

地盤情報の不確実性を考慮した液状化リスク分析に関する研究

笠間清伸¹

九州大学大学院工学研究院社会基盤部門

概要：本研究では、固化処理地盤の地盤物性の不均質性を考慮した非線形地震応答解析によるモンテカルロ・シミュレーションから得られた液状化確率をもとに、地震外力の地域特性や不確実性、ならびに局所的な液状化に起因する経済損失を考慮した固化処理地盤の液状化リスク分析手法の提案を行った。さらに、液状化リスク指標に基づき福岡地域を想定した固化処理地盤の性能評価を行った。

1. はじめに

液状化対策工法の一つとして、事前混合処理工法¹⁾や浸透固化処理工法²⁾のように、軟弱地盤の支持力増加や砂質地盤の液状化対策などを目的として、固化材の混合や薬液の注入により地盤改良を行う工法が開発された。しかし、これらの地盤改良工法による固化処理地盤は、固化材の混合の不均一性および対象地盤の土質の不均質性などの理由により、自然堆積地盤に比べてせん断弾性係数や液状化強度などの地盤諸係数に大きな空間的なばらつきを有することが報告されている³⁾。このような固化処理地盤が有する地盤物性の空間的なばらつきによって、地震時に局所的な液状化やせん断破壊が生じ、地盤の支持力や破壊モードに影響すると予想される。

そこで本節では、地盤物性の空間的なばらつきを考慮した地盤の数値解析法と、リスク指標を用いた地盤の液状化対策の性能評価法を統合して、固化処理地盤の液状化リスクを評価した事例を紹介する。詳しい内容は、参考文献⁴⁾を参照していただきたい。最初に、地盤物性に空間的なばらつきを有する固化処理地盤で生じる局所的な液状化を評価するために、地盤のせん断波速度と液状化強度の空間的なばらつきを考慮した非線形地震応答解析を用いてモンテカルロ・シミュレーションを行った。その結果を用いて地震外力の地域特性や不確実性、ならびに液状化に起因する経済損失を考慮した液状化リスク分析を行った。さらに、提案手法を用いて、液状化リスク指標に基づき福岡地域を想定した固化処理地盤の性能評価を行った。

2. 液状化リスク分析における解析フロー

図1に示す液状化リスク分析フローに従って、福岡地域を対象に、固化処理地盤の液状化リスク分析を行った。液状化リスク R は、液状化の発生確率を P 、液状化に起因する被害額の大き

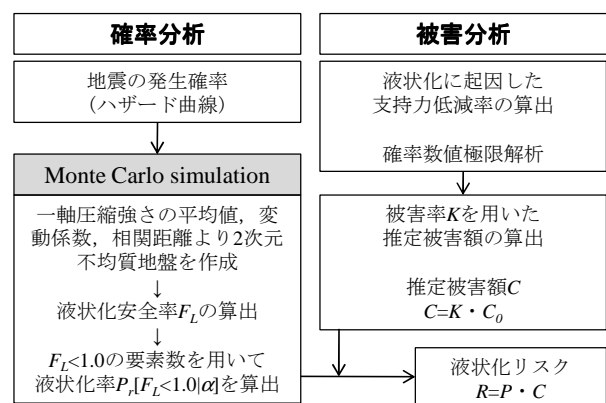


図1 液状化リスク分析フロー

さを C とし、式(1)のように定義した。

$$R = P \times C \quad (1)$$

液状化の確率分析では、対象地域における地震外力 α の年超過確率 P_α を表すハザード曲線から、地震の発生確率 $p(\alpha)$ を地震により計算した。

$$p(\alpha) = -\frac{dP_\alpha}{d\alpha} \quad (2)$$

図2に、石川⁵⁾が提案した東京、大阪および福岡の地震ハザード曲線を示す。地震ハザード曲線とは、地震外力の大きさ（最大入力加速度 α ）とその年超過確率 P_α の関係を示すものである。同じ最大基盤加速度で比較した場合には、福岡と東京における年超過確率はワンオーダー程度異なる。このハザード曲線を用いることで、地震の不確実性や地域特性を考慮したリスク分析が可能となる。さらに、次式により液状化の年間発生確率 P を算出した。

$$P = P_r[F_L < 1.0|\alpha] \cdot p(\alpha) \quad (3)$$

ここで、 $P_r[F_L < 1.0|\alpha]$ は地震外力 α が発生した条件下での液状化の発生確率である。一般に、地震外力 α と条件付き液状化発生確率 $P_r[F_L < 1.0|\alpha]$ の関係は、フラジリティ曲線と呼ばれる。

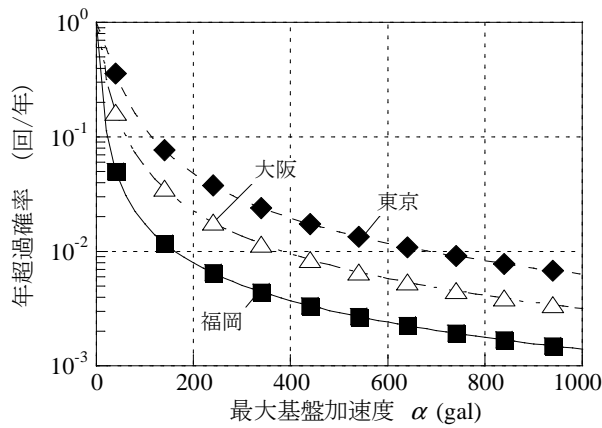


図2 地震ハザード曲線

被害分析では、液状化地盤上の構造物が全壊したときの最大被害額 C_0 を基準にして、その被害の程度を表す被害率 K を乗じることで、次式のように被害額 C の評価を試みた。

$$C = K(P_r[F_L < 1.0|\alpha]) \cdot C_0 \quad (4)$$

本報告書では、液状化率と被害率の定量化関係は、液状化後の地盤を剛塑性体でモデル化し確率数値極限解析を通して得られた研究成果⁶⁾を利用した。図3に、液状化率 $P_r[F_L < 1.0|\alpha]$ と被害率 K の関係を示す。液状化率が0.1%と非常に小さい条件でも、被害率が増加するのは、構造物に作用する水平慣性力に起因して支持力が低下するためである。また、液状化率が0.1から10%にかけて増加すると、被害率は急激に増加した。液状化率と被害率の関係を双曲線近似した回帰曲線を表1にまとめた。

被害率の計算では、最大入力加速度 α と得られる液状化率 $P_r[F_L < 1.0|\alpha]$ から表1に示す回帰曲線より被害率を計算し、式(5)より期待損失額 R を算出した。

$$R = P_r[F_L < 1.0|\alpha] \cdot p(\alpha) \cdot K(P_r[F_L < 1.0|\alpha]) \cdot C_0 \quad (5)$$

以上のように、確率分析と被害分析の両方で液状化率を共通な指標として用いるのが特徴である。

3. 液状化リスク分析結果

図4に福岡地域を対象とした場合の固化処理地盤の液状化リスク曲線を示す。リスク曲線とは、縦軸に対象地域での地震の年超過確率 P_α 、横軸に液状化に起因した期待経済損失額 C からなる曲線である。ただし、本報告では、横軸を期待損失率（被害率と同値）とし、最大被害額 C_0 に対する損失割合として正規化して示した。

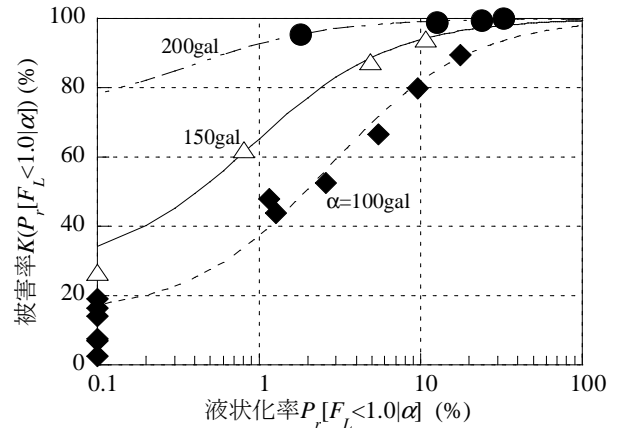


図3 地震時の破壊形状の違いによる影響

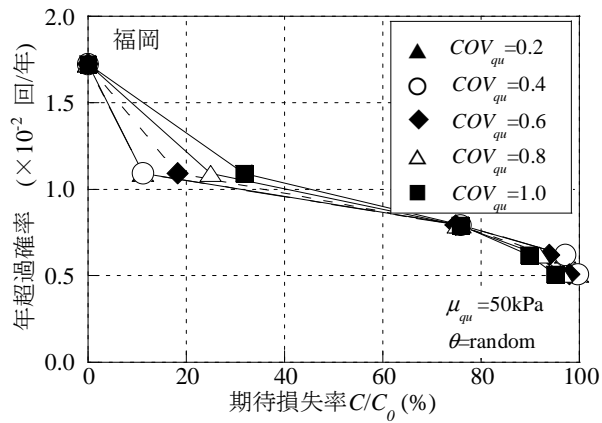
表1 液状化率と被害率の回帰曲線

入力加速度	被害率 $K(P_r[F_L < 1.0 \alpha])$ (%)	相関係数
100gal	$K = x/(0.0313 + 0.0116 \times x) + 14$	0.9832
150gal	$K = x/(0.0124 + 0.0130 \times x) + 27$	0.9989
200gal	$K = x/(0.0127 + 0.0357 \times x) + 72$	0.9998

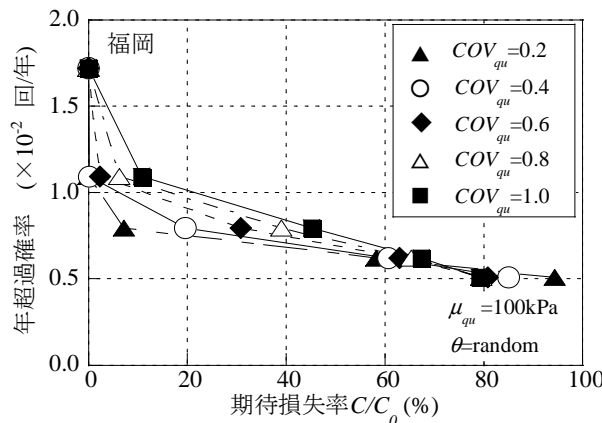
x: 液状化率 $P_r[F_L < 1.0|\alpha]$ (%)

図4に示す液状化リスク曲線は、右下がりの分布であり、年超過確率が小さくなるほど、期待損失率が大きく増加した。平均強度 100kPa の固化処理地盤では、年超過確率が 1.5×10^{-2} 回/年以上の地震を想定した際、大きな被害は発生しないと判定される。一方で、年超過確率が 0.5×10^{-2} 回/年以下の地震を想定した際、期待損失率が80%以上となり、ほぼ全崩壊すると予想できる。また、強度のばらつきの影響に着目すると、一軸圧縮強さの変動係数が大きいほど、期待損失率が大きくなった。平均強度 100kPa の固化処理地盤に年超過確率が 1.0×10^{-2} 回/年(再現期間 100年)の地震が作用することを想定すると、ばらつきの非常に大きな $COV_{qu} = 1.0$ では期待損失率 21%となったが、ばらつきの小さい $COV_{qu} = 0.2$ では被害を受けるリスクは非常に小さい。

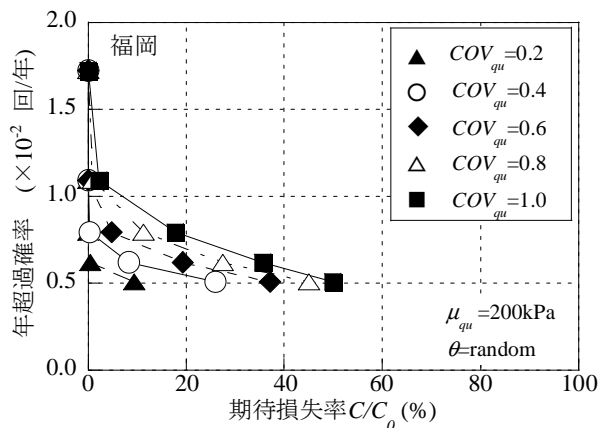
式(5)に基づいた液状化リスク R は、図4に示されるリスク曲線上の年超過確率と被害額の間を積分する(つまり、リスク曲線と縦軸・横軸で囲まれる面積を求める)ことで、1年間に期待される被害額(以降、年間液状化リスクとよぶ)として計算できる。図5に、一軸圧縮強さの変動係数と年間液状化リスクの関係を示す。図中には、年間液状化リスクの平均値と標準偏差より計算した90%信頼区間を示した。年間液状化リスクは、一軸圧縮強さの変動係数が大き



a) 一軸圧縮強さ $\mu_{qu}=50\text{kPa}$



b) 一軸圧縮強さ $\mu_{qu}=100\text{kPa}$



c) 一軸圧縮強さ $\mu_{qu}=200\text{kPa}$

図4 液状化リスク曲線

くなるにつれて増加し、その増加率は、平均強度が高いほど大きくなった。たとえば、平均強度 50kPa の地盤では、変動係数の影響による年間液状化リスクの差は、ほとんど生じなかった。しかし、平均強度 200kPa の地盤では、最大で 7.2 倍の差が生じた。また、年間液状化リスクは、平均強度が増加すると、大きく低減した。変動係数 $COV_{qu}=1.0$ の年間液状化リスクを比較すると、200kPa の固化処理地盤は、平均強度 100kPa

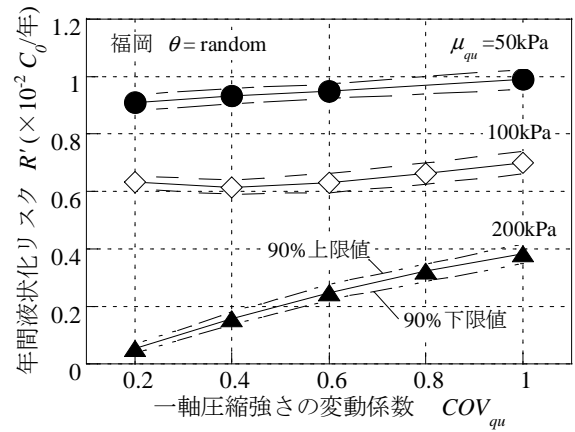


図5 年間液状化リスクと一軸圧縮強さの変動係数

の固化処理地盤に比べて、約 44% の年間液状化リスクを低減することができる。

4. 実地盤への適用のための統計的処理

本節では、提案した液状化リスク分析手法を表 2 で示す実際に施工された固化処理地盤に適用した。表 2 は、沿岸開発技術研究センターが調査し、測定した実施工された固化処理地盤における一軸圧縮強さの統計値や施工条件である。三つの固化処理地盤をそれぞれ Site 1、Site 2 および Site 3 とよぶことにする。Site 1 は、固化材添加率が 7.5% と大きいため平均強度も大きく、強度の変動係数も他の地盤に比べて小さい。Site 2 は、平均強度が 360kPa と液状化を防止するには十分な強度を有するが、変動係数が極めて大きい。Site 3 は、平均強度が最も小さく、変動係数も比較的大きな地盤である。

事前混合処理工法技術マニュアルを参考に得た一軸圧縮強さの統計値と液状化強度の関係をj用いて、液状化強度の空間的ばらつきを推定した。実施工された固化処理地盤の液状化強度の平均値および変動係数を得るためには、原位置でサンプリングされた供試体を用いて実地された一軸圧縮強さに関する統計値を用いて計算することになる。しかし、サンプリングされた供試体を用いた一軸圧縮試験から得られた一軸圧縮強さのばらつきは、1) 地盤が有する本質的な空間的ばらつき、2) 一軸圧縮試験が有する実験誤差、3) 統計的な推定誤差などを含む。したがって、計測された一軸圧縮強さの変動係数 COV_{qu0} は、以下のように 3 つの成分で構成される。

$$COV_{qu0}^2 = COV_{qu}^2 + COV_m^2 + COV_n^2 \quad (6)$$

表2 固化処理砂地盤における一軸圧縮強度の統計値

固化処理工法	固化材	セメント 添加率	養生日数	含水比 w (%)	標本数 n	平均値 (kPa)	COV_{qu0}
事前混合処理	SP	7.5%	91日	6.5	32	661	0.470
	SP	3%	28日	9.4	13	360	0.990
	SP	4%	28日	11.8	25	120	0.750

SP: 高炉スラグセメントB種

表3 一軸圧縮強さの統計値に基づく繰返しせん断強度比 R

	Site 1	Site 2	Site 3
セメント添加率	7.5%	3%	4%
標本数	32	13	25
平均一軸圧縮強度 (kPa)	661	360	120
本質的な空間的ばらつき (COV_{qu})	0.426	0.867	0.685
観測値のばらつき (COV_{qu0})	0.470	0.990	0.750
強度試験における偶発誤差* (COV_m)	0.150	0.150	0.150
統計的推定誤差 (COV_n)	0.083	0.275	0.150
回帰式の不確定性に起因した系統誤差 (COV_b)	0.410	0.410	0.410
平均繰返しせん断強度比** R_l	1.893	1.140	0.540
繰返しせん断強度比 R の変動係数 COV_R	0.591	0.959	0.798

* 一軸圧縮強度における偶発誤差 $COV_m = 0.15$

** $R_l = a \cdot q_u + b : a = 0.0025, \bar{b} = 0.24, COV_b = 0.410$

表4 想定した地震動の大きさ

再現期間	50年*	75年*	100年*	300年
年超過確率(回/年)	0.023	0.014	0.010	0.003
最大基盤加速度(gal)	85**	130**	160**	443**

* レベル1地震動を想定

** 石川⁵⁾のハザード曲線より算出

*** 福岡地域防災計画を参照

ここで、 COV_{qu} は一軸圧縮強さの本質的な空間的ばらつきをあらわす変動係数、 COV_m は実験誤差に起因する変動係数、 COV_n は統計的推定誤差に起因する変動係数である。一軸圧縮試験の実験誤差は、三軸試験などに比べて大きいといわれている。たとえば、土田・湯⁷⁾は、三軸圧縮試験の実験誤差が $COV_m = 0.05$ であるのに対して、一軸圧縮強さの実験誤差は、 $COV_m = 0.15$ 程度であると報告した。また、統計的推定誤差は、標本数が増加すれば小さくなり、確率統計論の立場から式(7)が提案される。

$$COV_n = COV_{qu} / \sqrt{n} \quad (7)$$

ここで、 n は、標本数である。したがって、式(6)と式(7)から一軸圧縮強さの本質的な空間的ばらつきを表す変動係数は、以下の式で計算できる。

$$COV_{qu}^2 = \frac{COV_{qu0}^2 - COV_m^2}{1 + 1/n} \quad (8)$$

式(8)を用いることで、現位置でサンプリングされた供試体を用いて得られた一軸圧縮強さの統計値から、一軸圧縮強さの実験誤差および統計的推定誤差を考慮し、固有の空間的ばらつきを計算できる。さらに一軸圧縮強さから液状化強度を間接的に推定する回帰式の不確定性(バイアス)を考慮する必要がある。本報告では、一軸圧縮強さ q_u と液状化強度 R の関係を、以下の式のように表現した。

$$R = R_l = a \cdot q_u + b \quad (9)$$

ただし、 $a = 0.0025$ の固定変数とし、 b は実験値から平均値 $\mu_b = 0.24$ 、変動係数 $COV_b = 0.410$ の確率変数とした。一軸圧縮強さの本質的な空間的ばらつき COV_{qu} と回帰式の変動係数 COV_b

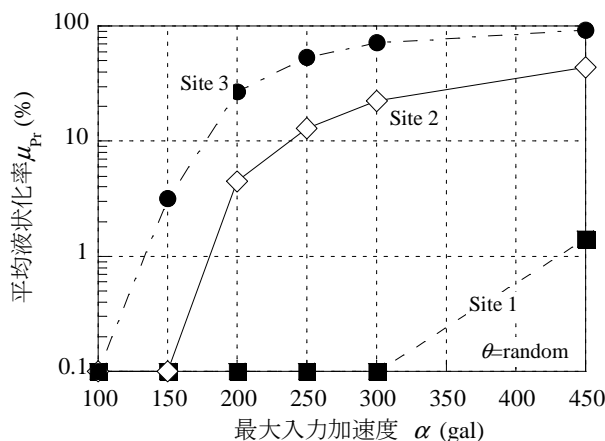


図6 平均液状化率と最大入力加速度

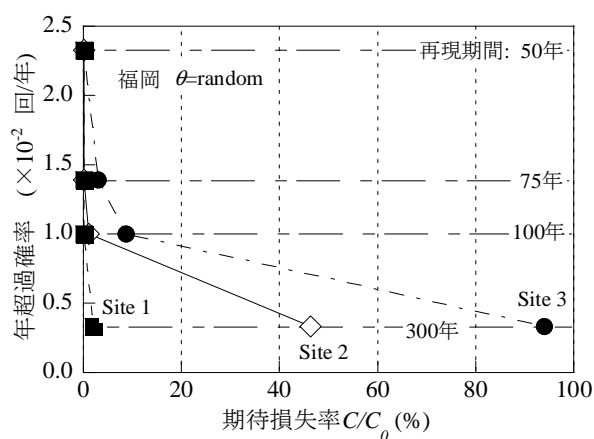


図7 年超過確率と期待損失率

から、液状化強度の変動係数 COV_R を以下の式で算定した。

$$COV_R = \sqrt{COV_{qu}^2 + COV_b^2} \quad (10)$$

式(6)~式(10)と表2に示す統計値を用いて計算した一軸圧縮強さ q_u と繰返しせん断強度 R の統計値を表3に示す。ここで、一軸圧縮試験が有する実験誤差 COV_m は、0.15とした。最終的に得られた空間的ばらつき COV_{qu} は、一軸圧縮試験の偶発誤差と推定誤差を考慮したにもかかわらず比較的大きな値を示した。推定した繰返しせん断強度比の平均値は、固化材添加率が増加するとともに増加する傾向にある。しかしながら、その変動係数は、固化材添加率の増加とともに減少する傾向にあるものの、推定された変動係数 0.591~0.959 は、自然堆積地盤のせん断強度に比べて大きな空間的ばらつきの程度を示した。

表4には、事例解析に用いた4種類の設計用想定地震動の大きさを示す。本報告では、地震動の波形の影響は考慮せず、地震動の大きさのみに着目した。レベル1地震動に相当する地震動の大きさとして、再現期間を50, 75, 100年の地震動を想定し、図2に示す福岡のハザード曲線を用いて、対応する地震動の大きさを決定した。また、レベル2地震動に相当する地震動の大きさとして、福岡県地域防災計画⁸⁾を参考に、最大入力加速度443galと設定した。

5. 実地盤のリスク評価

表3で得られた実験誤差および統計的推定誤差を考慮した固化処理地盤固有の一軸圧縮強さの平均値と変動係数を入力定数として、得られた平均液状化率と最大入力加速度の関係を、図6に示す。Site 1は、最大入力加速度が443gal(レベル2地震動に相当)の時も、液状化率1.4%と

非常に小さい値となり、非常に安定した地盤であった。Site 2とSite 3は、130gal以上(再現期間75年以上)の地震動が発生した際、わずかな液状化の発生確率が予想された。たとえば、Site 3は、160gal(再現期間100年)の地震動が発生した際、液状化率が7.92%と大きな値をとり、液状化による損失が予想された。

さらに、図6に示すフラジリティ曲線と、図2に示す福岡のハザード曲線ならびに図3と表1に示す被害分析結果を用いて計算した液状化リスク曲線を、図7に示す。年超過確率が 2.3×10^{-2} 回/年(再現期間50年)程度では、どの固化処理地盤でも期待損失率は小さく、ほぼ被害は受けない結果となった。ただし、年超過確率が 0.3×10^{-2} 回/年(再現期間300年、福岡でのレベル2地震動の大きさに想定)程度では、Site 3で期待損失率94%と予想され、ほぼ全崩壊となった。しかしながら、同条件においてSite 1の期待損失率は0.2%と小さな値となり、非常にリスクの低い安全な固化処理地盤であることがわかった。

6. まとめ

地盤物性の空間的ばらつきを考慮した地盤の非線形地震応答解析と、リスク指標を用いた地盤の性能評価法を統合した液状化リスク分析手法を用いて、福岡地域を想定した固化処理地盤の安全性評価を行った。得られた結論を以下に示す。

1) 固化処理地盤の被害率は、最大入力加速度が小さいときほど、一軸圧縮強さのばらつきに大きく影響を受ける。特に、液状化率が10%まで増加すると被害率が急激に増加するため、一軸圧縮強さの変動係数が固化処理地盤の期待損失率に与える影響は大きい。

2) 年間液状化リスクは、平均一軸圧縮強さを増加させることで大きく低減する。たとえば、

処理地盤の平均一軸圧縮強さを 100kPa から 200kPa に改良すれば、年間液状化リスクを、約 44% 低減できる。ただし、平均一軸圧縮強さが高い固化処理地盤ほど、一軸圧縮強さの変動係数の影響を大きく受けるため、強度のばらつきを最小限に抑えることも重要である。

3) 実際に施工された固化処理地盤の事例解析により、固化材添加率 4.0% である平均強度が小さく強度ばらつきが大きい固化処理地盤では、再現期間 100 年の地震動を想定した際、最大 160gal の地震動が発生し、地盤全体の 7.9% に局所的な液状化が発生すると判定される。そのとき、予想される経済損失額は最大損失額の約 8% である。また、福岡県地域防災計画で想定される最大地震動 443gal が発生した場合も、固化材添加率 7.5% である平均強度が大きく強度ばらつきが小さい固化処理地盤は、ほぼ被害を受けずに機能を保持することができると判断される。

今後は、地盤の液状化に伴って生じる物的損失、人的損害および営業損失など様々な被害形態を網羅して被害分析を行う必要がある。

参考文献

- 1) Zen, K., Yamazaki, H., Yoshizawa, H. and Mori, K.: Development of Premixing Method against Liquefaction, Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.461-464, 1992.
- 2) Yamazaki, H., Hayashi, K. and Zen, K.: New Liquefaction Countermeasure Based on Pore Water Replacement, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.4, pp.2741-2744, 2006.
- 3) Larsson, S., Stille, H. and Olsson, L.: On horizontal variability in lime-cement columns in deep mixing, Geotechnique, Vol.55, No.1, pp.33-44, 2005.
- 4) 片岡 範夫, 笠間清伸, 善 功企, 陳 光斉: 地盤物性に空間的不均質性を有する固化処理地盤の液状化リスク分析, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No.1, pp.119-129, 2011.
- 5) 石川裕: 確率論的想定地震と低頻度巨大外力評価への応用に関する研究, 京都大学学位論文, 1998.
- 6) 忽那惇, 善功企, 陳光斉, 笠間清伸: 局所的液状化を考慮した砂地盤の支持力解析, 第 8 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.237-240, 2008.
- 7) 土田孝, 湯怡新: 港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率, 港湾技術研究所報告, Vol.35, No.1, pp.117-146, 1996.

8) 福岡県防災会議: 福岡県地域防災計画震災対策編, pp.3-12, 2007.