

モンテカルロシミュレーションによる 地盤物性のばらつきが地震応答に与える影響 に関するケーススタディ

畑 明仁¹・志波 由紀夫²

¹大成建設技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室
(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: hata@ce.taisei.co.jp

²大成建設技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室
(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: shiba@ce.taisei.co.jp

平成19年度に原子力学会において制定された「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準」においては、地盤物性のばらつきに起因する自由地盤応答のばらつきを等価線形解析により評価することが示されている。本検討では、単純な一次元地盤モデルを対象に、地盤の動的物性の基本要素である初期せん断剛性 G_0 、せん断剛性のひずみ依存非線形特性 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係、減衰のひずみ依存特性 $h \sim \gamma$ 関係のそれぞれのばらつきが等価線形解析結果にどのような影響を与えるかを、モンテカルロシミュレーションを用いて数値的に評価した。その結果、 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係が動的応答に与える影響が最も大きく支配的な要素であることが分かった。

Key Words : probabilistic safety assessment, monte carlo simulation, equivalent linear approach, uncertainty, dynamic soil property

1. はじめに

平成19年に原子力学会において制定された「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準」¹⁾においては、地盤物性のばらつきに起因する自由地盤応答のばらつきを等価線形解析²⁾により評価することが示されている。等価線形解析には豊富な実績があり^{3),4),5)}、その適用性等について多くの検討^{5),6),7)}が既に実施されているが、原子力学会標準に示されたようにモンテカルロシミュレーションを用いて直接地盤物性の不確実性を評価した例はいまだ少ない。

地盤は本来的に不均質性を有し、また、地盤内の情報を設計段階で全て入手することは工学的観点からは不可能であり、地盤物性の不確実性を設計手順に取り込むためには、設計計算上重要な因子となる要素を同定し、必要な原位置調査や室内試験データの取得を効率的に行うことが重要となる。従って地盤物性が持つ不確実性の評価においては、原位置における地盤調査技術に関わる研究開発と、実構造物の設計実務を念頭においた主要因子同定の両面から

検討を重ねることが有益と考えられる。

以上の見地から、本稿は、土木構造物の耐震設計において多用されている地震応答解析手法である等価線形解析にモンテカルロシミュレーションを適用し、材料物性のばらつきに起因する自由地盤応答のばらつきを系統的に評価し、応答解析上主要な因子となるパラメータを抽出するものである。

2. 解析条件

等価線形解析の対象としたのは図-1に示すように工学的基盤である岩盤が深度20mに位置する一次元自由地盤モデルとした。層分割および物性は同図に示すとおりである。なお、表層地盤の初期せん断剛性 G_0 は拘束圧依存性を考慮して各層ごとに設定した。

各層の非線形特性 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係は、表-1の値をパラメータとするR-Oモデル相当の関係を用いた。これらの関係を図-2に示す。なお、最下層の岩盤(層18)は線形とした。

入力波形は、内陸直下型地震として兵庫県南部地震の神戸海洋気象台波形(以下、神戸波)および海

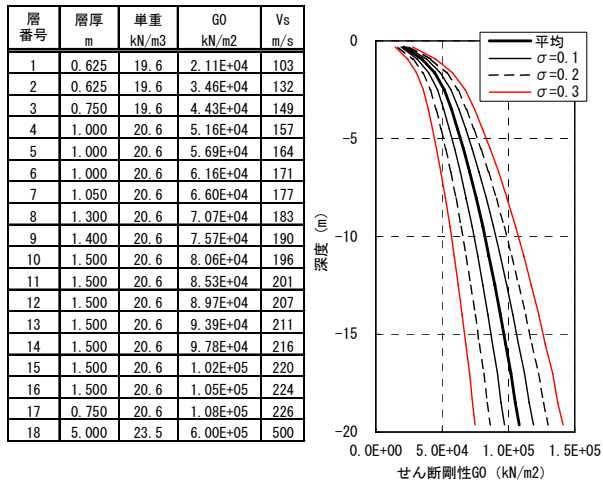


図-1 一次元地盤モデル

表-1 G/G0, hの変動の条件

平均値	R-Oモデル $\gamma = \frac{\tau}{G_0} \left[1 + \alpha \left \frac{\tau}{G_0 \gamma_r} \right ^\beta \right]$ $\alpha=2.1335$ $\beta=2.0932$ $\gamma_r=8.65E-04$
G0の分布	・対数正規分布
G/G0の分布	・基準ひずみにおいて正規分布 ・せん断ひずみ=1および1e-6で標準偏差が0となるように対数軸上で比例配分
hの分布	・基準ひずみにおいて正規分布 ・せん断ひずみ=1e-6で標準偏差が0となるように対数軸上で比例配分

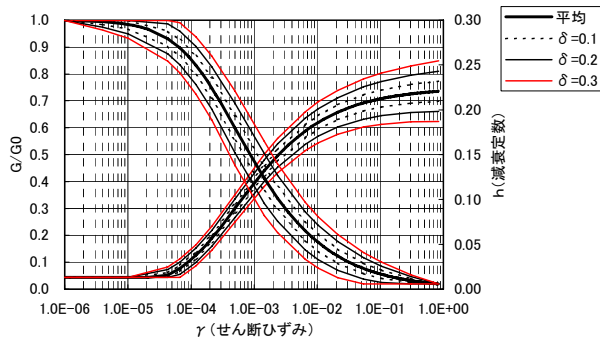
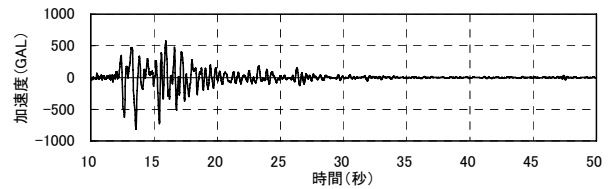


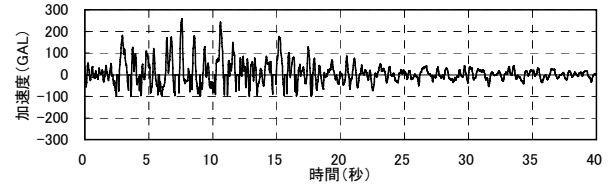
図-2 地盤のG/G0~γおよびh~γ関係

洋型地震として宮城県沖地震の東北大学波形（以下、宮城波）を選定した。それぞれの波形を図-3に、応答スペクトルを図-4に示す。各波形の入力にあたっては、それぞれ最大加速度を300, 600, 900Galに振幅調整し、岩盤層（層18）に上昇波（E波）として入力した。

表層地盤（層1～層17）の物性のばらつきについては、初期せん断剛性G0, G/G0~γ関係, h~γ関係の3因子について検討した。ここで、各層の物性は独立にばらつくものとした。



(a) 神戸海洋気象台波形



(b) 東北大学波形

図-3 入力加速度波形

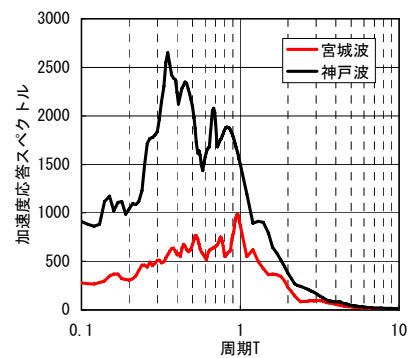


図-4 入力波の加速度応答スペクトル

表-2 計算条件

入力波形	神戸海洋気象台波形, 東北大学波形
入力加速度	最大加速度=300Gal, 600Gal, 900Gal
G0の分布	対数正規分布 (対数標準偏差=0.1, 0.2, 0.3)
G/G0~γの分布	正規分布 (変動係数=0.1, 0.2, 0.3)
h~γの分布	正規分布 (変動係数=0.1, 0.2, 0.3)
非線形モデル	等価線形モデル

表-3 解析ケース

ケース名	変動項目	ケース数
CASE1	G0	変動係数3×波形2×入力加速度3=18
CASE2	G/G0~γ	変動係数3×波形2×入力加速度3=18
CASE3	h~γ	変動係数3×波形2×入力加速度3=18
CASE4	上記全て	変動係数3×波形2×入力加速度3=18
	計	18×4=72ケース

初期せん断剛性G0のばらつきは、初期値G0を中央値とする対数正規分布と仮定し、その対数標準偏差は0.1, 0.2, 0.3の3ケースとした。図-1に、各ケースにおける初期せん断剛性の変動幅（1σ区間）を併記して示す。なお、対数正規分布における対数標準偏差は近似的に変動係数と一致する。

G/G0~γ関係およびh~γ関係については、基準ひずみにおけるG/G0およびhが正規分布するものと

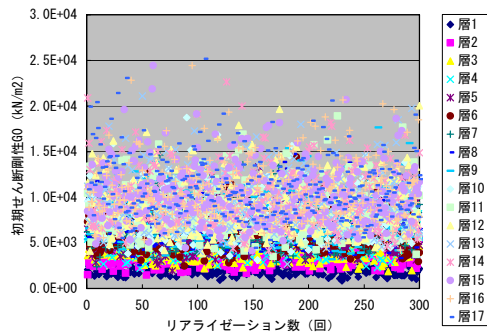


図-5 初期せん断剛性 G_0 のサンプル値

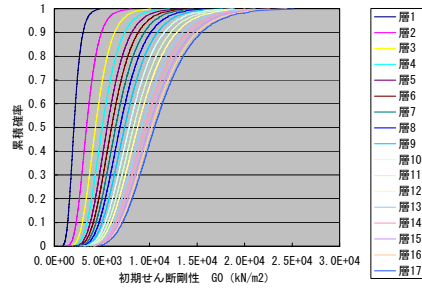


図-6 初期せん断剛性 G_0 の分布 (変動係数 $\delta=0.3$)

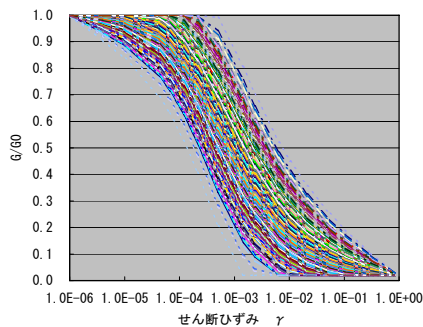


図-7 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係のサンプル曲線 (変動係数 $\delta=0.3$)

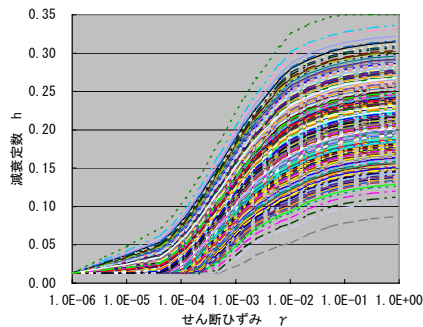
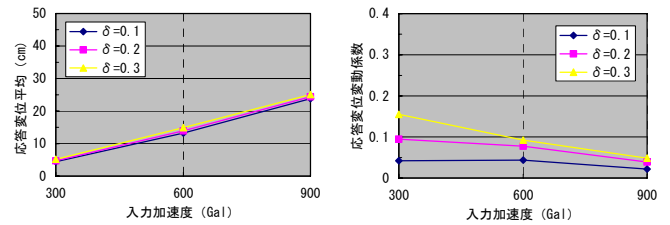


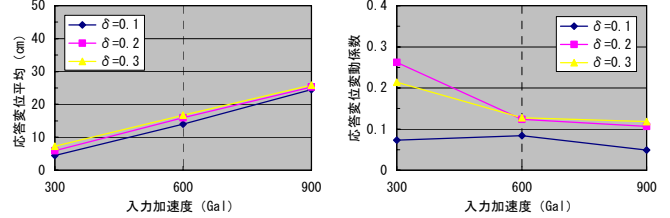
図-8 $h \sim \gamma$ 関係のサンプル曲線 (変動係数 $\delta=0.3$)

し、変動係数 $\delta=0.1, 0.2, 0.3$ の3ケースを設定した。なお、基準ひずみにおける物性の変動量は、地盤のひずみレベルに依存して表-1に示すように変動幅を調整した。図-2には $G/G_0 \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係について、それぞれ変動係数 $\delta=0.1, 0.2, 0.3$ に対応する 1σ 区間も併記して示す。

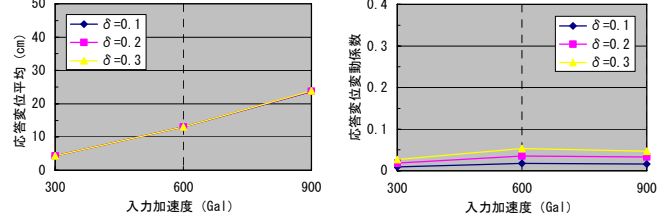
モンテカルロシミュレーションにおいては、ラテンハイパーキューブサンプリング (層分割300) を用いて、各ケースのリアライゼーション数を300と



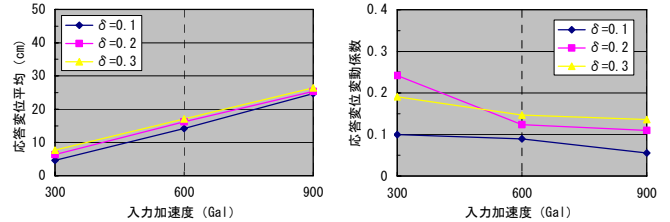
(a) 平均応答および変動係数 (CASE1)



(b) 平均応答および変動係数 (CASE2)



(c) 平均応答および変動係数 (CASE3)



(d) 平均応答および変動係数 (CASE4)

図-9 解析結果

した。また、モンテカルロシミュレーションの解析条件としては、表-2、表-3に示すように、変動項目：4×変動係数：3×入力波形：2×入力加速度レベル：3=72ケースとした。図-5、図-6には、実際の計算で得られた初期せん断剛性 G_0 のサンプル値およびその分布 (変動係数 $\delta=0.3$ の場合)、図-7、図-8には層1における $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係のサンプル曲線 (変動係数 $\delta=0.3$ の場合) を一例として示す。

3. 解析結果

(1) 平均応答と変動係数

図-9には神戸波を入力波とした各解析ケースにおける地表面 (層1上面) の最大応答変位の平均値、変動係数を示す。いずれのケースも平均応答については入力加速度の上昇に対してほぼ比例的に増加している。しかしながら一方で、変動係数については、入力加速度の増加に対してほぼ一定あるいは低下する傾向を示しているとともに、 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係を変動させたCASE2およびCASE4の一部を除くと、その変動係数は入力物性の変動係数よりも小さくなる結果となった。なお、ここで得られた傾向は宮城波を入力した場合についても、また、地表面最大応答加速

度についても同様の結果が得られた。

(2) 応答に影響を与える主要因子

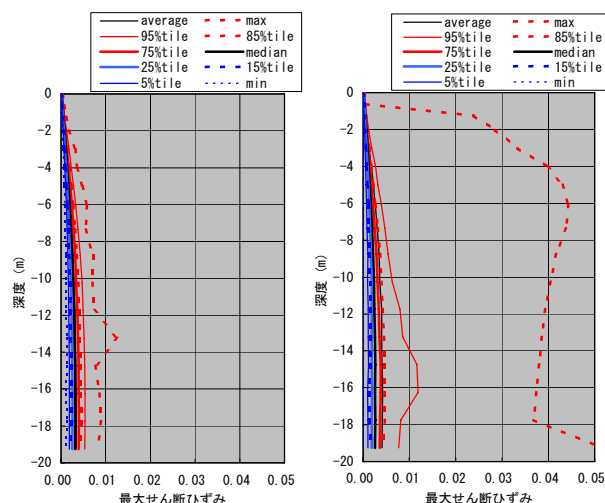
図-9の変動係数に着目すると、 G_0 のみ (CASE1),あるいは $h \sim \gamma$ 関係のみ (CASE3)を変動させた場合に比べ、 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係を変動させた場合 (CASE2)に応答に与える影響が特に大きいことが分かる。全ての因子を変動させたCASE4においては、その傾向は $G/G_0 \sim \gamma$ 関係を変動させた場合 (CASE2)に類似しており、CASE4における応答の変動は、主に $G/G_0 \sim \gamma$ 関係の変動が支配していると考えられる。なお、ここで得られた傾向は宮城波を入力した場合についても、また、地表面最大応答加速度についても同様の結果が得られた。

(3) 最大せん断ひずみ

図-10には最大せん断ひずみの深度分布の統計量を示す。ここでは、特に変動係数の傾向に大きな差異が生じたCASE1とCASE2の神戸波300Gal入力、変動係数 $\delta=0.2$ の結果を示している。ここに示すとおり、CASE2においてはリアライゼーションの中で極めて大きな応答を示すものがあり、特に最大値ではそのせん断ひずみは5%に達し、その結果、中央値と平均値の乖離が大きくなっている。こうした極大値が解のばらつきを増大させ、比較的小さな平均値に対して大きな変動係数が得られる要因となったと考えられる。

4. まとめ

単純な一次元地盤モデルを対象として、耐震設計の実務で実績のある等価線形解析法にモンテカルロシミュレーションを適用することにより、地盤物性のばらつきが地表面応答特性に与える影響を数値的に評価した。地盤の動的物性のうち、初期せん断剛性 G_0 、ひずみ依存特性 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を変動させ、最大応答値のばらつきを評価した結果、平均応答は入力加速度に比例して増加するものの、応答値のばらつきは必ずしも増大しない結果を得た。また、応答のばらつきに最も影響を与える因子は地盤のひずみ依存非線形特性 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係であることが認められた。



(a) CASE1

(b) CASE2

図-10 最大せん断ひずみ分布の比較
(神戸波300Gal入力、変動係数 $\delta=0.2$)

参考文献

- 1) 日本原子力学会：原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2007, 2007.9
- 2) Schnabel, B., Lysmer, J. and Seed, B.: SHAKE A COMPUTER PROGRAM FOR EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF HORIZONTALLY LAYERED SITES, EERC Report, No.EERC72-12, 1972.12
- 3) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全照査マニュアル, 1992.9
- 4) 土木学会：動的解析と耐震設計, [第2巻] 動的解析の方法, 技報堂出版, 1989.7
- 5) 吉田望：実用プログラムSHAKEの適用性, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.14-31, 1994
- 6) 吉田望, 澤田純男, 中村晋：地盤の地震応答解析の精度に対する手法の影響, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.763-768, 2002
- 7) 谷本俊輔, 杉田秀樹, 高橋章浩：液状化地盤に対する等価線形解析の適用性に関する検討, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.490-493, 2006

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF UNCERTAINTY OF DYNAMIC SOIL PROPERTIES WITH EQUIVALENT LINEAR APPROACH

Akihito HATA, Yukio SHIBA

This paper presents a fundamental study on the effect of uncertainty of dynamic soil properties with equivalent linear approach, which is still one of the most popular and practical technique adopted in aseismic design in civil engineering arena. With the aid of Monte-Carlo simulation technique, dynamic response of a simple one-dimensional soil layer model, of which uncertainty of initial shear modulus G_0 , nonlinear strain dependency $G/G_0 \sim \gamma$ and $h \sim \gamma$ are considered, is directly calculated. Through a series of simulation, it is demonstrated that although average response of ground surface increases as input acceleration increases, the coefficient of variance doesn't necessarily increase, and that $G/G_0 \sim \gamma$ relationship is the most important factor among the concerned parameters.