

# 地盤物性のばらつきを考慮した 地震応答解析に関する研究

## EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS CONSIDERING SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES

国生隼人<sup>1</sup>・中村充裕<sup>2</sup>  
Hayato KOKUSHO, Mitsuhiro NAKAMURA

<sup>1</sup>正会員 八千代エンジニアリング株式会社 臨海開発部 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)  
<sup>2</sup>三井共同建設コンサルタント株式会社 港湾・空港事業部 (〒169-0075 東京都新宿区高田馬場1-4-15)

The reliability-based design method was introduced to the new technical standard for port and harbor facilities, revised in July 2007. However soil properties for earthquake response analysis are treated as deterministic values in most case. In this paper, the effect of spatial variability of soil properties, including the vertical correlation, on seismic response by a computer code 'SHAKE' is investigated. Another objective of this paper is to make clear the effect of spatial variability of soil properties, including the vertical and horizontal correlation, on seismic response by a computer code 'FLIP'. A computer code 'FLIP' is used for effective stress analysis of soil-structure systems constructed in coastal areas.

**Key Words :** Reliability based design, earthquake response analysis, spatial variability of soil properties, monte carlo simulation, spatial correlation

### 1. はじめに

平成19年度に港湾基準が改訂され、港湾施設の設計に信頼性設計法が導入された。しかしながら、地盤の液状化判定や地震時の施設の変形量照査に用いる地震応答解析において、解析条件となる地盤物性は確定的に取り扱われている場合がほとんどである。そのため、地震応答解析分野における地盤物性のばらつきを考慮した信頼性解析への対応が望まれている。

本研究では、地盤の液状化判定等に当り、1次元地震応答解析手法として一般的な計算プログラム「SHAKE」を用いて、地盤物性のばらつきが地震応答解析結果や液状化判定結果に与える影響について、モンテカルロシミュレーション(以下、「MCS」)による検討を行った。

また、地震時の変形量照査に当り、2次元地震応答解析手法として一般的な「FLIP」を用いて、地盤物性の空間自己相関性(空間的な位置関係が近い地盤は類似の特性を有する性質)を考慮した解析を行った。

### 2. せん断剛性のばらつきを考慮した 1次元地震応答解析および液状化の検討

#### (1) 検討の概要

現行の基準・指針類における液状化予測・判定手法は、対象とする地盤の物性を確定的に取り扱うものであり、得られる結果も液状化の有・無という二者択一的なものである。そこで、港湾施設の設計において一般的な液状化予測・判定手法を対象とし、地盤物性のばらつきが、1次元地震応答解析結果および液状化予測・判定結果に与える影響を確認するとともに、ある想定地震外力に対する液状化の危険度を確率論的に評価する手法について検討を行った。

#### (2) 検討手法

1次元地震応答解析には「SHAKE」を用いる。液状化の予測・判定手法には、「埋立地の液状化対策ハンドブック」<sup>1)</sup>の方法を用いる。同書における液状化判定手法には、①粒度とN値による予測・判定、②液状化安全率 $F_L$ による判定の2種類があるが、本研究では液状化の有無の判定が数値的に取り扱える②の液状化安全率 $F_L$ による手法を用いることとする。

②の手法で用いる液状化強度比 $R_{max}$ は、本来繰返

し三軸試験より得られるものであるが、以降で述べる確率変数として取り扱うN値より、道路橋示方書<sup>2)</sup>におけるN値と液状化強度Rの関係式を用いて設定することとする。

(3) 検討条件

a) 対象地震動

対象とする地震動は、以下の4波形(レベル1地震動, 国総研HPよりダウンロード)とする。基盤加速度レベルは50gal~250gal範囲で変化させて検討を行う。

- ・ 釧路港波(卓越周波数 0.8Hz)
- ・ 石巻港波(卓越周波数 1.0Hz)
- ・ 今治港波(卓越周波数 1.5Hz)
- ・ 博多港波(卓越周波数 2.0Hz)

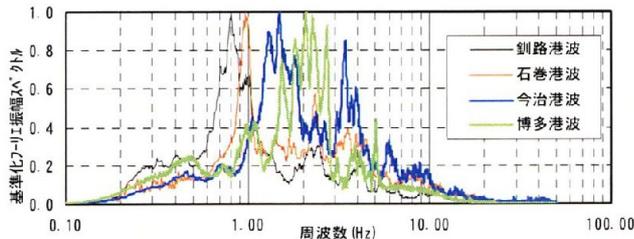


図-1 対象地震動の基準化フーリエスペクトル

b) 地盤条件

検討地盤モデルは図-2に示すとおり、砂層①, 砂層②, 粘性土層の3層構成とし、層厚はすべて5mとする。このうち、砂層②と粘性土層について地盤のばらつきを考慮する。地下水位はG.L.-5.0とし、液状化判定は砂層②を対象に行う。SHAKEでは上記検討地盤モデルをさらに1m毎の層厚に区分したモデルを用いることとし、各層の土質定数等は表-1に示すとおりである。同表に示すとおり、全体的な剛性を変化させた3ケースについて検討を行った(確率変数として取り扱う定数については、表-1の値は平均値である)。

表-1 解析に使用する土質定数

layer	土質区分	各ケース共通			Case1 <sup>※1</sup>			Case2 <sup>※1</sup>			Case3 <sup>※1</sup>			備考
		G.L. (m)	層厚 (m)	$\gamma_t$ kN/m <sup>3</sup>	N値 kN/m <sup>2</sup>	qu <sup>※2</sup> m/s	Vs <sup>※2</sup> m/s	N値	qu <sup>※2</sup> kN/m <sup>2</sup>	Vs <sup>※2</sup> m/s	N値	qu <sup>※2</sup> kN/m <sup>2</sup>	Vs <sup>※2</sup> m/s	
1	砂層①	0.0	1.0	18.0	0.52	-	(70)	0.76	-	(80)	1.47	-	(100)	ばらつき非考慮
2		-1.0	1.0											
3		-2.0	1.0											
4		-3.0	1.0											
5		-4.0	1.0											
6	砂層② (液状化層)	-5.0	1.0	18.0	1.08	-	(90)	1.95	-	(110)	4.85	-	(150)	N値を確率変数 ・対数正規分布 ・変動係数=0.5
7		-6.0	1.0											
8		-7.0	1.0											
9		-8.0	1.0											
10		-9.0	1.0											
11	粘性土層	-10.0	1.0	16.0	-	34.55	(60)	-	77.74	(90)	-	138.20	(120)	quを確率変数 ・正規分布 ・変動係数=0.3
12		-11.0	1.0											
13		-12.0	1.0											
14		-13.0	1.0											
15	基盤	-14.0	1.0	18.0	-	-	-	-	-	-	-	-	300	
16		-15.0	-											

※1: 着色部は確率変数として取り扱う。

※2: せん断波速度Vsは砂層はN値, 粘性土層はquよりそれぞれ換算。

c) ばらつきを考慮する地盤物性

砂層②のN値, および粘性土層の一軸圧縮強度quを確率変数として取り扱うこととし、確率分布, 変動係数は既往の調査結果等<sup>3)</sup>より次のとおりとする。その他の定数等として、単位体積重量 $\gamma$ , 減衰定数h(初期値), およびG/G<sub>0</sub>・hのひずみ依存性については確定的に取り扱うこととする。

- ・ N値: 対数正規分布, 変動係数=0.5
- ・ qu: 正規分布, 変動係数=0.3

d) 土質定数の空間自己相関性について

地震応答解析の実施に当っては、深度1m毎に区分した各層に対し、砂層の場合はN値, 粘性土層の場合はquを先に述べた確率分布に従う変数としてランダムに設定する。ここで、空間的に近くに位置する地盤物性についてはある程度類似の性状を持つ(空間自己相関性を有する)と考えられるため、これを適切に考慮する必要がある。本研究では、空間自己相関性のモデル化<sup>4),5)</sup>を以降のとおり行う。

地盤を深度方向に複数層に分割した場合、異なる深度にある2層の各中心深度を*i, j*とし、その間の距離を*r<sub>ij</sub>*とする。任意の層の中心点*c*における地盤の物性値をそれぞれ平均*X<sub>c</sub>*, 標準偏差*σ<sub>c</sub>*なる確率変数*X<sub>c</sub>*(*c=1,2,...,n*)として与えると*i, j*層間の地盤物性の相関係数  $\tau_{ij}$ は式(1)で与えられる。ここに、 $cov[X_i, X_j]$ は*X<sub>i</sub>*と*X<sub>j</sub>*の共分散である。

$$\tau_{ij} = \frac{cov[X_i, X_j]}{\sigma_i \cdot \sigma_j} \quad (1)$$

ここで、相関係数  $\tau_{ij}$ が*i, j*層間の距離*r<sub>ij</sub>*で一義的に規定されるものとし、式(2)による関数形を仮定する。*b*は相関距離と呼ばれ、*b*が大きいほど広域にわたって相関が強いことを示す。この相関距離*b*は土質調査より求めることができる。

$$\tau_{ij} = \exp\left(-\frac{r_{ij}}{b}\right) \quad (2)$$

GL±0	砂層① (ばらつき考慮しない) GL-5.0 砂層② (ばらつき考慮) GL-10.0 粘性土層 (ばらつき考慮) GL-15.0 基盤 (ばらつき考慮しない)

図-2 検討地盤モデル

確率変数ベクトル $\{X\}^T = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ に対する共分散マトリックス $[C_X]$ は、標準偏差 $\sigma_i$ 、相関係数 $\tau_{ij}$ を用いて式(3)で与えられる。これを例えば下三角行列 $[C_X^*]$ を用いて式(4)のようにLU分解すれば、各要素の確率変数 $X_c$ は、平均0、分散1のn個の独立な正規乱数 $a_c (c=1, 2, \dots, n)$ を用いて、式(5)のように与えられる。行列 $[C_X]$ は正値対象行列なので、この分解にはコレスキー分解の方法を用いることができる。なお、正規乱数は、メルセンヌツイスターにより発生させた一様乱数を、逆関数法(Moroの方法)<sup>6)</sup>にて正規乱数へと変換して生成した。

$$[C_X] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2\tau_{12} & \dots & \sigma_1\sigma_n\tau_{n1} \\ \sigma_2\sigma_1\tau_{12} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_2\sigma_n\tau_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_n\sigma_1\tau_{n1} & \sigma_n\sigma_2\tau_{n2} & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[C_X] = [C_X^*] \cdot [C_X^*]^T$$

$$[C_X^*] = \begin{bmatrix} c_{11} & & & 0 \\ c_{21} & c_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \vdots \\ \bar{X}_n \end{Bmatrix} + [C_X^*] \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

本研究では、砂層②のN値と粘性土層のquについて、平均 $\mu_N$ 、 $\mu_{qu}$ 、および標準偏差 $\sigma_N$ 、 $\sigma_{qu}$ は1m毎に区分したいずれの層も同じ値であるため、共分散マトリックス $[C_X]$ は式(6)(7)に示すとおりとなる。

$$[C_X] = \sigma^2 \cdot [C'] \quad (6)$$

$$[C'] = \begin{bmatrix} 1 & \tau_{21} & \dots & \tau_{n1} \\ \tau_{12} & 1 & \dots & \tau_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{n1} & \tau_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

したがって、 $[C']$ を(4)式のようにLU分解した行列を $[C'^*]$ とすると、各層の土質定数(N値、qu)は式(8)(9)のとおりとなる。なお、(8)式の $\lambda_N$ 、 $\zeta_N$ はそれぞれN値の対数の平均(= $\mu_{(\ln N)}$ )、標準偏差(= $\sigma_{(\ln N)}$ )である。

$$[\ln N] = \lambda_N + \zeta_N \cdot [C'^*] \cdot [a] \quad (8)$$

$$[qu] = \mu_{qu} + \sigma_{qu} \cdot [C'^*] \cdot [a] \quad (9)$$

検討に当っては各確率変数(N値、qu)の相関距離 $b$ を設定する必要がある。本来は土質調査結果より設定するが、本研究では次のとおりとする。粘性土の一軸圧縮強度については深さ方向の相関距離は既往の研究<sup>7)</sup>より数m程度と言われている。これを参考に、空間自己相関性の大小が結果に与える影響についても考察することとし、相関距離 $b=1m$ 、 $5m$ の2ケースについて検討を行う。砂層と粘性土層の相関距離は便宜的に同じ値を使用することとする。参考

として、ある乱数の組み合わせについて、相関距離を変化させた場合の土質定数( $V_s$ )の深度方向のばらつき具合を図-3に示す(土質定数はcase2の場合)。同図より相関距離 $b$ が大きい程、層毎の物性値の変動が小さくなっていることが確認できる。

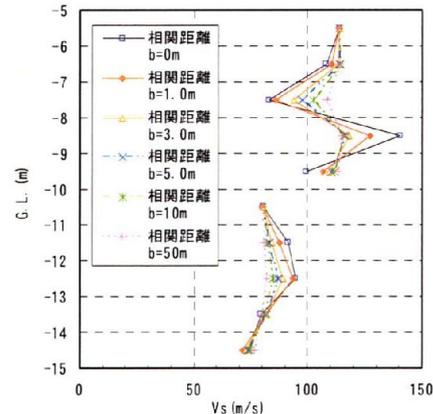


図-3 相関距離 $b$ による土質定数( $V_s$ )のばらつき状況

#### e) 液状化危険度の確率論的評価

液状化安全率 $F_L$ の算定方法は下式のとおりであり、 $F_L < 1$ の時液状化すると判定する。式中の $R_{max}$ は前述の液状化強度比であり、 $L_{max}$ は地震応答解析結果より求まる最大せん断応力比<sup>1)</sup>である。

$$F_L = \frac{R_{max}}{L_{max}} \quad (10)$$

この判定基準を用いて、上記の確率変数(N値、qu)をランダムに変化させ、MCSにより $F_L < 1.0$ となる確率を評価する。MCSの試行回数は、構造物の破壊確率等と異なり、液状化の発生確率のオーダーが大きいことから、既往の研究<sup>8)</sup>等を参考に1,000回とする。

#### (4) 予備検討(確定論的評価)

確率変数(N値、qu)について平均値を用いて、確定的な検討を行った結果を表-2に示す。なお、液状化安全率 $F_L$ の値は、各層で若干異なるが、同表に示す値は砂層②の平均値である。地盤物性のばらつきを考慮した検討は、本結果において $F_L$ の値が1.0程度となった次のケース(表-2着色部)について行う。

- ・入力波形：石巻港波、・地盤条件：Case2
- ・基盤加速度レベル：150、200、250gal

表-2 予備解析(確定論的評価)の結果

入力波形	地盤条件	基盤加速度レベル毎のFL算定結果※				
		50gal	100gal	150gal	200gal	250gal
釧路港	Case1	1.65	1.20	1.04	<b>0.95</b>	<b>0.86</b>
	Case2	1.13	1.14	1.00	<b>0.87</b>	<b>0.85</b>
	Case3	1.95	<b>0.92</b>	<b>0.75</b>	<b>0.79</b>	<b>0.80</b>
石巻港	Case1	1.88	1.31	1.23	1.22	1.27
	Case2	2.16	1.39	<b>1.06</b>	<b>1.08</b>	<b>0.97</b>
	Case3	2.51	1.71	1.48	1.16	<b>0.95</b>
今治港	Case1	1.92	1.68	1.50	1.20	1.03
	Case2	1.73	1.79	1.40	1.15	1.15
	Case3	2.14	1.32	1.38	1.36	1.16
博多港	Case1	2.25	1.83	1.51	1.02	1.19
	Case2	2.00	1.78	1.33	1.28	1.08
	Case3	1.96	1.55	1.66	1.28	1.00

※FL算定結果は砂層②(層厚5m)を1m毎に区分した5層の算出結果の平均値  
※イタリックはFL(5層平均) < 1.0のケース

(5) ばらつきを考慮した検討(確率論的評価)

地盤物性のばらつきを考慮した解析結果を表-3に示す。同表にて、 $F_L$ は前述の確定的な検討結果であり、 $F_L'$ がばらつきを考慮した解析結果(MCSの全試行回数の平均)である。 $P(F_L < 1)$ は試行回数1,000回のうち、 $F_L < 1$ となる確率を示す。

結果より今回の条件では、地盤のばらつきを考慮した場合、確定的に検討した結果より $F_L$ が1~3割程度大きくなる傾向が得られた(表-3の $F_L' / F_L$ 参照)。また、相関距離 $b$ が小さい程、この差異が大きくなる傾向が確認された(図-4参照)。液状化強度比 $R_{max}$ はN値より換算するため、当初仮定した対数正規分布によく一致しており(図-5参照)、上記のような平均値がくい違う傾向がみられるのは、地震応答解析結果の平均的な応答が、平均的な物性値を用いて確定的に解析した結果と必ずしも一致しないこと(図-6参照)によると考えられる。なお、既往の研究<sup>8)</sup>でも、同様に平均値がくい違う傾向が確認されている。MCSの収束状況については図-7に示すとおりであり、試行回数1,000回で概ね収束することが確認される。

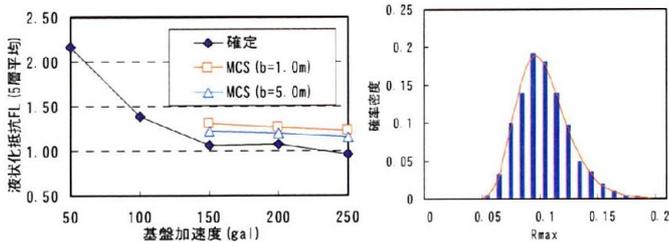


図-4 FLと基盤加速度の関係

図-5 液状化強度R発生頻度

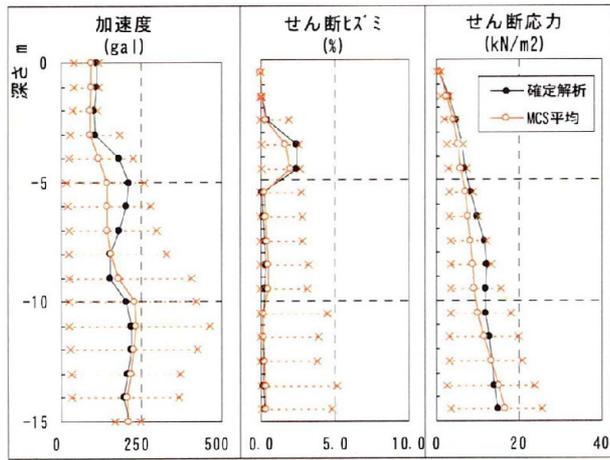


図-6 地震応答解析結果(250gal, b=1.0m)

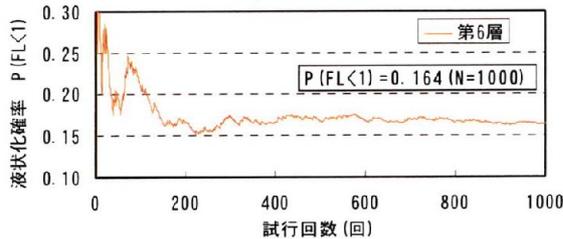


図-7 MCS収束状況(250gal, b=1.0m)

表-3 地盤物性のばらつきを考慮した解析結果

入力波	地盤条件	基盤加速度	検討方法	相関距離 b (m)	項目	解析結果 (FL: 確定解析, FL': ばらつき考慮 MCS平均値)						
						検討深度 (対象: 砂層②) G.L. (m)						
						-5~-6	-6~-7	-7~-8	-8~-9	-9~-10	平均※	
石巻港	Case 1	150 gal	MCS	1.0	確定	FL	1.28	1.12	0.99	0.95	0.97	1.06
					FL'	1.44	1.35	1.28	1.24	1.25	1.31	
					P(FL<1)	0.080	0.128	0.170	0.186	0.152	0.001	
			5.0	FL'	1.38	1.27	1.18	1.14	1.16	1.23		
				FL'/FL	1.08	1.13	1.19	1.20	1.19	1.15		
				P(FL<1)	0.074	0.112	0.172	0.220	0.207	0.017		
	Case 2	200 gal	MCS	1.0	確定	FL	1.29	1.12	0.99	0.96	1.02	1.08
					FL'	1.37	1.28	1.23	1.21	1.24	1.27	
					P(FL<1)	0.089	0.150	0.200	0.203	0.170	0.003	
			5.0	FL'	1.33	1.22	1.15	1.13	1.16	1.20		
				FL'/FL	1.03	1.09	1.17	1.17	1.14	1.12		
				P(FL<1)	0.073	0.131	0.207	0.247	0.190	0.021		
	Case 3	250 gal	MCS	1.0	確定	FL	1.09	0.99	0.89	0.90	0.98	0.97
					FL'	1.27	1.23	1.23	1.22	1.23	1.23	
					P(FL<1)	0.164	0.182	0.192	0.203	0.176	0.025	
			5.0	FL'	1.22	1.17	1.14	1.12	1.14	1.16		
				FL'/FL	1.12	1.19	1.27	1.24	1.16	1.20		
				P(FL<1)	0.150	0.196	0.229	0.266	0.244	0.078		

※平均については、1回の試行毎に5層の平均値をとったものについて、全試行回数の平均値

3. 地盤物性の空間自己相関性を考慮した 2次元地震応答解析

(1) 検討の概要

地盤物性の空間自己相関性については、既往の研究<sup>7)</sup>においてその傾向が明らかにされており、例えば、海底の粘性土の粘着力に関しては、鉛直方向の相関距離は前述のとおり数mである。一方、水平方向においては、数十m~数百mの相関距離を有していると言われている。そのため、水平方向は距離によらず一定の地盤物性(完全相関)と仮定され地盤解析などが行われることが多い。

地震応答解析に大きな影響を与えるせん断波速度については、相関距離に着目した分析が少なく、今後、データの収集及び分析が期待されている。今後のデータの蓄積や検討条件によっては、水平方向の相関距離を考慮した解析が必要となることが考えられることから、ここでは、「水平方向の相関距離を考慮した地震応答解析手法の確立」や、その「検討結果の傾向把握」のため、鉛直および水平方向について地盤物性のばらつきを考慮した2次元の地震応答解析を実施することとした。なお、今回の検討では、上記の相関距離の値は、鉛直方向を2mとし、水平方向は2, 4, 8mと変化させた3ケースについて検討を行った。

(2) 検討方法

港湾構造物の地震応答解析手法として用いられることの多いFLIP<sup>9)</sup>にて解析を行った。また、解析地盤モデルについては、前掲図-2に示すような単純な成層構造を採用し、原地盤を想定した砂層②と粘性土層にばらつきを考慮し、その上層の砂層①は均質な材料を想定してばらつきを未考慮とした。また、地盤物性については、前出の1次元解析モデルと整合させており、大規模な変状による結果への影響を

避けるため、表-1に示す検討ケースの内、比較的地盤強度の高いCase3を選定した。なお、解析メッシュとしては、図-8に示すように解析対象区域を1m×1mメッシュとして、両端部に緩衝領域を設けた。また、表-4に示すFLIPのモデルパラメタとして、土質材料の剛性を設定するせん断弾性係数 $G_m$ や体積弾性係数 $K_m$ は、ばらつきを考慮する物性値であるせん断波速度 $V_s$ より設定した。せん断抵抗角 $\phi$ やN値については、上記 $V_s$ と相関関係を持たせ、変数を削減することによって、作業の煩雑性を低減した。なお、履歴減衰 $H_{max}$ 、変相角 $\phi_p$ 、単位体積重量や細粒分含有率 $F_c$ については、確定値扱いとした。せん断波速度 $V_s$ 等との相関関係をもたせるための関係式<sup>10)</sup>は次のとおりとする。

a) せん断波速度 $V_s$ とN値の関係

$$G_m = \rho \cdot V_s^2 \quad (11)$$

ここに、 $\rho$ ：湿潤単位体積重量

$$G_m = 14,100N^{0.68} \quad (12)$$

ここに、 $G_m$ ：せん断弾性係数(kN/m<sup>2</sup>)

$N$ ：標準貫入試験のN値

b) N値とせん断抵抗角 $\phi$ の関係

$$D_r = 21[100 \cdot N / (\sigma_v' + 0.7)]^{0.5} \quad (13)$$

相対密度 $D_r$ とせん断抵抗角 $\phi$ の関係を、試験結果図<sup>10)</sup>より、次のとおり設定した。

- ・  $D_r \geq 100\%$  :  $\phi = 45^\circ$
- ・  $D_r < 100\%$  :  $\phi = (D_r/10) + 35$

ここに、 $N$ ：標準貫入試験のN値  
 $\sigma_v'$ ：有効上載圧力(kN/m<sup>2</sup>)  
 $D_r$ ：相対密度(%)

せん断波速度 $V_s$ から求めたN値から、相対密度 $D_r$ を求め、せん断抵抗角 $\phi$ と相関関係をもたせた。



図-8 メッシュモデル

表-4 FLIPモデルパラメタ

分類	モデルパラメタ	
動の変形特性	$G_{ma}$	せん断弾性係数( $\sigma_m' = \sigma_{ma}$ における値)
	$K_{ma}$	体積弾性係数( $\sigma_m' = \sigma_{ma}$ における値)
	$\phi_f$	内部摩擦角
	$h_{max}$	履歴減衰の上限値
液状化特性	$\phi_p$	変相角
	$w_1$	液状化特性全体を規定するパラメタ
	$p_1$	液状化特性の前半を規定するパラメタ
	$p_2$	液状化特性の後半を規定するパラメタ
	$c_1$	液状化発生の下限値を規定するパラメタ
	$S_1$	液状化の終局状態を規定するパラメタ

上式を用いてばらつきを考慮するケース毎に地盤物性の設定を行った(1検討シリーズ当たり20ケース)。また、 $V_s$ の設定に考慮したばらつきの空間分

布を設定するにあたり、既往の研究成果<sup>11),12),13)</sup>にならない山崎&篠塚のモデル<sup>13)</sup>である式(14)~(17)の式を用いて設定を行った。式(14)~(17)に加えて、式(18)~(21)を使用し空間分布を設定するため、まず、式(17)のパワースペクトルを0とする $k_{xu}$ 及び $k_{yu}$ を求めた。その後、 $\phi$ 及び $\psi$ の位相角を一様乱数によって、20通り程度ランダムに設定(0~ $2\pi$ )し、式(15)~(17)により変動成分を求め、各要素中心位置毎の $V_s$ の空間分布を求めた。

$$f(X_i, Y_i) = f_m + f(X_i, Y_i) \quad (14)$$

$$f(x_i, y_i) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} A_{kl} [\cos(\phi_{kl} + k_{xk}x_i + k_{yl}y_i) + \cos(\psi_{kl} - k_{yl}y_i + k_{xk}x_i)] \quad (15)$$

$$A_{kl} = \sqrt{2S(\bar{k})\Delta k_x \Delta k_y} \quad (16)$$

$$S(\bar{k}) = \sigma_b^2 \frac{d_x d_y}{4\pi} e^{-\left(\frac{d_x^2 k_x^2 + d_y^2 k_y^2}{4}\right)} \quad (17)$$

$$\Delta k_x = \frac{k_{xu}}{N_x} \quad (18) \quad \Delta k_y = \frac{k_{yu}}{N_y} \quad (19)$$

$$k_{xk} = k \Delta k_x \quad (20) \quad k_{yl} = l \Delta k_y \quad (21)$$

ここに、

- $A_{kl}$ ：確率変数の空間分布のスペクトル振幅
- $S(\bar{k})$ ：パワースペクトル
- $\Delta k_x, \Delta k_y$ ：水平、鉛直空間の波数増分
- $\Phi_{kl}, \Psi_{kl}$ ：0から $2\pi$ までに一様に分布するランダムな位相角
- $N_x, N_y$ ：水平方向、深さ方向の要素数
- $k_{xu}, k_{yu}$ ： $k_x-k_y$ 平面上の4分割波数(上向)
- $d_x, d_y$ ：水平、鉛直方向の相関距離
- $\bar{k} = (k_{xk}, k_{yl})$ ：波数ベクトル
- $k, l$ ：波数増分と波数間の係数
- $\sigma_b$ ：変動パラメタの標準偏差
- $x_i, y_j$ ：空間位置(要素中心)

上式を用いて、 $V_s$ のバラつきを考慮する原地盤層について、図-9に示すような「鉛直2m、水平2・4・8m」の相関距離に応じた設定を行った。

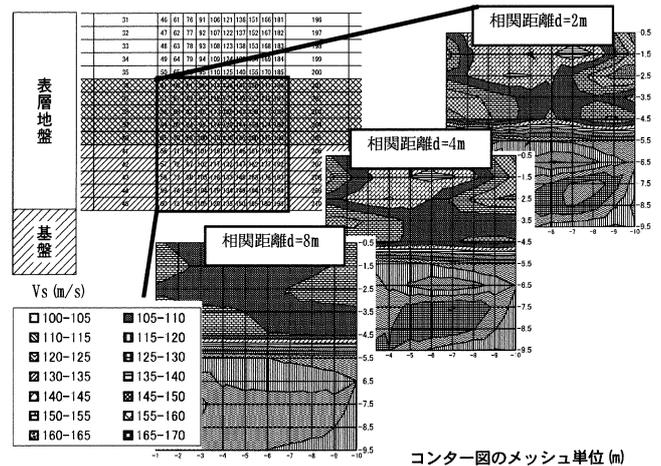


図-9 せん断波速度 $V_s$ の分布コンター図

### (3) 検討結果

2次元地震応答解析の実施にあたって、検討した解析ケースを以下に示す。入力地震動には、前述の1次元地震応答解析に用いた4波形のうち、釧路港波を用いることとした。

#### a) 解析モデルケースの設定条件

- ・ 相関距離；水平距離2, 4, 8m(鉛直2m固定)
- ・ 確率モデル位相角；20通り設定

#### b) FLIP 解析上の検討シリーズ

- ・ 入力加速度；25, 100gal
- ・ 液状化考慮；液状化考慮，未考慮

相関距離d=2m, 4m, 8mの場合の検討を実施し、その解析結果を表-5及び図-10に示す。

加速度及び変位の鉛直方向分布では、「液状化未考慮」の場合に、地盤物性の確定解析値とばらつき考慮の場合の解析結果平均値はほぼ一致する。これは、地盤のばらつきを正規分布でモデル化したためである。一方、「液状化考慮」の場合には、確定解析値を越える場合と越えない場合があるが、明確な傾向は確認できない。また、相関距離が長くなるほど、応答加速度及び変位において、変動係数(ばらつき)は小さくなる。

表-5 地表面最大応答値の平均値，変動係数の比較

応答値項目	基礎加速度25gal(0.25m/s <sup>2</sup> )				基礎加速度100gal(1.00m/s <sup>2</sup> )			
	液状化あり		液状化なし		液状化あり		液状化なし	
	加速度(m/s <sup>2</sup> )	変位(m)	加速度(m/s <sup>2</sup> )	変位(m)	加速度(m/s <sup>2</sup> )	変位(m)	加速度(m/s <sup>2</sup> )	変位(m)
固定解析値	0.4523	0.0147	0.3851	0.0037	0.4638	0.0644	1.4240	0.0386
d=2m 平均値	0.4086	0.0101	0.3587	0.0037	0.6031	0.0569	1.3786	0.0390
d=2m 変動係数	0.0436	0.2030	0.0045	0.0192	0.0607	0.0679	0.0080	0.0436
d=4m 平均値	0.4030	0.0093	0.3589	0.0037	0.5989	0.0554	1.3767	0.0390
d=4m 変動係数	0.0592	0.3969	0.0019	0.0182	0.0842	0.0559	0.0062	0.0348
d=8m 平均値	0.3998	0.0076	0.3584	0.0036	0.6126	0.0565	1.3737	0.0382
d=8m 変動係数	0.0536	0.2633	0.0017	0.0059	0.0465	0.0485	0.0038	0.0112

### 4. おわりに

1次元地震応答解析(SHAKE)については、地盤物性のばらつきを考慮し、MCSによる検討を行った結果の平均的な応答値と、地盤物性の平均値を用いて確定的に解析した結果が異なる場合があることが確認された。これは地震応答解析結果が地盤物性に対し複雑な挙動をすることに起因すると考えられる。

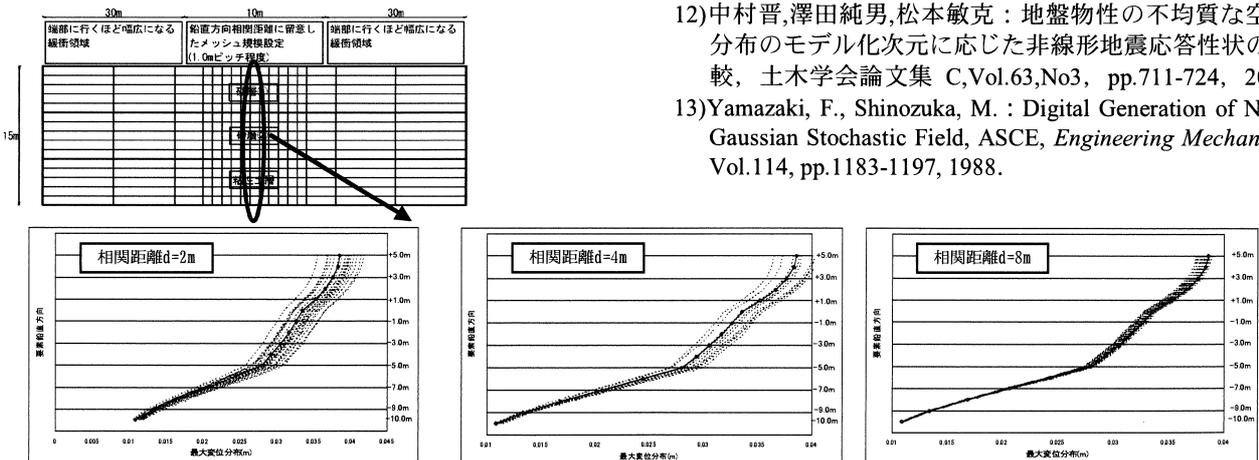


図-10 変位最大値分布(鉛直分布 実線-確定解析, 点線-ばらつき考慮)

また、既往の研究<sup>11),12)</sup>において「水平方向の地盤物性の相関距離」を考慮した2次元地震応答解析が実施されているが、本研究では、港湾域にて用いられることの多い地震応答解析「FLIP」を用いた同様の解析の検討可能性を確認した。なお、検討結果の妥当性検証や土留形式モデルでの検討も含め今後の課題と考える。

謝辞：本研究は、国土技術政策総合研究所、港湾信頼性設計法研究会において実施したものです。研究に当り座長の長尾室長をはじめ会員の皆様に大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(V耐震設計編), 2002.
- 3) 土質工学会技術普及委員会編：土質データのばらつきと設計, 土質工学会, 1988.
- 4) 土田孝, 小野憲司：数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用, 港湾技術研究所報告 Vol.27 No.4, pp127-143, 1988.
- 5) 宮田正史, 井合進, 一井康二：液状化による不同沈下の予測手法の開発, 港湾技術研究所資料 No.908, 1998.
- 6) B.Moro : The Full Monte, Risk Vol.8(Feb.), pp.57-58, 1995.
- 7) 松尾稔：地盤工学—信頼性設計の理念と実際—, 技報堂出版, pp.55-96, 1985.
- 8) 高橋佳宏, 國生剛治：地盤の1次元地震応答解析に与える地盤物性のバラツキの影響, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, 2001.
- 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29 No.4, pp.27-56, 1990.
- 10) 森田年一, 井合進, Hanlongliu, 一井康二, 佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法 港湾技術研究資料 No.869, 1997.
- 11) 田中博文, 沖村孝, 鳥居宣之：盛土の地震応答特性評価に地盤の空間的不均質性が及ぼす影響, 土木学会地震工学論文集, pp.1-8, 2005.
- 12) 中村晋, 澤田純男, 松本敏克：地盤物性の不均質な空間分布のモデル化次元に応じた非線形地震応答性状の比較, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.711-724, 2007.
- 13) Yamazaki, F., Shinozuka, M. : Digital Generation of Non-Gaussian Stochastic Field, ASCE, Engineering Mechanics, Vol.114, pp.1183-1197, 1988.