

## 総費用最小化理論に基づく液状化対策地盤の最適地盤改良度の提案

稲富, 祐太郎  
九州大学大学院工学府

笠間, 清伸  
九州大学大学院工学研究院

善, 功企  
九州大学大学院工学研究院

陳, 光斉  
九州大学大学院工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/21852>

---

出版情報 : JCOSSAR2011論文集, pp.657-663, 2011-10. 日本学術会議 土木工学・建築学委員会  
バージョン :  
権利関係 :

# 総費用最小化理論に基づく液状化対策地盤の最適地盤改良度の提案

稲富祐太郎\* 笠間清伸\*\* 善功企\*\* 陳光斉\*\*

by

Yutaro INATOMI\*, Kiyonobu KASAMA\*\*, Kouki ZEN\*\* and Guangqi CHEN\*\*

This paper presents a liquefaction risk analysis in terms of the percent defective in ground improvement. In this paper, the liquefaction potential of artificially solidified ground is analyzed statistically using Monte Carlo Simulation of the nonlinear earthquake response analysis considering the spatial variability of soil properties. Damage cost induced by a partial liquefaction in the solidified ground is estimated based on the reduction of the seismic bearing capacity obtained by random field numerical limit analysis. The annual liquefaction risk is calculated by multiplying the liquefaction potential with the damage costs caused by a partial liquefaction. Effects of percent defective in ground improvement on the liquefaction risk of anti-liquefaction ground investigated using the hazard curve, fragility curve induced by liquefaction, and liquefaction risk curve. Moreover, the percent defective in ground improvement was discussed from the viewpoint of the quality verification for the construction of anti-liquefaction ground. Finally, ideal strength of ground improvement was decided based on minimization of expected total cost.

**Key words:** Liquefaction, Risk analysis, Ideal strength

## 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年に発生した東北地方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、構造物の安全性をフラジリティ曲線、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、西村ら<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、片岡ら<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、笠間ら<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。

一般に構造物のリスク評価は、コストと連携づけて議論されることが多く、コスト面では維持管理費用を含めたライフサイクルコストの縮減が要求される。通常、構造物のリスクを低くしようとする場合、初期建設費や維持管理費が大きくなり、相反関係が成立する。したがって、構造物における総コストを最小化することができ、最適設計計画を決定することが出来る。西村ら<sup>7)</sup>は、総コストを最小化する設計法について解説した。この考え方は、様々な不確定要因に対して費用の期待値を算出する期待総費用最小化理論として信頼設計法に取り入れられることが多い。

地盤改良を行う際、地盤強度に空間的不均質性が生じることから改良強度を割り増すことが多い。そこで本論文では、液状化の目安とされる強度 100kPa を設計強度と定義し、割り増した改良強度を設計強度で除したもの

+ 原稿受理 2011年4月30日 Received

\* 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

\*\* 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門〒819-0395 福岡市元岡744

を割増係数と定義し、割増係数に着目した液状化リスク分析を行った。そして、総コストとの関係から、最適な割増係数を算出することを目的とした。

## 2 液状化リスク分析手法

地盤の非線形応答解析には、地震応答プログラム *FLIP* を使用した<sup>8)</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、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 Fig. 1 に示す。また、Table 1 に解析条件を示す。固化処理土の一軸圧縮強さ  $q_u$  における変動係数  $COV_{q_u}$  は、実地盤の一軸圧縮強さ  $q_u$  の試験結果から 0.2~1.0 とした。ただし、本論文では最も液状化の可能性があり危険だと考えられる変動係数 1.0 を中心に分析を行った。一軸圧縮強さ  $q_u$  の自己相関距離  $\Theta$  は、非常に小さい条件 (random と表記) と設定した。入力地震波は、福岡西方沖地震で観測された南北方向の加速度波形<sup>9)</sup>を用いた。ただし、最大入力加速度を 1~3m/sec<sup>2</sup> に振幅調整した。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>10)</sup>。Fig. 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。本研究では、Fig.1 のような地盤が各都市にあるものと想定し解析を行った。

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

Fig. 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>11)</sup> に示された諸係数を用いて算出した。

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

本法では、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、各深度の液状化に対する安全性を表す指標である。通常、 $F_L < 1.0$  の時に地盤が液状化する可能性があるとして判断される。

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

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>12)</sup> による一軸圧縮強さ  $q_u$  との関係から求めた回帰式(4)より算出した。

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

$L$  は地盤要素に作用する繰返しせん断応力比であり、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の平均値  $A_{max}$  から式(5)より算出した。

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

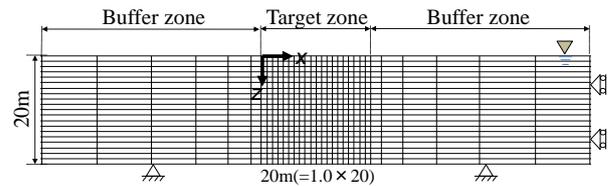
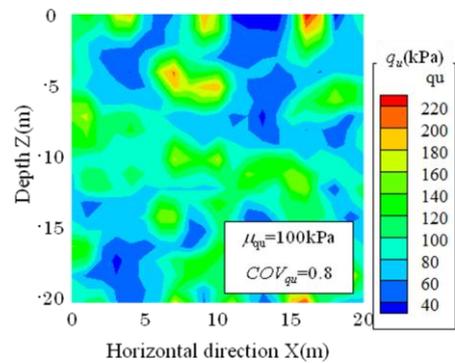


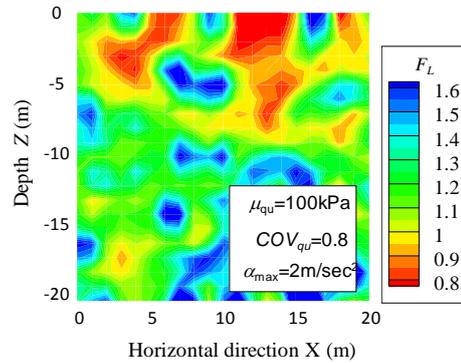
Fig. 1 Finite element mesh

Table 1 Input parameters

Input parameter	Symbol	Unit	Value
Unconfined compressive strength	$\mu_{q_u}$	kPa	200
	$COV_{q_u}$		0.2-1.0
Correlation length	$\theta$	m	random
Poisson ratio			0.33
Density	$\rho$	t/m <sup>3</sup>	1.89
Damping coefficient	$h$		0.15
Internal friction angle	$\phi$	degree	30
Unit weight	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	18.5
Effective unit weight	$\gamma'$	kN/m <sup>3</sup>	8.5
Monte Carlo iteration			1000



a)  $q_u$



b)  $F_L$

Fig. 2 Typical results of strength and liquefaction

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。Fig. 2b) に、Fig. 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  $P_L[F_L < 1.0 | \alpha]$  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  $P_L[F_L < 1 | \alpha]$  と定義し、

式(6)から算出した。

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

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>13)</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。

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

$$F(P_r[F_L < 1.0 | \alpha]) = 1.0 \quad (10)$$

ここで、 $F(P_r)$  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る。現在、液状化による被害形態の研究が進んでいないことから、本研究では  $F(P_r[F_L < 1.0 | \alpha]) = 1.0$  と定義した。液状化率と被害率の関係を双曲線近似した回帰曲線を Table 2 にまとめ、この結果を利用し被害率を算出した。なお、最大入力加速度  $2\text{m/sec}^2$  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。そして、最終的に、式(11)を用いて液状化リスク  $R$  を算出した。

$$R = P_r[F_L < 1.0 | \alpha] \times \{K \times C_0 [P_r[F_L < 1.0 | \alpha]]\} \quad (11)$$

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。

### 3 地盤改良における割増係数

事前混合処理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。地盤強度に空間的不均質性が生じることから改良強度を割り増すことが多い。本論文では、液状化の目安とされる強度  $100\text{kPa}$  を設計強度と定義し、割り増した改良強度を設計強度で除したものを割増係数と定義した。Fig. 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と同配合条件での原位置強度の比をまとめたものである。原位置強度と室内強度は、同配合条件で等しくなる(割増係数=1.0)のが理想的であるが、図より明らかのように、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、強度比は 1.0

を中心にばらつきを有する値となる。本論文では、室内強度を目標強度と定義した。その際の目標強度は、液状化対策の必要強度とされる  $100\text{kPa}$  とした。

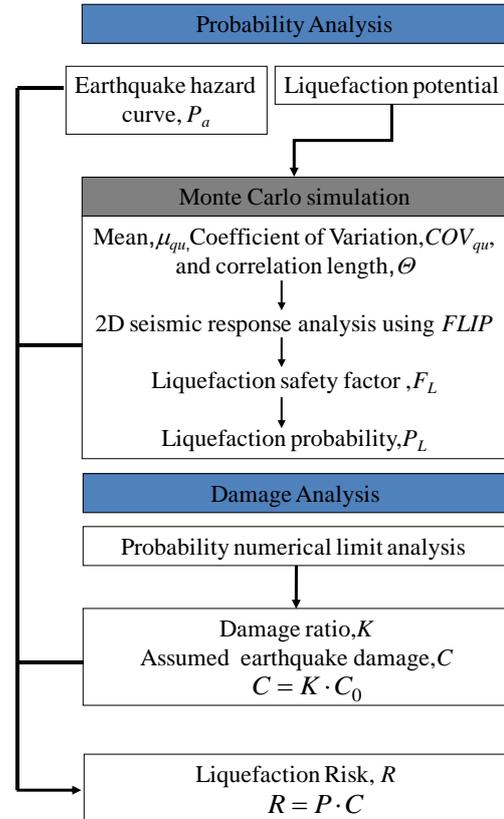


Fig. 3 Liquefaction risk analysis flow

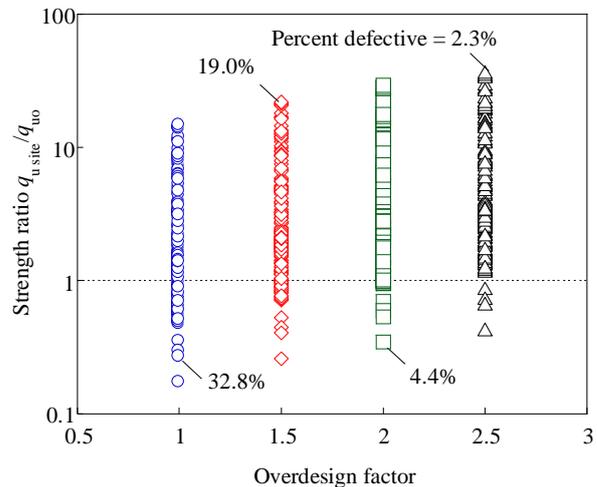


Fig. 4 Strength ratio and overdesign factor

Table 2 Damage ratio and liquefaction potential

Acceleration	Damage ratio $K(P_r[F_L < 1.0   \alpha])$ (%)	Correlation
$1\text{m/sec}^2$	$K = x / (0.0313 + 0.0116 \times x) + 14$	0.9832
$2\text{m/sec}^2$	$K = x / (0.0124 + 0.0130 \times x) + 27$	0.9989
$3\text{m/sec}^2$	$K = x / (0.0127 + 0.0357 \times x) + 72$	0.9998

x: Liquefaction potential  $P_r[F_L < 1.0 | \alpha]$  (%)

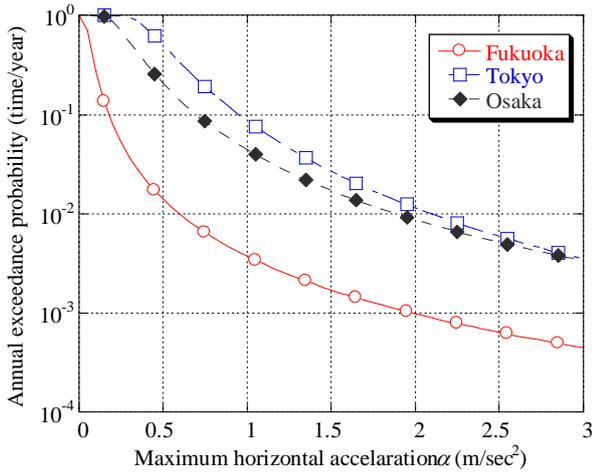


Fig. 5 Annual exceedance probability of earthquake

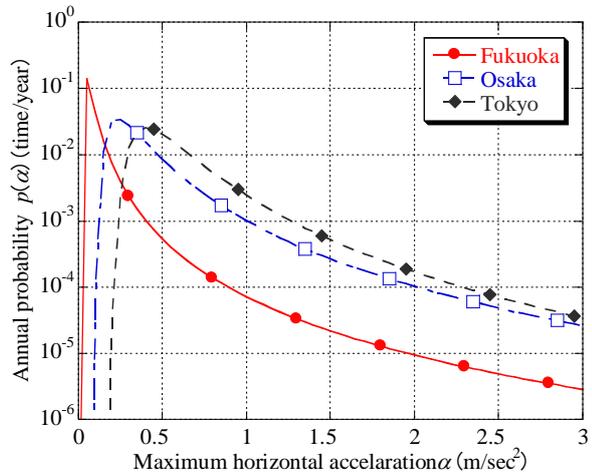


Fig. 6 Annual probability of earthquake

#### 4 液状化リスク分析結果

##### 4・1 確率分析

Fig. 5 に、福岡、大阪および東京の年超過確率  $P_a$  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  $P_a$  は、地震外力  $\alpha$  が大きくなると減少し、その減少割合は地震外力  $\alpha$  が大きくなるほど減少した。また、同じ年超過確率  $P_a$  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  $P_a=1\%$ 、つまり再現期間 100 年の地震外力  $\alpha$  の値は、福岡が  $0.6\text{m/sec}^2$ 、大阪が  $1.75\text{m/sec}^2$ 、そして東京が  $2\text{m/sec}^2$  である。この結果から、東京は地震の発生しやすい都市であり、福岡は地震の発生しにくい都市であることが分かる。本文では、福岡に着目し、液状化リスク分析を行った。

Fig. 6 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  $p(\alpha)$  を示す。年超過確率  $P_a$  と同様に、いずれの都市においても地震の年超過確率  $P_a$  は、地震外力  $\alpha$  が大きくなると減少した。また、同じ年発生確率  $p(\alpha)$  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、福岡で  $0.4\text{m/sec}^2$ 、大阪で  $1\text{m/sec}^2$ 、東京で  $1.3\text{m/sec}^2$  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においても減少した。また、各都市の年発生確率  $p(\alpha)$  の最大値の

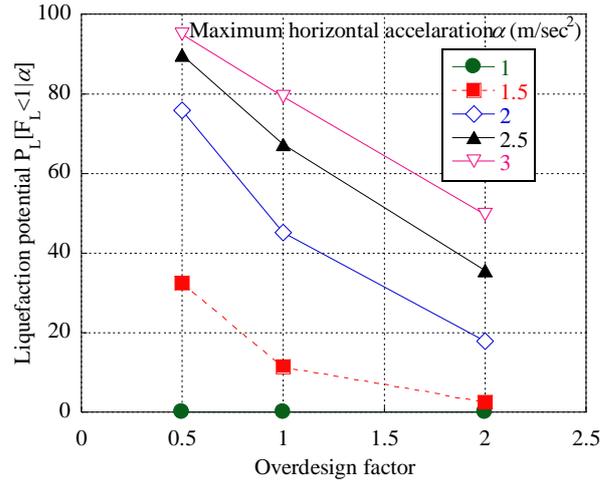


Fig. 7 Liquefaction potential

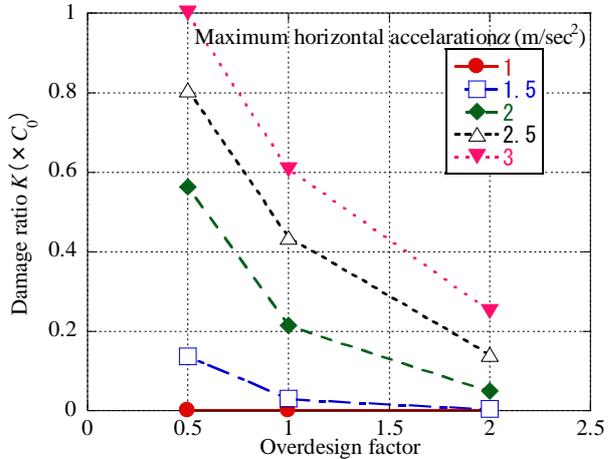


Fig. 8 Damage ratio induced by liquefaction

地震外力  $\alpha$  の値は、異なるものとなった。その値は福岡では  $0.05\text{m/sec}^2$ 、大阪では  $0.3\text{m/sec}^2$ 、東京では  $0.45\text{m/sec}^2$  である。このことより、東京が最も大きな地震が発生する可能性があることが分かる。

Fig. 7 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  $P_L[F_L < 1.0 | \alpha]$  と割増係数の関係を示す。前述したとおり、各割増係数での一軸圧縮強さ  $q_u$  の変動係数は危険側で考慮するため 1.0 とした。液状化率  $P_L[F_L < 1.0 | \alpha]$  は、割増係数が大きくなるほど減少した。また、地震外力  $1\text{m/sec}^2$  においては、割増係数が 0.5 の場合においても、液状化率  $P_L[F_L < 1.0 | \alpha]$  が 0 に近いことから、地震外力  $1\text{m/sec}^2$  以下では液状化は発生しないと推察できる。

##### 4・8 被害分析

Fig. 8 に液状化に起因した被害率  $K$  と不良率の関係を示す。被害率  $K$  は、割増係数が大きくなるほどいずれの地震外力  $\alpha$  においても減少した。また、被害率  $K$  の減少割合は、割増係数が大きくなるほど、いずれの地震外力  $\alpha$  においても減少した。このことより、被害率  $K$  は各地震外力  $\alpha$  でそれぞれ一定値に収束していくと推察できる。

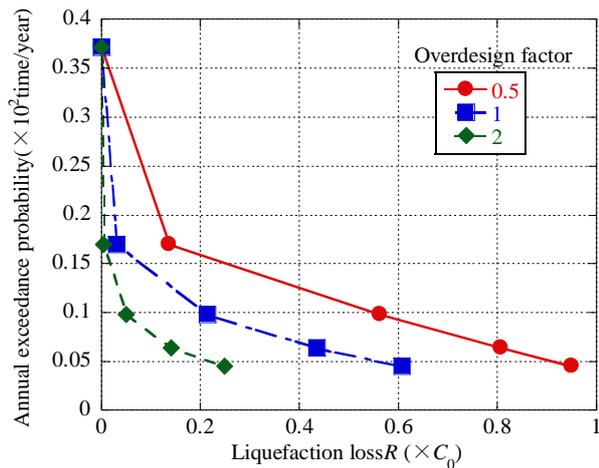


Fig. 9 Liquefaction risk curve (Fukuoka)

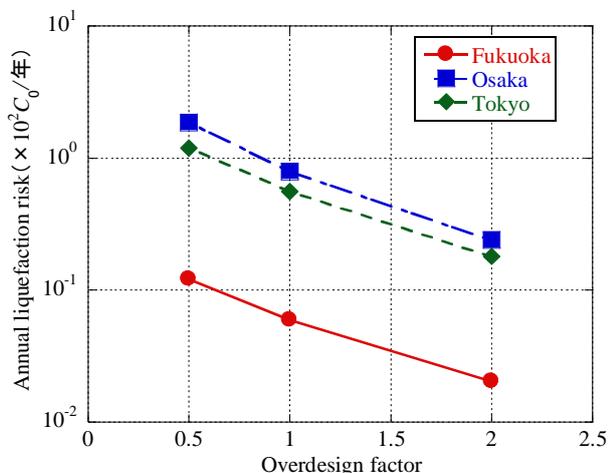


Fig. 10 Annual liquefaction risk

#### 4・3 リスク分析

Fig. 9 に、福岡を想定した固化処理地盤の液化化リスク曲線を示す。ここでリスク曲線とは、リスクとそのリスクが発生する年超過確率の関係を示したものである。液化化リスク  $R$  は、割増係数の値によらず、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化化リスク  $R$  は増大した。例えば、年超過確率が 0.1 回/年、つまり再現期間が 10 年の液化化リスク  $R$  を想定した場合、割増係数が 0.5 の地盤の液化化リスク  $R$  は、最大被害額  $C_0$  の 55% 程度を有する。一方、割増係数が 2.0 の改良地盤は、5% 程度とほぼ被害を受けないことが分かる。

さらに、Fig. 9 示す液化化リスク曲線を積分することで各都市がもつ年間の液化化リスク  $AR$  を算出した。福岡、大阪および東京における年間液化化リスクの結果を Fig. 10 示す。各都市の年間液化化リスクは、いずれの都市においても割増係数が大きくなるほど減少した。また、その値は地震の発生確率の影響を受けるため、各都市で異なるものとなった。割増係数が 2.0 の改良地盤を想定すると、各都市の年間液化化リスク  $AR$  は、福岡、大阪および東京でそれぞれ最大被害額  $C_0$  の 0.05%、0.5% および 0.3% となった。

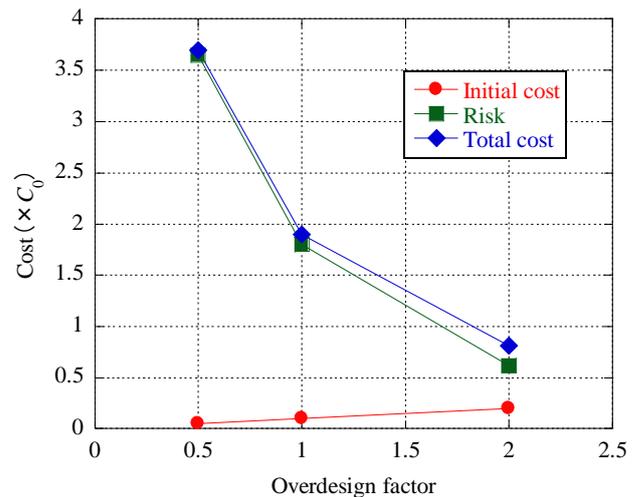


Fig. 11 Cost for Liquefaction ( $C_1=0.1$ )

#### 5 最適地盤改良度の提案

続いて、以上で得た液化化リスクを利用して、液化化対策に伴う期待総費用を最小化することにより、最適な地盤改良の不良率を提案することを試みる。一般に構造物の供用年数  $t$  年における期待総費用  $C_T$  は、以下の式のように表される。

$$C_T(t) = C_I + C_M(t) + C_F(t) \quad (12)$$

ここで  $C_I$ 、 $C_M$  および  $C_F$  は、それぞれ液化化対策の初期費用、維持管理費用および期待損失費用である。ここで、構造物の破壊損失として液化化被害を取り上げており、液化化対策にかかる費用は初期費用が大半であり、維持管理費用  $C_M$  は無視することができる。また、併用期間  $t$  年とした時の期待損失費用は、年間液化化リスク  $AR$  を用いて、式(13)のように表される。

$$C_F(t) = \sum_{i=1}^n \frac{AR}{(1+r)^i} \quad (13)$$

ここで、 $r$  は、構造物の年間の割引率である。本論文では、割引率  $r$  を公共構造物に用いられる 0.04 とした。さらに、液化化対策の初期費用  $C_I$  と最大被害額  $C_0$  との比として初期費用比  $\lambda = C_I/C_0$  を導入する。また、地盤改良の割増係数が大きくなるほど初期費用が増大すると仮定し、割増係数 1.0、つまり割り増しを行わない地盤改良を基準として割増係数が 1.0 の地盤改良コストが 0.1 の時、割増係数が 0.5 ならば地盤改良コストは 0.05、割増係数が 2.0 ならば地盤改良コストは 2.0 であると想定した。異常により式(12)は以下ようになる。

$$C_T(t) = \lambda \cdot C_0 \cdot P_D + \sum_{i=1}^n \frac{AR}{(1+r)^i} \quad (13)$$

ただし、 $P_D$  が割増係数である。以上から得られた結果を用いて、液化化リスク  $R$  と構造物の期待総費用  $C_T$  の関係から、地盤改良における最適地盤改良度を検討した。

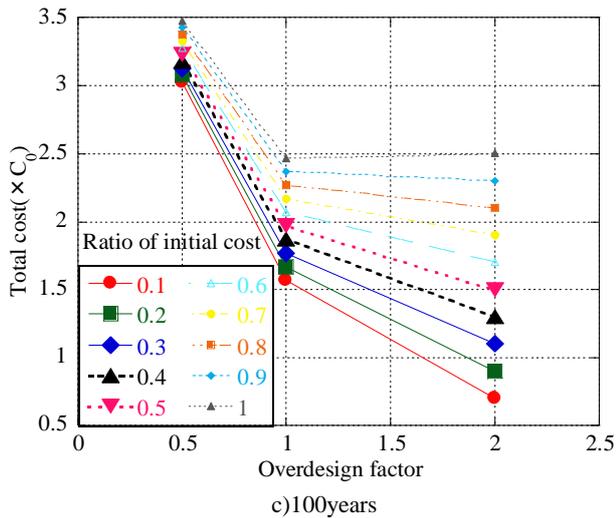
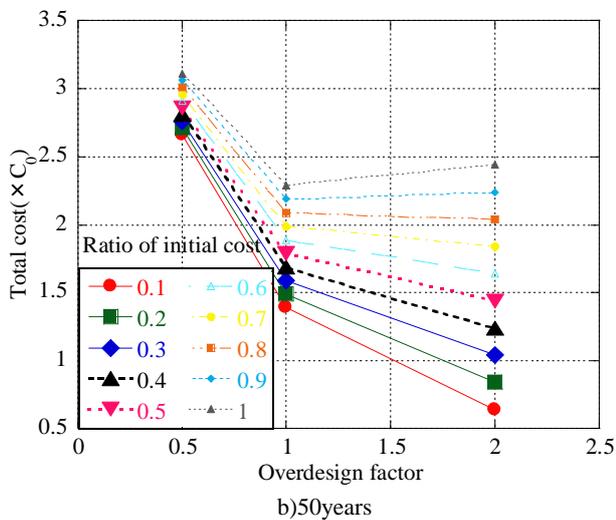
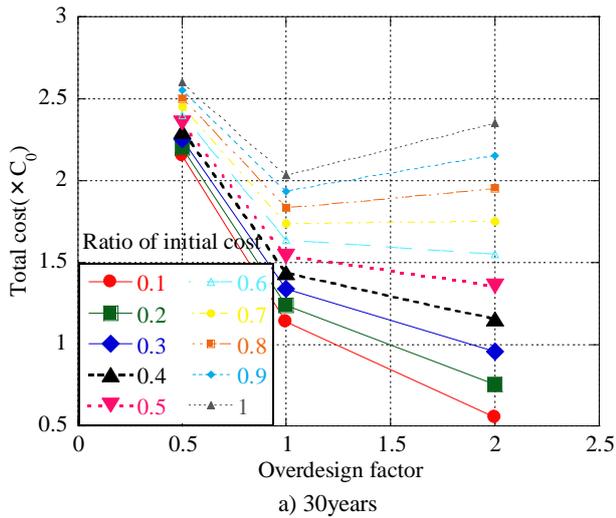


Fig.12 Total cost for liquefaction

一般に構造物の供用年数は、対象構造物の規模および重要性に応じて30年、50年および100年とされることが多い。このことから、福岡を想定した供用年数30年、50年および100年の液状化対策における期待損失費用をFig.12に示す。福岡ではいずれの供用年数においても、地盤改良の初期費用が小さい場合、総期待費用は割増係

数が大きくなるほど減少した。しかし、初期費用が大きくなると期待総費用は、割増係数1.0の場合に最小値をとった。このことより地盤改良の初期費用が大きくなるほど、最適地盤改良度は小さい値をとる。つまり改良を行う際、割り増しを行う必要はないことがわかる。したがって、地盤改良の初期費用比が大きい場合、最適地盤改良度は割増係数1.0をとり、初期費用比が小さい場合最適地盤改良度は割増係数2.0もしくはさらに大きな割り増しを行う必要がある。本研究では、割増係数2.0までの解析で議論を進めたが、2.0以上の解析を行っていく必要がある。

以上のように液状化対策を行う際、未改良地盤の年間液状化リスク $AR_0$ と初期費用比が分かることによって、液状化対策における最適地盤改良度が判断できることを示した。

## 6 結論

本文では、改良地盤を対象に地盤改良の割増係数に着目した液状化リスク分析を行った。そして、期待総費用最小化理論に基づいて最適地盤改良度の算定を行った。得られた結論を以下に示す。

- (1) 液状化率は、改良地盤の割増係数が大きくなるとともに減少した。ただし、地震外力 $1m/sec^2$ において液状化率が小さいことから、地震外力 $1m/sec^2$ 以下の地震において液状化は発生しないと推察できる。
- (2) 局所的な液状化に起因した被害率は、割増係数が大きくなるとともに減少した。ただし、その減少割合は割増係数が大きくなると小さくなった。このことより被害率は各地震外力でそれぞれ一定値に収束していくと推察できる。
- (3) 福岡での液状化によるリスクは、年超過確率が0.1回/年、つまり再現期間が10年の液状化リスク $R$ を想定した場合、割増係数が0.5の地盤の液状化リスク $R$ は、最大被害額 $C_0$ の55%程度を有する。一方、割増係数が2.0の改良地盤は、5%程度とほぼ被害を受けない。
- (4) 年間液状化リスクは、割増係数が大きくなるとともに減少した。また、その値は地震の発生確率の影響を受けるため、各都市で異なるものとなった。割増係数が2.0の改良地盤を想定すると、各都市の年間液状化リスク $AR$ は、福岡、大阪および東京でそれぞれ最大被害額 $C_0$ の3%、0.005%および0.002%となった。
- (5) 割り増しを行わない地盤改良を基準として、初期費用比を設定すると地盤改良の初期費用が大きな地盤では、最適地盤改良度は割増係数1.0となった。また初期費用が小さな改良地盤の最適地盤改良度は割増係数2.0および2.0以上の値となった。

## 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) 西村伸一, 清水英良: 期待総費用最小化理論に基づく干拓堤防の最適液状化対策, 地盤工学会誌, pp27-29, 2003
  - 8) 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.
  - 9) 福岡技術研究所九州支店: 福岡西方沖地震加速度波形
  - 10) Baecher, G.B. Christian, J.T.: Reliability and statistics in geotechnical engineering, John Wiley & Sons, Ltd, NY, 2003.
  - 11) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 2004
  - 12) (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
  - 13) 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