

## 不良率に着目した改良地盤の液状化リスク分析

稲富, 祐太郎  
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

善, 功企  
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

陳, 光齊  
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

笠間, 清伸  
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

<https://hdl.handle.net/2324/21974>

---

出版情報：土木学会論文集B3（海洋開発）． 67（2）， pp.423-428， 2011-12-08． 公益社団法人土木学会  
バージョン：  
権利関係：



## 03. 不良率に着目した改良地盤の 液状化リスク分析

### LIQUEFACTION RISK ANALYSIS FOR ARTIFICIALLY SOLIDIFIED GROUND IN TERMS OF PERCENT DEFECTIVE OF GROUND IMPROVEMENT

稲富祐太郎<sup>1</sup>・善功企<sup>2</sup>・陳光齊<sup>3</sup>・笠間清伸<sup>4</sup>・

Yutaro INATOMI, Kouki ZEN, Guangqi CHEN and Kiyonobu KASAMA

<sup>1</sup>学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市元岡744)

<sup>2</sup>フェロー 博(工) 九州大学教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市元岡744)

<sup>3</sup>正会員 理博 九州大学准教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市元岡744)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 九州大学准教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市元岡744)

The anti-liquefaction ground improved by cement-mixing and permeable-grouting shows the spatial variability in soil properties such as shear modulus and liquefaction strength resulting from the spatial variability of soil profile in original ground, the non-uniformities of mixing and grouting, etc. It is expected that liquefaction resistance and nonlinear seismic response of anti-liquefaction ground are affected by the spatial variability, however, the liquefaction properties of anti-liquefaction ground with a large spatial variability in soil properties have not been fully clarified. In order to investigate effects of percent defective of ground improvement, a risk-based method was proposed to assess the liquefaction-induced damage against the anti-liquefaction ground.

**Key Words :** Cement mixing, liquefaction, Risk analysis, Percent defective

#### 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いる。2011年に発生した東北太平洋沖地震による液状化では、港湾構造物に大きな被害をもたらした。地震時に発生する液状化の被害には、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ものがあり、社会・経済に甚大な被害をもたらす。そこで液状化対策の一つとして、事前混合処理工法<sup>1)</sup>や浸透固化処理工法<sup>2)</sup>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空間的な不均質性を有することが報告されている<sup>3)</sup>。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。

固化処理地盤の設計を行うさい、弾性定数や強度

定数などの地盤物性の不均質性や不確実性を合理的かつ定量的に取り扱う必要がある。このような背景から、地盤の不均質性や地震発生の不確実性などを考慮した人工処理地盤の安全性評価手法が求められた。近年、地盤工学の分野において、地震や降雨などによって引き起こされる自然災害の潜在的危険性の定量的評価や合理的かつ経済的対策投資を行うための指標として、リスク指標を用いたリスク分析やリスクマネジメントに関する研究がなされている。リスク分析による安全性評価では、ハザードや構造物の材料特性などの不確定量を確率・統計論に基づき合理的かつ定量的に取り扱うことで、構造物の安全性を fragility 曲線、リスク曲線または破壊確率として評価することが可能となる。これまで地盤構造物を対象としたリスク分析では、盛土、擁壁および斜面などに適用事例があるが、人工処理地盤に関してリスク分析を適用した研究は少ない。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、西村ほか<sup>4)</sup>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、片岡ほか<sup>5)</sup>は固化

処理地盤を対象に、液状化リスクの定量的評価手法の提案を目的に、固化処理地盤の液状化強度の不均質性を考慮した非線形地震応答解析をもとに、モンテカルロ・シミュレーションを行った。その結果から地震外力の不確実性と地域特性や局所的な液状化発生に起因した地盤の支持力低減による損失を考慮した液状化リスク分析手法の提案を行った。また、局所的な液状化を想定するために、笠間ほか<sup>6)</sup>は液状化強度の空間的な不均一性をランダム場理論で表現した。また、それを用いて数値極限解析を使ったモンテカルロ・シミュレーションにより、局所的な液状化を考慮した地震時支持力を解析し、その結果を用いて、液状化強度の不均一性が支持力係数および破壊モードに与える影響について確率統計的に考察した。

そこで本論文では、空間的不均質性に起因して生じる、目標改良強度を下回る地盤の空間占有率を不良率と定義し、局所的な液状化と不良率との関係を明らかにすることによって、改良地盤の液状化リスクを算出することを目的とした。初めに、局所的な液状化の確率分析と被害分析を行った。その結果から、局所的な液状化のリスクを算出し、地盤改良の不良率との関係を明らかにした。

## 2. 液状化リスク分析

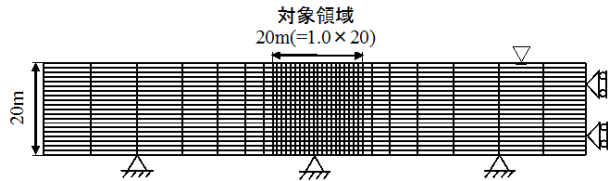


図-1 解析地盤モデル

表-1 解析条件

|          |            |                   |                         |
|----------|------------|-------------------|-------------------------|
| 一軸圧縮強度   | $\mu_{qu}$ | kPa               | 50, 100, 200            |
|          | $COV_{qu}$ |                   | 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 |
| 自己相関距離   | $\Theta$   | m                 | random, 2, 5, 10        |
| ポワソン比    | $\nu$      |                   | 0.33                    |
| 密度       | $\rho$     | t/m <sup>3</sup>  | 1.89                    |
| 最大減衰定数   | $h_{max}$  |                   | 0.15                    |
| 内部摩擦角    | $\phi$     | °                 | 30                      |
| 単位体積重量   | $\gamma$   | kN/m <sup>3</sup> | 18.5                    |
| 有効単位体積重量 | $\gamma'$  | kN/m <sup>3</sup> | 8.5                     |

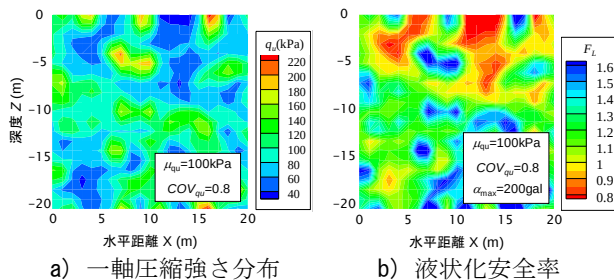


図-2 解析結果の一例

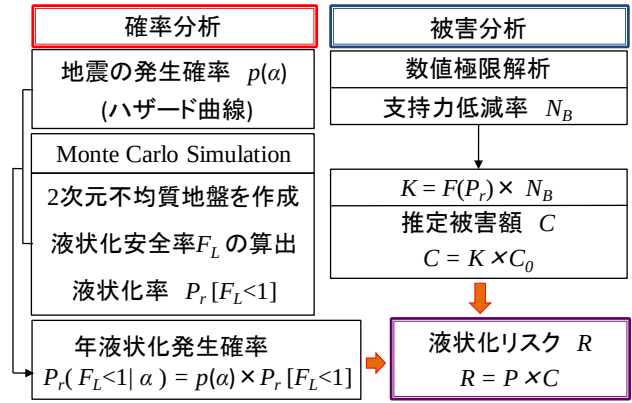


図-3 液状化リスク分析フロー

地盤の非線形地震応答解析には、地震応答プログラムFLIPを使用した<sup>7)</sup>。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対象領域として、高さ20m、幅20m、地震動を滑らかに伝搬できる要素サイズ1.0m×1.0m（要素数：400個、接点数：441個）と設定した解析地盤モデルを図-1に示す。また、表-1に解析条件を示す。本文では、固化処理地盤の各要素の材料特性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算出した<sup>8)</sup>。図-2a)に試算結果の一例を示す。

本文では、液状化リスク $R$ （液状化に起因する損失期待値）を、年間の液状化の発生確率 $P$ 、液状化に起因する被害額 $C$ を用いて式(1)のように定義した。

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

図-3に、液状化リスク分析フローを示す。

液状化の確率分析では、対象地域における地震外力 $\alpha$ の年超過確率 $P_\alpha$ を表すハザード曲線から地震の発生確率 $p(\alpha)$ を式(2)により算出した。ハザード曲線は「建築物荷重指針2004年度版」<sup>9)</sup>に示された諸係数を用いて算出した。

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

本文では、液状化安全率 $F_L$ を液状化を判定する指標として用いた。式(3)に示す液状化安全率 $F_L$ は、各要素の液状化に対する安全性を表す指標である。一般に、 $F_L < 1.0$ の時に地盤が液状化する可能性があると判断される。

$$F_L = \frac{R'}{L} \quad (3)$$

ここで、 $R'$ は地盤要素が有する繰返しせん断応力比

であり、事前混合工法技術マニュアル<sup>10)</sup>による一軸圧縮強さ $q_u$ との関係から求めた回帰曲線である式(4)より算出した。

$$R' = 0.0025q_u + 0.24 \quad (4)$$

$L$ は地盤の各要素に作用する繰返しせん断応力比で、非線形地震応答解析から得られた各要素の最大応答水平加速度 $\alpha_{max}$ から式(5)より算出した。

$$L = \frac{\alpha_{max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (5)$$

ここで、 $g$ は重力加速度、 $\sigma_v$ 、 $\sigma'_v$ はそれぞれ鉛直応力および鉛直有効応力である。図-2b)に、図-2a)の条件で解析を行った時の液状化安全率 $F_L$ の空間分布を示す。図に示すように、一軸圧縮強さ $q_u$ の小さい箇所では液状化安全率 $F_L$ は小さい値をとり、局所的な液状化が発生すると判断できた。

本文では、局所的な液状化などの液状化領域の空間割合を表現するために、液状化率 $P_r[F_L < 1.0 | \alpha]$ を算出した。地盤全体の要素数 $Number[element]$ に対する液状化した要素数（液状化安全率が1.0を下回った要素数） $Number[F_L < 1.0]$ の割合を、液状化率 $P_r[F_L < 1 | \alpha]$ と定義し、式(6)から算出した。

$$P_r[F_L < 1.0 | \alpha] = \frac{Number[F_L < 1.0]}{Number[element]} \times 100(\%) \quad (6)$$

さらに、地震外力 $\alpha$ に起因する年間の液状化の発生確率 $P$ を式(7)のように定義した。

$$P = P_r[F_L < 1.0 | \alpha] \times p(\alpha) \quad (7)$$

液状化の被害分析では、局所的な液状化に起因する地盤の支持力低減に着目し、上部構造物が全壊したときの最大被害額 $C_0$ を基準にして、被害率 $K$ を乗じることで被害額 $C$ を式(8)のように定義した。

$$C = K[P_r[F_L < 1.0 | \alpha]] \times C_0 \quad (8)$$

ただし本文では、著者らの研究グループが液状化率 $P_r[F_L < 1.0 | \alpha]$ と支持力低減率 $N_B$ の関係を定量化することを目的に別途実施した、液状化後の地盤の剛塑性体でモデル化し数値極限解析を通して得られた研究成果を利用した<sup>11)</sup>。しかし、局所的な液状化による被害率と支持力低減率の関係が解明されていないことから、本論文では被害率と支持力低減率の関係を式(9)のように定義した。

$$K = F(P_r[F_L < 1.0 | \alpha]) \times N_B \quad (9a)$$

$$F(P_r[F_L < 1.0 | \alpha]) = 1.0 \quad (9b)$$

$F(P_r)$ は、被害率 $K$ と支持力低減率 $N_B$ との関係を表す関数であり、本研究では $F(P_r) = 1.0$ と定義した。

最終的に、式(10)より液状化リスク $R$ を算出した。

$$R = \{P_r[F_L < 1.0 | \alpha] \times p(\alpha)\} \times \{K[P_r[F_L < 1.0 | \alpha]] \times C_0\} \quad (10)$$

### 3. 地盤改良の不良率

本文では、液状化対策地盤の空間的不均質性に起因して生じる目標改良強度を下回る地盤の空間占有率を地盤改良の不良率と定義し、不良率に着目した液状化リスク分析を行った。図-4は、事前混合処理工法により改良された固化処理地盤における室内強度 $q_{u0}$ と同配合条件での原位置強度 $q_{u\text{site}}$ の比を各割増係数でまとめたものである。ここで割増係数とは、設計強度と目標改良強度の比を表したものである。原位置強度 $q_{u\text{site}}$ と室内強度 $q_{u0}$ は、同配合条件で等しくなる（強度比=1.0）のが理想的であるが、図より明らかなように、原位置の地盤の不均質性や固化材混合の不均一性などに起因して、強度比ばらつきを有する値となる。本文では、室内強度を目標改良強度と定義し、目標改良強度を下回る（強度比<1.0）割合を不良率と呼ぶ。図-5に不良率の基本的概念を示す。固化処理地盤の強度分布は $\chi^2$ 度検定の結果から、対数正規分布に従うものとした。

また、本文では地盤の非線形応答解析の入力定数である平均値 $\mu_{qu}$ と変動係数 $COV_{qu}$ を用いて不良率を算出した。そのさいの目標強度は、液状化対策の必要強度である100kPaとした。

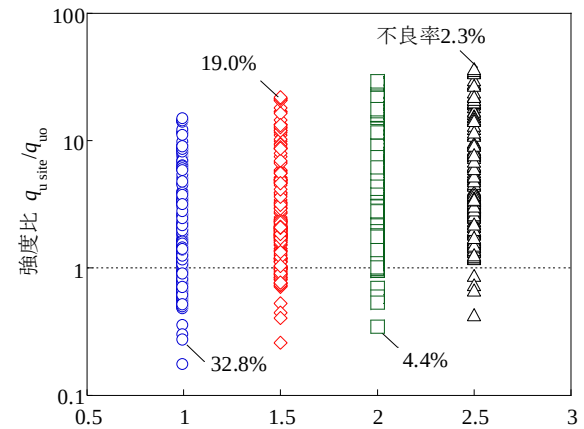


図-4 強度比、割増係数および不良率の関係

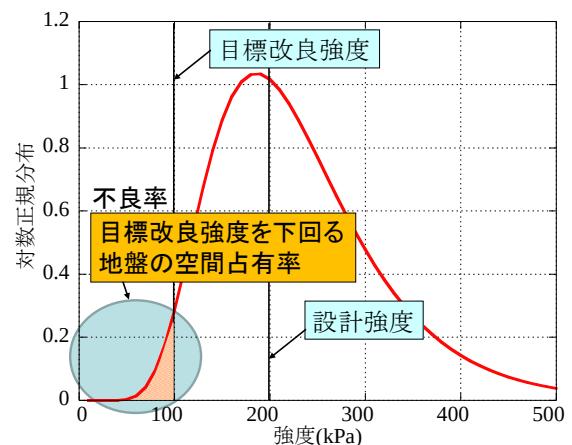


図-5 不良率の基本的概念

#### 4. 液状化リスク分析結果

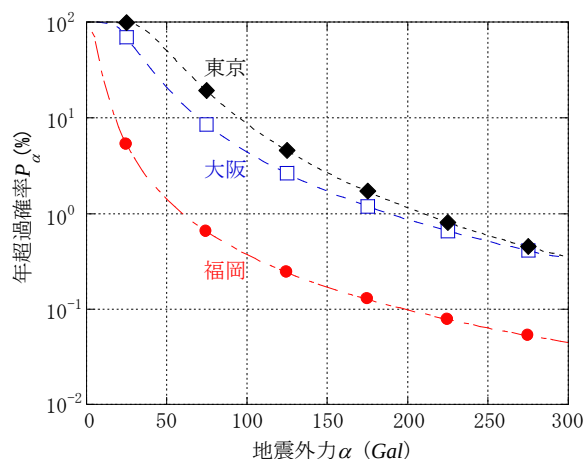


図-6 地震年超過確率(福岡, 大阪, 東京)

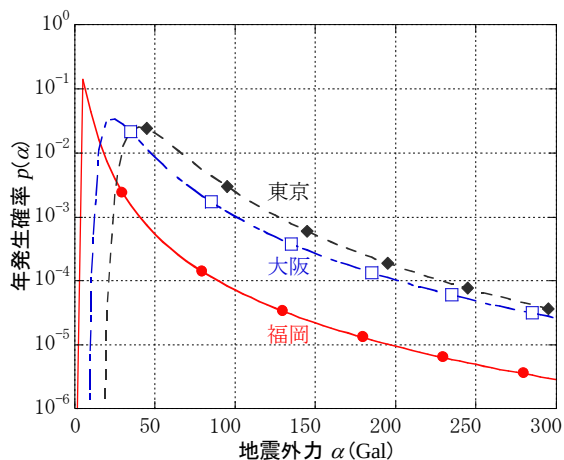


図-7 地震年発生確率(福岡, 大阪, 東京)

##### (1) 確率分析

図-6に、福岡、大阪および東京の年超過確率 $P_\alpha$ の地震ハザード曲線を示す。いずれの都市においても地震の年超過確率 $P_\alpha$ は、地震外力 $\alpha$ が大きくなると減少した。また、同じ年超過確率 $P_\alpha$ で比較すると東京の地震外力 $\alpha$ の値が最も大きく、福岡の地震外力 $\alpha$ が最も小さい値となった。例えば、年超過確率 $P_\alpha=1\%$ 、つまり再現期間100年の地震外力 $\alpha$ の値は、福岡が60Gal、大阪が175Gal、そして東京が200Galである。本文では、大きな地震外力 $\alpha$ の年超過確率 $P_\alpha$ の値が大きい都市、つまり大地震の起こりやすい都市である東京に着目し、液状化リスク分析を行った。

また、図-7に年超過確率より算出した、福岡、大阪および東京の年発生確率 $p(\alpha)$ のハザード曲線を示す。年超過確率 $P_\alpha$ と同様に、いずれの都市においても地震の年超過確率 $P_\alpha$ は、地震外力 $\alpha$ が大きくなると減少した。また、同じ発生確率 $p(\alpha)$ で比較すると東京の地震外力 $\alpha$ の値が最も大きく、福岡の地震外力 $\alpha$ が最も小さい値となった。例えば、年発生確率 $p(\alpha)=10^{-3}(\%)$ では、福岡が40Gal、大阪で100Gal、東京で130Galである。また、地震外力 $\alpha$ が大きくなると、年発生確率 $p(\alpha)$ の減少割合は、いずれの都市

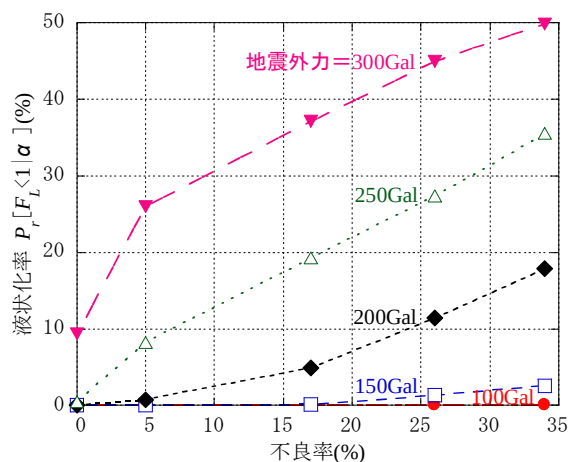


図-8 液状化率と不良率

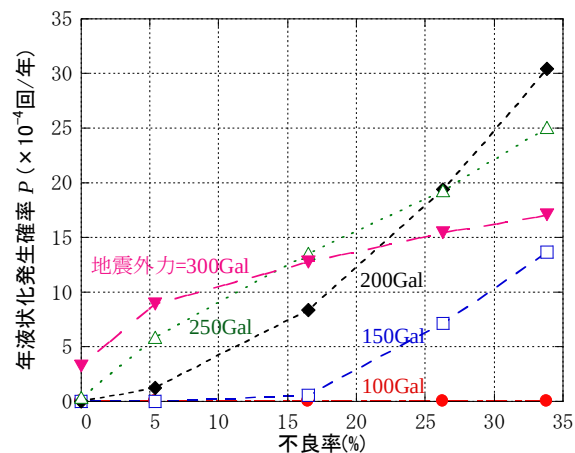


図-9 年液状化発生確率と不良率(東京)

においても減少し、一定の値に収束した。

図-8にモンテカルロ・シミュレーションにより算出した液状化率 $P_r[F_L < 1.0 | \alpha]$ と、設計強度200kPa $\omega$ 想定した際の不良率の関係を示す。液状化率 $P_r[F_L < 1.0 | \alpha]$ は、不良率が大きくなるほど増加した。また、その増加割合は地震外力 $\alpha$ によって異なり、地震外力 $\alpha$ が増加するほど大きいものとなった。増加割合は、地震外力 $\alpha$ が250Galと300Galにおいて大きくなることから、液状化の発生には地震外力 $\alpha$ の大きさが影響すると考えられる。

図-9に東京における各地震外力 $\alpha$ での年液状化発生確率 $P$ と不良率の関係を示す。年液状化発生確率 $P$ は、いずれの地震外力 $\alpha$ においても不良率の増加に伴い増加した。ただし、その増加割合は、地震外力によって異なるものとなり、地震外力 $\alpha$ の大きな250Galと300Galにおいて小さくなった。これは、液状化が地震に起因して起こるため、地震外力 $\alpha$ の値が大きくなると、地震の年発生確率 $p(\alpha)$ の値が小さくなることから、地震外力 $\alpha$ が大きくなると、年液状化発生確率 $P$ の増加割合が減少すると考えられる。

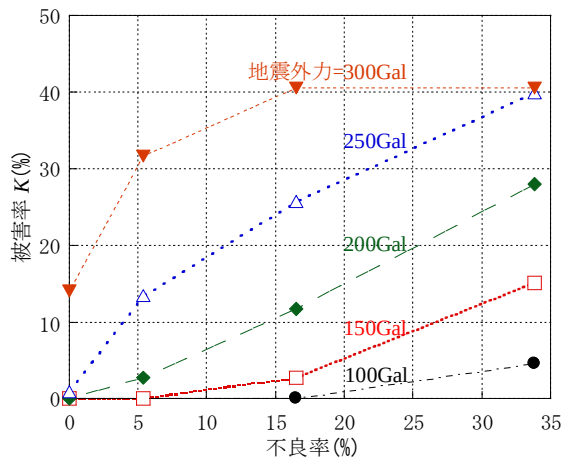


図-10 被害率と不良率

## (2) 被害分析

図-9に被害率 $K$ と不良率の関係を示す。被害率 $K$ は、不良率が大きくなるほどいずれの地震外力 $\alpha$ においても増加した。ただし、地震外力300Galにおいて、被害率 $K$ が約40%に収束することから、被害率 $K$ には最大値があると推察できる。

## (3) リスク分析

図-11に、東京を想定した設計平均強度200kPaの固化処理地盤における液状化リスク曲線を示す。液状化によるリスク $R$ は、不良率の値によらず、年超過確率が小さくなるほど増加した。また、同じ年超過確率で比較すると、不良率が大きくなるほど液状化リスク $R$ は増大した。例えば、年超過確率が $2 \times 10^{-2}$ 回/年、つまり再現期間が50年の液状化リスク $R$ を想定した場合、不良率が34%である地盤の液状化リスク $R$ は、最大被害額 $C_0$ の21%程度を有する。一方、不良率が0%の改良地盤は、ほぼ被害を受けないことが分かる。

図-11示す液状化リスク曲線を積分することで各都市がもつ年間の液状化リスクを算出した。福岡、大阪、東京における年間液状化リスクの結果を図-12示す。各都市の年間液状化リスクは、不良率が大きくなるほど増大した。また、その増加割合は地震発生確率の影響を受け、各都市で異なるものとなった。不良率が20%の地盤では、各都市の年間液状化リスクは福岡で最大被害額の $C_0$ の0.04%、大阪で0.35%、東京で0.5%となった。

## 5. 結論

本文では、改良地盤を対象に地盤改良の不良率に着目した液状化リスク分析を行った。得られた結論を以下に示す。

(1) 液状化率は、改良地盤の不良率が大きくなるとともに増加した。ただし、液状化率の増加割合は地震外力の大きさによって異なり、250Galから300Galにおいて大きなものとなった。

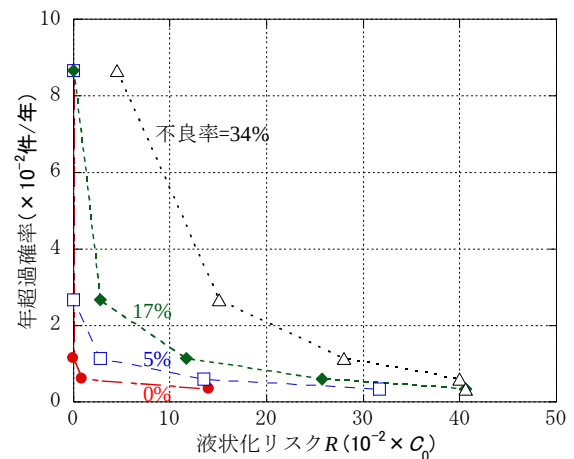


図-11 液状化リスク曲線(東京)

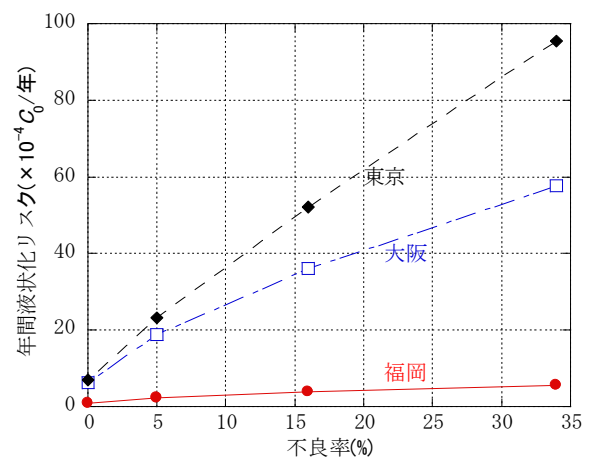


図-12 年間液状化リスク(福岡、大阪、東京)

- (2) 年液状化発生確率は、不良率が大きくなるとともに増大した。ただし、地震の発生確率が地震外力の増大につれて減少することに起因して、年液状化発生確率の増加割合は、地震外力が大きくなると減少した。
- (3) 局所的な液状化に起因した被害率は、不良率が大きくなるとともに増大した。ただし、地震外力300Galにおいて本文で仮定した被害率が40%に収束することから、地震外力300Galでの液状化による最大被害額は、上部構造物が全壊した時の最大被害額があると判断できる。
- (4) 東京での液状化によるリスクは、年超過確率 $2.0 \times 10^{-2}$ 回/年(再現期間50年)を想定した場合、不良率が34%の地盤は最大被害額の21%を有するが、不良率が0%の改良地盤は液状化による被害を受けない。
- (5) 年間液状化リスクは、不良率が大きくなるとともに増大した。また、その増加割合は地震の発生確率の影響を受けるため、各都市によって異なる。

## 参考文献

- 1) Zen, K., Yamazaki, H. & 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. & 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. & Ollson, L.: On horizontal variability in limecement columns in deep mixing, *Geotechnique*, 55(1), pp.33-44, 2005
- 4) 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性設計, 土木学会論文集, No. 603, pp. 101-111, 1998
- 5) 片岡範夫: 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, 自然災害科学研究西部地区部会報, 2010
- 6) 笠間清伸, 善功企, 陳光齊, 久米英輝: 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
- 7) Iai, S., Matsunaga, Y., & Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *Report of the Harbour Research Institute*, Vol.29, pp.27-56. 1990.
- 8) Baecher, G.B. Christian, J.T.: Reliability and statistics in geotechnical engineering, John Wiley & Sons, Ltd, NY, 2003.
- 9) 建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 2004
- 10) (財) 沿岸開発技術センター編: 事前混合処理工法技術マニュアル, pp. 64-76, 1999
- 11) 忽那惇, 善功企, 陳光齊, 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