

地盤定数のばらつきを考慮した 表層地盤の地震応答特性

畠中 仁¹ 室野 剛隆² 棚村 史郎¹

¹正会員 工修 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 工博 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

一般的な地盤の地震応答解析は、確定的に定めた地盤定数を用いて実施されるが、実際の地盤は不均質な材料であり、地盤定数はばらつきを有している事が確認されている。従って地震応答解析の高精度化を目指すのであれば、このばらつきの影響を把握する必要がある。

そこで本論文では、確率論的な地盤場モデルを設定してモンテカルロシミュレーションを行い、地盤の非線形解析に必要なパラメータであるせん断波速度と強度定数のばらつきが地震応答に与える影響について検討した。

Key Words : seismic response, nonlinear analysis, nonhomogeneity, soil property, Monte Carlo simulation

1. はじめに

構造物の耐震性能を評価するためには、地盤の振動性状を精度良く把握する必要がある。このためには解析手法の高精度化と地盤物性を精度良く評価することの2つが重要である。前者については、既往の研究により多くの知見が得られ、実際の設計にも反映されている。後者については、実際の地盤は非常に不均質な材料であり、地盤定数はばらつきを有していることが確認されている¹⁾。しかし、一般的な地盤の地震応答解析は、確定的に定めた地盤定数を用いて実施され、そのばらつきは無視されているのが現状である。地盤定数の不確実性の要因には①本質的に地盤は不均質である、②全ての材料に対して材料定数が求められない、③モデル化の誤差。の3つがある。地盤応答解析の高精度化を目指すのであれば、このようなばらつきの影響がどの程度であるのかを把握しておくことが重要である。本論文では、偶然性不確実性と言われる①と②の要因による地盤定数のばらつきが、表層地盤の地震応答に及ぼす影響について検討を行う。また、既往の研究には、地盤定数のばらつきが地震応答に与える影響について論じた研究も見られるが、そのほとんどが弾性範囲内の研究であり非線形範囲での検討を行った例は少ない。

そこで本論文では、確率論的な地盤場モデルを設定して、モンテカルロシミュレーションによる地盤の非線形

動的解析を実施し、地盤定数のばらつきが地震応答に与える影響について検討した。

2. 検討方法

地盤の非線形解析に必要なパラメータであるせん断波速度 V_s と強度定数(内部摩擦角 ϕ)のばらつきがそれぞれ地震応答に与える影響について検討した。

本検討では、せん断波速度 V_s と強度定数(内部摩擦角 ϕ)をそれぞれ正規分布に従う乱数として扱い、地盤を確率場としてモデル化した。確率地盤場のモデル化については文献を参照されたい^{2) 3)}。この確率地盤場の非線形動的応答解析をモンテカルロシミュレーションにより

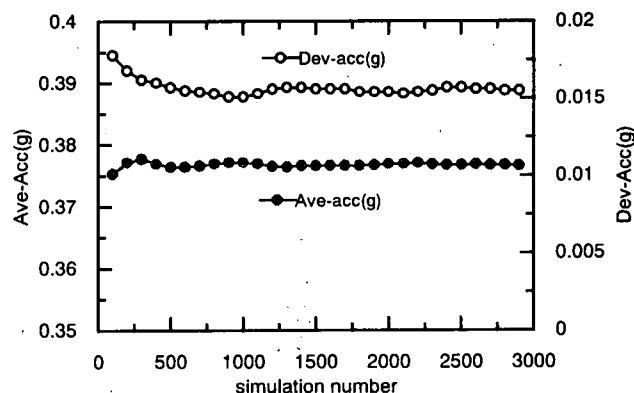


図1 試行回数による応答値の推移

実施する。モンテカルロシミュレーションでは、その試行回数が問題となるが、事前解析により試行回数の妥当性の検証を行った。地表面最大応答加速度の平均と標準偏差の試行回数による推移を図1に示す。試行回数500回以降は、応答加速度の平均、標準偏差ともほぼ一定となることから試行回数を500回と定めた。

解析に用いた土の構成則は、表現が簡便な双曲線モデルとする。入力地震動は、波形を鉄道標準⁹⁾の標準波（スペクトルⅡ・G1）とし、最大加速度については小地震と大地震を想定し、それぞれ最大加速度が100gal、750galとなるように振幅調整した2種類を考慮した。

3. 1層地盤の検討

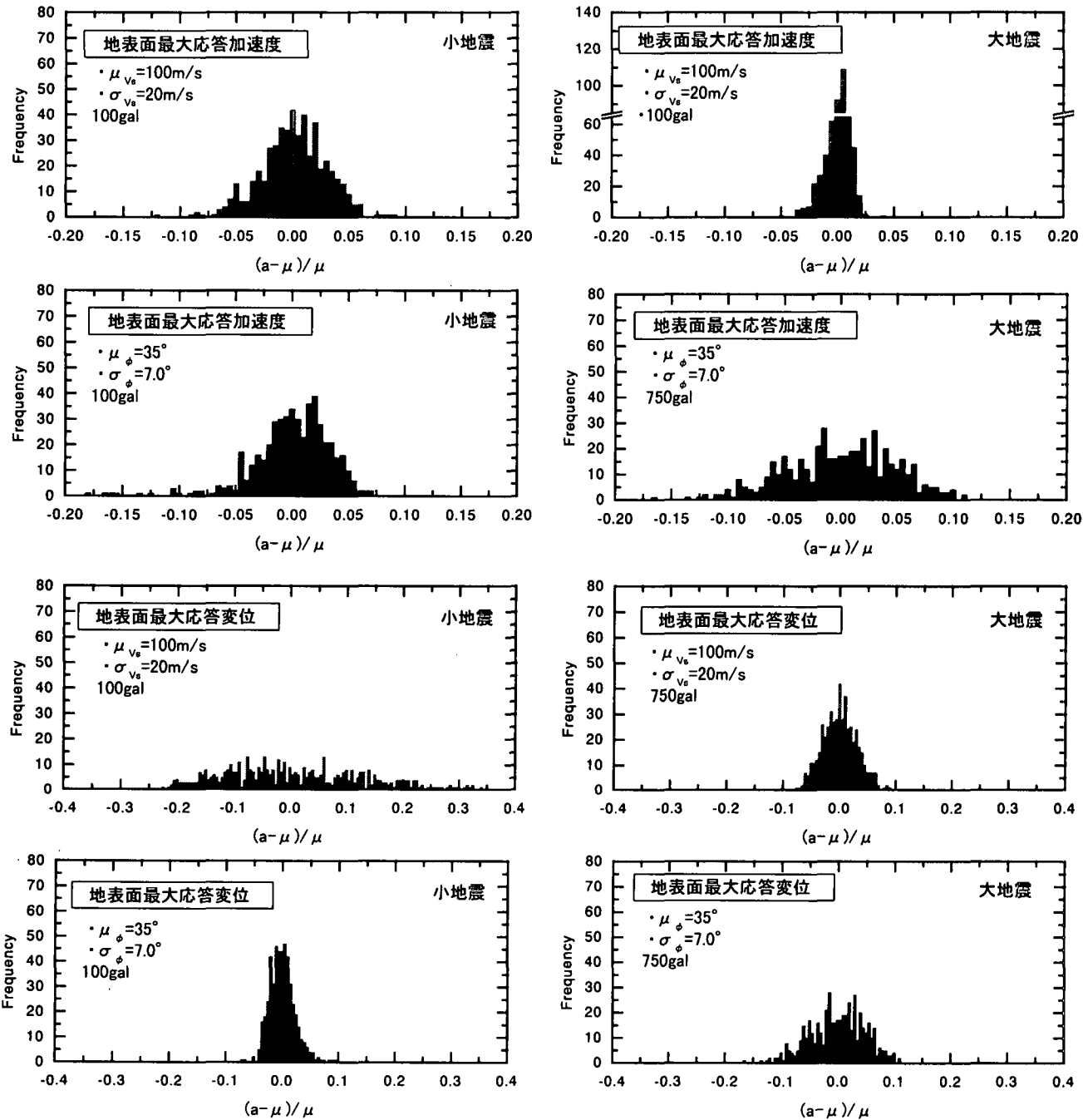


図2 最大応答値の度数分布

(1) 解析ケース

解析対象とした地盤は、平均的特性として $V_s=100\text{m/s}$ 、 $\phi=35^\circ$ 、層厚=20mの1層地盤とした。この1層地盤について、せん断波速度 V_s と内部摩擦角 ϕ のばらつきをそれぞれ表1のように設定した。

表1 1層地盤・解析ケース

	ばらつきの指標		平均的 特性
	平均値	標準 偏差	
V_s のばらつきを考慮	100m/s	20m/s	$V_s=100\text{m/s}$ $\phi=35^\circ$ 層厚=20m
ϕ のばらつきを考慮	35°	7°	

(2) 解析結果

地表面最大応答値の度数分布を図2に示す。上2段は地表面最大応答加速度の度数分布であり、下2段は地表面最大変位の度数分布である。図の横軸は、応答値の平均 μ と応答値 a の差を μ で除すことにより正規化したもので、平均値 μ からの応答値 a の離隔の程度を示している。

せん断波速度 V_s のばらつきを考慮した場合の応答加速度のばらつき(図2・1段目)は、入力レベルの大きさで比較すると、入力レベルが小さいと大きく、入力レベルが大きいと小さい。一方、内部摩擦角 ϕ のばらつきを考慮した場合の応答値のばらつき(図2・2段目)についても、入力レベルの大きさで比較すると、入力レベルが小さいと小さく、入力レベルが大きいと大きくなっており、 V_s のばらつきを考慮した結果と逆の結果となっている。応答変位のばらつきについては特にその傾向が著しい。

入力レベルが小さいときは、せん断ひずみレベルが小さいので、図3上図に示すように土の $\tau \sim \gamma$ 関係(せん断応力 $\sim$ せん断ひずみ関係)の初期剛性部分のばらつきが応答値に影響を与える。つまり、せん断波速度のばらつきが応答値のばらつきに影響を与える。

一方、入力レベルが大きいときは、土の非線形化が顕著に進むので、せん断ひずみレベルは大きくなる。大ひずみ領域では土のせん断応力がせん断強度近くに到達するので、図3下図に示すようにせん断強度のばらつきが応答値に大きな影響を与える。つまり、内部摩擦角のばらつきが応答値のばらつきに影響を与える。

内部摩擦角のばらつきを考慮した入力レベルが大きい

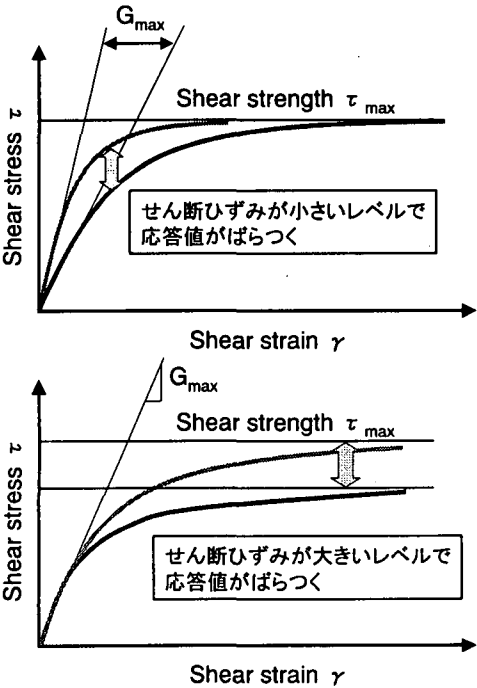


図3 地盤定数にばらつきのある場合の $\tau \sim \gamma$ 関係

ときの応答加速度の度数分布形状(図2・2段右図)は、平均値を中心にほぼ左右対称の形状となっている。内部摩擦係数 ϕ が、正規分布に従う乱数で与えられているため、せん断強度の分布は正規分布に従う。入力レベルが大きいときは、せん断応力 $\approx$ せん断強度であるからせん断応力分布はせん断強度分布に近くなる。よってせん断応力と相関のある加速度分布は正規分布に従い左右対称となる。

一方、せん断波速度のばらつきを考慮した分布形状(図2・1段右図)は、平均値よりも小さい方にやや裾の長い形状となっており平均値を超えると頭打ちの分布になっている。せん断応力がせん断強度に達し加速度が頭打ちになっているためであり、既往の論文にも指摘されている^{3) 5)}。

4. 3層地盤の検討

(1) 解析ケース

地盤定数にばらつきのある層の位置が、地震応答特性に及ぼす影響を把握することを目的として3層地盤の検討を行った。解析方法は前項と同様に、モンテカルロシミュレーションによる地震応答解析を行う。ここで扱う地盤定数は、前項で示したように、入力レベルが大きいときにそのばらつきの影響が大きい強度定数(内部摩擦角 ϕ)とする。入力地震動は最大加速度を750galに振幅調整したものについてののみ検討を行う。せん断波速度は確定値($V_s=100\text{m/s}$)として扱う。

解析ケースを表2に示す。強度定数のばらつきの小さい層(平均 $\mu_\phi=40^\circ$ 、標準偏差 $\sigma_\phi=4^\circ$ 、層厚20m)に、強度定数のばらつきの大きい中間層(平均 $\mu_\phi=40^\circ$ 、標準偏差 $\sigma_\phi=8^\circ$ 、層厚5m)を挿入し、強度定数の平均値は同じだが層位置でそのばらつきの大きさが異なる3層地盤を設定する。解析は中間層の位置をパラメータとして3ケースとした。なお、比較のため1層地盤(中間層がない)でばらつきの異なる2ケースについても解析を行った。

表2 解析ケース

	中間層（層厚 5m）の設定			層全体のばらつきの設定		
	層位置	平均値	標準 偏差	平均値	標準 偏差	層厚
case1	中間層なし			40°	4°	20m
case2	GL-5m ～10m	40°	8°			
case3	GL-10m ～15m					
case4	GL-15m ～20m					
case5	中間層なし				8°	

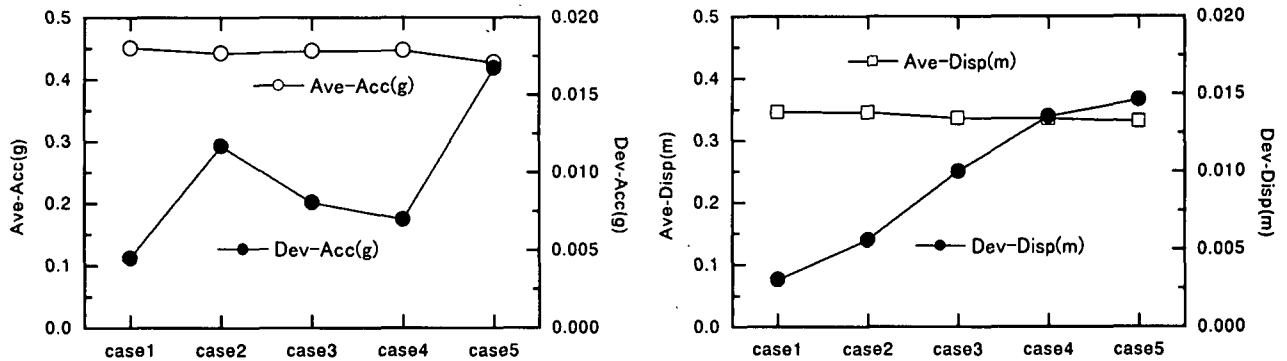


図4 3層地盤 地表面最大応答値の平均と標準偏差

～左：地表面最大加速度，右：地表面最大変位～

(2) 解析結果

図4に、各ケースの地表面最大応答値の平均値と標準偏差を示す。地表面最大応答値の平均値に関しては、応答加速度、応答変位ともにケースによる違いは見られずほぼ一定となっている。今回の解析ケースのように、強度定数のばらつきはあるがその平均値が層全体で一定である場合は、ばらつきの大きい層の位置やそのばらつきの大きさが、地表面最大応答値の平均値に対して大きな影響がないことが分かった。

地表面最大応答加速度の標準偏差は、層全体で ϕ のばらつきが小さいcase1が最も小さく、層全体で ϕ のばらつきが大きいcase5が最も大きい。ばらつきの大きい層が中間にある場合は、その層が地表に近い位置にあるほど応答加速度の標準偏差が大きい。つまり応答加速度のばらつき（標準偏差）に対しては、地表に近い層の強度定数のばらつきが支配的であることが分かった。

地表面最大応答変位の標準偏差も、層全体で ϕ のばらつきが小さいcase1が最も小さく、層全体で ϕ のばらつきが大きいcase5が最も大きい。しかし、ばらつきのある層が中間にある場合は、応答加速度とは傾向が異なり、その層が深い位置にあるほど応答変位の標準偏差が大きい。地表面最大応答変位のばらつきに対しては、深い層の内部摩擦角のばらつきが支配的であることが分かった。

5. 結論と今後の課題

地盤の非線形解析に必要なパラメータであるせん断波速度 V_s と強度定数（内部摩擦角 ϕ ）のばらつきがそれぞれ地震応答に与える影響について検討した。また、強度定数（内部摩擦角 ϕ ）にばらつきのある層の位置が、地震応答特性に及ぼす影響を把握するために、3層地盤の検討を行った。検討の結果、以下のことが明らかになった。

1)地表面最大応答加速度及び応答変位のばらつきに対し

ては、入力レベルが小さい場合はせん断波速度 V_s のばらつきの影響が大きく、入力レベルが大きい場合は強度定数（内部摩擦角 ϕ ）のばらつきの影響が大きい。

2)強度定数の平均値が層全体で一定の場合は、強度定数にばらつきのある層の位置やそのばらつきの大きさに関わらず、地表面最大応答加速度及び応答変位の平均値は一定である。

3)地表面最大応答加速度のばらつきに対しては、地表に近い層の内部摩擦角 ϕ のばらつきの影響が大きい。逆に地表面最大応答変位のばらつきに対しては、深い層の内部摩擦角 ϕ のばらつきの影響が大きい。

今後は、地盤定数のばらつきと応答値のばらつきの関係について定量的に把握するために、今回のような結果の蓄積を行っていく。また、地盤定数のばらつきが構造物の耐震性能を評価する際に用いられる所要降伏震度スペクトル⁹⁾に対する影響について検討し、地盤定数のばらつきが構造物に対して及ぼす影響について把握する。

参考文献

- 1) 増田，森本，山本：地盤震動解析法の高精度化に関する研究－地盤調査・試験について－，第9回地震工学シンポ，pp373-378,1994
- 2) Vanmarcke,E.H.：Probabilistic modeling of soil profiles, *J.Geotechnical Engineering Division*, pp.1227-1246
- 3) 室野，神田，棚村：地盤定数のばらつきが地震応答に与える影響に関する感度分析，第35回地盤工学研究発表会，pp2245-2246,2000
- 4) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物設計標準・同解説 耐震設計,1999
- 5) 末富，澤田，吉田：地震動上限値と地盤のせん断強度の関係に関する一考察，第34回地盤工学研究発表会，pp1963-1964,1999