

地盤物性の相関構造が地中構造物の地震応答に与える影響に関する数値的検討

畑 明仁¹・坂下 克之²・志波 由紀夫³・清野 純史⁴

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: hata@ce.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: katsuyuki.sakashita@sakura.taisei.co.jp

³フェロー会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: shiba@ce.taisei.co.jp

⁴正会員 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター)
E-mail: kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp

地盤および地中構造物の地震時応答の不確実性を考慮する場合、地盤物性の空間的ばらつきは重要な要素の一つである。地盤物性の空間的ばらつきについては、そのモデル化の手法は多数提案されているが、そのばらつきが地震時応答に与える影響については必ずしも十分な整理がなされていない。本論では、地中RCボックスカルバート埋設地盤を対象に、異なる自己相関構造を持つ地盤モデルに対して地震応答解析のモンテカルロシミュレーションを行い、地盤物性の相関構造と応答の関係を、最大応答値の分散の観点から検討した。その結果、線形モデルにおいては最大応答値の分散が局所平均距離と相関距離の比の増大に伴い減少するものの、非線形モデルにおいては対象とする応答値毎に分散を極大化する局所平均距離と相関距離の比があることを確認した。

Key Words : variance function, spatial variation, correlation length, local average length, Monte-Carlo simulation

1. はじめに

各種設計基準への性能設計の導入が進み、設計照査過程において、設計条件が保有する種々の不確実性を明示的に考慮する必要性が高まっている。しかし一方で構造物の設計・照査のプロセスとしてその手法を具体化するためには、いまだ未整理の論点も多く、その実現・普及は必ずしも容易ではない。性能設計の高度化のためには、個別の現象毎に不確実性が与える影響について理解を深め、個々の特性に応じた具体的な設計手法開発につなげることが重要である。

筆者らはこれまでに、地盤物性のばらつきが地盤の地震時応答に与える影響についていくつかの数値的検討を行ってきた¹⁾²⁾³⁾。その中で地盤物性の空間的ばらつきが地盤の応答に影響を与えることを確認しているが、その空間的ばらつきの形態と地震時応答のばらつきの関係については十分な整理には至っていない。本論は地盤物性の空間的ばらつきをその自己相関構造の観点から整理し、

地盤物性の自己相関構造の変化が地震時の応答のばらつきに与える影響を数値的に検討したものである。

地盤物性のばらつきの取り扱いについては、これまでも多くの研究がなされており、膨大な蓄積がある。そこでの主要な論点は、統計論に基づく観測データからの地盤物性の推定と、確率論に基づく地盤の推定物性のモデル化である。地盤の推定物性を確率論により取り扱う際には、確率場の理論に基づくモデル化が一般的である。

地盤物性の確率場のモデル化についてVanmarckeは、地盤物性を確率場でモデル化する際に工学的対象となる物理量は一般に空間積分値であることに留意することが重要であることを提唱した⁴⁾⁵⁾。例えば、構造物の設計に用いられる剛性は、地盤にせよコンクリートにせよ、それらを構成する個々の微粒子の剛性を直接扱うのではなく、複数種の粒子が混在したある領域における平均剛性をもって設計用の剛性として用いる。また、設計の照査対象となる応答値であっても、工学的対象となるのは着目する現象に対応したあるスケールでの積分値である。

例えば、地盤のすべり破壊であれば、対象となるすべり面に生じるせん断応力の線積分値がすべり面全体の破壊を規定するであろうし、コンクリートはりのせん断破壊であれば、コンクリートの圧縮耐力と鉄筋の引張耐力がバランスして構成されるトラスの全体的な支持力をもってせん断耐力と称される。このように工学的に取り扱われる物理量は、対象となる現象に応じたスケールおよび構造を考慮した空間的積分値として取り扱われる。

Vanmarckeはこのことを明示的に取り扱い、確率場の局所平均量を軸に理論の定式化を図った。その基本になる事項が分散関数である。これは、確率場の局所平均値からなる移動平均場では、平均化の対象となる区間サイズ、すなわち局所平均距離の大きさによって物性場のばらつき、すなわち分散が低減することに着目し、その傾向を関数として表現したものである。

最近、本城ら^{9,7)}はVanmarckeの分散関数を設計に積極的に利用するアプローチを提案している。本城らは、設計に必要とされる地盤物性が局所平均量であることを前提にその統計的推定誤差を評価する理論を定式化し、それを応答値評価に援用することを目的に基礎構造物を対象とした具体的な検証を行っている。そこでは、異なる自己相関距離を持つ地盤物性場に対して、基礎構造物の沈下量や支持力のばらつきを数値的に検討し、その物理現象に対応した適切な局所平均距離を選択することによりVanmarckeの分散関数で概ね分散評価ができるとしている。こうした取り組みは、地盤の相関構造が規定された場合、設計対象となる応答値のばらつきを簡易に評価することを可能とするもので工学的に意義深い。

本論は、こうした分散関数による応答評価の適用性を、地盤および地中構造物の動的問題を対象に数値的に検討するものである。次章ではVanmarckeが示した局所平均と分散関数を簡単にレビューし、続いて3章で検討の方針を示す。次に、4、5章において、その結果を順に示す。また、6章において最後にまとめを示す。

2. 確率過程の局所平均と分散関数

(1) Vanmarckeの分散関数

ある確率過程 $u(z)$ に対して、その局所平均過程は以下のように表される。

$$u_L(z) = \frac{1}{L} \int_{z-L/2}^{z+L/2} u(z) dz \quad (1)$$

ここに、 L は局所平均距離である。 $u_L(z)$ はもともとの確率過程 $u(z)$ の移動平均過程となっている。

このとき、確率過程 $u(z)$ の平均と、移動平均過程 $u_L(z)$ の平均はともに一致する。

$$\overline{u_L} = \overline{u} \quad (2)$$

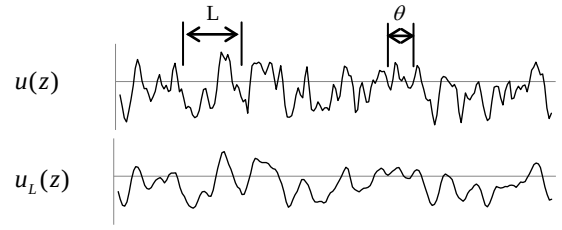


図-1 確率場とその移動平均場

一方で、それぞれの分散は、移動平均過程においては、もともとの過程の微小区間における変動が平均化されるため、その分散をとると局所平均距離の増加にともなって低減することが知られている。Vanmarckeはこの分散の低減率を、以下に示す分散関数として定義した。

$$\gamma_u(L) = \frac{\text{Var}[u_L]}{\text{Var}[u]} \quad (3)$$

分散関数は代表的な自己相関関数を持つ確率過程に対して解析的に表現することが可能であり、Vanmarckeはいくつかの例を提示している。例えば、自己相関関数がGauss型をとる場合の分散関数を下記のように求めている。

(1次元)

$$\rho(\tau) = \exp\left[-\left(\frac{\tau}{\theta}\right)^2\right] \quad (4)$$

$$\gamma\left(\frac{L}{\theta}\right) = \left(\frac{\theta}{L}\right)^2 \left[\sqrt{\pi} \frac{L}{\theta} \text{erf}\left(\frac{L}{\theta}\right) + \exp\left[-\left(\frac{L}{\theta}\right)^2\right] - 1 \right] \quad (5)$$

ただし、 ρ : 自己相関関数、 θ : 相関距離、 γ : 分散関数、 erf : 誤差関数、 L : 局所平均距離である。

本式を2次元に拡張する場合、自己相関関数および分散関数は各方向の積として以下のように表される。

(2次元)

$$\rho(\tau) = \exp\left\{-\left(\frac{\tau_x}{\theta_x}\right)^2 + \left(\frac{\tau_y}{\theta_y}\right)^2\right\} \quad (6)$$

$$\gamma_{xy}\left(\frac{L_x}{\theta_x}, \frac{L_y}{\theta_y}\right) = \gamma_x\left(\frac{L_x}{\theta_x}\right) \cdot \gamma_y\left(\frac{L_y}{\theta_y}\right) \quad (7)$$

ただし、

$$\gamma_i\left(\frac{L_i}{\theta_i}\right) = \left(\frac{\theta_i}{L_i}\right)^2 \left[\sqrt{\pi} \frac{L_i}{\theta_i} \text{erf}\left(\frac{L_i}{\theta_i}\right) + \exp\left[-\left(\frac{L_i}{\theta_i}\right)^2\right] - 1 \right] \quad (8)$$

である。図-2に(5)式の分散関数を示す。分散関数は、もともと局所平均距離の増加と分散の低減傾向の関係を示したものであるが、式(5)を見ると、分散関数は実質的には L/θ 、すなわち、局所平均距離を相関距離で正規化した量の関数として規定されている。このことは確率場の変動を考慮する場合、対象となる構造スケールに応

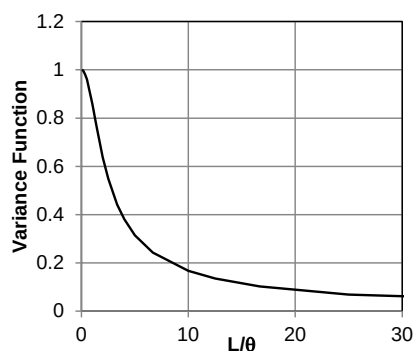


図-2 分散関数

じて相関距離の影響が変わることを示しており重要である。

本論では以降、上記Gauss型の自己相関関数を持つ物性場に対して、その動的応答最大値のばらつきがどのように変動するかについて検討および考察を行う。

(2) 応答場の分散関数

本論の目的は、物性場がある自己相関構造に従って空間的に変動した場合、その系の地震時応答のばらつきがどのように変化するかを確認しようとするものである。すなわち、物性場の局所平均値の分散が、局所平均距離の増大に従って低減するとき、地震時応答の分散にどの程度の低減を期待できるのかを確認する。

Vanmarckeらは、単純なせん断はりを対象に基礎的な考察を行い、空間的に変動する剛性を持つせん断はりの静的荷重に対する応答変位は、剛性の自己相関構造により大きく影響を受けることを示している⁹⁾。

一方、大竹ら⁷⁾は、こうしたVanmarckeの分散関数の基礎の沈下および支持力の信頼性評価への応用を試みている。彼らの具体的な適用事例では、基礎構造物を対象として検討を行い、その沈下量および支持力の分散低減特性は、それぞれの地盤内応力状態を考慮して適切に設定した局所平均距離を用いることにより、その応答値の分散低減をVanmarckeの分散関数で評価できるとしている。これは基礎の沈下量や支持力は、それぞれ地盤内ひずみや地盤内応力のある領域における積分値として表現されることを明確に意識し、Vanmarckeの分散関数を応答場の評価に応用しようとするものと言える。

本論は、上記と同趣旨の検討を、地盤および地中構造物の地震時応答評価に対して行う。耐震設計で対象となる動的応答では、地盤および構造物は入力地震動に対し過渡応答し、ひずみ場、応力場は時々刻々変化する。最大応答値は入力地震動に対する時々刻々の応答の重畳積分の結果として現れるとともに、応答モードには低次から高次まで様々な成分が含まれる。仮に地盤と構造物の非線形性を考慮した場合、その剛性低下状況により系の応答特性も時々刻々と変化するためより一層複雑となる。しかしながら一方で地中構造物の横断面方向のせん断変

形を考慮した場合、その構造物の変形は地盤のせん断変形に支配され、地盤のせん断変形は1次モードが卓越することから、単純な分散低減傾向が見られることが期待できる。以上の観点を鑑み、本論ではVanmarckeの分散関数の適用性を検討する。

3. 検討の方針

(1) 検討の方針

検討の対象を地中RCボックスカルバートの横断方向の地震時応答とし、空間的相関構造の異なる地盤モデルに対しモンテカルロシミュレーションを実施して、その最大応答値のばらつきを検討する。

図-3に検討の手順を示す。まず地盤の応答特性を確認する目的で、(1) 線形自由地盤を対象とした検討を行う。ここでは地盤の地震時せん断変形に大きな影響を与えると考えられる地盤物性の鉛直方向の相関構造に着目する。また、線形地盤の検討結果をもとに対象となる応答ごとに局所平均距離を設定する。次に、(2) 非線形自由地盤を対象とした検討を行い、非線形性の影響を確認する。次に、(1)、(2)で考慮しなかった水平方向の相関構造が動的応答に与える影響を(3)、(4)にて確認する。最後に(5)、(6)において地中構造物埋設地盤の解析を行い、地中構造物の応答に対する分散関数の適用性の検討を行う。対象となる局所平均距離の設定については前の検討と同様に線形地盤を対象とした解析結果をもとに行い、非線形地盤を対象とした解析から非線形性の影響を把握する。

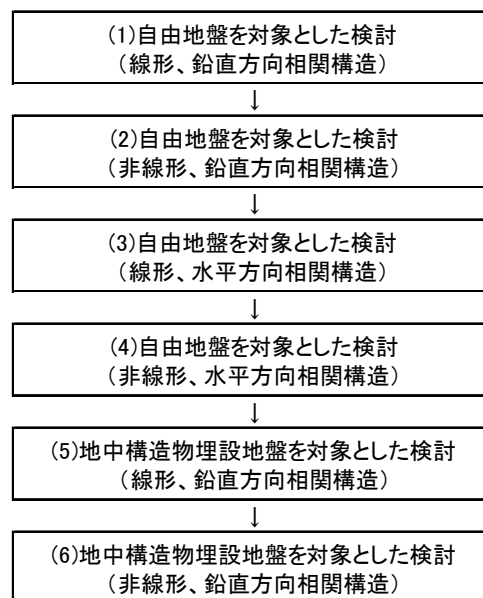


図-3 検討の手順

表-1 解析条件（自由地盤モデル，鉛直方向相関構造影響検討）

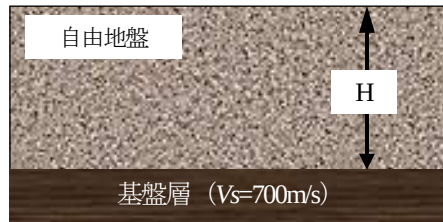
分類	Case名	表層厚H (m)	モデル幅B (m)	初期剛性相関距離(m)		平均Vs (m/sec)	入力レベル (m/sec ²)	備考
				鉛直 θ_y	水平 θ_x			
線形	A1	15	1	1,2,4,8, ∞	∞	100,200,300,400	10	Vsの影響確認確認
	A2	30,60	1	1,2,4,8, ∞	∞	300	10	表層厚の影響確認
非線形	A3	15	1	1,2,4,8, ∞	∞	300	1,5,10	非線形性影響確認
	A4	30	1	1,2,4,8, ∞	∞	300	15	表層厚の影響確認

表-2 解析条件（自由地盤モデル，水平方向相関構造影響検討）

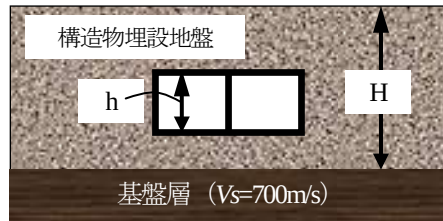
分類	Case名	表層厚H (m)	モデル幅B (m)	初期剛性相関距離(m)		平均Vs (m/sec)	入力レベル (m/sec ²)	備考
				鉛直 θ_y	水平 θ_x			
線形	B1	15,30	30,60	∞	1,4,8,15, ∞	200,300	10	水平方向相関構造影響確認
	B2	15	60	$(\theta_x, \theta_y)=(1,1),(1,8),(15,1),(15,8)$		300	10	鉛直・水平方向同時影響確認
非線形	B3	15	60	∞	1,4,8,15, ∞	300	10	鉛直・水平方向同時影響確認
	B4	15	60	$(\theta_x, \theta_y)=(1,1),(1,8),(15,1),(15,8)$		300	10	鉛直・水平方向同時影響確認

表-3 解析条件（構造物埋設地盤モデル，鉛直方向相関構造影響検討）

分類	Case名	表層厚 (m)	モデル幅 (m)	構造物緒元		初期剛性相関距離(m)		平均Vs (m/sec)	入力レベル (m/sec ²)	備考
				高さ(m)	位置(m)	鉛直	水平			
線形	C1	30	60	4,6,8	中央	1,2,4,8, ∞	∞	300	10	構造物高さ影響確認
非線形	C2	30	60	4,6,8	中央	2,4,8, ∞	∞	300	15	構造物高さ影響確認
	C3	30	60	4	地表，基盤面	2,4,8, ∞	∞	300	15	構造物位置影響確認
	C4	30	60	4	中央	2,4,8, ∞	∞	300	15	入力波影響確認



(a) 自由地盤モデル



(b) 構造物埋設地盤モデル

図-4 検討対象地盤と構造物

(2) 解析モデル

前項の方針に従い，各種の条件で一連のモンテカルロシミュレーションを実施した．解析条件を表-1～表-3に，対象としたモデルのイメージを図-4に示す．また，構造物の緒元を表-4に示す．

CaseA1においては，表層厚H=15mの自由地盤を対象に，地盤の剛性をVs=100～400m/sに変動させて種々の地盤剛性に対して最大応答値のばらつきの傾向を確認した．その後，CaseA2においてVs=300m/sの地盤に対し地盤の表層厚を30，60mと変化させ，表層厚の変化に伴う特性の変化を検討した．次に，CaseA3，A4において，Vs=300m/s，表層厚15mおよび30mの非線形地盤に対して同様の検討を実施し非線形性の影響を検討した．

CaseB1～CaseB4においては，自由地盤を対象に，表層厚，モデル幅，Vsを変動させて，水平方向の相関構造の影響を確認した．CaseB1，B3においては水平方向の物性値変動を考慮し，CaseB2，B4においては鉛直方向，水平方向の両者を変動させた場合について検討を行った．

CaseC1～C4においては，構造物埋設地盤を対象とした検討を行った．ここでは，構造物の高さや埋設深さの影響も検討する目的から，構造物位置や高さの自由度を持たせるため表層厚は30mを基本とした．なお，地盤物性の相関構造については，後述するようにCaseBの結果では水平方向の物性変動は地中構造物の横断面の地震時応答に与える影響が小さかったため，CaseCの検討では地盤物性の鉛直方向の変動に着目した検討とした．

図-5に構造物埋設地盤モデルのメッシュ図の1例（表層厚H=30m，モデル幅B=60m）を示す．高さ方向および構造物周辺の水平方向は0.5m間隔で分割している．なお，

表-4 構造物緒元

構造：RCボックスカルバート（2box）		
断面	厚さ	60cm
主鉄筋	径	D19
	ピッチ	150mm
材料		
コンクリート	圧縮強度	33.6 N/mm ²
	引張強度	0 N/mm ²
	ポアソン比	0.2
	単位重量	23.0 kN/m ³
鉄筋	降伏強度	379.5 N/mm ²
	ヤング係数	200.0 kN/mm ²
	ポアソン比	0.3
	単位重量	77.0 kN/m ³

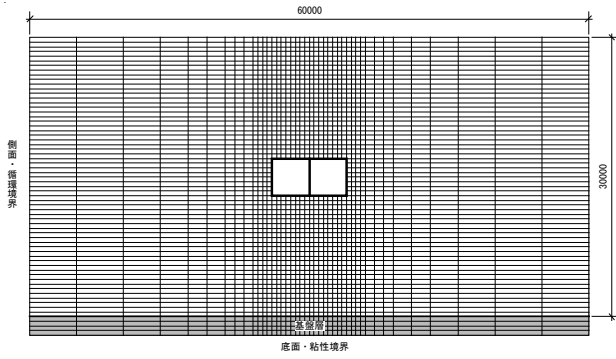
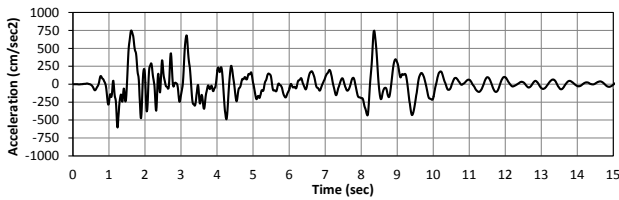
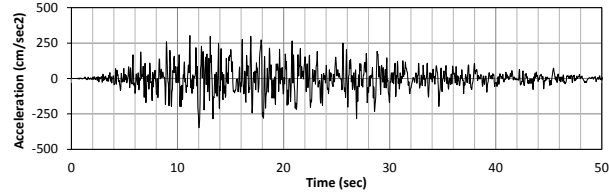


図-5 解析メッシュの1例 (表層厚H=30m, 幅W=60m, 構造物高さh=4m, 構造物埋設位置地盤中央の例)

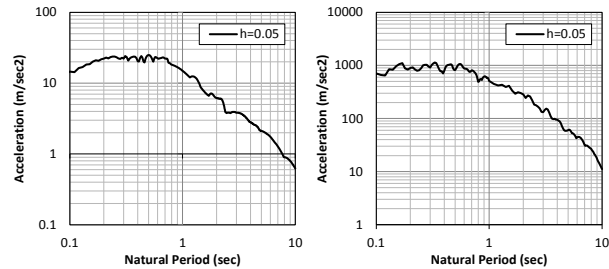


(a) レベル2地震動内陸型-1



(b) レベル2地震動海洋型-2

図-6 入力波形



(a) レベル2内陸型-1

(b) レベル2海洋型-2

図-7 入力波形の加速度応答スペクトル

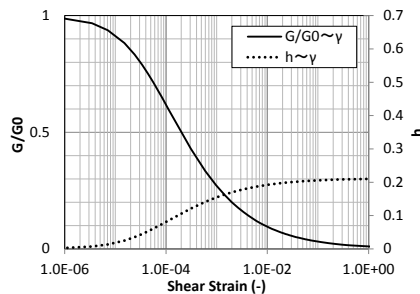


図-8 地盤の非線形特性

自由地盤モデルの解析メッシュは単位幅の柱状モデルとし、高さ方向は構造物埋設地盤モデルと同様に0.5m間隔に分割した。また、境界条件は自由地盤モデル、構造物埋設モデル共にモデル下端は粘性境界、モデル側方は周期境界とした。

入力波形はコンクリート標準示方書に示されるレベル2地震動の内陸型-1の波形を用い、表-1～表-3に示されるおりの倍率で用いた。なお、表-3に示すCaseC4においては波形の違いによる影響を見るために、レベル2地震動海洋型-2の波形（以下、波形2）を用いた解析を行った。図-6、図-7に入力波形、応答スペクトルを示す。

各要素の非線形特性については、線形のケースでは地盤および構造物共に線形、非線形検討ケースにおいては地盤、構造物共に非線形性を考慮した。

地盤の非線形特性は以下に示すRamberg-Osgoodモデルとした。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} \left[1 + \alpha \left| \frac{\tau}{G_0 \gamma_r} \right|^\beta \right] \quad (9)$$

ただし、 $\alpha=20$, $\beta=1$ とした。地盤の非線形特性を図-8に示す。

構造物はファイバーモデルで表現し、コンクリートはコンクリート標準示方書に示される二次関数型、鉄筋はバイリニア型とした。なお、コンクリートの引張強度は考慮していない。

モンテカルロシミュレーションにおける変動物性の対象は地盤の初期せん断剛性とし、その自己相関関数は式(4)、(6)に示すGauss型の自己相関関数を仮定した。

一般に、確率場はRice⁹⁾によれば以下のように表現できる

(1次元)

$$f(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2S(\kappa_i) \Delta \kappa} \cos(\kappa_i x + \phi_i) \quad (10)$$

(2次元)

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sqrt{2S(\kappa_{xi}, \kappa_{yj}) \Delta \kappa_{xi} \Delta \kappa_{yj}} \cos(\kappa_{xi} x + \kappa_{yj} y + \phi_{ij}) \quad (11)$$

ただし、 $S(\cdot)$ はパワースペクトル、 κ は波数、 ϕ は $\pm 0 \sim 2\pi$ の一様乱数である。ここでGauss型の自己相関関数に対するパワースペクトルは以下のように表される¹⁰⁾。

(1次元)

$$S(\kappa) = \sigma^2 \frac{\theta}{2\sqrt{\pi}} \exp \left\{ -\frac{\theta^2 \kappa^2}{4} \right\} \quad (12)$$

(2次元)

$$S(\kappa_x, \kappa_y) = \sigma^2 \frac{\theta_x \theta_y}{4\pi} \exp \left\{ -\frac{\theta_x^2 \kappa_x^2 + \theta_y^2 \kappa_y^2}{4} \right\} \quad (13)$$

実際に数値的に確率場を発生させる際には式(10)、(11)において有限個の級数にて近似する。

こうして発生される確率場は正規確率場であるため、表-1～表-3のVsに対応した平均値を持ち、変動係数0.3とする対数正規確率場に下の式により変換した。

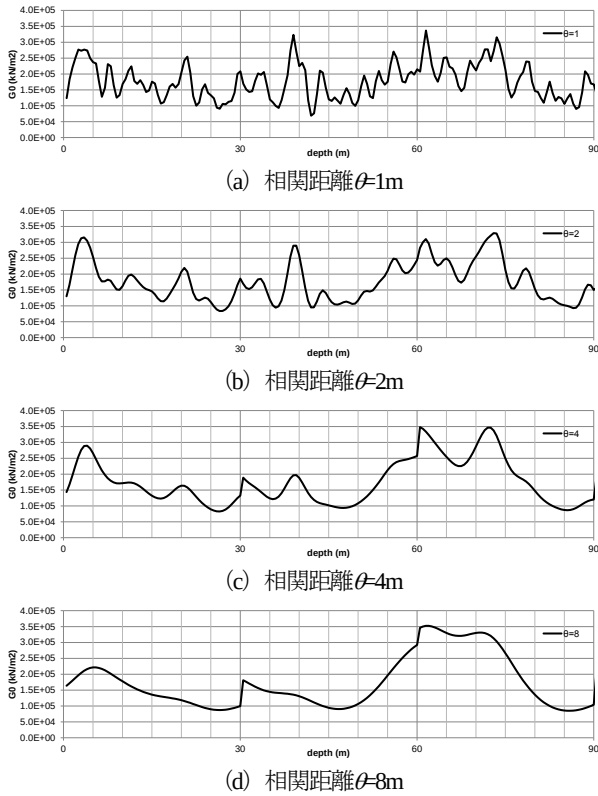


図-9 地盤物性のサンプル場

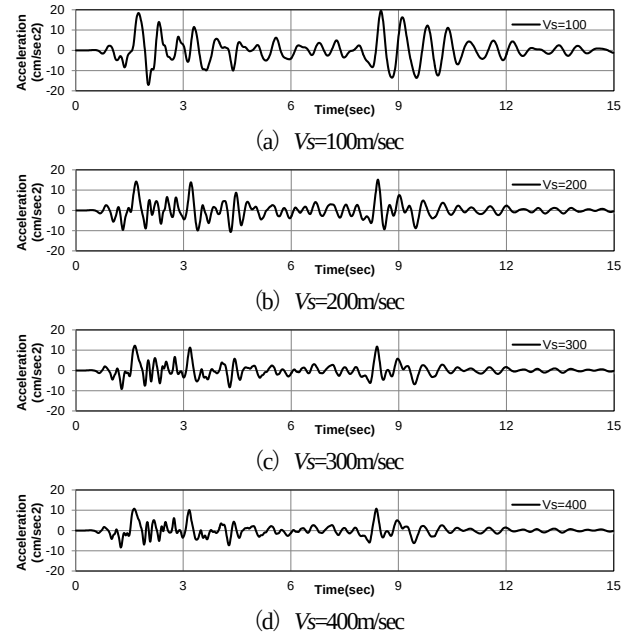


図-10 自由地盤モデルの地表面加速度応答波形

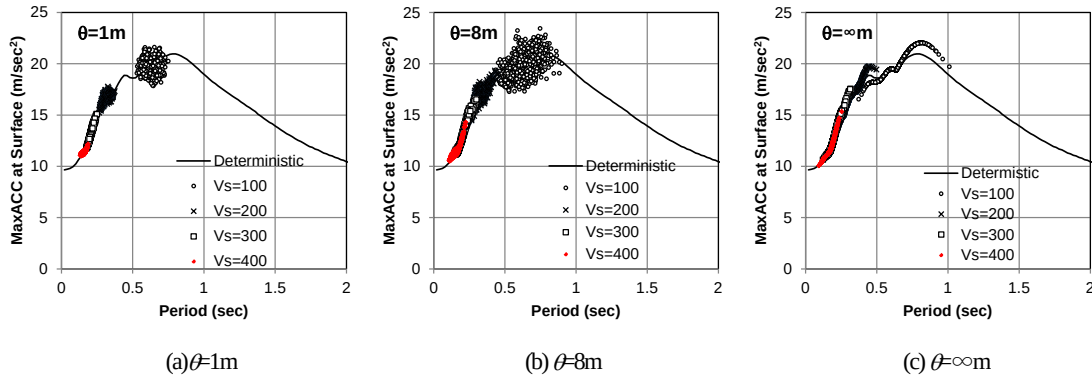


図-11 モンテカルロシミュレーションの整理結果 (CaseA1)

$$G_0(z) = \exp \left\{ x(z) \times \zeta + \ln(\rho_0 V_s^2) - \frac{1}{2} \zeta^2 \right\} \quad (14)$$

ただし、 ρ_0 は土の単位体積質量、 ζ は対数標準偏差で、 ζ は変動係数 δ により以下のように算定される。

$$\zeta^2 = \ln(1 + \delta^2) \quad (15)$$

以上の方法で、各ケースごとに物性場を1000個発生させ、1000リアライゼーションのモンテカルロシミュレーションを実施した。図-9に発生させたサンプル場の1例を示している。上述のとおり、サンプル場は各ケースごとに1000個作成しているが、ここでは深さ30mのサンプル場を3ケースすなわち90m分を例示している。なお本検討では変動係数は0.3に固定している。図-9を見ると、相関距離の増加にともなって物性の変動が緩やかになっていることがわかる。

4. 自由地盤モデルによる検討

(1) 線形自由地盤の結果

モンテカルロシミュレーションの実施に先立ち、応答の基本的な性状を確認するために一様な地盤物性を持つ自由地盤の応答解析を、 $V_s=100, 200, 300, 400$ m/sの4ケースについて行った。図-10にこれらの結果得られた地表面加速度応答波形を示す。これらの波形から、地盤の剛性の変化に伴い固有周期が変化した結果、応答波形の振幅や周期特性に違いが表れていることがわかる。モンテカルロシミュレーションで解析される個々の地盤モデルは平均的にはこれらと同じ物性を持ちつつ、空間的に物性がばらつくので、こうした一様地盤を用いた応答の周辺でばらつくことになる。

図-11に、モンテカルロシミュレーションにより得られた地表面加速度の最大応答値をその初期固有周期により整理した結果を示す。なおここでは、地盤の剛性を一様に変化させて実施した確定論的解析結果と併記している。また、相関距離 θ が1m, 8m, ∞ mの場合のみを示している。 $\theta=\infty$ mで地盤剛性を変動させた場合には、地盤剛性を一様に変化させているため、確定論的解析結果をトレースするように分布している。一方で $\theta=1$ m, 8mとした場合には、同様に確定論的解析結果周辺に分布するものの、確定論的解析結果からずれた応答を示す場合が表れている。これらから地盤剛性の空間的ばらつきを考慮すると、空間的に一様な物性を持つ地盤とは応答のばらつきの特性が異なることがわかる。なお、 $V_s=100$ m/sおよび200m/sの領域で $\theta=\infty$ mの結果と確定論的解析結果の間に若干ずれが生じている理由は、確定論的解析においては、それぞれの解析ケースごとに設定された地盤モデルが持つ固有周期に対して減衰が5%となるように設定したのに対して、モンテカルロシミュレーションでは、それぞれの平均 V_s である $V_s=100, 200, 300, 400$ m/sに対する固有周期に対して減衰が5%となるように固定して実施したためである。今回の検討モデルでは剛性比例型減衰を用いているため、モンテカルロシミュレーションの結果ではその初期固有周期が平均 V_s に対応する固有周期より長くなると（ $V_s=100$ m/sの場合、固有周期が0.6secより大きくなると）減衰が5%より低下して確定論的解析よりも若干応答が大きくなり、初期固有周期が短くなった場合にはその逆の傾向を示す。

以上を示したモンテカルロシミュレーションの結果を統計的に分析し整理する。図-12には地表面最大応答加速度、速度、変位の変動係数と相関距離の関係性をまとめて示す。これらを見ると、すべてのケースにおいて、また最大応答加速度、速度、変位のすべての変動係数が、相関距離の減少に伴って減少していることがわかる。この結果を改めて、式(3)に示した分散関数の形に整理する。式(3)の分散関数で評価する場合には、局所平均距離を決定する必要があるが、ここでは表層厚の15mを採用する。また、式(3)の正規化定数となる分散値としては $L/\theta \rightarrow 0$ となる $\theta=\infty$ の時（一様物性）の応答値の分散を用いた。図-13に分散関数の理論値と比較した結果を示す。これらを見ると、 $V_s=100$ m/sの場合の加速度応答については少しずれが見られるものの、概ね地表面最大応答値の分散の低減傾向は分散関数に従うことがわかる。局所平均距離として表層厚15mを採用した理由は、地盤のせん断変形においては1次モードが卓越すると考えられるからであるが、分散関数との適合性を見ると妥当な設定と考えられる。一方、 $V_s=100$ m/sの場合に加速度応答において異なる傾向が表れた理由は高次モードの影響と考えられる。 $V_s=100$ m/sの場合、一次固有周期が0.6sec、二次固有周期が0.2sec程度であることが固有値解析の結果から得られている。他の条件に比べ二次固有周期が比較的長く、高次モード応答が大きくなり最大加速度の変動を大きくしたものと考えられる。なお、このような傾向は後述するように表層厚が大きくなった場合や、非線形性を考慮した場合にも表れる。

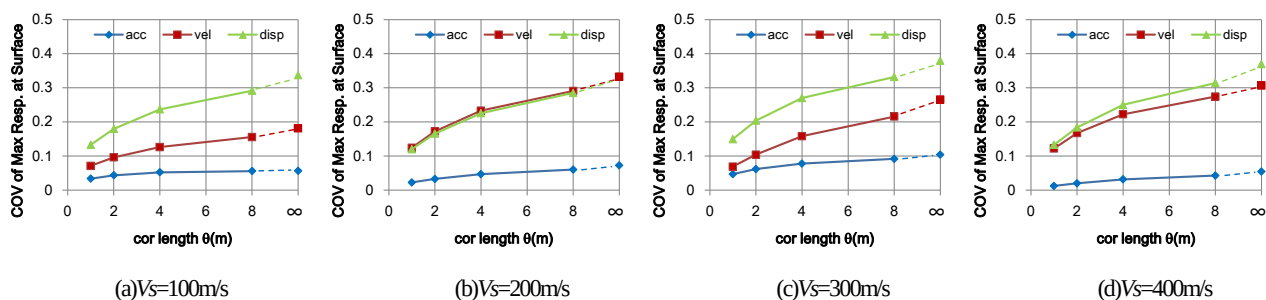


図-12 相関距離と最大応答値の変動係数の関係 (CaseA1, 地表面最大応答加速度、速度、変位)

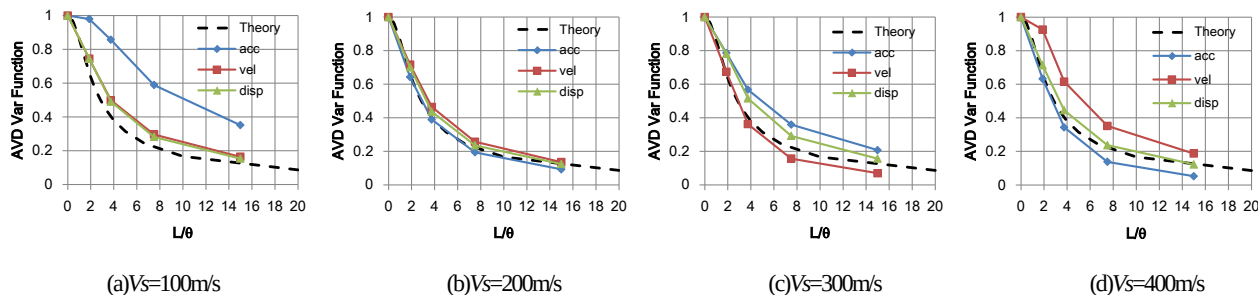


図-13 地表面最大応答値の分散関数 (CaseA1, 加速度、速度、変位)

以上と同様の検討を、地盤内の2点間のせん断変位の最大応答値の分散について行った結果を図-14に示す。ここでは、地盤中央深さで深度方向に1～8mまでの離隔をとった2点（例えば、2mの離隔の場合、深さ7mと深さ8m位置）の相対変位の最大応答値を整理している。また、局所平均距離にはそれぞれに対応する離隔距離を用いている。これらの結果から地盤の最大相対変位についてもばらつきの減少傾向が分散関数に従うことがわかる。

次に、表層厚の変化の影響を検討したCaseA2の結果を図-15、図-16に示す。図-15においては、局所平均距離はそれぞれの表層厚とし、図-16においては層厚15mの場合と同じ考えで相対変位の計測対象位置の離隔をとっている。これらの結果を見ると表層厚H=30mの場合には、分散関数に従った低減傾向が見られるものの、表層厚が60mの場合には異なる傾向が見られる。すなわち、最大応答加速度の分散がVanmarckeの分散関数よりも大きくなっており、また地盤中央部せん断変位においては $0 < L/\theta < 1$ の範囲において分散が大きくなる傾向が見られる。H=60mの場合にこのような傾向が表れる理由は、H=60mの場合の一次固有周期は0.8sec、二次固有周期は0.27secであることから、先述のH=15m、 $V_s=100\text{m/s}$ の条件と同様に高次モードの影響によるものと考えられる。

(2) 非線形自由地盤の結果

前項で示した傾向が、非線形応答においてどのように変化するかを確認するために、非線形地盤を対象に同様の整理を行った。図-17、図-18にその結果を示す。これ

らの結果を見ると、入力加速度が小さい間は、線形地盤と同様の傾向が見られるものの、入力加速度が 5m/sec^2 、 10m/sec^2 と大きくなると、分散関数と異なる傾向を示すことがわかる。地表面の最大応答加速度については $L/\theta=2\sim4$ の範囲で、地盤内のせん断変位最大応答値については $0 < L/\theta < 1$ の範囲で、一旦分散関数が上昇しその後漸減傾向が見られる。ここで改めて、これらの結果を標準偏差の変動として示したものが図-19、図-20である。標準偏差で結果を確認する理由は、分散関数で対象とする分散比は正規化定数である $\theta=\infty$ の場合の分散値の値に依存するので、その影響を除外して傾向を確認するためである。これらの結果を見ると、地表面最大応答値、地盤内せん断変位最大応答値ともに、その分散は入力加速度が大きくなるに従って大きくなり、地表面最大応答速度では $L/\theta=2\sim4$ 、地盤内最大相対変位では $L/\theta=1$ 周辺でその増幅度が高いことが分かる。分散関数の値が $L/\theta > 0$ のときに極大値をとるということは、対象とする応答に応じて特に応答のばらつきを大きくする相関距離の領域があることを意味している。相関距離 θ は相関係数が $1/e=0.368$ となる距離であり、物性の相関が小さくなる距離を示す指標であるので、地表面最大応答加速度については表層厚の $1/4\sim1/2$ のスケールで地盤物性値が異なる値をとるとき、また地盤内部のせん断変位については、相対変位を計測する対象位置の離隔と同程度の距離で地盤物性値が異なる値をとるときに応答のばらつきが大きくなることを示している。

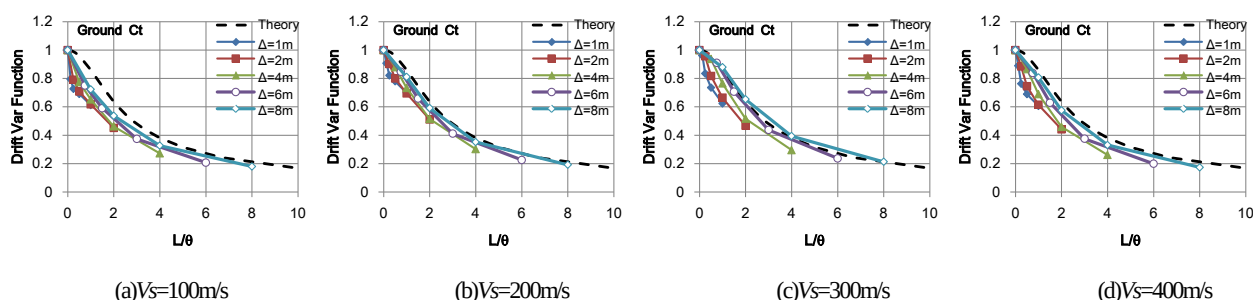


図-14 地盤中央部最大せん断変位の分散関数 (CaseA1, 地盤中央部)

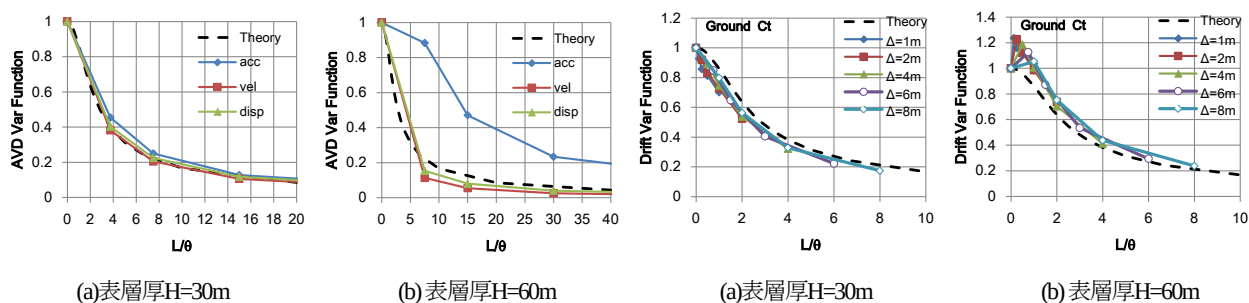


図-15 地表面最大応答値の分散関数 (CaseA2)

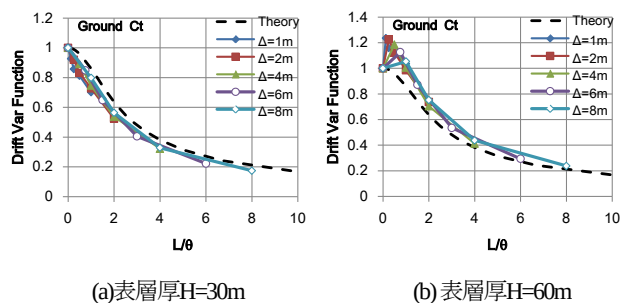
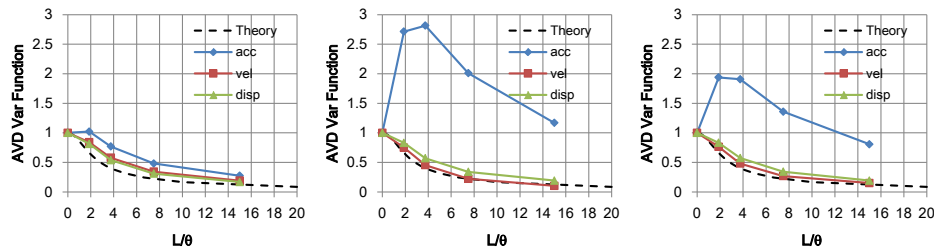
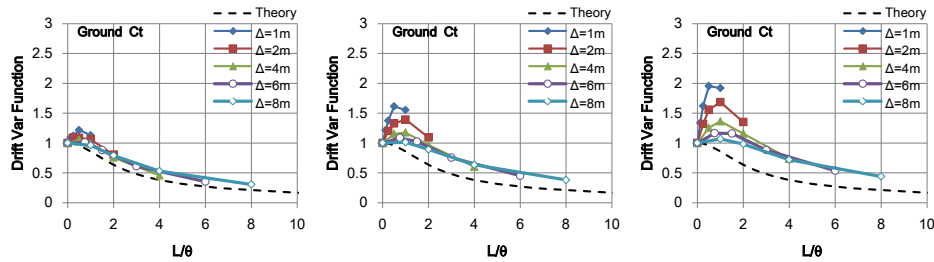


図-16 地盤中央部最大せん断変位の分散関数 (CaseA2)



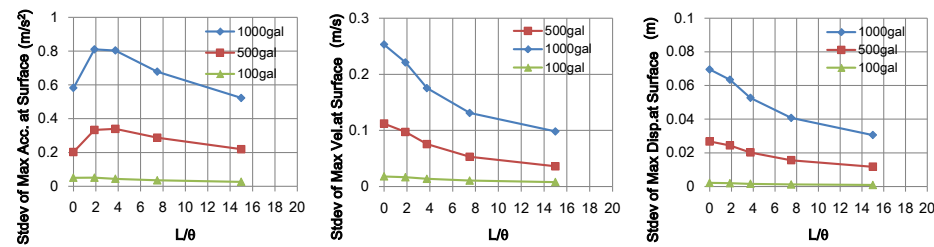
(a)入力レベル=1.0m/sec² (b)入力レベル=5.0m/sec² (c)入力レベル=10.0m/sec²

図-17 地表面最大応答値の分散関数 (CaseA3, 加速度, 速度, 変位)



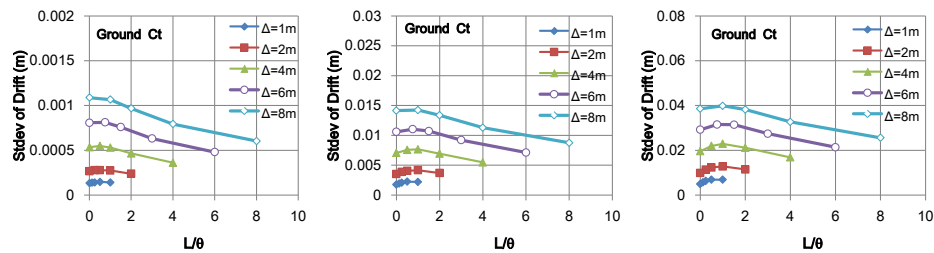
(a)入力レベル=1.0m/sec² (b)入力レベル=5.0m/sec² (c)入力レベル=10.0m/sec²

図-18 地盤中央部最大せん断変位の分散関数 (CaseA3, 地盤中央部)



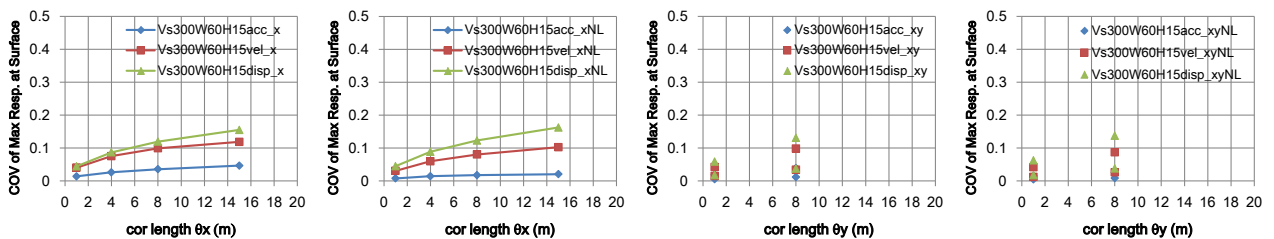
(a)地表面最大応答加速度 (b)地表面最大応答速度 (c)地表面最大応答変位

図-19 地表面最大応答値の標準偏差 (CaseA3, 加速度, 速度, 変位)



(a)入力レベル=1.0m/sec² (b)入力レベル=5.0m/sec² (c)入力レベル=10.0m/sec²

図-20 地盤中央部最大せん断変位の標準偏差 (CaseA3, 地盤中央部)



(a)水平方向変動(線形) (b)水平方向変動(非線形) (c)水平・鉛直方向変動(線形) (d)水平・鉛直方向変動(非線形)

図-21 地表面最大応答値の変動係数 (CaseB, Vs=300m/s, W=60, H=15m, 加速度, 速度, 変位)

(3) 水平方向の変動の影響

本検討で対象とする地中構造物の横断方向の応答に対しては、地盤の水平方向の剛性の変化は大きな影響を与えないと考えられるが、念のためCaseBでその影響を確認した。

図-21 (a), (b)に水平方向の相関距離を変動させた場合の地盤の相関距離と地表面最大応答値の変動係数の関係を示す。ここでは局所平均距離としてモデル幅をとっている。鉛直方向のみの物性を変動させた図-12と比較すると、その変動係数が総じて小さくなっていることが分かる。また、鉛直方向のみ物性変動させた場合に見られた非線形ケースのばらつきの増幅が見られない。すなわち、水平方向の物性を変動することにより、非線形地盤の応答における鉛直方向物性変動の影響が軽減されていることが分かる。ここでは解析結果の一部のみ示すが、水平方向の物性変動の影響は他のケースにおいても同様の傾向を示した。同図 (c), (d)には水平方向と鉛直方向の双方を変動させた場合の結果を示す。こちらにおいても応答のばらつきは小さく非線形性による応答のばらつきの増幅も見られなかった。

5. 構造物埋設地盤モデルによる検討

前章の検討結果を受けて、本章では、鉛直方向の地盤物性のみを変動させて地中にRCボックスカルバートが埋設された地盤を対象に応答の変動について検討する。

(1) 線形地盤の結果

図-22, 図-23に表層厚30mで $V_s=300\text{m/sec}$ とし、地盤中央の深度15mの位置に高さ $h=4, 6, 8\text{m}$ のボックスカルバートが埋設された地盤に対する解析結果を示す。図-22では地表面最大応答値を、図-23ではボックスカルバートの地震時の応答指標として重要な層間変位および隔壁に生じるせん断力の最大応答値を示している。局所平均距離として地表面最大応答値に対しては表層厚、ボックスカルバートの層間変位、隔壁せん断力に対しては分散関数との適合性を確認の上、構造物高さ h の1.5倍としている。

地表面最大応答については、地盤中に構造物が埋設された場合であっても自由地盤と同様の傾向を示し、最大応答値の分散低減が分散関数で評価できる結果となっている。また、層間変位および隔壁に生じるせん断力についても応答値の分散低減傾向は分散関数と一致している。なお、ここでボックスカルバートの層間変位、せん断力の局所平均距離として $1.5h$ の適合性が良い理由は、構造物の層間変形を考慮した場合、地盤剛性の変動スケールが構造物寸法そのものではなく、その周囲も含めた範囲の剛性が影響しているためと考えられる。

(2) 非線形地盤の結果

図-24, 図-25に表層厚30mで $V_s=300\text{m/sec}$ とし、地盤中央の深度15mの位置に高さ $h=4, 6, 8\text{m}$ のボックスカルバートが埋設された非線形地盤における分散関数を示す。非線形自由地盤モデルでも見られたように地表面応答加速

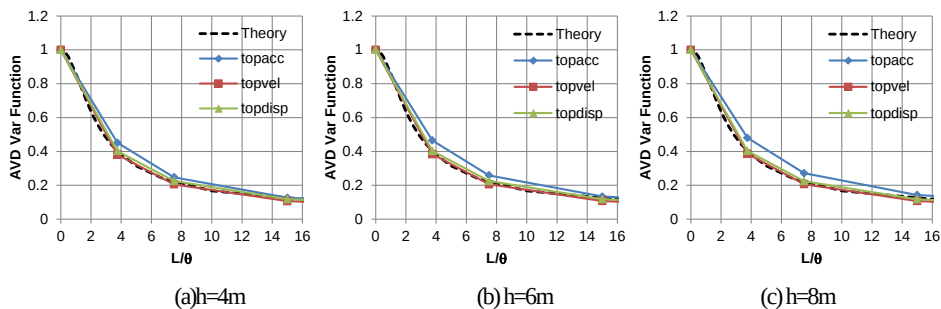


図-22 地表面最大応答値の分散関数 (CaseC1, 加速度, 速度, 変位)

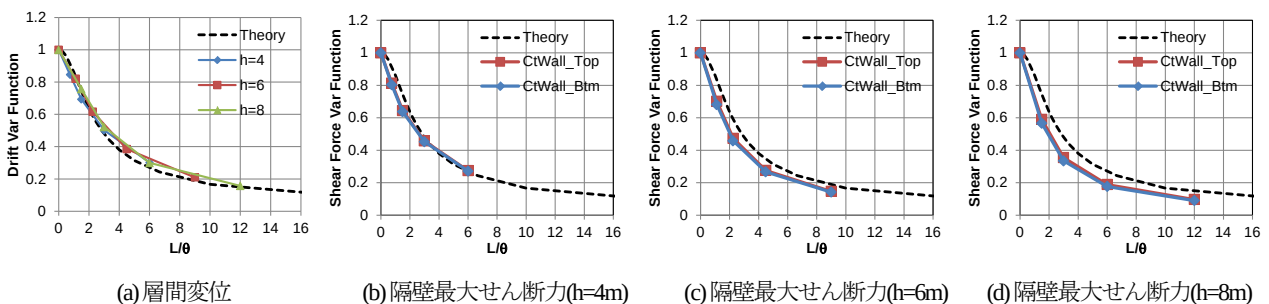


図-23 ボックスカルバート応答の分散関数 (CaseC1, 地盤中央部)

度の分散が分散関数に比べて大きくなる傾向が見られる。またボックスカルバートの層間変形と隔壁に作用するせん断力については $L/\theta=2$ 周辺での分散の増加が顕著になっている。ボックスカルバートの応答の分散は、分散関数に比べ極めて大きくなったため、非線形自由地盤の解析結果の整理に倣って標準偏差で整理してみる。その結果を示したものが図-26である。これらの結果を見ると、構造物高さの増加とともに層間変位の標準偏差は増大、隔壁に作用するせん断力の標準偏差は減少するが、そのピークの位置は $L/\theta=1\sim3$ 程度で共通していることが分かる。すなわち、ボックスカルバートの層間変位および隔壁のせん断力ともに、そのばらつきはボックスカルバー

トの高さではなく、地盤の相関距離とボックスカルバートの高さの比に依存して変動することを示している。

(3) 構造物埋設位置および入力波形の影響

表層厚30mで $V_s=300\text{m/sec}$ とし、高さ4mのボックスカルバートを地盤中央（深度15m）、地表面直下、基盤直上の位置に埋設された場合の解析結果を図-27に示す。図-27は標準偏差をまとめた結果である。ボックスカルバートが地表面周辺にあるときは、ボックスカルバートのせん断変形が小さくなるため、若干異なる傾向を示すものの、 $L/\theta<3$ の増加に伴って標準偏差が一旦増加し、その後漸減する傾向は同じである。地表面付近でボックスカ

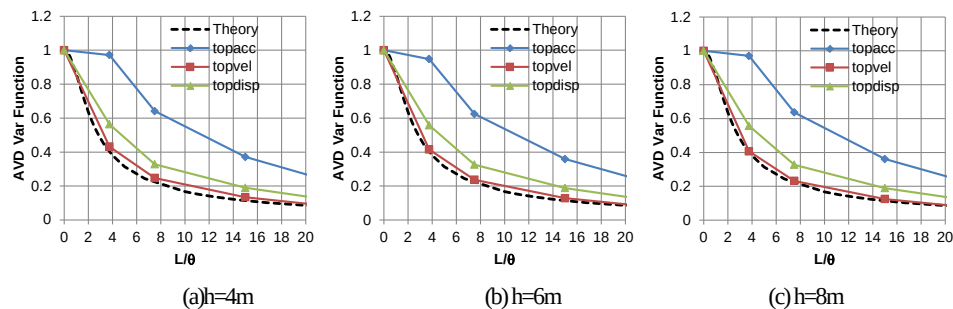


図-24 地表面最大応答値の分散関数 (CaseC2, 加速度, 速度, 変位)

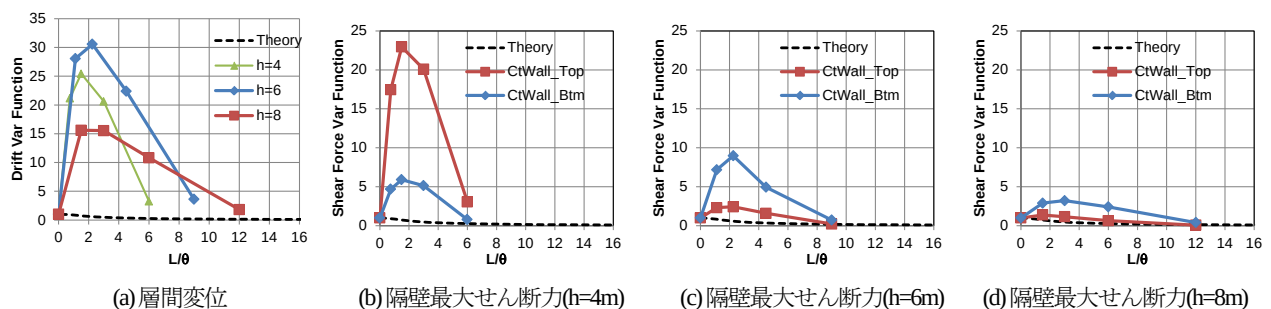


図-25 ボックスカルバート応答の分散関数 (CaseC2, 地盤中央部)

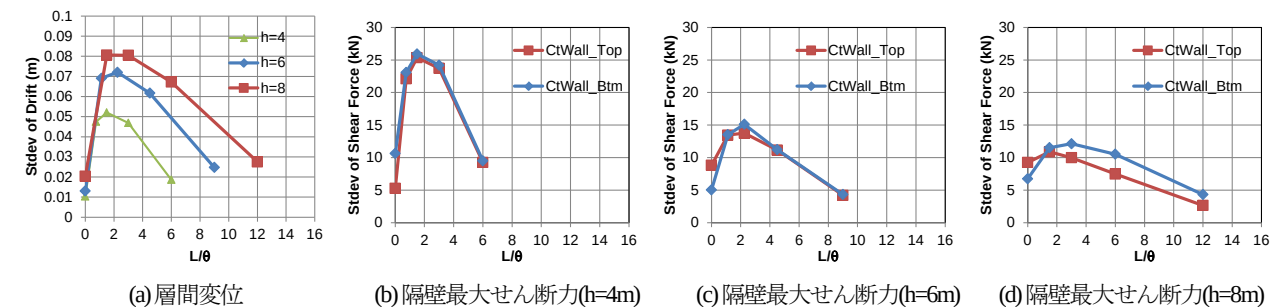


図-26 ボックスカルバート応答の標準偏差 (CaseC2, 地盤中央部)

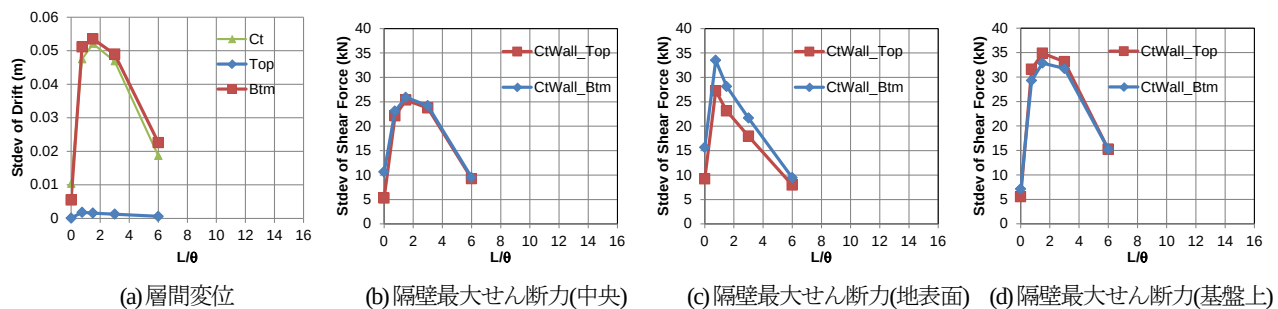


図-27 ボックスカルバート応答の標準偏差 (CaseC3, h=4m)

ルバーのせん断変形が小さいにも関わらず、その最大応答せん断力の標準偏差が地盤中央部や基盤直上の結果と変わらないのは、地盤中央部や基盤直上にボックスカルバートが存在するときには、隔壁の曲げ降伏が進行しており、その結果として応答せん断力がほぼ一定となっていることが要因と考えられる。結果として応答変形の小さい地表付近のボックスカルバートの応答変形の標準偏差が他の条件と同程度となったものである。

図-28には波形2を用いて計算を行った結果も示している。波形2は海溝型地震を想定した波形であり、その径時特性は波形1と大きく異なるが、分散の低減傾向については同様の結果を得た。

以上、一連の解析結果を示したが、着目すべきことは、これら多様な条件にも関わらず、変動係数および標準偏差と相関距離の関係が同じ傾向を示すことである。このことは、設計において地盤物性の空間的ばらつきを考慮する際、対象とする応答ごとにその応答のばらつきを大きくする相関距離の条件が特定されることを示している。

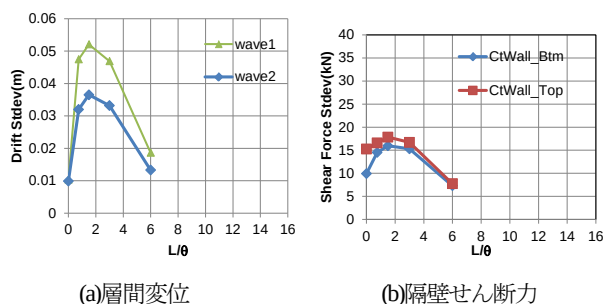


図-28 ボックスカルバート応答の標準偏差 (CaseC4)

6. まとめ

地盤の初期せん断剛性の自己相関構造に着目し、相関距離を変動させて、自由地盤および地中RCボックスカルバートが埋設された地盤を対象に、その最大応答値の分散を評価した。その結果以下のことが明らかとなった。

- 線形の自由地盤の地震時応答最大値のばらつきは、地盤の相関構造の変化に対し、概ねVanmarckeが提案する分散関数に従って低減する。分散関数を規定するために必要な局所平均距離として、地表面最大応答値については表層厚、地盤内の局所的なせん断変形については、せん断変形の測定対象となるその離隔距離を選定すれば、分散低減傾向が分散関数と一致する。ただし、表層厚が大きい場合、平均Vsが小さい場合など、表層地盤の固有周期が長くなると分散低減が分散関数からかい離する場合がある。
- 非線形の自由地盤の地震時最大応答値の分散は、非線形性が強くなると、ある L/θ に対して極大値を

とる。またそのときの分散値は分散関数で予測される値に比べ極めて大きくなることもある。分散が大きくなる L/θ の条件は地表面最大応答値では $L/\theta=2\sim4$ 、地盤内の局所的なせん断変位については $L/\theta=1$ 程度である。

- 線形の地盤に埋設された線形のRCボックスカルバートの最大応答値の分散は、地盤の相関構造の変化に対し、Vanmarckeが提案する分散関数に従って低減する。分散関数を規定するために必要な局所平均距離は、構造物高さの1.5倍とすると、分散低減傾向が分散関数と一致する。
- 非線形の地盤に埋設された非線形のRCボックスカルバートの最大応答値の分散は、ある L/θ に対して極大値をとる。またそのときの分散値は分散関数で予測される値に比べ極めて大きくなることもある。分散が大きくなる L/θ の条件は $L/\theta=1\sim3$ 程度である。

本検討においては、地盤物性の空間的ばらつきと地震時の応答値のばらつきとの関係を、地盤物性の相関距離をキーパラメータとして整理し、その特性を確認した。こうした知見は、今後、地盤物性の空間的不均質性を考慮した解析を実施する際に、条件設定のための基礎資料となると考えている。

参考文献

- 1) 畑明仁, 志波由紀夫: 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, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, 2009
- 2) 畑明仁, 志波由紀夫: 地盤物性の空間的ばらつきが地震応答のばらつきに与える影響に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.66, No.1, 2010
- 3) 坂下克之, 畑明仁, 志波由紀夫: モンテカルロシミュレーションによる地中構造物の地震時損傷確率評価および評価手法の簡易化の検討, 第33回地震工学研究発表会, 23-D-1, 7-409, 2013
- 4) Vanmarcke, E.H.: Probabilistic Modeling of Soil Profiles, J. of Geotechnical Engineering (ASCE), Vol.103, No.GT11, pp.1227-1246, 1977.
- 5) Vanmarcke, E.H.: Random Fields, MIT press., 1983.
- 6) 本城勇介, 大竹雄, 加藤栄和: 地盤パラメータ局所平均の空間的ばらつきと統計的推定誤差の簡易評価理論, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.1, pp.41-55, 2012.
- 7) 大竹雄, 本城勇介: 地盤パラメータ局所平均を用いた空間的ばらつき簡易信頼性評価法の検証, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.3, pp.475-490, 2012.
- 8) Vanmarcke, E.H. and Grigoriu, M.: Stochastic Finite Element Analysis of Simple Beams, J. of Engineering

- Mechanics (ASCE), Vol.109, No.5, pp.1203-1214, 1983.
- 9) Rice, S.O. : Mathematical Analysis of Random Noise, *Bell System Technical Journal*, Vol.23, 1944, Vol.24, 1945.
- 10) Fenton, G.A. and Griffiths, D.V.: Risk Assessment in Geotechnical Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

RESPONSE VARIABILITY OF UNDERGROUND STRUCTURES CAUSED BY SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PROPERTY

Akihito HATA, Katsuyuki SAKASHITA, Yukio SHIBA and Junji KIYONO

It is important to consider the spatial variability of soil properties to evaluate the uncertainty of dynamic response of subsurface structures and surrounding ground induced by earthquakes. Although there are many proposed models for generation of stochastic fields, few researches have been conducted to evaluate the response variability of the system which has those stochastic fields. This paper examines the response variability of the underground structures and surrounding ground modeled with random field subjected to earthquake ground motion. Series of Monte-Carlo simulations were conducted for linear and nonlinear models under various conditions. From those results, it turned out that the response variability can be estimated with the variance function proposed by Vanmarcke for linear model and that for nonlinear model, the variance of the response becomes much larger than estimated by variance function when the ratio of local averaging length and correlation length takes a certain value corresponding to each response to be examined.