

強度の空間的ばらつきを考慮した 事前混合処理地盤の地震時変形解析

片山 遥平¹・秋本 哲平²・上野 一彦²・
笠間 清伸³・古川 全太郎³

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市 1534-1)
E-mail: youhei.katayama@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市 1534-1)

³ 正会員 九州大学大学院工学研究院社会基盤部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 九州大学伊都キャンパス)

各種の改良地盤は自然堆積地盤の不均質性や施工時の不均一性により大きな空間的ばらつきを有する。FLIP にモンテカルロシミュレーションを適用し、事前混合処理工法により改良された地盤の空間的ばらつきを考慮した地震時変形解析を行った。平均強度、変動係数、自己相関距離から対数正規分布に基づき空間的ばらつきを有する改良体要素の一軸圧縮強さを算出し、これより粘着力、初期せん断弾性係数、体積弾性係数を算出して入力値とした。本論文で得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1)改良地盤の平均強度に依らず適合率が約 67%あれば信頼度 100%で許容残留水平変位量を満足する。
(2)一軸圧縮強さが 100 kN/m² 未満の改良体要素を未処理土相当として扱うことで安全側の設定となる。
(3)本解析手法が事前混合処理工法に適用可能であることを確認した。

Key Words : *premixing method, spatial variability, seismic deformation analysis, Monte Carlo simulation, FLIP*

1. はじめに

自然堆積地盤は土質に大きな不均質性を有し、さらに地盤改良工事の施工における固化材の混合、締固めなどの不均一性も合わさり、改良後の地盤は各種地盤定数に大きなばらつきを生じることが分かっている¹⁾。このような背景により、地盤物性の空間的な不均質性を考慮した研究が数多く行われている。

土田・小野は、圧密沈下量の推定に必要な体積圧縮係数、圧密係数、圧縮指数および圧密降伏応力をばらつかせることで不均一地盤をモデル化し、モンテカルロシミュレーション(以下、MCS)により不同沈下量を予測する手法を開発した²⁾。佐竹・若井は、地盤の粘着力および内部摩擦角などをばらつかせた斜面安定解析および MCS を実施し、材料に均質を仮定することは設計照査上危険側となることを示している³⁾。笠間らは、浸透固化処理された地盤の一軸圧縮強さをばらつかせることで、粘着力、初期せん断弾性係数および体積弾性係数の空間的ばらつきをモデル化した地震時変形解析を実施し、適合率とケーソン上端部の残留水平変位量(以下、変位量)の関係について報告している⁴⁾。ここで適合率とは、

改良体要素のうち一軸圧縮強さ q_u が設計基準強度 q_{uck} を上回った割合のことであり、適合率と不良率には、適合率=100%-不良率の関係がある。

笠間らの手法⁴⁾は、改良体の強度のばらつきが問題となる各種地盤改良工法に適用可能である。本研究では、一般的な固化処理工法の一例として事前混合処理工法を選定し、これにより改良された地盤を対象に、空間的ばらつきを考慮した地震時変形解析を実施した。また、事前混合処理工法技術マニュアル⁵⁾(以下、事前混合マニュアル)において、必要支持力を満足するための適合率の目安は示されているが、許容変位量を満足するための適合率については示されていないため、変位量を基準とした必要適合率について検討した。

2. 解析概要

地震時変形解析のソルバーには、地震時の液状化による構造物被害予測プログラム FLIP ROSE ver.8.0.3(以下、FLIP)⁶⁾を使用した。図-1 に使用した FLIP 断面を、表-1 に地盤定数を示す。なお、本論文では FLIP のメッシュ

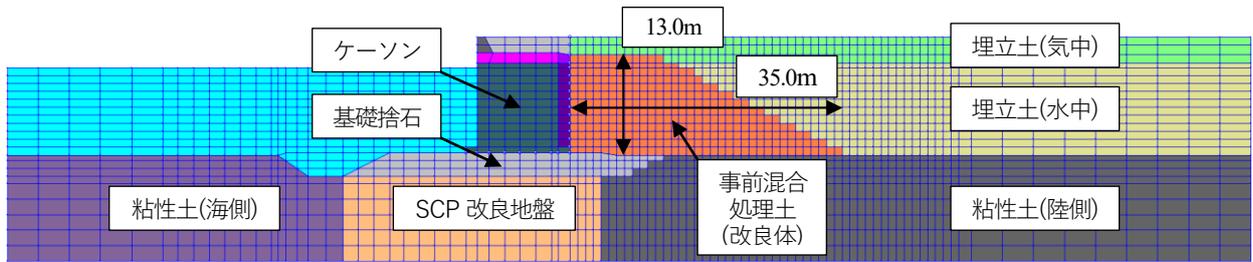


図-1 使用したFLIP断面

表-1 地盤定数

土質	単位 体積重量 γ_t kN/m ³	水中重量 γ kN/m ³	基準有効 拘束圧力 σ_{ma} kN/m ²	初期せん断 弾性係数 G_{ma} kN/m ²	体積 弾性係数 K_{ma} kN/m ²	ポアソン比 ν -	最大 減衰 h_{max} -	せん断強度 (粘着力) c kN/m ²	せん断 抵抗角 ϕ_f °	変相角 ϕ_p °	液状化パラメータ				
											S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
埋立土(水中)	-	10.0	63.0	79,380	207,000	0.33	0.24	0.0	36.0	28.0	0.005	6.27	0.50	0.93	2.68
埋立土(気中)	18.0	-	63.0	79,380	207,000	0.33	0.24	0.0	36.0	-	-	-	-	-	-
粘性土(海側)	17.0	7.0	143.0	74,970	195,500	0.33	0.2	0.0	30.0	-	-	-	-	-	-
粘性土(陸側)	17.0	7.0	143.0	74,970	195,500	0.33	0.2	0.0	30.0	-	-	-	-	-	-
基礎捨石	20.0	10.0	98.0	180,000	469,400	0.33	0.24	0.0	40.0	-	-	-	-	-	-
SCP改良地盤	19.4	9.4	167.7	155,200	404,700	0.33	0.23	0.0	40.2	-	-	-	-	-	-
事前混合処理土(改良体)	18.0	10.0	0.0	q_u より算出	q_u より算出	0.33	0.20	q_u より算出	36.0	-	-	-	-	-	-

データのことを断面と呼称する。この断面は地震時の土圧低減を目的として重力式護岸の裏込めを事前混合処理したもので、事前混合マニュアル（H20年版）に記載の断面の改良部のメッシュを細かくしたものである。なお最新版である令和元年版の断面はフーチングを削除した構造となっており、H20年版の方がより一般的な構造であると考えてこれを採用した。陸側は法線より100m、海側は60mの範囲を解析対象範囲とした。事前混合処理土（改良体）は要素数302、高さ13.0m、全体幅35.0m、面積304.4m²の台形状となっている。解析条件は2次元平面ひずみ条件であり、自重解析時は底面境界を固定、側方境界を鉛直ローラーとし、自由地盤部解析時は底面、側方境界ともに粘性境界とした。最終的には自由地盤部解析結果を境界条件として、断面全体の地震応答解析を実施した。図-2に使用した地震動データを示す。これは最大加速度544Gal、加振時間20秒のレベル2地震動である。フーリエスペクトルから読み取った卓越振動数が0.54Hzであることから、卓越周期は1.85秒である⁷⁾。

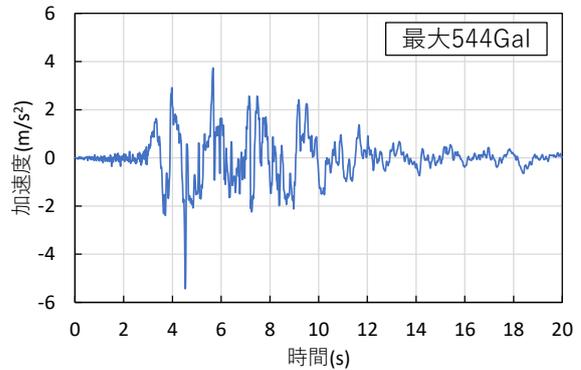


図-2 使用した地震動データ

入力しないが、これを変数とする粘着力 c (kN/m²)、初期せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m²)および体積弾性係数 K_{ma} (kN/m²)を、事前混合マニュアルに記載の次式よりそれぞれ算出してFLIPに入力した。

$$c = \frac{q_u}{2 \tan(45^\circ + \phi/2)} = \frac{q_u}{3.925} \quad (1a)$$

$$G_{ma} = 10^{0.669 \log(q_u) + 3.938} \quad (1b)$$

$$K_{ma} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{3 \cdot (1 - 2\nu)} \cdot G_{ma} \quad (1c)$$

ここに、 q_u ：要素ごとの一軸圧縮強さ(kN/m²)、 ϕ ：せん断抵抗角(=36.0°)、 ν ：ポアソン比(=0.33)である。

なお、初期せん断弾性係数と密度からせん断波速度を算出し、これと層厚から地盤の固有周期を求めることができる。今回の検討における改良地盤の固有周期の平均値は0.41~0.45秒となり、図-2に示す入力地震動の卓越周期とは一致しない。

(1) 改良地盤の空間的ばらつきのモデル化

改良地盤の空間的ばらつきを考慮するため、改良体各要素の一軸圧縮強さを対数正規分布に基づいて算出した。ここで、改良土の強度分布は正規分布に従う設定とするのが一般的⁸⁾であるが、正規分布では平均強度と変動係数の設定によっては一軸圧縮強さが負の値を取る要素が出現することがあるため、解析の都合上対数正規分布を採用した。なお工法の違いはあるが、深層混合処理工法により改良された地盤の一軸圧縮強さの確率分布は、正規分布、対数正規分布の両方に従うことが並河によって示されている⁹⁾。FLIPにおいては要素の一軸圧縮強さは

(2) 解析条件の設定

ケーソン上端部の許容変位量は事前混合マニュアルに準拠して1.0mとした。設計基準強度は、改良体強度を一樣にした解析で許容変位量1.0m未満を満足する値として、130kN/m²を設定した。平均強度 q_{uave} の算定にあたっては、次に示す対数正規分布の確率密度関数を用いた。

$$\text{適合率} = \int_{130}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln_std \cdot x} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \ln_ave}{\ln_std} \right)^2} dx \quad (2a)$$

$$\ln_ave = \ln \left(\frac{ave^2}{\sqrt{var+ave^2}} \right) \quad (2b)$$

$$\ln_std = \sqrt{\ln \left(\frac{1+var}{ave^2} \right)} \quad (2c)$$

$$var = std^2 \quad (2d)$$

$$std = ave \cdot cov \quad (2e)$$

ここに、 \ln_ave ：対数正規分布における平均強度(kN/m²)、 \ln_std ：対数正規分布における標準偏差(kN/m²)、 ave ：平均強度(kN/m²)、 std ：標準偏差(kN/m²)、 var ：分散、 cov ：変動係数である。

式(2a)～(2e)に適合率と変動係数を入力することで、逆算的に平均強度を算出することができる。適合率については事前混合マニュアルによると、支持力を根拠とするものではあるが、現場割増強度 η によらず不良率が25%程度を下回れば目標支持力を満足できるとあることから、暫定的に75%と設定した。変動係数については、管中混合固化処理工法技術マニュアル⁸⁾などを参考に、0.35とした。これらの数値より、平均強度174kN/m²($\eta=1.34$)を算出した。また、詳細は後述するが、144kN/m²($\eta=1.11$)と195kN/m²($\eta=1.50$)を加えて3通りの平均強度で解析を実施することとした。

地盤の空間的ばらつきをモデル化する際には、平均強度の他に、ばらつきの度合いを示す変動係数や、強度の空間的な自己相関を示す自己相関距離が必要となる。変動係数に関しては、事前混合マニュアルによると、0.4以下で比較的現場の混合状態がいい場合、0.8～1.0でばらつきが大きい場合とあることから、ばらつきの大小をモデル化するため、0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0の5通りとした。自己相関距離に関しては、議論の余地はあるが、笠間らの浸透固化処理工法の検討⁹⁾と同様に、鉛直方向を0.2m、水平方向を2.0mと設定した。

また、対数正規分布に基づいて各要素の一軸圧縮強さを計算する際、負の値を取ることはないが、平均強度と変動係数の設定によっては、一軸圧縮強さが1kN/m²以下や4,000kN/m²以上といった、事前混合処理工法では通常取りえない値となることがある。これは不自然であると考え、一軸圧縮強さの最小値、最大値をそれぞれ10kN/m²、1,000kN/m²と設定した。

表-2 解析ケース

平均強度 kN/m ²	変動係数 -	ケース	閾値 kN/m ²	ケース	閾値 kN/m ²	ケース	閾値 kN/m ²
144	0.2	1	-	16	50	31	100
	0.4	2		17		32	
	0.6	3		18		33	
	0.8	4		19		34	
	1.0	5		20		35	
174	0.2	6		21		36	
	0.4	7		22		37	
	0.6	8		23		38	
	0.8	9		24		39	
	1.0	10		25		40	
195	0.2	11		26		41	
	0.4	12		27		42	
	0.6	13		28		43	
	0.8	14		29		44	
	1.0	15		30		45	

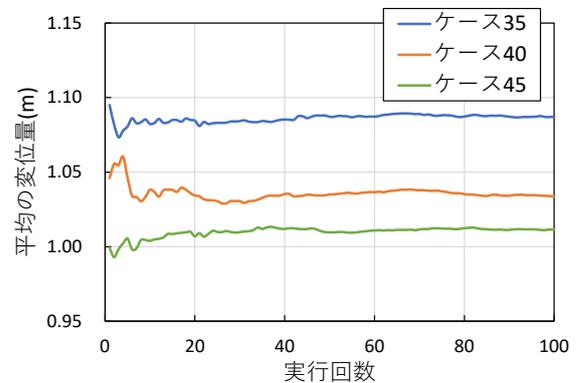
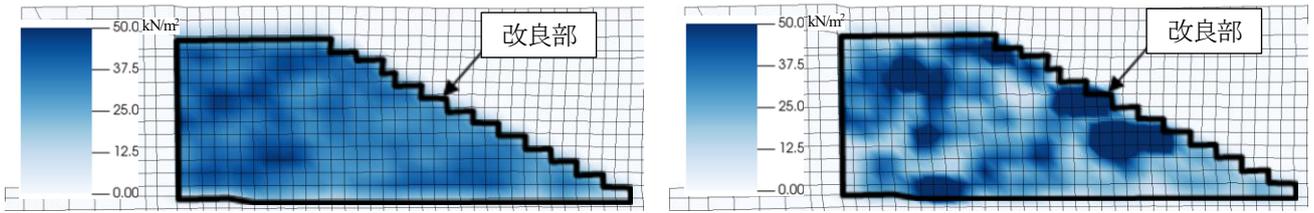


図-3 MCS100回での変位量の収束確認

ここで表-1に示したとおり、今回の検討では改良体要素に液状化パラメータ¹⁰⁾を入力していないが、これは一軸圧縮強さによらず液状化を起こさないことを意味しており、改良体の一軸圧縮強さが小さい値をとる場合は危険側の設定となる。笠間らの浸透固化処理土に関する検討⁹⁾では、設計基準強度未満の要素を未処理土相当の地盤として扱うことで、安全側の設定としている。これを参考にして、改良体要素の液状化を考慮しない場合は別に、所定の一軸圧縮強さを閾値として、その値未満の一軸圧縮強さを有する改良体要素を未処理土相当の地盤、すなわち表-1中の埋立土(水中)として扱うこととした。なお本断面では、液状化パラメータが入力されている埋立土(水中)のみが液状化の発生する可能性がある要素となる。事前混合マニュアルによると、一軸圧縮強さが50～100kN/m²以上であれば液状化による破壊ではなく引張り破壊を示すようになるとあるため、閾値を50kN/m²または100kN/m²と設定した。

表-2に解析ケースを示す。平均強度3通り、変動係数5通り、閾値3通りの合計45ケースとした。空間的な一軸圧縮強さのばらつきを有する断面をMCSによりケースごとに100個ずつ生成し、FLIPにて解析を実施した。



(a)変動係数 0.2, 変位量 0.92 m の断面 (変位量最小) (b)変動係数 1.0, 変位量 1.09 m の断面 (変位量最大)

図-4 ケース 1~5 における変位量最小・最大断面の粘着力分布の比較

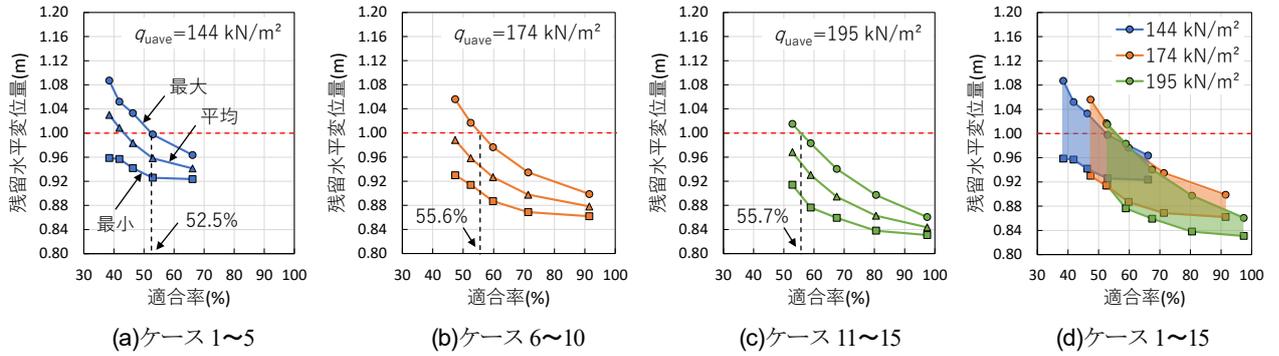


図-5 改良体要素の液状化を考慮しない場合の解析結果

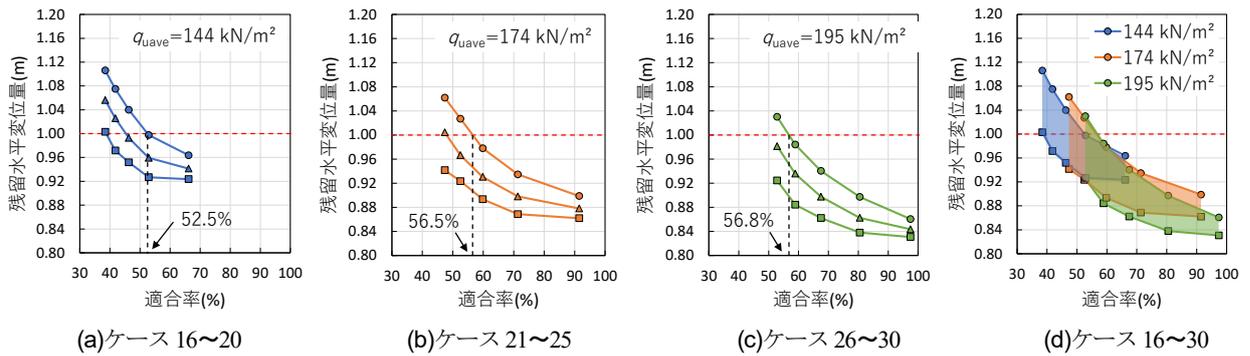


図-6 閾値を 50 kN/m² とした場合の解析結果

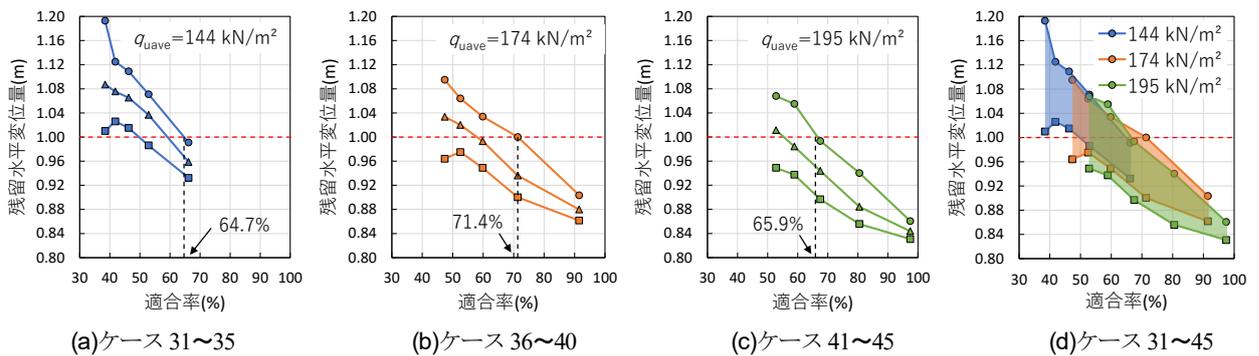


図-7 閾値を 100 kN/m² とした場合の解析結果

3. 解析結果

図-3 に FLIP 解析の実行回数とそのときの平均の変位量の関係の一例を示す。これは変位量のばらつきが最も大きかった変動係数 1.0, 閾値 100 kN/m² のグループ(ケース 35, 40, 45)であるが、これより 100 回の MCS で変

位量は十分収束することを確認した。

図-4 にケース 1~5 において変位量が最小, 最大であった断面の粘着力の分布図を示す。この図を見ると、変動係数が小さい場合は改良体の強度は概ね均一に分布しており、変動係数が大きい場合はばらつきの度合いが大きくなっていることが分かる。

(1) 改良体要素の液状化を考慮しない場合の解析結果

図-5に改良体要素の液状化を考慮しない場合(ケース1~15)の適合率と変位量の関係を示す。100断面における最大、最小および平均の変位量を示している。(a)~(c)を見ると、変動係数が小さい、すなわち適合率が大きいほど変位量が小さくなる傾向が確認できる。

ここで100断面のうち変位量が1.0m未満であった割合を変位合格率と称すると、平均強度が174 kN/m²のときに変位合格率が100%となる適合率は55.6%である。平均強度144 kN/m²とは、式(2a)~(2c)に入力する適合率を55.6%として算出した値になる。平均強度195 kN/m²は、現場割増強度を切り良く1.5とした場合の値である。

(d)は3通りの平均強度の最大、最小の変位量を一つのグラフに重ねた図であるが、変位量の取りうる範囲は概ね一致しており、変位量は平均強度(現場割増強度)に依らず適合率によって定まることがわかる。変位合格率が100%となるための必要適合率は、平均強度の低い順に52.5%、55.6%、55.7%となり、平均強度に依らず概ね等しい値が得られた。

しかし、一般に海上の地盤改良工事において許容されている一軸圧縮強さの不良率は15%~25%程度^{9,10)}であることを鑑みると、必要適合率が55%程度というのは非常に小さい値であると言える。これは前述のとおり、改良体要素の液状化パラメータを入力していないことにより、どれだけ小さな一軸圧縮強さであっても液状化しない危険側の設定になっていることが原因と考えられる。次節では閾値未満の改良体要素を未処理土相当の地盤として扱うケースについて説明する。

(2) 閾値を50 kN/m²とした場合の解析結果

図-6に閾値を50 kN/m²とした場合(ケース16~30)の解析結果を示す。必要適合率はそれぞれ52.5%、56.5%、56.8%であった。図-5と比較すると、適合率ごとの変位量はほとんど変わらないことが分かる。これは、今回の解析条件では50 kN/m²未満の改良体要素の割合が低いことが主な理由だと考えられる。最も割合が高い平均強度144 kN/m²、変動係数1.0のケースでも19.7%しかないため、変位量におよぼす影響が小さかったと考えられる。

(3) 閾値を100 kN/m²とした場合の解析結果

図-7に閾値を100 kN/m²とした場合(ケース31~45)の解析結果を示す。必要適合率はそれぞれ64.7%、71.4%、65.9%であった。図-6と比較すると変位量が増大していることが分かる。この結果から事前混合マニュアルに示されているとおり、一軸圧縮強さが50~100 kN/m²程度あれば地震時の変位抑制に大きく寄与することが分かる。

なお、一部のケースでは適合率が小さくなることで変位量の最小値が小さくなっている。これはばらつきの度

表-3 解析結果のまとめ

ケース	平均強度	変動係数	適合率	閾値	最小	平均	最大	変位	必要
	kN/m ²		%		kN/m ²	変位量	変位量		
1	144	0.20	66.2	-	0.92	0.94	0.96	100	52.5
2		0.40	52.9		0.93	0.96	1.00	100	
3		0.60	46.3		0.94	0.98	1.03	83	
4		0.80	41.8		0.96	1.01	1.05	37	
5		1.00	38.5		0.96	1.03	1.09	14	
6	174	0.20	91.5	-	0.86	0.88	0.90	100	55.6
7		0.40	71.4		0.87	0.90	0.93	100	
8		0.60	59.8		0.89	0.93	0.98	100	
9		0.80	52.5		0.91	0.96	1.02	99	
10		1.00	47.4		0.93	0.99	1.06	68	
11	195	0.20	97.4	-	0.83	0.84	0.86	100	55.7
12		0.40	80.5		0.84	0.86	0.90	100	
13		0.60	67.5		0.86	0.89	0.94	100	
14		0.80	58.9		0.88	0.93	0.98	100	
15		1.00	52.8		0.91	0.97	1.02	88	
16	144	0.20	66.2	50	0.92	0.94	0.96	100	52.5
17		0.40	52.9		0.93	0.96	1.00	100	
18		0.60	46.3		0.95	0.99	1.04	66	
19		0.80	41.8		0.97	1.03	1.08	12	
20		1.00	38.5		1.00	1.06	1.11	0	
21	174	0.20	91.5	50	0.86	0.88	0.90	100	56.5
22		0.40	71.4		0.87	0.90	0.93	100	
23		0.60	59.8		0.89	0.93	0.98	100	
24		0.80	52.5		0.92	0.97	1.03	96	
25		1.00	47.4		0.94	1.00	1.06	49	
26	195	0.20	97.4	50	0.83	0.84	0.86	100	56.8
27		0.40	80.5		0.84	0.86	0.90	100	
28		0.60	67.5		0.86	0.90	0.94	100	
29		0.80	58.9		0.88	0.94	0.98	100	
30		1.00	52.8		0.92	0.98	1.03	79	
31	144	0.20	66.2	100	0.93	0.96	0.99	100	64.7
32		0.40	52.9		0.99	1.04	1.07	1	
33		0.60	46.3		1.02	1.07	1.11	0	
34		0.80	41.8		1.03	1.08	1.13	0	
35		1.00	38.5		1.01	1.09	1.19	0	
36	174	0.20	91.5	100	0.86	0.88	0.90	100	71.4
37		0.40	71.4		0.90	0.94	1.00	99	
38		0.60	59.8		0.95	0.99	1.03	67	
39		0.80	52.5		0.98	1.02	1.06	16	
40		1.00	47.4		0.96	1.03	1.10	11	
41	195	0.20	97.4	100	0.83	0.84	0.86	100	65.9
42		0.40	80.5		0.86	0.88	0.94	100	
43		0.60	67.5		0.90	0.94	0.99	100	
44		0.80	58.9		0.94	0.98	1.06	79	
45		1.00	52.8		0.95	1.01	1.07	26	

合いが大きくなった結果、ケーソン背面下部などの変位抑制に大きく寄与するであろう箇所に、大きな一軸圧縮強さを有する要素が集中したことが理由と考えられる。

(4) 必要適合率の考察

表-3に解析結果のまとめを示す。改良体要素の液状化を考慮しない場合や閾値を50 kN/m²とした場合は危険側の設定となり、必要適合率は平均でそれぞれ54.6%、55.3%となった。閾値を100 kN/m²とした場合は安全側の設定となり、必要適合率は平均で67.3%となった。本研究の解析条件においては、第二章の二節に示した支持力を基準とする場合の適合率(75%)よりも変位を基準とした必要適合率の方が若干低くなる結果となり、構造形式や性能を規定する値(例えば支持力、変位量、沈下量など)およびその許容値に応じて必要適合率を決定する必要がある可能性が示された。

実務上は閾値を 100 kN/m^2 として解析を実施するのが安全側となるため妥当だと思われるが、繰返し非排水三軸試験などを実施し、一軸圧縮強さに応じた液状化パラメータを適切に設定することができれば、必要最小限の安全性を見込んだ必要適合率を設定でき、経済性の向上につながると思われる。

4. おわりに

事前混合処理工法により重力式護岸の裏込めを改良した FLIP 断面を用いて、一軸圧縮強さの空間的ばらつきを考慮した地震時変形解析を実施した。検討の結果、以下の成果が得られた。

- 1) 適合率と変位量の関係は平均強度に依らず概ね一致し、適合率のみで変位量を評価できる。適合率が 67%程度あれば変位合格率 100%を達成できる。ただし、改良体要素の強度分布が対数正規分布に従うこと、平均強度が 144 kN/m^2 以上であることが前提条件である。
- 2) 事前混合処理工法においては、改良体の一軸圧縮強さが $50 \sim 100 \text{ kN/m}^2$ 程度あれば地震時の変位抑制効果を発揮する。
- 3) 一軸圧縮強さが 100 kN/m^2 未満の改良体要素を未処理土相当として扱うことで、許容変位量を満足するための必要適合率を安全側で設定できる。
- 4) 本手法が事前混合処理工法に適用可能であることを確認した。

なお本論文で示した数値は、断面や各種の解析条件によって変わりうることに留意されたい。例えば、継続時間のより長い地震動や、改良地盤の固有周期と一致する卓越周期を持つ地震動を入力する場合などは、より大きな適合率が必要となる可能性がある。

今後は、様々な工種、断面で検討を実施し、適用範囲を拡大していくつもりである。また、本論文で示した解析手法を各種固化処理工法による地盤改良工事の事後調査に適用することを考えている。具体的には、事前に作成した FLIP 断面で空間的ばらつきを考慮した地震応答解析を実施し、適合率と変位量もしくはその他の指標の関係を求めておく。この解析結果より品質評価のための簡易チャート図を作成し、事後調査で得られた適合率をプロットすることで、合否判定を行うといったものである。ただし本手法は、事後調査で得られた改良体の一軸圧縮強さの確率分布が対数正規分布に従うことが前提条件である。また、実地盤の真の適合率を求める必要もあり、これは不可能であることから、事後調査のサンプリング数を考慮して適合率に安全係数を見込むような手法の構築が必要となる。

REFERENCES

- 1) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 786-787, 2018. [The Ports & Harbours Association of Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, pp. 786-787, 2018.]
- 2) 土田孝, 小野憲治: 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, 第 27 巻, 第 4 号, pp. 123-200, 1988. [Tsuchida, T. and Ono, K.: Evaluation of differential settlements with numerical simulation and its application to airport pavement design, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 27, No.4, pp. 123-200, 1988.]
- 3) 佐竹亮一郎, 若井明彦: 材料の不均質性が斜面の安定性に及ぼす影響に関する解析的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 14, No. 2, pp. 95-109, 2019. [Satake, R. and Wakai, A.: Reliability analysis in uncertainty of slope stability influenced by spatial heterogeneity in geotechnical materials, *Japanese Geotechnical Journal*, Vol. 14, No. 2, pp. 95-109, 2019.]
- 4) 笠間清伸, 西田啓介, 古川全太郎, 秋本哲平, 堤彩人, 片山遥平: 地盤定数の不均一性を考慮した浸透固化処理地盤の地震時変形解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 78, No. 2, pp. I_901-I_906, 2022. [Kasama, K., Nishida, K., Furukawa, Z., Akimoto, T., Tsutsumi, A. and Katayama, Y.: Seismic deformation analysis of ground improved by permeation grouting method considering the spatial variability of soil parameter, *Journal of JSCE, Special Issue(Ocean Engineering)*, Vol. 78, No. 2, pp. I_901-I_906, 2022.]
- 5) 一般財団法人沿岸技術研究センター: 事前混合処理工法技術マニュアル (改訂版), pp. 163, 2008. [Coastal Development Institute of Technology: *Jizenkongousyorikouhou Gijutsu manyuuru(Kaiteiban)*, pp. 163, 2008.]
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Report of Port and Harbour Research Institute*, Vol. 29, No. 4, pp 27-56, 1990.
- 7) 菅野高弘, 三藤正明, 及川研: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察 (その 6) ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験, 港湾技研資料 No. 813, 1995. [Sugano, T., Mitoh, M. and Oikawa, K.: Mechanism of damage to port facilities during 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (Part 6) Experimental study on the behavior of caisson-type quay wall during earthquake using underwater shaking table, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport, Japan*, No. 813, 1995.]
- 8) 一般財団法人沿岸技術研究センター: 管中混合固化処理工法技術マニュアル (改訂版), pp. 18, 2008. [Coastal Development Institute of Technology: *Kanyuukongoukokasyorikouhou Gijutsu manyuuru(Kaiteiban)*, pp. 18, 2008.]
- 9) 並河努: 強度の確率分布がセメント改良柱の一軸圧縮強さに与える影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 68, No. 4, pp. 695-706, 2012. [Namikawa, T.: Effect of probability distribution of strength on unconfined compression strength of full scale column, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C, Geosphere Engineering*, Vol. 68, No. 4, pp. 695-706, 2012.]
- 10) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 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ータの簡易設定法, 港湾技研資料 No. 869, 1997. [Morita, T., Iai, S., Liu, H., Ichii, K. and Sato, Y.: Simplified

method to determine Parameter of FLIP, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport, Japan*, No. 869, 1997.]

Kuukouniokeru Shinsoukongousyorikouhou Gijutsu-manyuaru(Kaiteiban), pp. 156-157, 2018.]

- 11) 一般財団法人沿岸技術研究センター：港湾・空港における深層混合処理工法技術マニュアル（改訂版），pp. 156-157, 2018. [Coastal Development Institute of Technology: *Kouwan &*

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

SEISMIC DEFORMATION ANALYSIS OF GROUND IMPROVED BY PREMIX-ING METHOD CONSIDERING THE SPATIAL VARIABILITY OF STRENGTH

Youhei KATAYAMA, Teppei AKIMOTO, Kazuhiko UENO,
Kiyonobu KASAMA and Zentaro FURUKAWA

The improved ground has a large spatial variability due to the spatial variability of naturally deposited ground and construction. A seismic deformation analysis considering the spatial variation of the premixing treated ground is conducted by Monte Carlo simulation using FLIP. The unconfined compressive strength of the improved elements with spatial variability was calculated from the mean strength, coefficient of variation, and autocorrelation distance based on a log-normal distribution, from which the cohesion, initial shear modulus, and bulk modulus were calculated as input values. The main conclusions of this paper are as follows,

- (1) The allowable residual horizontal displacement is satisfied with 100 % of reliability when the percent defective is less than about 33 %, regardless of the mean strength of the improved elements.
- (2) The improved elements with unconfined compressive strength of less than 100 kN/m² are treated as equivalent to untreated soil, which is on the safe side analysis for residual displacement after earthquake.
- (3) This analysis method can be applied to any type of solidification ground improvement.