

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	THE LIQUEFACTION RISK ANALYSIS OF CEMENT-TREATED SANDY GROUND CONSIDERING THE SPATIAL VARIABILITY OF SOIL STRENGTH
著者(和文)	片岡 範夫, 笠間 清伸, 善 功企, 陳 光斉
Authors(English)	Norio Kataoka, Kiyonobu Kasama, Kouki Zen, Guangqi Chen
出典(和文)	土木学会論文集C (地圏工学), Vol. 67, No. 1, pp. 119-129
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering), Vol. 67, No. 1, pp. 119-129
発行日 / Pub. date	2011, 3
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2011 Japan Society of Civil Engineers.

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

片岡 範夫¹・笠間 清伸²・善 功企³・陳 光斉⁴

¹正会員 福岡県那珂県土整備事務所 道路課 (〒816-0943 福岡県大野城市白木原3丁目5番25号)

E-mail: kataoka-n2988@pref.fukuoka.lg.jp

²正会員 九州大学助教 大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

E-mail: kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

³正会員 九州大学教授 大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

E-mail: zen@civil.kyushu-u.ac.jp

⁴正会員 九州大学准教授 大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

E-mail: chen@civil.kyushu-u.ac.jp

地盤内に固化材を混合することで、液状化強度を向上させる液状化対策工法が開発されており、様々な要因により、せん断弾性係数や液状化強度などの地盤諸係数に空間的な不均質性が生じることが報告されている。この地盤物性の空間的な不均質性に起因して、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が影響を受けると予想される。本論文では、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定性、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。

Key Words : cement-mixing, chemical grouting, liquefaction, risk analysis, reliability theory

1. はじめに

近年、設計に用いられる最大想定地震動よりも、はるかに大きな地震が世界各地で発生しており、港湾構造物や海上空港などの災害リスクや危機管理への対応は、重要な社会的課題となっている。地震時に発生する地盤の液状化は、建物の崩壊、地盤および土木構造物の不等沈下、変形、側方流動など様々な被害をもたらす。結果的に社会・経済的に甚大な損害をもたらす。そこで、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不均質性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不均質性によって、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。善ら⁴⁾は、セメントなどの固化材によって改良された砂質土を対象とした繰返し三軸試験において、供試体の強度が大きい場合、供試体はせん断破壊を、小さい場合に液状化によく似た破壊を示すことを明らかにした。また、地盤物性の空間的な不均質性が、地震時の地盤挙動に与える影響について、畠中と室野⁵⁾は、1次元有限要素法を用いて、確率論的な地盤モデルを設定したモンテカルロ・シミュレーションを行い、せん断波速度と内部摩擦角の不均質性が地震応答に与える影響を明らかにした。2次元有限要素法を用いた不均質地盤の研究として、末富ら⁶⁾は、地盤物性の不均質な空間分布をモデル化した地盤表層部の散乱減衰特性を、中村ら⁷⁾は、地盤物性の不均質な空間分布のモデル化の差異による地盤の強非線形応答のばらつきにおよぼす影響を考察した。また、地盤物性の不均質性が液状化に与える影響に関して、Juangら⁸⁾は、原地盤で行った標準貫入試験の結果から、地盤の液状化確率を考察するとともに、繰返しせん断強度比と液状化ポテ

ンシャルとの関係式を提案した. さらに, 近年では, Popescuら⁹⁾が, 地盤物性の空間的な不均質性を3次元有限要素法により表現し, その不均質性に起因した局所的な液状化発生のシミュレーションを行うなど, 多くの研究によって, 地盤物性の空間的不均質性が, 地震時の地盤挙動に与える影響は明らかになりつつある. しかしながら, 地盤物性の空間的不均質性に起因して発生する地盤の局所的液状化が, 地盤ならびに周辺構造物に与える経済的被害の定量化までに至っていないのが現状である.

一方, 確率・統計論に基づく信頼性理論は, 強度定数などの不確定量を論理的かつ定量的に取り扱う手法であり, 信頼性理論を構造物の設計に適用することにより, 構造物の安全性を安全性指標または破壊確率として評価することが可能となる. 信頼性理論に基づく液状化確率を用いた最適設計の研究事例として, 西村ら¹⁰⁾は, 液状化対策地盤の信頼性設計手法を提案し, 構造物の重要度, 耐用年数および地震発生の地域特性の違いによる最適な地盤内の改良率を定量的に評価した. また, 陳ら¹¹⁾は, モンテカルロ・シミュレーションによる液状化リスク分析手法を提案し, 対象とする地盤の地盤物性の不確定性を考慮した液状化発生確率や期待損失額などの定量的評価手法を提案した. このように確率・統計論に基づく信頼性理論や, 災害に起因する期待損失額をリスク指標として評価するリスク分析を導入することで, 定量的な液状化対策地盤の性能評価が可能になると考えられる.

そこで本論文では, 地盤物性の空間的不均質性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することで, 固化処理地盤の液状化リスク評価手法を提案することを目的とした. 最初に, 地盤物性に空間的不均質性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不均質性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. 信頼性理論に基づく液状化確率の算出

(1) ランダム場理論と非線形地震応答解析

非線形地震応答解析では, 二次元有限要素法を用い, 土の応力-ひずみとして, 双曲線モデルを組み合わせたマルチスプリング¹²⁾を用いた. 地盤物性の空間的な不均質性が応答におよぼす影響の検討領域として, 高さ 20m,

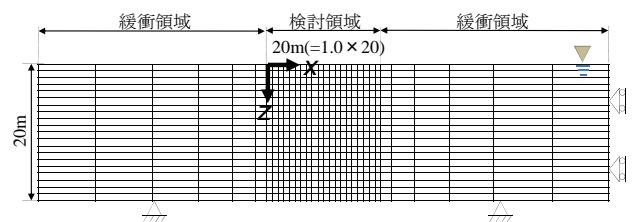
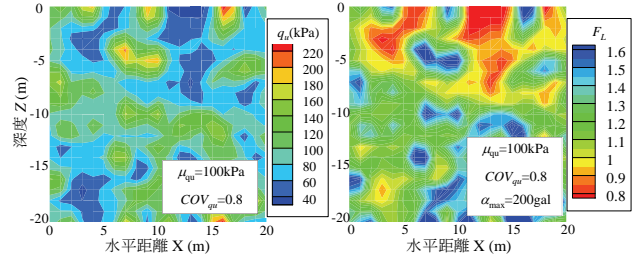


図-1 解析地盤モデル



a) 一軸圧縮強さ分布 b) 液状化安全率

図-2 解析結果の一例

表-1 解析条件

一軸圧縮強さ	μ_{qu}	kPa	50, 100, 200
	COV_{qu}		0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
自己相関距離	θ	m	random
ポアソン比	ν		0.33
密度	ρ	t/m ³	1.89
減衰定数	h		0.15
内部摩擦角	ϕ	°	30
単位体積重量	γ	kN/m ³	18.5
有効単位体積重量	γ'	kN/m ³	8.5

幅20m, 要素サイズ1.0m×1.0m(要素数: 400個, 節点数: 441個)と設定した解析地盤モデルを, 図-1に示す. 側方境界と検討対象領域の間に, 境界条件の影響が検討領域に及ばないための緩衝領域として, 幅2m, 4m, 6m, 8m, 10mと側方に向かって広がる要素を設けた. また, 地震応答解析時の境界条件として, 側方および底面を粘性境界とした. なお, 地下水位面は地表面と一致させた.

表-1に, 解析条件を示す. 本論文では, 固化処理地盤の各要素の材料特性(せん断波速度と液状化強度)を一軸圧縮強さから間接的に評価するために, ランダム場理論を用いて, 空間的不均質性を考慮した各要素の一軸圧縮強さの空間分布を計算した. 具体的には, 地盤の一軸圧縮強さ q_u を対数正規分布と仮定し, 平均強度 μ_{qu} , 変動係数 COV_{qu} , 自己相関距離 θ および正規乱数行列 X から, コレスキー分解を用いた mid-point 法により各要素の一軸圧縮強さを計算した. 図-2a)に計算結果の一例を示す. 詳しい計算法は, 参考文献13)や14)に詳しいが, ランダム場理論では異なる正規乱数行列 X を使用して, 強度の空間分布が異なる地盤を何度も作成することができる.

次に, 図-3に示す固化処理土の一軸圧縮強さとせん断波速度の関係¹⁵⁾から得られた以下の式を用いて, せん

断波速度を計算し、応答解析への入力定数とすることで、空間的不均質性を考慮した非線形地震応答解析を行った。

$$V_s = 10^{2.26} \cdot (q_u)^{0.21} \quad (1)$$

ここで、深度増加による拘束圧の増加に起因してせん断波速度が増加することが考えられるが、予備解析によって地盤応答値に与える影響は小さかったため、本解析ではせん断波速度の拘束圧依存性は考慮していない。

固化処理土の一軸圧縮強さは、固化材の種類や量、対象とする土の物理化学的特性、養成条件や混合の程度などが強度に影響するため、実地盤の一軸圧縮強さの変動係数は、0.14~0.99と比較的大きな不均質性を有すると報告されている¹⁶。また、空間的な変動を表わす固化処理地盤の鉛直および水平方向の自己相関距離は、0.15~12m程度^{3, 16, 17}であり、自然堆積地盤に比べて小さい値を有する。これらを参考に、本解析における固化処理土の一軸圧縮強さ q_u の変動係数 COV_{q_u} の入力条件を、0.2~1.0の0.2間隔の5段階とした。地盤強度の自己相関距離 θ は、要素間距離よりも小さい場合を考慮し、要素の強度をランダムに決定した条件(本論文では、 θ -randomと表記)に設定した。これは、固化処理地盤の自己相関距離が小さいことに加えて、著者ら¹⁸が行った強度の空間的不均質性を考慮した支持力解析において、自己相関距離 θ の影響を考察した結果、 θ -randomとした条件で地盤の平均支持力の低減が最も大きかったためである。

一方、地盤の単位体積重量の変動係数は0.1程度であり、一軸圧縮強さの変動係数よりも小さいため、今回の解析では、地盤の単位体積重量と有効単位体積重量は確定値として解析した。入力基盤加速度は、第4章において福岡地域を対象としたリスク分析を行うため、福岡県西方沖地震において建設技術研究所九州支店の地下65mの砂岩・頁岩で構成される基盤内で観測された南北方向の加速度波形を用いた。ただし、入力加速度の大きさが液状化確率に与える影響を調べるために、最大入力加速度を100~300galに振幅調整して入力地震動とした。

(2) 固化処理地盤の液状化・せん断破壊判定

本論文では、液状化対策を目的として固化処理した地盤において、せん断強度や液状化強度などの地盤物性の空間的不均質性に起因した局所的な破壊発生を考察するために、液状化安全率 F_L と一軸圧縮強さ q_u を地盤の破壊形状を判定する指標として用いた。

ここで、液状化安全率 F_L とは、地盤の液状化発生の有無を判断する指標であり、一般に、 $F_L < 1.0$ の時に地盤が液状化すると判断される。

$$F_L = R/L \quad (2)$$

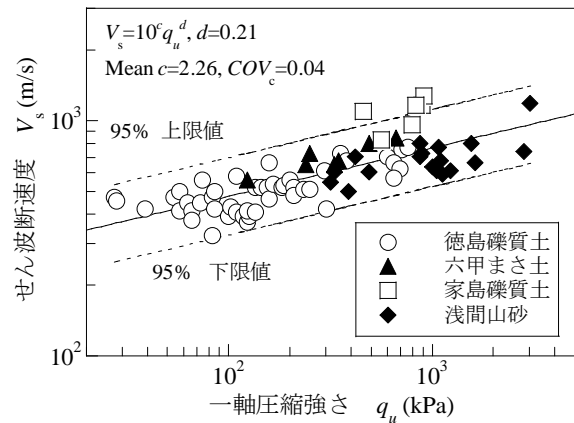


図-3 一軸圧縮強さとせん断波速度

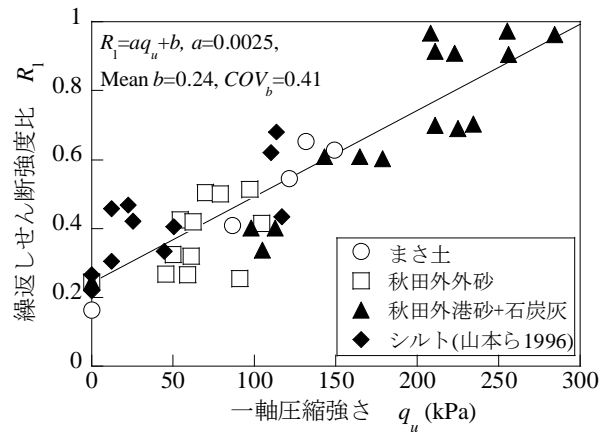


図-4 一軸圧縮強さと繰返しせん断強度比

ここで、 R は固化処理土が有する繰返しせん断強度比であり、 L は地盤に作用する繰返しせん断応力比である。

液状化安全率 F_L を計算するための固化処理地盤の繰返しせん断強度比は、図-4 に示す事前混合処理工法技術マニュアル¹⁵と山本ら¹⁹による固化処理土の一軸圧縮強さと繰返しせん断強度比の関係を利用し、得られる回帰曲線である式(3)を用いて計算した。

$$R = R_r = 0.0025 \cdot q_u + 0.24 \quad (3)$$

地盤内のせん断波速度の空間的不均質性を考慮した二次元非線形地震応答解析を行い、各要素を構成する四つの節点で得られた最大応答水平加速度の平均値 A_{max} を求めた後、式(4)より、繰返しせん断応力比 L を求めた。

$$L = \frac{A_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (4)$$

ここで、 g は重力加速度、 σ_v 、 σ'_v はそれぞれ鉛直応力および鉛直有効応力であり、代表的な砂質土の値²⁰を参考に $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ および $\gamma' = 8.5 \text{ kN/m}^3$ として計算した。図-2b)に、図-2a)の条件で解析を行った時の液状化安全率の空間分布を示す。図に示すように、一軸圧縮強さが小さい箇所を中心に局所的な液状化が発生した。

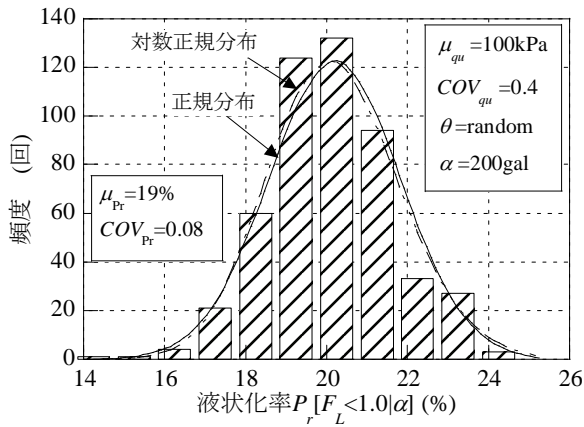


図-5 液状化率の頻度分布

さらに、事前混合処理工法技術マニュアル¹⁵⁾より、固化処理土は、一軸圧縮強さが約100kPaを超えると、繰返しせん断を受けた際の破壊形状が、液状化破壊からせん断破壊に移行すると報告されている。このことから、液状化安全率が1.0以下($F_L < 1.0$)かつ一軸圧縮強さ q_u が100kPa以下の破壊形状を液状化破壊、液状化安全率 $F_L < 1.0$ かつ $q_u > 100\text{kPa}$ の破壊形状をせん断破壊と定義した。

以上のような各要素における液状化破壊およびせん断破壊の判定結果を地盤全体としての評価に結びつけるために、液状化破壊した要素ならびにせん断破壊した要素が地盤全体に占める空間占有率を計算した。ここで、地震外力 α が作用した時の、地盤全体における液状化発生箇所ならびにせん断破壊発生箇所の空間占有率をそれぞれ液状化破壊率 $P_r[F_L < 1.0, q_u < 100\text{kPa} | \alpha]$ とせん断破壊率 $P_r[F_L < 1.0, q_u > 100\text{kPa} | \alpha]$ と定義した。ただし、液状化破壊率とせん断破壊率を足し合わせたものを液状化率 $P_r[F_L < 1.0 | \alpha]$ と呼ぶことにする。例えば、液状化率 $P_r[F_L < 1.0 | 50\text{gal}] = 10\%$ とは、地震外力50galにおいて地盤全体の10%の領域で液状化あるいはせん断破壊が発生するという意味である。

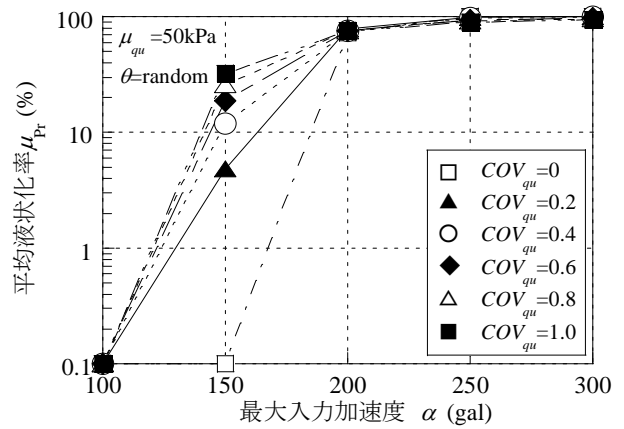
(3) 液状化率と fragility 曲線

地盤強度に空間的不均質性を有する固化処理地盤の液状化率 $P_r[F_L < 1.0 | \alpha]$ を確率統計的に評価するために、モンテカルロ・シミュレーションを n 回行った際の液状化率の平均値 μ_{Pr} と標準偏差 σ_{Pr} を以下の式で計算した。

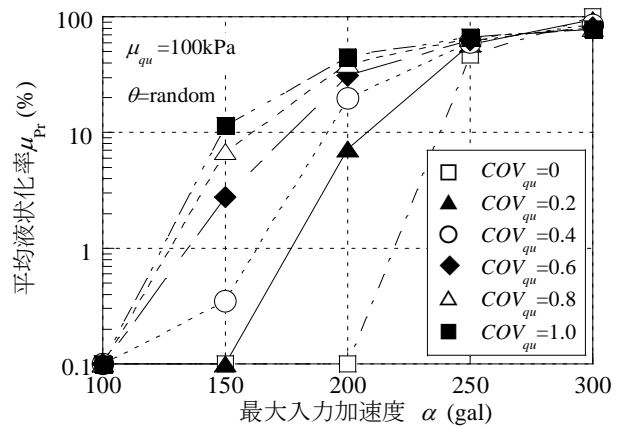
$$\mu_{Pr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_r[F_L < 1.0 | \alpha]_i \quad (5)$$

$$\sigma_{Pr} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_r[F_L < 1.0 | \alpha]_i - \mu_{Pr})^2} \quad (6)$$

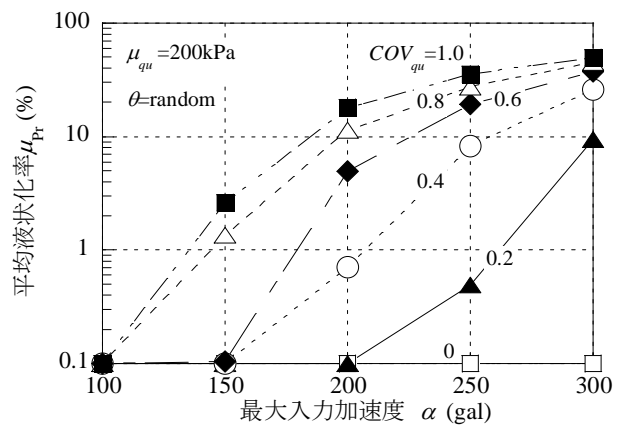
なお、モンテカルロ・イタレーションは、各入力条件に



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-6 最大入力加速度と平均液状化率

において平均液状化率を $\pm 0.005\%$ の精度で推定できる1000回まで行った。図-5に液状化率の頻度分布の一例を示す。ここで、一軸圧縮強さの平均値 $\mu_{qu}=100\text{kPa}$ 、変動係数 $COV_{qu}=0.4$ および最大入力加速度 $\alpha=200\text{gal}$ である。

図中には、液状化率の平均値と変動係数をもとに計算した分布形も示す。 χ^2 検定を用いた適合度の検定から、すべての入力条件における液状化率の分布形は、正規分布および対数正規分布に有意水準5%で適合した。

図-6に、平均液状化率と最大入力加速度の関係を示

す。平均液状化率は、最大入力加速度 α が大きくなるにつれて増加した。一軸圧縮強さの平均強度 50kPa の地盤では、最大入力加速度 200gal 以上で、一軸圧縮強さの変動係数によらず地盤のほぼ全域に液状化が発生した。これは、地盤強度の不均質性を考慮しない均質地盤 ($COV_{qu}=0$)でも、 $\alpha > 150$ gal では F_L が 1.0 以上となり、ほとんどの要素で液状化が発生するためである。一方、平均強度が 100kPa および 200kPa の地盤では、一軸圧縮強さの変動係数 COV_{qu} の違いによる液状化率の差が顕著に生じた。たとえば、平均強度 100kPa の地盤について考察すると、最大入力加速度 $\alpha=150$ gal のとき、均質地盤では液状化の可能性はほとんどなかったが、不均質性の非常に大きな地盤($COV_{qu}=1.0$)では、地盤全体の 11.5%が液状化する結果となった。

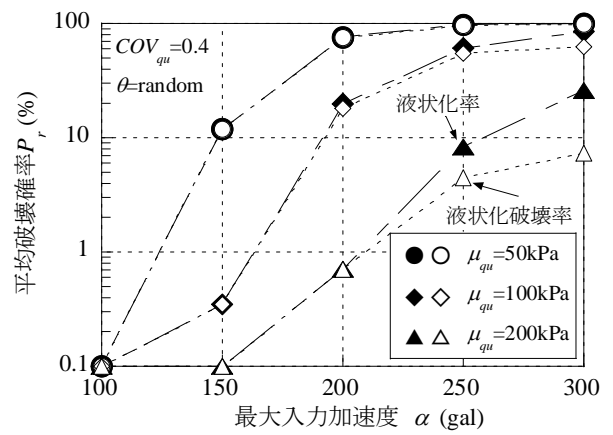
固化処理土の破壊形状を考察するために、図-7に、最大入力加速度の増加に伴う液状化率 $P_L[F_L < 1.0 | \alpha]$ と液状化破壊率 $P_L[F_L < 1.0, q_u < 100kPa | \alpha]$ の変化を示す。ここで、一軸圧縮強さの変動係数 $COV_{qu}=0.4$ および 1.0 とした。図中に示した液状化率と液状化破壊率との差が、せん断破壊率 $P_L[F_L < 1.0, q_u > 100kPa | \alpha]$ である。平均強度の低い固化処理地盤($\mu_{qu}=50kPa$)では、最大入力加速度の増加とともに、液状化率と液状化破壊率は、ほぼ同値のままに大きくなったことから、せん断破壊が発生する可能性は非常に小さい。一方、平均強度が高い地盤では、最大入力加速度 200gal 以上で、せん断破壊率が増加した。たとえば、平均強度200kPaの地盤では、最大入力加速度 $\alpha=200$ gal のとき、液状化破壊率が7.0%発生したのみでせん断破壊はほぼ生じなかったが、 $\alpha=300$ gal では、液状化破壊率7.4%、せん断破壊率18.6%であり、破壊確率全体の約7割をせん断破壊が占めた。この結果から、固化処理地盤を対象に液状化リスク分析を行う際、せん断破壊率も含む液状化率でリスクを算出すると、液状化リスクを過大に評価してしまう可能性がある。ただし、本論文では、液状化破壊率とせん断破壊率を合算した液状化率を用いて安全側にリスクを評価することにした。

3. 液状化リスク分析

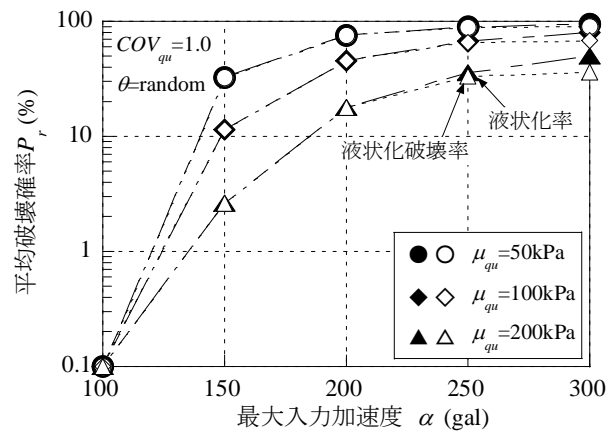
(1) リスク分析フロー

本節では、図-8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さを C とし、式(7)のように定義した。

$$R = P \times C \quad (7)$$



a) 一軸圧縮強さの変動係数 $COV_{qu}=0.4$



b) 一軸圧縮強さの変動係数 $COV_{qu}=1.0$

図-7 地震時の破壊形状の違いによる影響

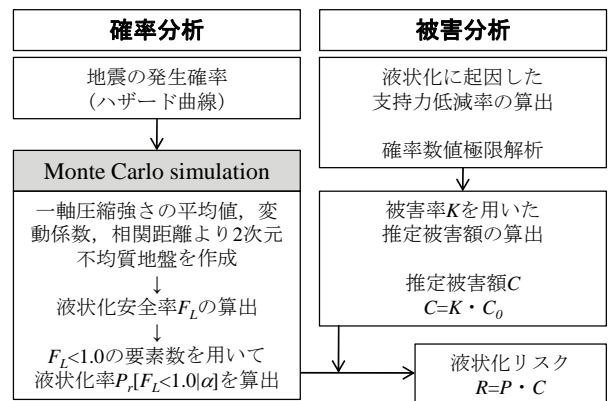


図-8 液状化リスク分析フロー

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。

$$p(\alpha) = -\frac{dP_\alpha}{d\alpha} \quad (8)$$

図-9 に、石川²⁰⁾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 (本論文では、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。このようなハザード曲線を用いることで、地震の不確定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。

$$P = P_r [F_L < 1.0 | \alpha] \cdot p(\alpha) \quad (9)$$

ここで、 $P_r [F_L < 1.0 | \alpha]$ は、地震外力 α が発生した条件の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、脆弱性曲線と呼ばれる。ここで、本論文で対象とする地盤物性に空間的不均一性を有する地盤では、地震時に液状化と非液状化箇所が混在するため、第2章で示した液状化率（液状化発生箇所の空間占有率）を液状化発生確率として考えた。

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 を乗じることで被害額の評価を試みた。これまでに被害率を求める方法として、実際の地震被害に関する調査結果をもとに経験的に決定する方法²²⁾や数値解析に基づいて計算する方法^{23) 24)}などがあり、本論文のリスク分析の被害分析にそれら研究成果を利用することも可能である。ただし本論文では、著者らの研究グループが液状化率と被害率の関係を定量化することを目的に別途実施した、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^{25) 26)}を利用した。つまり、第2章で示した有限要素法による非線形地震応答解析とこれから説明する被害率の結果は、連続した解析結果ではなく別途異なる解析を行って算出した結果である。

著者らが別途行った地盤の被害率の算定では、地盤の被害率は、地盤の液状化に伴う地盤の支持力低下率と線形関係であると仮定している。つまり、地震時支持力が常時支持力に比べて50%低下したとき、その被害額 C は最大被害額 C_0 の50%であると仮定した。地震時の局所的な液状化を考慮した地盤支持力解析については、参考文献25)と26)を参照いただきたいが、液状化強度の空間的不均質性をランダム場理論で表現し、数値極限解析を用いたモンテカルロ・シミュレーションにより確率・統計的に地震時支持力特性を明らかにしている。その成果の一例として、図-10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

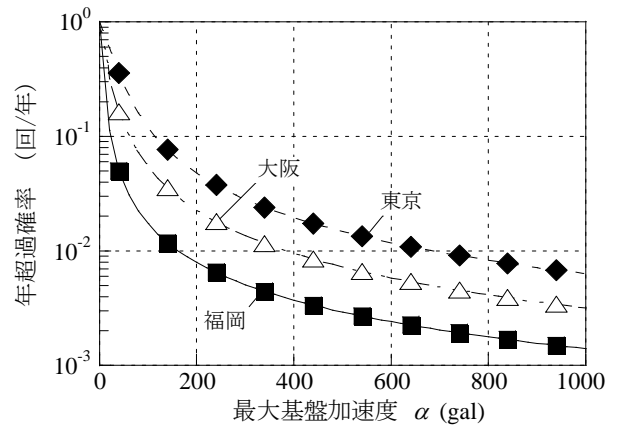


図-9 地震ハザード曲線

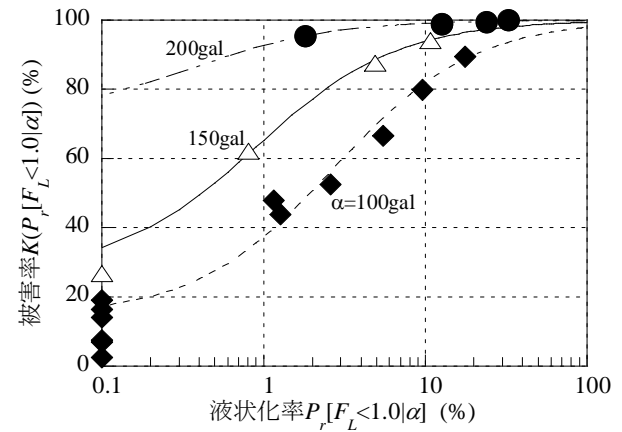


図-10 地震時の破壊形状の違いによる影響

表-2 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

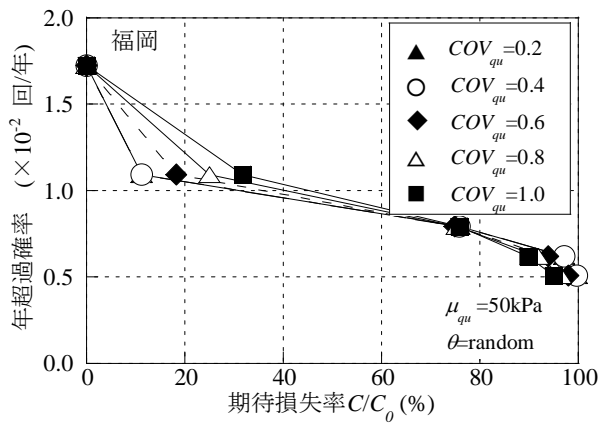
x: 液状化率 $P_r [F_L < 1.0 | \alpha]$ (%)

急激に増加した。この結果から、わずかな液状化が地盤の支持力に大きな影響を与えることがわかる。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-2にまとめている。なお、最大入力加速度200gal以上では液状化率に関係なく、地盤の支持力が大幅に低減するため、一律に被害率 $K(P_r [F_L < 1.0 | \alpha]) = 100\%$ とした。

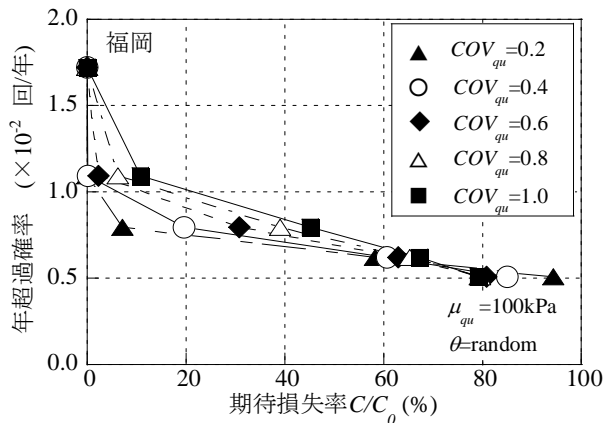
本論文では、この被害率 $K(P_r [F_L < 1.0 | \alpha])$ を導入し、式(10)で被害額 C の大きさを計算した。

$$C = K(P_r [F_L < 1.0 | \alpha]) \cdot C_0 \quad (10)$$

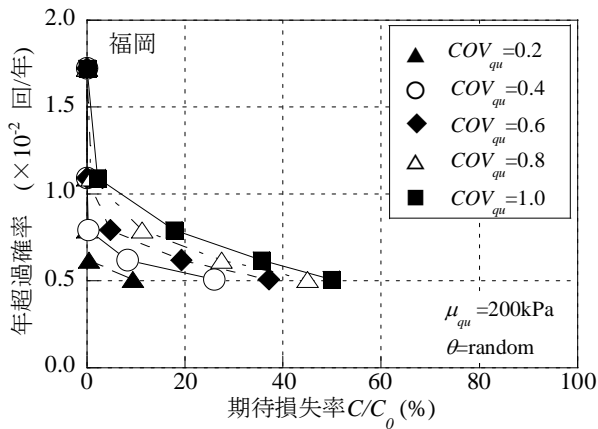
モンテカルロ・シミュレーション過程における被害率の計算では、入力した最大入力加速度 α と得られる液状化率 $P_r [F_L < 1.0 | \alpha]$ から表-2に示す回帰曲線よりその被害率を計算し、最終的に式(11)よりモンテカルロ・イタレー



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-11 液状化リスク曲線

シヨンごとに期待損失額 R を算出した。

$$R = P_r [F_L < 1.0 | \alpha] \cdot p(\alpha) \cdot K(P_r [F_L < 1.0 | \alpha]) \cdot C_0 \quad (11)$$

以上のように本液状化リスク分析手法は、確率分析と被害分析の両方で液状化率 $P_r[F_L < 1.0 | \alpha]$ を共通な指標として計算するのが特徴である。

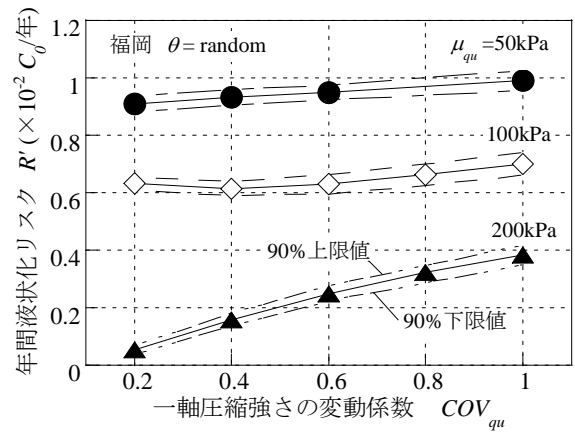


図-12 年間液状化リスクと一軸圧縮強さの変動係数

(2) 液状化リスク分析結果

図-11 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_e 、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、本論文では、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-11 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、年超過確率が小さくなると、期待損失率は増加し、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、強度の不均質性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、不均質性の非常に大きな $COV_{qu}=1.0$ では期待損失率 21% となったが、不均質性の小さい $COV_{qu}=0.2$ では被害を受けるリスクは非常に小さい。

式(11)に基づいた液状化リスク R は、図-11 に示されるリスク曲線上の年超過確率と被害額の関係を積分する(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-12 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

表-3 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-4 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_i	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 $COV_m=0.15$

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

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、年間液化化リスクは、平均強度が増加すると、大きく低減した。変動係数 $COV_{qu}=1.0$ の年間液化化リスクを比較すると、200kPa の固化処理地盤は、平均強度 100kPa の固化処理地盤に比べて、約 44% の年間液化化リスクを低減することができる。

4. 実地盤への適用

本節では、提案した液化化リスク分析手法を表-3で示す実際に施工された固化処理地盤に適用した。表-3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 と液化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。

(1) 実地盤データの統計的処理

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化化強度の関係式を用いて、液化化

強度の空間的不均質性を推定した。実施工された固化処理地盤の液化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盤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、Baecher and Christian¹⁴⁾によれば、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。

$$COV_{qu0}^2 = COV_{qu}^2 + COV_m^2 + COV_n^2 \quad (12)$$

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²⁷⁾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(13)が提案される。

$$COV_n = COV_{qu} / \sqrt{n} \quad (13)$$

表-5 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²⁰⁾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、 n は、標本数である。したがって、式(12)と式(13)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。

$$COV_{qu}^2 = \frac{COV_{qu0}^2 - COV_m^2}{1 + 1/n} \quad (14)$$

式(14)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。本論文では、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。

$$R = R_l = a \cdot q_u + b \quad (15)$$

ただし、 $a=0.0025$ の固定変数とし、 b は図-4に示す実験値から平均値 $\mu_b=0.24$ 、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 から、液状化強度の変動係数 COV_R を以下の式で算定した。

$$COV_R = \sqrt{COV_{qu}^2 + COV_b^2} \quad (16)$$

式(12)~式(16)と表-3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-4に示す。ここで、一軸圧縮試験が有する実験誤差 COV_{m_l} 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。

(2) 想定した地震動の大きさ

表-5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。本論文では、地震動の波形の影響は

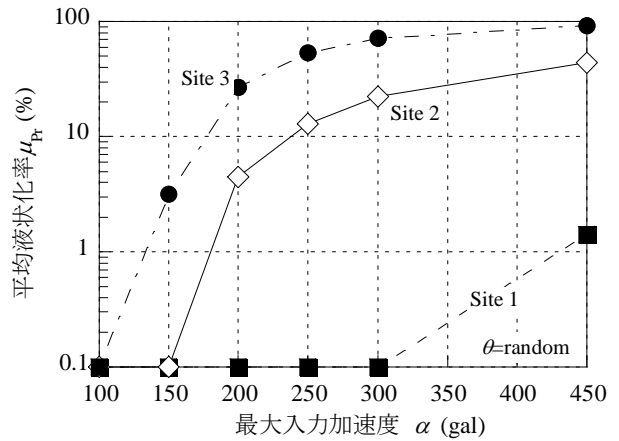


図-13 平均液状化率と最大入力加速度

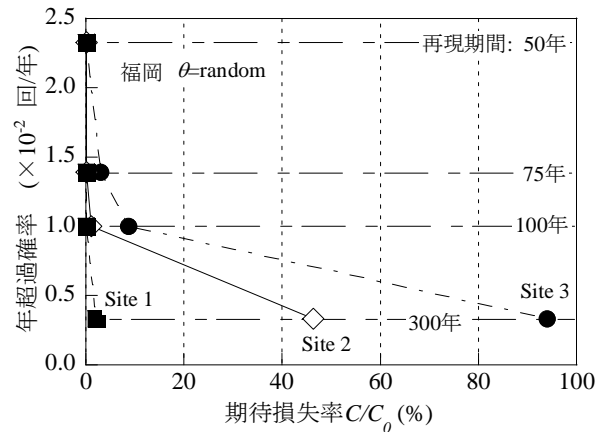


図-14 年超過確率と期待損失率

考慮せず、地震動の大きさだけに注目した。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-9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²⁰⁾を参考に、最大入力加速度443galと設定した。

(3) 実地盤のリスク評価

表-4 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第2章で示した解析の入力定数として、地盤定数の不均質性を考慮した非線形解析を再実行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-13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。しかし、Site 2とSite 3では、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-13に示すフラジリティ曲線と、図-9に示す福岡のハザード曲線ならびに図-10と表-2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-14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。

5. 結論

地盤物性の空間的不均質性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することで、固化処理地盤の液状化リスク分析手法を提案した。提案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) 固化処理地盤の液状化率は、最大入力加速度が小さいときほど、一軸圧縮強さの不均質性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、強度の不均質性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不均質性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不均質性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。

謝辞: なお、本解析で使用した入力地震波形は、福岡西方沖地震の際に(株)建設技術研究所九州支社で観測されたものを提供していただいた。また、本研究は科研費(22360188)の助成を受けたものである。記して、関係者各位には深甚の謝意を表したい。

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) 善功企, 山崎浩之, 佐藤泰: 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性, 港湾技術研究所報告, Vol.29, No.2, pp.85-118, 1990.
- 5) 畠中仁, 室野剛隆: 地盤定数のばらつきを考慮した表層地盤の非線形地震応答特性, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.769-774, 2002.
- 6) 末富岩雄, 澤田純男, 吉田望, 土岐憲三: 地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.195-206, 2000.
- 7) 中村晋, 澤田純男, 松本敏克: 地盤物性の不均一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.
- 8) Juang, H.C. Yang, H.S. and Yuan, H.: Model Uncertainty of Shear Wave Velocity-Based method for Liquefaction Potential Evaluation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.131, No.10, 1274-1282, 2005.
- 9) Popescu, R. Prevost, J.H. and Deodatis, G.: 3D Effects in Seismic Liquefaction of Stochastically Variable Soil Deposits, *Geotechnique*, Vol.55, No. 1, pp.21-31, 2005
- 10) 西村伸一, 清水英良, 藤井弘章, 島田清: 液状化対策地盤改良に関する信頼設計, 土木学会論文集, No.603/III-44, pp.101-111, 1980.
- 11) 陳光齊, 善功企, 諫山亜依, 笠間清伸: モンテカルロシミュレーションによる液状化リスク分析手法,

- 土木学会論文集, No.792/III-71, pp.61-73, 2005.
- 12) 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, 1990.
- 13) 笠間清伸, 善功企, Whittle, A. J.: 確率数値限界解析を用いた粘性土地盤の支持力特性, 応用力学論文集, Vol.11, pp. 291-298, 2008.
- 14) Baecher, G.B. and Christian, J.T.: *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd., NY, 2003.
- 15) (財)沿岸開発技術研究センター編: 事前混合処理工法技術マニュアル, 1999.
- 16) Kasama, K., Zen, K. and Whittle, J. A.: Effects of spatial variability of cement-treated soils on undrained bearing capacity, *Proc. Numerical Modeling of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment*, pp.305-313, 2006.
- 17) Navia, M.P. and Filz, G.M.: Statistical analysis of strength data from ground improved with DMM columns, *Proc. Deep Mixing '05*, Vol.1, pp.145-154, 2005.
- 18) 笠間清伸, 善功企: 強度不均一性を考慮した固化処理地盤の支持力に関する信頼性解析, 材料, Vol.59, No.1, pp.44-49, 2010.
- 19) 山本哲朗, 山内智也, 堀淵幸司: 砂~シルト地盤に対する液状化対策としてのセメント安定処理の効果に及ぼす粒度の影響, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.133-146, 1996.
- 20) (社)地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説—二分冊の1—, pp.181, 2009.
- 21) 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.
- 22) FEMA HAZUS99: Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, 1999.
- 23) 中村孝明, 宇賀田健: 地震リスクマネジメント, 技報堂出版, 2009.
- 24) 吉川弘道: 鉄筋コンクリート構造物の耐震設計と地震リスク解析, 丸善, 2008.
- 25) 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.
- 26) 笠間清伸, 善功企, 陳光斉: 確率数値極限解析を用いた固化処理地盤の地震時支持力特性, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, pp.345-350, 2010.
- 27) 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.
- 28) 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.

(2010.3.5 受付)

THE LIQUEFACTION RISK ANALYSIS OF CEMENT-TREATED SANDY GROUND CONSIDERING THE SPATIAL VARIABILITY OF SOIL STRENGTH

Norio KATAOKA, Kiyonobu KASAMA, Kouki ZEN and Guangqi CHEN

This paper presents a probabilistic method for assessing the liquefaction risk of cement-treated ground, which is an anti-liquefaction ground improved by cement-mixing. In this study, the liquefaction potential of cement-treated ground is analyzed statistically using Monte Carlo Simulation based on the nonlinear earthquake response analysis considering the spatial variability of soil properties. The seismic bearing capacity of partially liquefied ground is analyzed in order to estimate damage costs induced by partial liquefaction. Finally, the annual liquefaction risk is calculated by multiplying the liquefaction potential with the damage costs. The results indicated that the proposed new method enables to evaluate the probability of liquefaction, to estimate the damage costs using the hazard curve, fragility curve induced by liquefaction, and liquefaction risk curve.