地の北にそびえる火山の噴火堆積物や山体崩壊に伴う岩屑流によって埋められ、甲府盆地はかつて湖であったといわれている。さらに、豪雨による洪水、土石流が繰り返し発生し、砂礫が厚く堆積していった。多くの河川は北から南へと、次第に西に流路を変えながら、最終的にはもっとも標高の低い盆地南西部に集まり、富士川となって駿河湾まで流れる。釜無川はかつて甲府盆地の北西から盆地の中央に向かって流れていたが、戦国時代から江戸時代にかけての治水工事によって、盆地西を南北に流れる川となった¹⁾。その他、江戸時代には舞鶴城建設に伴い、河川の流路を変更している。そのため、かつて

の後背湿地上に建造された武家屋敷が、1854年安政東海地震で大破している^{2,4)}。

甲府盆地の表層地盤構造は、河川の流路と氾濫堆積物により、場所ごとに変化に富んでいる。このような地盤構造を有した場所では、3次元的地盤構造の変化によってローカルサイト効果と呼ばれる地震動やひずみの局所的な集中が生じる。一方で、山梨県東海地震被害想定³⁾では、250mメッシュの1次元等価線形化地震応答解析から震度を計算し、震度に基づいた被害想定を行っているため、そのようなローカルサイト効果に伴って過去の地震で盆地内で発生した被害の集中を説明できず、したがって適切な被害想定を行うことも難しい。

本研究は、かつての釜無川の流路や河川氾濫に起因して、複雑な3次元不整形表層地盤構造を有する甲府盆地中心部の被害想定を、3次元非線形地盤震動解析によっ

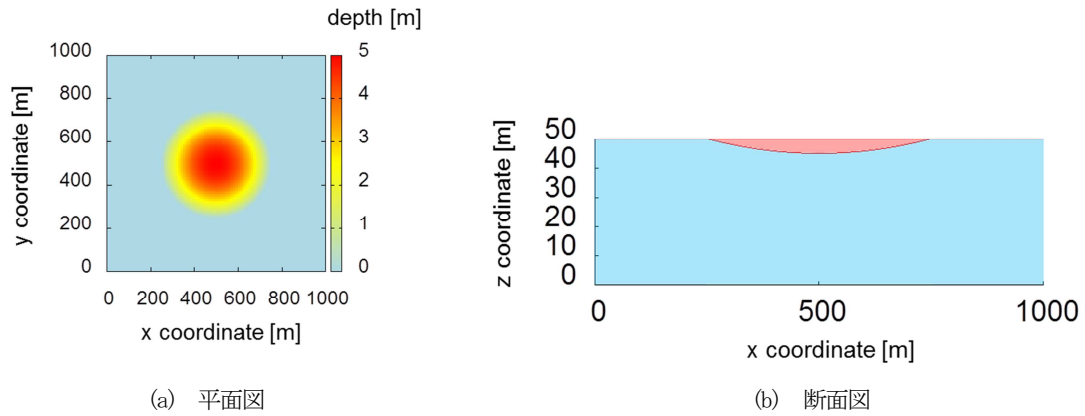


図-1 地盤モデルの3次元形状.

表-1 地盤モデルの物性値.

	V_p m/s	V_s m/s	ρ kg/m ³	h (線形時)	$h_{\max}$ (非線形時)	η
1層：粘性土	560.89	110	1600	0.01	0.26	0.00145
2層：砂質土	1172.77	230	1900	0.01	0.01	∞

て行うことを目指すものである．特に本稿では地盤ひずみの集中に着目し，(1) 甲府盆地の表層地盤と同様な物性値を有する，盆状の軟弱堆積層を理想化した仮想的な地盤モデルの3次元地震応答解析を実施し，表層地盤の不整形性によるひずみ集中のローカルサイト効果を検討する．つぎに，(2)甲府盆地の地盤モデルを対象として非線形3次元地震応答解析を実施し，実地盤における地震時の地盤ひずみを定量的に評価することを目的とする．

2. 既往の研究

これまで，地盤の不整形性に伴う諸現象の発生メカニズムや震動特性に関する研究は数多く行われてきている．いわゆる工学的基盤が盆状の形状をした盆状不整形表層地盤においては，地震動の反射・干渉によって局所的な地震動増幅，ひずみの集中が発生したり，ローカルな表面波の発生によって振幅の比較的大きな長周期の地震動が長時間継続するという継続時間延伸などが生じることが，理論的にも地震観測に基づく実証研究でも明らかにされている．

これらの基盤不整形性に起因する地震動の増幅、継続時間の延伸により甚大な被害が発生した例として 1985 年のメキシコ・ミチョアカン地震が挙げられる．メキシコ市は，火口湖を人工的に埋め立てた盆状の 3 次元不整形表層地盤構造を成し，超軟弱な粘土層が厚く堆積している．このような盆状の基盤不整形表層地盤で，発生した長周期地震動が数分間継続することにより，メキシコシティでは震央から 350km 程度離れていたにもかかわらず，

ならず，多くの中高層建物が倒壊した⁶⁾．

年縄らは甲府盆地を対象として，2 次元地下構造モデルの地震応答解析を行い，甲府盆地の不整形地盤構造特有の震動特性を示した⁷⁾．しかし，年縄が取り扱ったのは， V_s が 1000m/s に達する地震基盤の不整形性に基づいた表面波に関するローカルサイト効果、ならびに 1 次元のサイト効果であり，表層地盤の不整形構造については検討していない．

一方，地下埋設管路や都市トンネルにおいては，工学的基盤の不整形に起因する表層地盤の局所的なひずみの集中に着目した耐震設計が行われている．横浜等の土丹層の溺れ谷に軟弱粘性土が堆積した地盤中の地下構造物は，3 次元不整形表層地盤のモデル化が不可欠であることから，鈴木らは擬似 3 次元地盤モデルを開発し，実務設計に適用した⁸⁾．このモデルはバネ・マス系と平面応力状態の FEM を組み合わせた簡易モデルである．3 次元解析ではなく簡易モデルとしたのは，解析に用いるコンピュータの容量制限があったからである．土岐らは 3 次元不整形地盤のひずみ分布特性や，2 次元と 3 次元解析の違いが周波数応答倍率や応答波形に与える影響を考察している⁹⁾．しかし，これも比較的深い基盤の不整形の問題を取り扱っており，浅い軟弱な表層地盤の 3 次元問題を取り扱っていない．

こうした背景に対し，近年の計算機性能の発達や並列計算技術などの計算科学の発展に伴い，大規模な非線形地盤震動解析を可能とするコードの開発が行われている¹⁰⁾．市村らは， V_s が100m/s 程度の軟弱層を含む表層地盤に対して高精細なメッシュを広い領域で構築し，FEMによる解析を実施している¹¹⁾．本研究においても，こうし

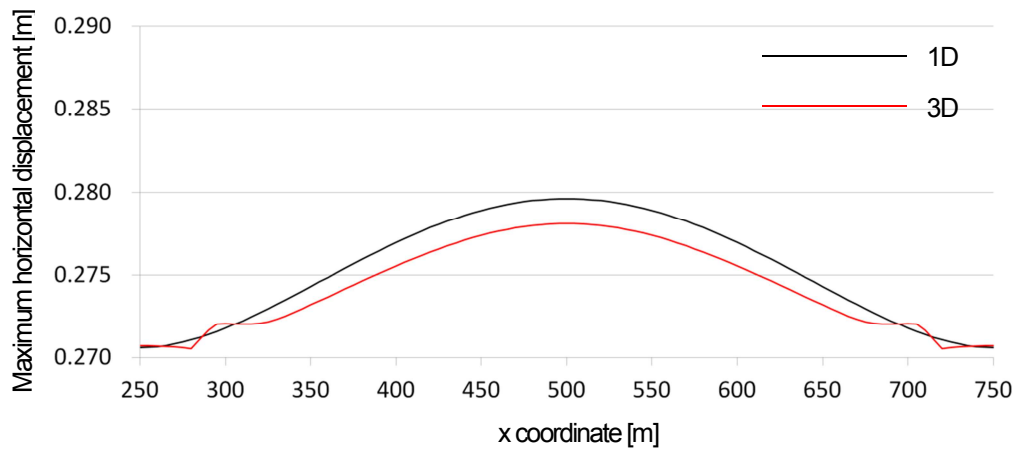


図-2 線形解析における，1次元解析と3次元解析の最大水平変位の比較.

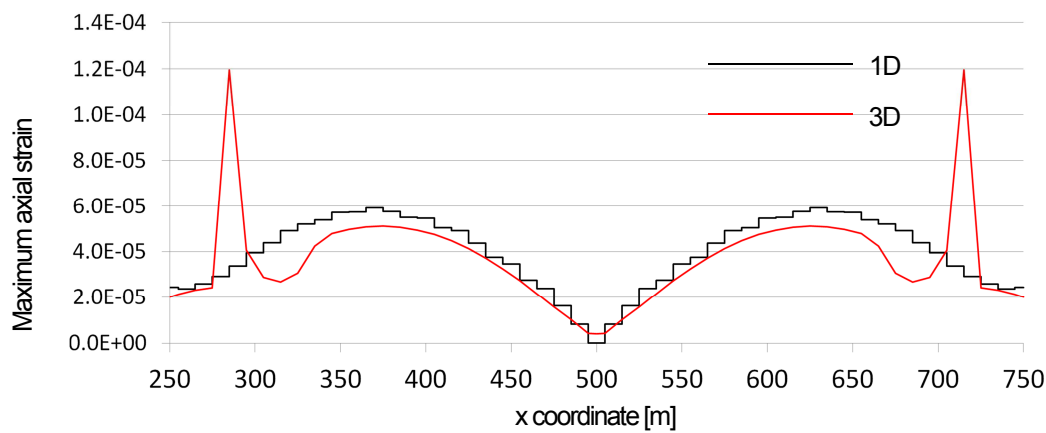


図-3 線形解析における，1次元解析と3次元解析の最大軸ひずみの比較.

た解析コードを利用し，軟弱層を含む地盤の高精細なモデルに対する解析を実施する。

3. 仮想的な地盤モデルに対する解析

(1) 解析モデル

甲府盆地に見られる，軟弱な堆積層の3次元的不整形性に起因する地盤ひずみの集中効果を検討するため，甲府盆地の表層地盤と同様な物性値を有する盆状の軟弱堆積層を理想化した，仮想的な地盤モデルを構築した。構築した解析モデルの形状を図-1に示す。モデル寸法は四方1km，深さ50mであり，中央に最大層厚5mの粘性土が盆状に堆積している2層モデルである。各層の物性値を表-1に整理する。同表には，後述する非線形解析における構成則のパラメタを併せて載せている。このモデルに対し，周波数2.5Hzまでの波長を10節点で表現できるようにメッシュ分割を行い，モデル側面と底面での波動の反射を除去するためにこれらの面に半無限境界条件を適用した。

この地盤モデルに対して，底面から中心周期0.5sのリ

ッカー波をx軸方向に入力し，モデル中心を通る断面における地表面について水平変位を算出し，軸ひずみを求めた。また，3次元的不整形性に起因する震動特性の把握のため，変位の各算出地点における1次元の地盤モデルを作成してFEMによる地盤震動解析を行い，隣り合う2点間の変位から軸ひずみを算出して3次元解析の比較を行うこととした。実際の解析には，並列化に対応した

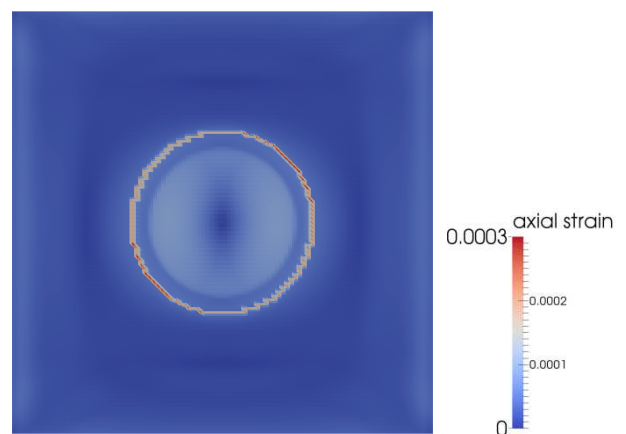


図-4 地盤モデルの最大主ひずみ分布：線形解析.

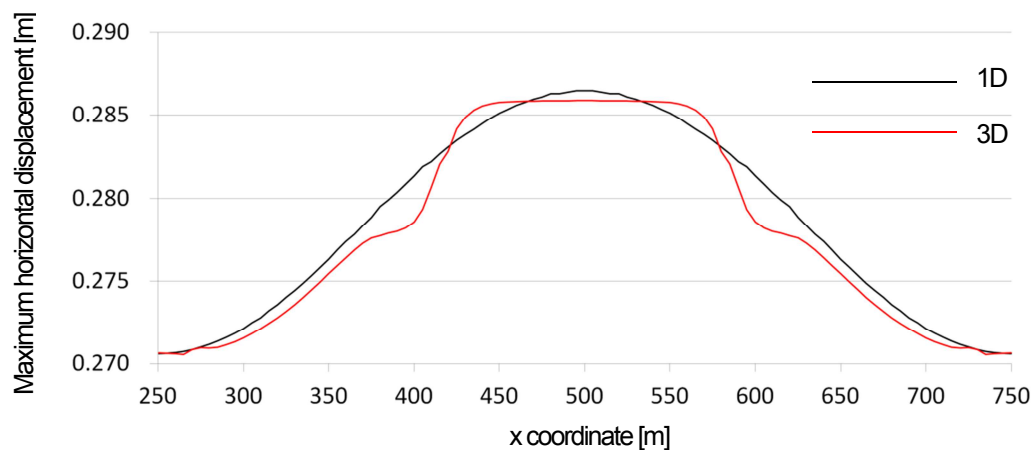


図-5 非線形解析における、1次元解析と3次元解析の最大水平変位の比較。

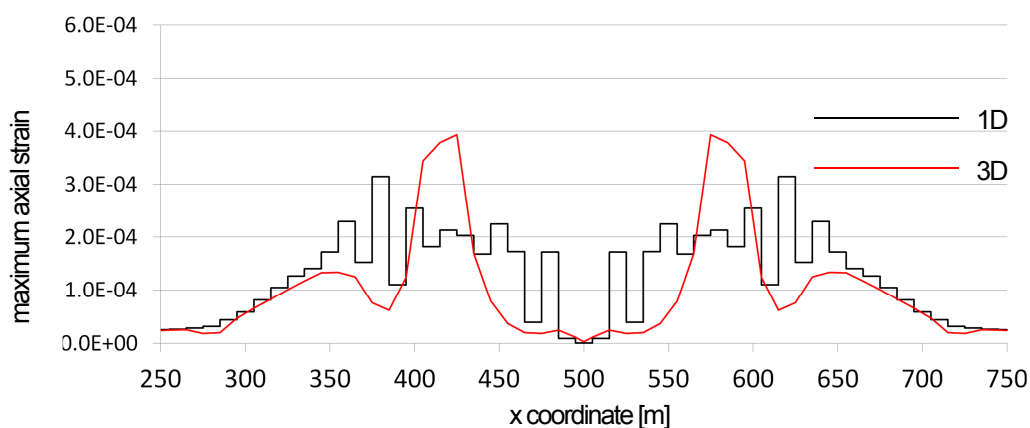


図-6 非線形解析における、1次元解析と3次元解析の最大軸ひずみの比較。

大規模非線形地盤応答解析コードであるGAMERA¹⁰⁾を用いた。

(2) 線形モデルに対する解析

3次元的不整形性に起因する震動特性の把握のため、地盤材料の構成則を線形とした場合の、モデル地盤の解析結果と1次元地盤モデルの解析結果との比較を行った。横軸に地盤モデルのx座標、縦軸に水平変位の最大値をとったグラフを図-2に、縦軸に軸ひずみの最大値をとったグラフを図-3に、地表面における最大主ひずみ分布を図-4に示す。1次元解析と比較したときの3次元解析の水平変位振幅の増幅は顕著なものではない。一方で、盆状の粘性土層端部より30～40m程度内側の地点で比較的大きな軸ひずみが局所的に集中しており、軸ひずみが最大値をとっている地点では同地点の1次元解析の結果の約2倍を越えていることが分かる。また、図-4に示す最大主ひずみ分布からは、堆積層の境界部付近でひずみの集中が帯状に生じていることが分かる。これらのことから、表層厚の違いによる波動の到達時間の遅れや地盤境界面での波動の屈折で地表面の2点間に大きな変位差が発生したことがひずみの集中に影響を与える、盆地端部

効果¹²⁾が軸ひずみ分布に生じているものと考えられる。

(3) 非線形性の影響の検証

次に、地盤の非線形挙動による影響を把握するために、非線形化モデルの解析を行った。せん断剛性の構成則として修正ROモデルとMasing則¹³⁾を適用し、パラメタは表-1に示す値を用いた。また、非線形化により地盤中の波速が遅くなることを考慮し、節点数を増やして線形時に

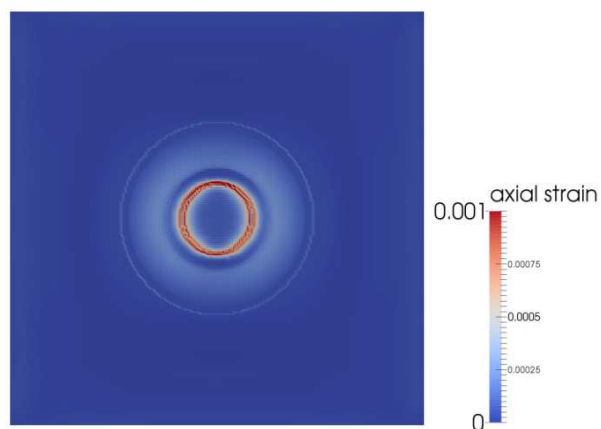


図-7 地盤モデルの最大主ひずみ分布：非線形解析。

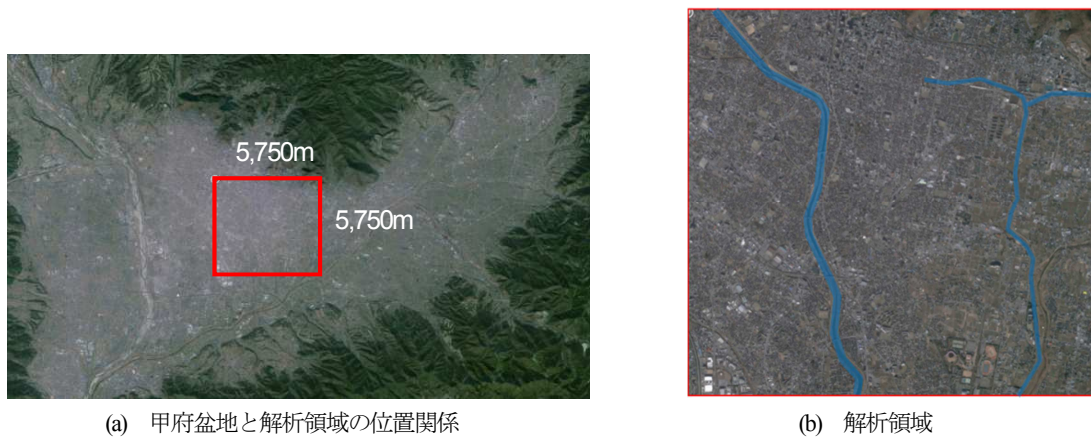


図-8 解析対象領域の航空写真. Google Earth による航空写真 (©2015 Google, ZENRIN) に加筆. (b)における青線は、領域中を流下する河川的位置を示している.

表-2 甲府盆地モデルの物性値.

	V_p m/s	V_s m/s	ρ kg/m ³	h (線形時)	$h_{\max}$ (非線形時)	γ_t
1層: 粘性土	560.89	110	1600	0.01	0.26	0.00145
2層: 砂質土	1172.77	230	1900	0.01	0.20	0.0025
3層: 礫質土	2141.58	420	2000	0.01	0.01	∞

周波数2.5Hzの波の波長を20節点で表現できるようにメッシュを構築した. 線形解析時と同様に, モデル中心を通る断面上の地表面における最大水平変位と最大軸ひずみを評価し, 各評価地点における1次元地盤モデルの非線形FEM解析の結果と比較を行った.

横軸に地盤モデルの x 座標, 縦軸に水平変位の最大値をとったグラフを図-5に, 縦軸に軸ひずみの最大値をとったグラフを図-6に示す. これらの図からは, 線形解析時と同様に水平変位については顕著な増幅が確認できないが, 軸ひずみについては線形時を越える値が生じていることが確認できる. また, 図-7に示す最大主ひずみ分布からは, 帯状に軸ひずみの集中が堆積層の厚い中央部寄りに生じていることが分かる. このように, 地盤の非線形化を考慮した場合, 地盤ひずみは線形時を越える値を示すことに加え, その集中箇所が変化することが分かった.

4. 甲府盆地モデルへの適用

(1) 解析モデル

次に, 実地盤におけるひずみ集中の効果を検証するために, 山梨県甲府盆地の地盤モデルに対する地盤震動解析を実施した.

解析の対象として, 河川の氾濫原であり軟弱な粘性土層が局所的に堆積しており, 甲府市の中心的な市街地でもある 5,750m x 5,750m の領域を図-8のように抽出した.

次に, 抽出した領域に対して, 本研究では工学的基盤以浅の地盤を表-2に整理する物性を有する①粘性土層, ②砂質土層, ③礫質洪積層の3層構造にモデル化し, 山梨県東海地震被害想定調査⁵⁾において作成された表層地盤モデルを基に, 図-9に示す連続的な地盤モデルを構築した. なお, 地盤モデルの構築にあたっては, 側方境界上の各ノードに同一の境界条件を適用するために, 四方に1km ずつの遷移領域を配置し同一の地盤条件へ遷移させている.

上記の解析モデルに対し, 図-10に示す, 工学的基盤面における想定東海地震波形¹⁴⁾を解析領域底部からの入力波として, GAMERAによる地盤震動解析を実施した. なお, 解析では時間間隔0.0025sで24,000ステップの計算を行い, 1コア当たり2.5GHzのクロック周波数, 総コア数432の並列計算環境で87,780s (約24.4時間) を要した.

(2) 解析結果

図-11に, 解析モデル地表面における最大主ひずみの分布を示す. 仮想的な地盤モデルに対する解析結果と同様に, 特に大きなひずみの集中領域が帯状に表れていることが確認できる. また, 図-9(b)との比較から, このひずみの集中帯は粘土層の堆積部に位置することがわかる. このことを確認するために, 図-11中A-A' 断面における, x 軸方向の最大軸ひずみ分布と地盤モデル形状の関係を図-12に示す. 同図からは, 最表層として粘土層が厚く堆積している地点において軸ひずみが特に大きく, 前節

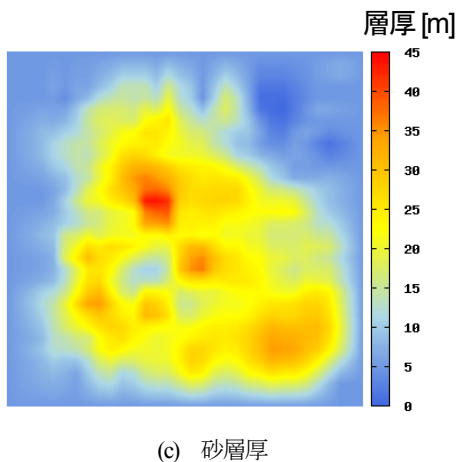
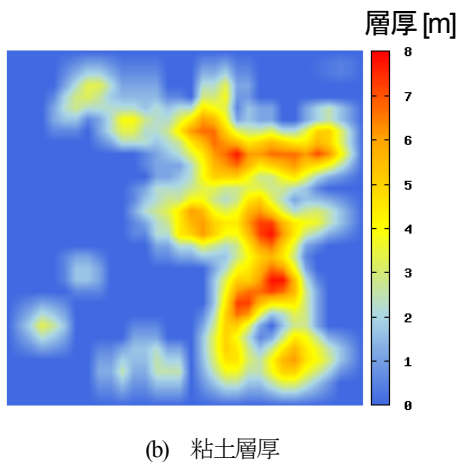
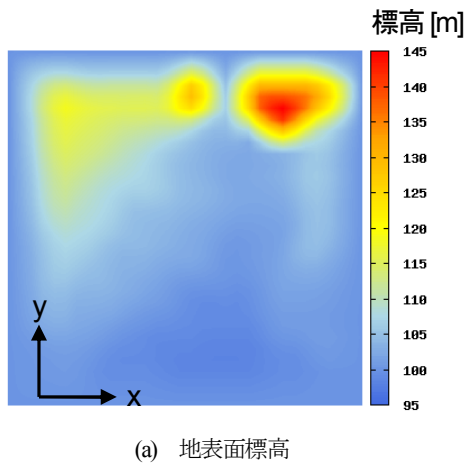


図-9 構築した3次元地盤構造モデル。最下層である礫質洪積層の下端を標高0mとした。

の非線形解析の結果と同様に、ひずみの集中は粘土層の不整形性や非線形挙動に起因しているものと判断できる。また、主ひずみの最大値は 10^3 を越えており、伸縮性の乏しい線状地下構造物の被害が、粘土層の堆積部で集中して発生する可能性が高いことがわかった。

これらの結果より、3次元不整形表層地盤の非線形解析は、大地震時の線状地下構造物の地震被害予測に不可欠であり、地表付近の局所的な沖積層の堆積を表現する高精細な地盤モデルの構築や、モデルに基づく数値地盤

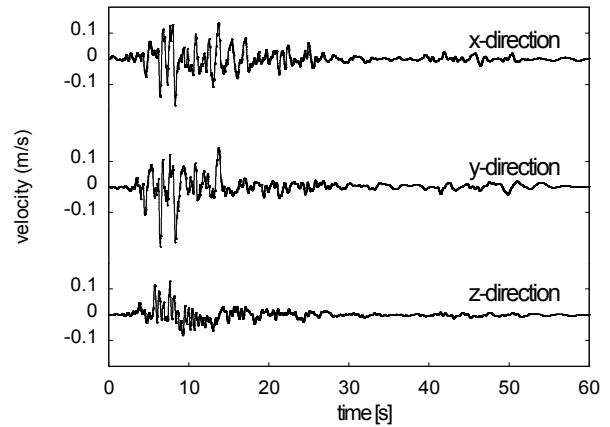


図-10 解析領域底部からの入力波の時刻歴波形。

震動解析が重要であることを示唆している。

5. おわりに

本研究では、地盤表層に不整形に堆積する軟弱層による地震時の地盤ひずみの集中効果を検証することを目的として、仮想的な2層地盤モデルと甲府盆地の実地盤モデルの2種のモデルに対する3次元地盤震動解析を実施した。解析から得られた知見は以下の通りである。

- ・ 2層モデルに対する線形解析から、不整形な軟弱堆積層によっては地表変位は顕著な増幅を示さないものの、ひずみについては堆積層端部付近に帯状の集中領域を生じさせる盆地端部効果が確認できた。
- ・ 2層モデルに対する非線形解析からは、同様に帯状のひずみ集中領域が生じたがその値は線形解析時を大きく越えており、また集中箇所は堆積層端部から堆積層中央部寄りに変化することが分かった。
- ・ 甲府盆地の実地盤モデルに対する非線形解析からは、2層モデルと同様に帯状のひずみ集中領域が軟弱堆

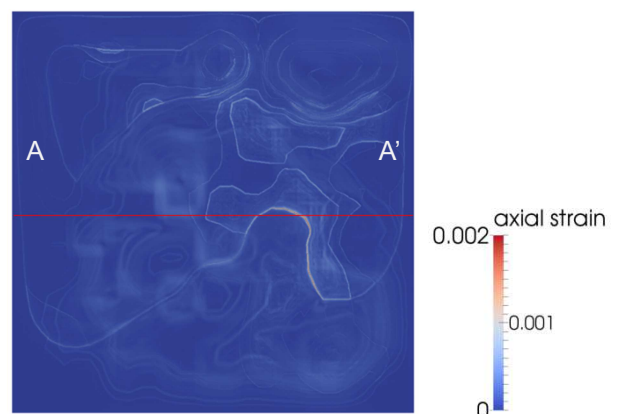


図-11 甲府盆地モデルにおける最大主ひずみ分布。

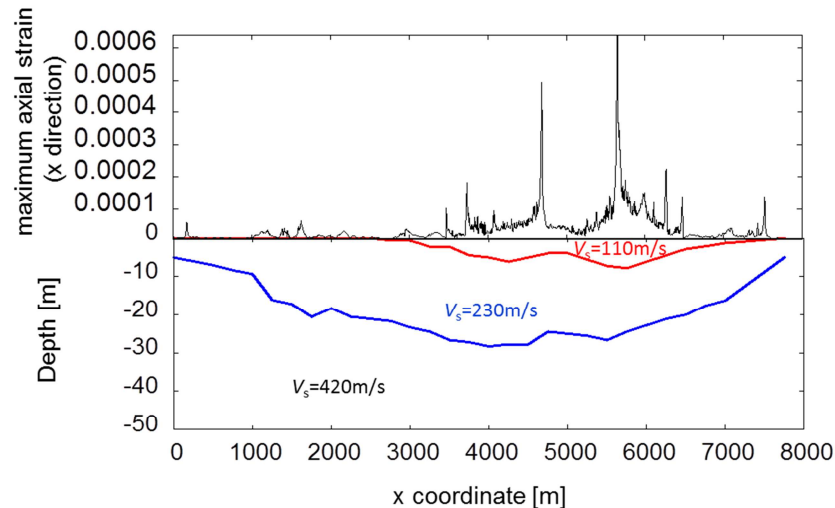


図-12 A-A断面における地盤モデル形状と最大軸ひずみ分布の比較。

積層の厚く堆積する場所に生じることが確認された。

- ・ 主ひずみの最大値は 10^{-3} を越えており、伸縮性の乏しい線状地下構造物の被害が、粘土層の堆積部で集中して発生する可能性が高いことがわかった。

今後は、本稿における地盤ひずみの解析結果や、より高精細なモデルに対する解析から得られる地表地震動の加速度の評価結果から構造物の被害結果の予測を行うなど、本解析を地震被害想定的高度化に結び付けたいと考えている。また、本解析で確認された、非線形化を考慮した地盤モデルにおけるひずみ集中のメカニズムを詳細に分析することも重要と考えられる。

参考文献

- 川崎剛：武田氏研究第 13 号 釜無川の流路変遷について，pp.41-46，1994
- 甲西町：甲西町誌 第二編 第二章 第四節 地震と噴火，pp.82-89
- 八田村：八田村誌 第二編 第二章 第六節 八田村の地盤災害，pp.116-117
- 櫛形町：櫛形町誌 第二節 第二章 第四節 気象災害の歴史，pp.89-91
- 山梨県：山梨県東海地震被害想定調査業務報告書，2005
- 田村重四郎，鈴木猛康，桑原弘昌：1985 年メキシコ地震調査報告書，1986
- 土木学会地震工学委員会ローカルサイトエフェクト小委員会：甲府盆地の地下構造モデルを用いた地震動解析，地震動のローカルサイト エフェクト：実例・理論そして応用，土木学会，2005
- Tamura, C. and Suzuki, T.: A Quasi-three-dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures- Construction of Ground Model -, 生産研究，第 39 巻第 1 号，pp.37-40, 1987.
- 土岐憲三，佐藤忠信，清野純史，福井基史：3 次元不整形地盤の震動特性について，京都大学防災研究所年報 第 35 号 B-2，1992
- Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Seizo Tanaka, Munee Hori, Maddegedara Lalith, Yoshihisa Shizawa, Hiroshi Kobayashi: Physics-based urban earthquake simulation enhanced by $10.7 \text{ BlnDOF} \times 30 \text{ K}$ time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation, *Proceedings of SC '14 Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, pp.15-26, 2014
- Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Munee Hori, Takashi Sakanoue, Ryo Hamanaka: Three-Dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Analysis of Local Site Effects for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines, *J. Pressure Vessel Technol.*, 136(4), Paper No:PVT-13-1131, 2014
- 永野正行，山田有孝：3 次元盆地端部構造の境界近傍における地震動増幅特性，日本建築学会構造系論文集，第 560 号，pp.51-58，2002
- 地盤工学会：地盤の動的解析-基礎理論から応用まで-，地盤工学会，2007
- 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会 <http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/> (2015 年 9 月 11 日閲覧)

ANALYSIS OF STRAIN CONCENTRATION IN ALLUVIUM USING THREE DIMENSIONAL NONLINEAR SESMIC GROUND RESPONSE ANALYSIS

Wataru IRIHARA, Takashi MIYAMOTO, Takeyasu SUZUKI,
Kohei FUJITA and Tsuyoshi ICHIMURA

For earthquake damage estimation in Kofu basin, it is important to evaluate local site effects of ground motion and ground strain in the complex ground structure. In this paper, we concentrate on the amplification of ground strain in surface alluvium. Behavior of an ideal alluvium soil model and realistic ground model in Kofu basin are analyzed to evaluate the local site effects with 3D nonlinear analysis. Results show that concentration of ground axial strain is inneglibile from the viewpoint of safety of underground structures, which implies significance of numerical evaluation of ground behavior.