九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

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

陳, 光斉
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

諫山, 亜依
九州大学大学院建設システム工学専攻

笠間, 清伸
九州大学大学院工学研究院

https://hdl.handle.net/2324/21960

出版情報：土木学会論文集. (792), pp.61-73, 2005-06-21. 公益社団法人土木学会
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

土木学会論文集 No. 792／III-71, 61-73, 2005. 6

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

陳光斉[1]・善功企[2]・諫山亜依[3]・笠間清伸[4]

[1]正会員　理博　九州大学助教授　大学院工学研究院　（〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1）
chen@civil.kyushu-u.ac.jp
[2]正会員　工博　九州大学教授　大学院工学研究院（〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1）
zen@civil.kyushu-u.ac.jp
[3]学生会員　工修　九州大学大学院建設システム工学専攻（〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1）
Isayama@civil.kyushu-u.ac.jp
[4]正会員　工博　九州大学助手　大学院工学研究院（〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1）
kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

現行の基準・指針類による液状化予測は，想定されるある大きさの外力に対する液状化の有・無の判定という二者択一的手法であり，土質特性の不確定性，地震動の大きさに応じた液状化レベル，液状化に伴う損失などは評価されていない．本文は，リスクの概念を現行基準の液状化予測手法に導入し，外力や土質条件の不確定性および損失を考慮した液状化リスクの分析手法を提案したものである．モデル地盤を対象に，７つの異なる設計基準・指針類をもとに，モンテカルロ・シミュレーションによる事例解析を行った．提案したリスク分析手法を用いることにより，対象地点における土質特性の不確定性を考慮した液状化の発生確率や損失率(期待損失額）などの定量的評価が可能であることが明らかになった．

Key Words : *liquefaction, risk analysis, simulation, standard, reliability, uncertainty*

1. はじめに

社会が成熟するにつれ，また，豊かになるにつれて，災害リスクや危機管理への対応は，ますます重要な社会的課題となっている．「阪神・淡路大震災」や「ニューヨーク同時テロ事件」は，リスク管理が待ったなしの状況であることを世界に突きつけた特筆すべき出来事であった．社会資本の整備にあたっても災害リスク概念の重要性が指摘されている[1),2)]．

災害は人間の生命，身体および財産と密接に関連しており，異常な自然現象であっても，人間活動に関わりがなければ災害とはいいがたい．災害における人間の関わり方の「濃密さ」を表すひとつの指標にリスクの概念がある．リスクは，経済・医療・環境・防災等あらゆる分野に存在し，その定義は分野によって異なるが，暴風，豪雨，豪雪，洪水，高潮，地震，津波，噴火等々を誘因とする自然災害を対象とした場合，「リスク=発生確率×損失額」で表されることが多い．これは，損害保険料率の算定で用いられる手法と同じである．リスクはゼロから極端に言えば無限大まで存在し，発生確率が極めて小さい場合でも，災害が発生した場合に巨額の損失を被るならばリスクは極めて大きい．

地震時に発生する地盤の液状化は，建物の破損・倒壊，地盤および土構造物の不等沈下，破壊，変形，側方流動，埋設構造物の浮き上がり，など様々な被害を引き起こし，結果的に社会・経済的に甚大な被害をもたらす．これまで，既往の被災事例の研究により，各種の液状化予測・対策手法が開発，提案されてきた．現行の液状化の予測・判定手法は，主に確率・統計的な見地で規定された地域や地盤種別ごとの，想定地震動に対するものであり，かつ，深度

ごとに判定される．液状化が発生すると判定されると，必要に応じて液状化対策が実施される．

しかしながら，これらの対策の実施の要・不要を判断する手法は今なお明確には定まっていない．すなわち,①液状化の有無という二者択一的評価では，液状化による構造物などの被害額，経済的損失が考慮に入っておらず，対策の必要性の定量的判断ができない状況にある．また，②確定的な大きさの外力および地盤特性のみを用いた判定では，起こりうるその他の大きさの外力およびそれによる損失程度や地盤特性などの不確定性が評価されていない．したがって，液状化災害のリスクを検討する上では，今後，こうした不確定性を考慮した評価手法の確立が不可欠と考えられる．

そこで，本文は，リスクの概念を現行基準・指針の液状化予測に導入し，外力や土質条件の不確定性を考慮した液状化危険度評価の手法（液状化のリスク分析手法）を提案するものである．

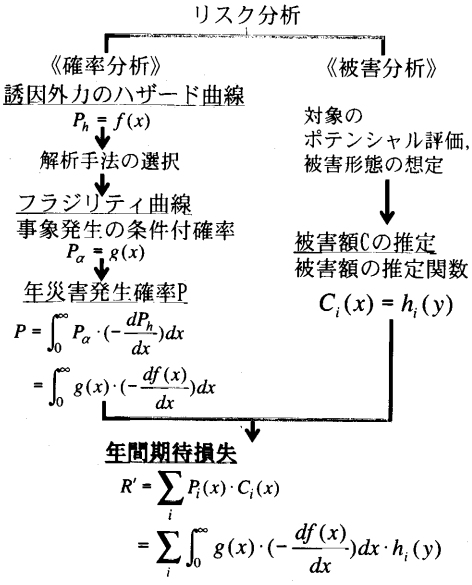


図-1　リスク分析の一般手順

2. リスクおよび液状化予測手法

(1) リスク

リスクは一般に，損失などを生じる可能性の大きさや，損失の事象そのものを示す．リスクマネジメントは，大きく３つの段階を有する[3]．第一段階は，分析対象の設定・ハザードの特定およびリスクの推定を行うリスク分析である．これを受けて，リスク評価を行うリスクアセスメント（第二段階）を経た後，リスクの総合的な管理の実施がリスクマネジメント（第三段階）となる．本研究は，リスクマネジメントの根幹をなすリスク分析に着目し，液状化危険度評価への導入の検討を行った．

本文では，確率・統計的評価に基づく，損失の期待値を以って定義されるリスク R を用いた[4]．

$$R = \sum_i P_i \cdot C_i \tag{1}$$

ここで，P_i は，被害形態 i の年間における発生確率，C_i は被害形態 i による損失の大きさで，物的損失や営業損失などから構成される．

この定式化により，事象による損失と，その事象の発生確率という不確定性をともに考慮することが可能となる．

さらに，誘因外力の地域性などを考慮するために，期待損失を横軸に，誘因外力の年超過確率を縦軸にとり，作成される曲線はリスク曲線とよばれる．このリスク曲線で囲まれる面積は年間における期待損失を表す．

一般的なリスク分析の手順を，**図-1** に示した．損失をもたらす何らかの事象の誘因外力として，ある大きさの外力を x とした．リスクの定義により，リスク分析では，確率分析と被害分析を行う必要がある．

まず，確率分析では，対象地における誘因外力の年超過確率を表すハザード曲線 P_h（式(2)）を求めたのち，災害の年間における発生確率 P を算出する．

$$P_h(x) = f(x) \tag{2}$$

この P は，誘因外力の発生確率 P_x（式(3)）に，ある大きさの誘因外力に対する災害発生の条件付確率 $P_\alpha(c_i \mid x)$（式(4)）を乗ずることで得られる（式(5)）．

$$P_x = \int_a^b (-\frac{dP_h(x)}{dx})dx = \int_a^b (-\frac{df(x)}{dx})dx \tag{3}$$

$$P_\alpha(c_i|x) = g(x) \tag{4}$$

$$\begin{aligned} P &= \int_0^\infty g(x) \cdot (-\frac{dP_h}{dx})dx \\ &= \int_0^\infty g(x) \cdot (-\frac{df(x)}{dx})dx \end{aligned} \tag{5}$$

ここで，$P_\alpha(c_i \mid x)$は，災害の誘因外力 x を条件とした被害形態 i の発生確率，すなわち，災害発生の条件付確率であり，フラジリティとよばれる．また，ある区間［a,b］における誘因外力の発生確率 P_x は，式

(2) を微分して得られる誘因外力の発生確率密度関数を当該区間で積分することにより得られる（式(3)）．P_α は信頼性理論に基づくフラジリティ曲線によって求まる．

次に，被害分析では，被害額を推定するための指標を y とし，被害額 C_i を下式で算定する．

$$C_i(x) = h_i(y) \tag{6}$$

ここで，指標 y は x の関数である．

以上，二つの分析を経て，リスクの定義によりリスクは式(7)により得られる．

$$\begin{aligned} R' &= \sum_i P_i(x) \cdot C_i(x) \\ &= \sum_i \int_0^\infty g(x) \cdot (-\frac{df(x)}{dx}) dx \cdot h_i(y) \end{aligned} \tag{7}$$

本文では，地震時の液状化リスク分析の一連の流れを具体的に示すために，一例として液状化の可能性のある埋立地モデル[5]を対象に解析を行った．液状化発生の誘因として地震を想定し，誘因外力 x として，各地震における地表面最大加速度を α_{max} をとった．

(2) 既往の液状化予測手法

液状化予測には，想定されるある大きさの地震動に対して，①液状化発生の有無，②液状化発生の場合に構造物に与える影響の程度，の予測があるが，狭義には液状化発生の予測のみを言う．上記②の構造物への影響の予測は未だ研究段階にあるが，①の液状化発生の有無に関しては種々の手法が提案されている[6]．これらの手法には，新潟地震以降の多くの研究成果により，①地形・地質や液状化履歴による概略の予測手法，②土質調査・試験結果による簡易な予測手法，③室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な予測手法，などがある[7)-12)]．

本文では，リスクの導入にあたり液状化発生の条件付確率の算定が必要となることを考慮して，F_L 値を用いる簡易予測手法に着目した．既往の予測手法のフローを**図-2**に示す．各深度 z_i ごとに F_L 値を計算する．

$$F_L = R_f / L_f \tag{8}$$

ここで，動的せん断強度比 R_f は，N 値，平均粒径 D_{50}，細粒分含有率 F_c，鉛直有効応力 σ'_v 等の土質定数の関数，地震時せん断応力比 L_f は，地震の最大加速度 α_{max}，鉛直有効応力の関数である．

既往の予測手法においては，各深度ごとに F_L をもとに液状化の判定が実施されるため，判定結果は対象地点の深度ごとの表示となる．この判定結果の表示によると，深度ごとの液状化危険度の予測状況を把握することは可能であるが，例えば，液状化すると判定された薄層が部分的に存在する場合に，層全体として対策をすべきかどうかは判断できない．

既往の手法においては，次のような課題が挙げられる．

①現行の予測手法では，液状化の有無という二者択一的評価であり，そこにある構造物などの被害の程度が考慮に入っておらず，対策の必要性が定量的には判断できない．

②想定するある大きさの外力および地盤特性のみについての判定であるため，その他の大きさの外力の発生，およびそれによる被害発生の可能性や地盤特性の不確定性が評価されていない．

(3) リスクを用いた評価手法の検討

a) リスクを用いた評価手法

本文では，現行の予測手法にリスクを取り入れることで前述における課題の検討を行った．リスク分析を用いた手法のフロー図を**図-3**に示す．

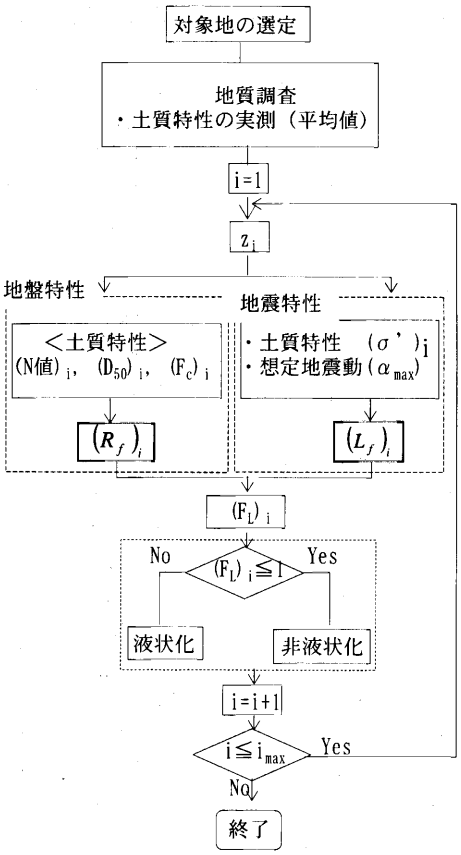


図-2 既往の予測手法フロー（F_L 値を用いる）

まず，確率分析においては，誘因外力の年超過確率を示すハザード曲線と対象地点の誘因外力に対する災害発生確率を示すフラジリティ曲線を算定する．ハザード曲線は，過去の地震履歴などのデータベースを用い，地震発生の時系列モデルや地震規模の確率モデル化などより求められる．また，フラジリティ曲線は，地盤特性や地震特性を用いて行ったが，フラジリティ曲線の算出においては，一般に，厳密な解析が困難である場合に用いられるモンテカルロ・シミュレーションを適用し，ある α_{max} に対する液状化発生の条件付確率 P_α の算定を試みた．モンテカルロ・シミュレーションにおいて，各土質特性を確率変数と仮定した．算定にあたり，岩崎[13]により提案されている層全体の液状化の激しさの程度を表す液状化指数 P_L を指標として用いた[14]．

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot (10 - 0.5z)dz \tag{9}$$

ただし

$$\begin{cases} F = 1 - F_L & (F_L < 1.0) \\ F = 0 & (F_L \geq 1.0) \end{cases} \tag{10}$$

液状化発生の判断基準とした P_L 値，**図-3** における $(P_L)_{lqf}$ を設定し，ある $(\alpha_{max})_i$ において，各シミュレーション j ごとに得られた $(P_L)_{ij}$ について $(P_L)_{ij} \geqq (P_L)_{lqf}$ を満たす $(P_L)_{ij}$ の個数 $Num(P_L)_{lqf}$ を求める．$Num(P_L)_{lqf}$ の，全データ数 j_{max} に対する割合を $(P_\alpha)_i$ として求めることにより，フラジリティ曲線を描いた．

次に，被害分析では，**図-3** に示すとおり，被害形態の想定，各対象別の被害算定などを行う必要があるが，現時点では被害分析は研究段階であるため，本文では液状化の程度に着目し，全壊時の最大被害額を基準にして液状化程度の影響を考慮した被害額の評価を試みた．

b) 各種指針類について

液状化安全率 F_L の評価には，色々な機関から指針が提案されている．つまり，各指針においては，R_f および L_f の評価式が異なる（R_f および L_f の詳細については参考文献15に纏められているので参照されたい）．本文では，いくつかの設計基準を用いた予測結果の比較検討を行った．用いた設計基準類は，**表-1**に示す7つである．①道路橋示方書1990年)）[16]（以下，道示90）および②道路橋示方書2002年）[16]（以下，道示02）は岩崎・龍岡らの研究成果を受けたのもであり，③鉄道構造物等設計標準[17]（以下，鉄道），④国鉄建造物設計標準[18]（以下，国鉄），⑥捨石・鉱さいたい積場建設基準[19]（以下，捨鉱）

表-1 解析に用いた指針類

基準番号	基準・指針類名称	年	発行機関
①	道路橋示方書	1990年	日本道路協会
②	道路橋示方書	2002年	日本道路協会
③	鉄道構造物等設計標準・同解説	1997年	鉄道総合技術研究所
④	国鉄建造物設計標準解説	1986年	土木学会
⑤	原子力発電所耐震設計技術指針	1987年	日本電気協会
⑥	捨石，鉱さいたい積場建設基準および解	1982年	日本鉱業協会
⑦	港湾の施設の技術上の基準・同解説	1999年	日本港湾協会

がこれに準拠する．⑤原子力発電所耐震設計[20]（以下，原技針）は，緩い砂地盤から密な砂地盤までの地盤に対する液状化応力比と基準化した N 値との関係を用いている．また，原技針では，繰り返し三軸試験における軸ひずみの両振幅 ε_{DA}=5%の条件で解析を行った．さらに，⑦港湾の施設の技術上の基準[21]（以下，港湾）に関しては，直接的には P_L 値が求められないので，等価 N 値と等価加速度によ土層区分図を用いる予測手法を参考にして，便宜的に P_L 値の算定を試みた．すなわち，液状化地点と非液状化地点に関する深度と F_L 値の関係図から，土層区分図において F_L=0.0, F_L=0.8, F_L=1.2の境界線を定め，ある等価加速度に対して，F_L 値を均等に割り振って解析を行った．なお，等価加速度は，地盤は剛体と仮定してせん断力を求め，得られたせん断に低減係数 γ_d を乗じて算出されると仮定した[19]．このさい，用いた波形は，一般の岸壁の液状化予測・判定で用いられている「大船戸波（S-252 NS BASE）」（以下，港-大）および「八戸波（S-1210 E41S）」（以下，港-八）で，それぞれにおけるせん断力の低減係数は式(11a)，式(11b)で示される．

$$\gamma_d = 1.0 - 0.019z \quad (z \leq 25m) \tag{11a}$$

$$\gamma_d = 1.0 - 0.026z \quad (z \leq 25m) \tag{11b}$$

3. 液状化リスクの事例解析

本文では以下の事例解析を通じて，液状化リスクの計算手順を示す．

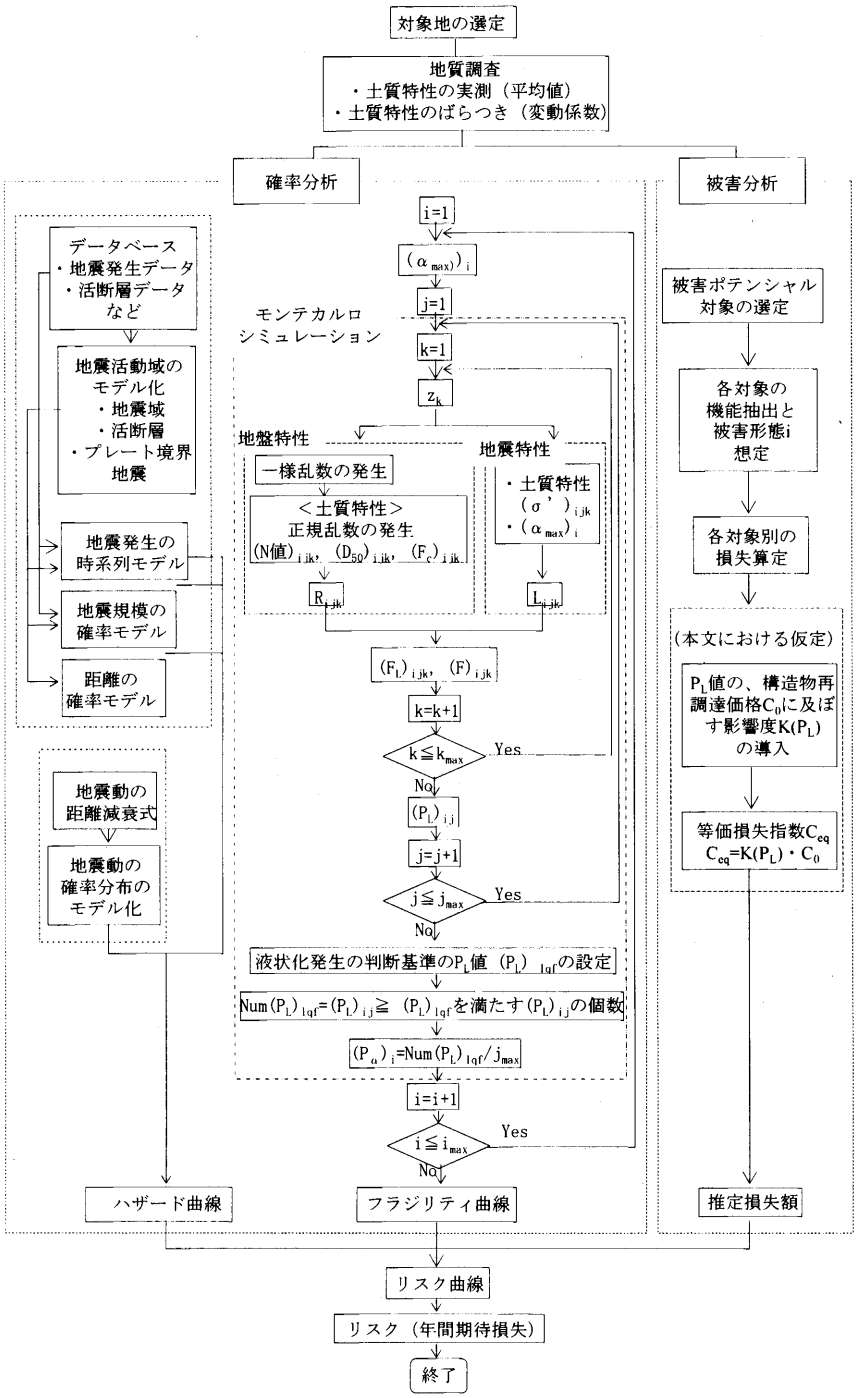
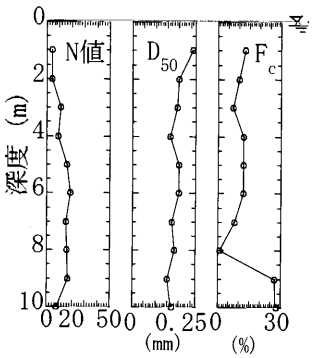


図-3 リスク分析を用いた手法のフロー図

表-2 土質特性

Z[m]	平均値 N値	D50	Fc
1	4	0.26	13
2	4	0.20	10
3	11	0.19	7
4	9	0.16	12
5	16	0.20	12
6	19	0.20	12
7	15	0.17	8
8	16	0.18	1
9	17	0.15	27
10	8	0.17	28



＊変動係数δは0.2，0.5および0.8で検討

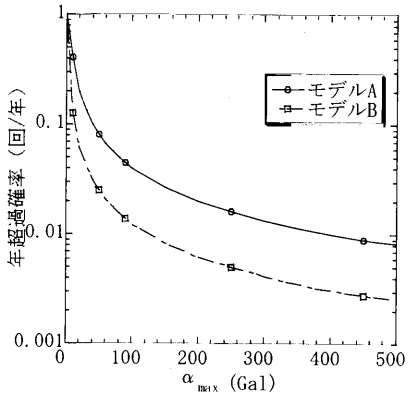


図-4 地震ハザード曲線

(1) 地盤条件

解析のさい，土質定数に関しては，N値，D_{50}，F_cを確率変数とし，地盤の湿潤密度を確定値18.5kN/m^{3}とした．モデル地盤の土質特性を**表-2**に示す．

深さ方向にN値，D_{50}，F_c等の平均値が変化している．地盤の土質定数のばらつきについては，変動係数δを0.5とした場合と，δ＝0.2，δ＝0.8の場合についても計算した（標準偏差＝変動係数×平均値）．

(2) 地震条件

石川ら[23]が提案している地震ハザード曲線を利用して，２つのモデル地域の地震特性について検討した．**図-4**に示すモデルAとモデルBはそれぞれA地域とB地域の地震ハザード曲線である．本文では，吉田[24]と同様に，得られた曲線の近似関係式を用いて地震発生の年超過確率を計算する．

モデルA： $P_h(x) = f_A(x)$

$$= \left\{ \exp(-x) + 0.24918x - 6.9211x^{1/2} + 19.328x^{1/3} - 11.728x^{1/4} \right\}^{-1} \tag{12a}$$

モデルB： $P_h(x) = f_B(x)$

$$= \left\{ \exp(-x) + 0.80323x - 4.0838x^{1/2} + 3.4632x^{1/3} + 0.78309x^{1/4} \right\}^{-1} \tag{12b}$$

ここで，xは地表面最大加速度α_{max}である．

(3) フラジリティ曲線

表-2 に示す土質定数 N，D_{50}，F_c の分布が正規分布に従うとして，1,000 回のモンテカルロ・シミュレーションを行った．N，D_{50}，F_c の変動係数は同じとし，それらを同時に変化させた．

本解析で対象とした地震外力の範囲は 0～300 Gal であり，10Gal ごとに液状化発生の確率を計算した．

ある一定の地震外力に対して，モンテカルロ・シミュレーションによる液状化発生の条件付確率の計算を以下の手順で行った．

① 深さ 1m から 10m まで 1m ごとに N，D_{50}，F_c の平均値と変動係数より N，D_{50}，F_c に関する標本を抽出する．

② 各指針の R_f と L_f の評価式を用いて，深さごとに F_L を計算する．

③ 式(10)により各層の F が得られ，式(9)に代入し，P_L を計算する．

④ ①～③の手順を 1000 回繰り返す．

⑤ 液状化発生の条件付確率は$(P_L)_{lqf}$を超えた回数とモンテカルロ・シミュレーションの総数 1000 との割合である．

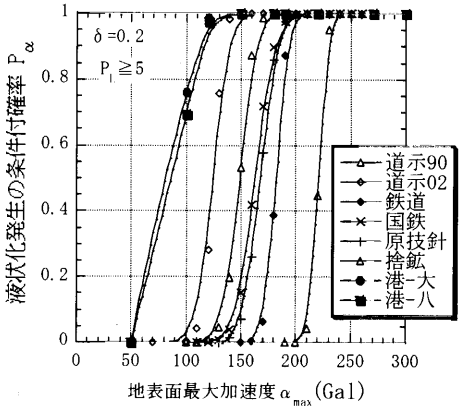
液状化発生の判断条件は $P_L \geqq 5$，すなわち，**図-3** において$(P_L)_{lqf}=5$ と設定した．岩崎らによると，$P_L \geqq 5$ で液状化の危険度が高くなることが明らかにされており[14]，この仮定はほぼ妥当なものと考えられる． 得られたフラジリティ曲線を**図-5** に示す．

(4) 被害分析

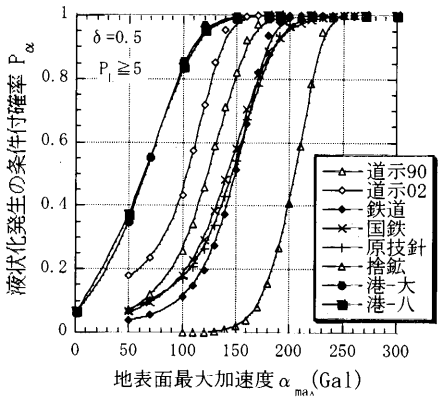
本文では，構造物が液状化により全壊した場合の最大被害額 C_0（構造物全壊の損害額や構造物の中の設備の損害額，サービス停止による損益等の全てのありうる損害の和）を基準にして，液状化程度の影響を考慮した被害額の評価を試みた．

C_0 に被害額への影響度係数 $K(P_L)$を乗じることで，液状化程度による被害額を評価することにした．この影響度を導入し，次式で表される等価損失指数 C_{eq}を定義した．

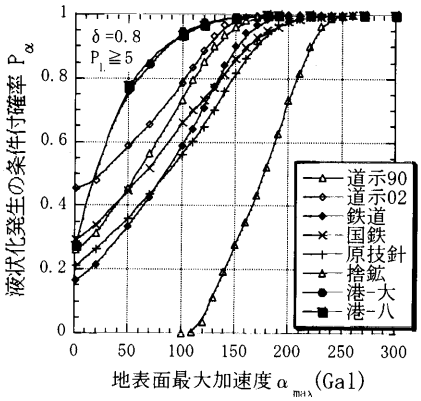
$$C_{eq} = K(P_L)C_0 \qquad 0 \leq K(P_L) \leq 1 \tag{13}$$



(a) 変動係数 δ=0.2



(b) 変動係数 δ=0.5



(c) 変動係数 δ=0.8

図-5 モデル地盤におけるフラジリティ曲線

影響度係数$K(P_L)$の表現に関しては，液状化による被害実績のレビューおよび調査・検証を行っていく必要がある．そこで，本文では一例として，岡[25]による，液状化指数P_L値と液状化の程度との定性的な関係をもとに，$P_L \geqq 35$で構造物全壊として，P_L値と影響度$K(P_L)$の間に，**図-6**に示す一義的な関係を仮定した．**図-6**中のマーカーは，図中の関係式の算出に仮定した部分点の値を示している．また，最大被害額としては，C_0＝150000〔万円〕としたケースについて検討したが，期待損失額/最大被害額を損失率dr，年間期待損失額/最大被害額を年間損失率dr'として損失の程度を表した．

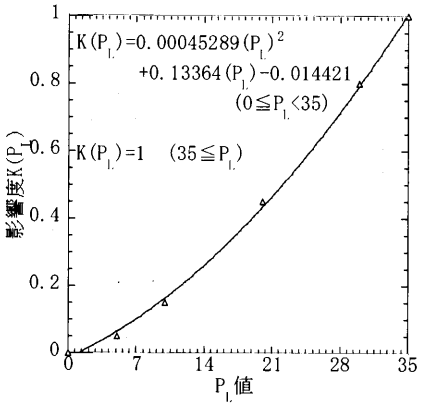


図-6 被害額への影響度関数

(5) リスクの算出

a) リスク曲線

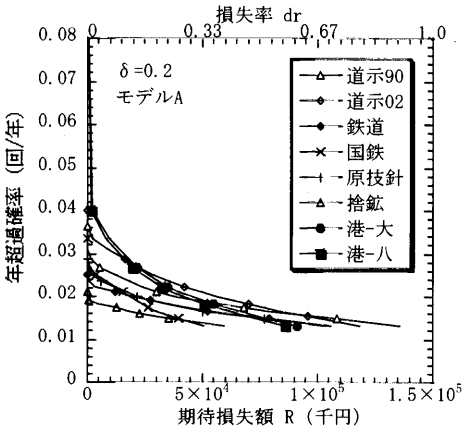
ある$(\alpha_{max})_i$において，各シミュレーションjごとに得られる$(P_L)_{ij}$に対する最大被害額への影響度$\{K(P_L)\}_{ij}$を**図-6**よりそれぞれ求め，それら$\{K(P_L)\}_{ij}$の平均値を当該外力$(\alpha_{max})_i$に対する影響度$\{K(P_L)\}_i$とした．これをもとに，式(13)により，$(\alpha_{max})_i$に対する等価損失指数C_{eq}が算定される．対応する液状化発生の条件付確率P_αを等価損失指数C_{eq}に乗じて，期待損失額Rが求まる（式（14））．

$$R = P_\alpha \cdot C_{eq} \tag{14}$$

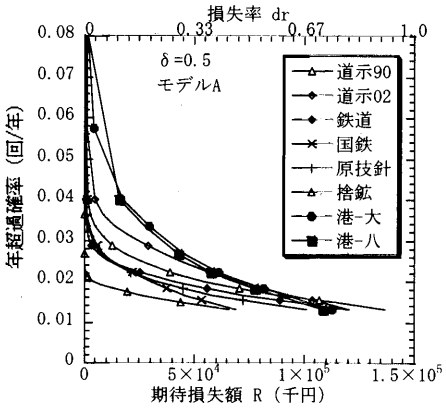
この期待損失Rと，地震ハザード曲線において対応するα_{max}の年超過確率P_hとを新しくプロットしてリスク曲線を求めた．**図-7**と**図-8**はそれぞれA地域（モデルA）とB地域（モデルB）におけるリスク曲線である．

b) 年間期待損失額

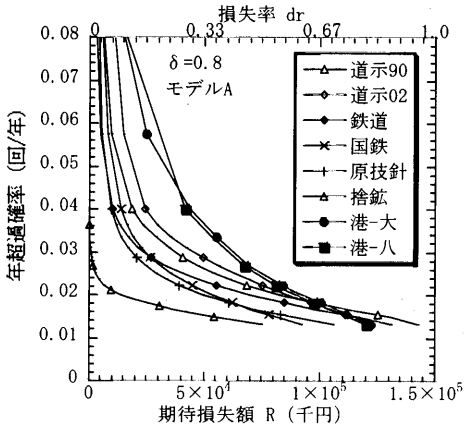
本文では，得られたリスク曲線について積分を行い求まる年間期待損失額R'で，リスクを表した．**図-9**は土質特性の各変動係数に対して得られた年間期待損失曲線である．



(a) モデル A, δ=0.2

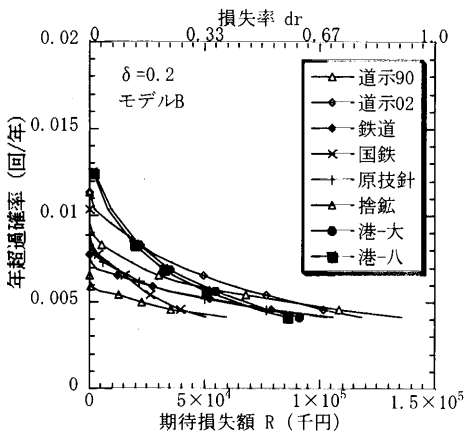


(b) モデルA, δ=0.5

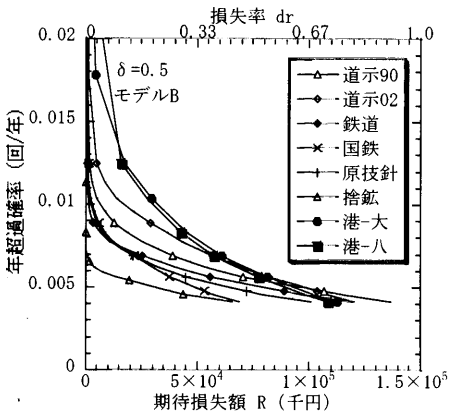


(c) モデルA, δ=0.8

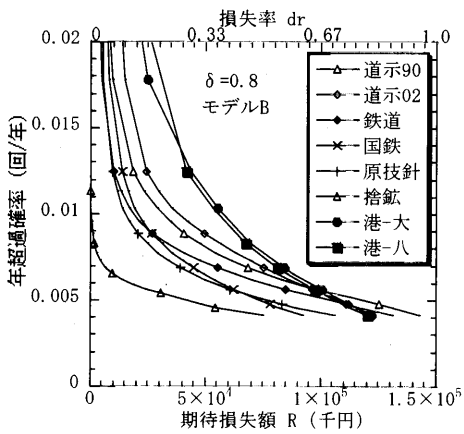
図-7 A 地域におけるリスク曲線



(a) モデルB, δ=0.2

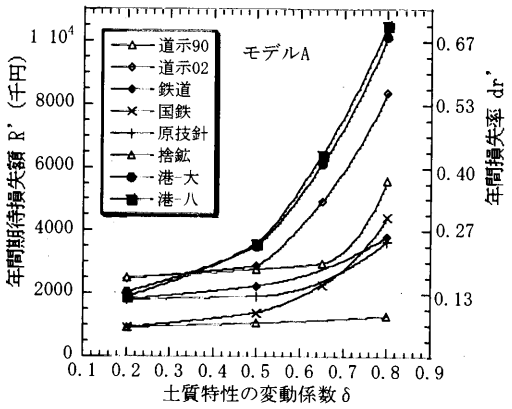


(b) モデルB, δ=0.5

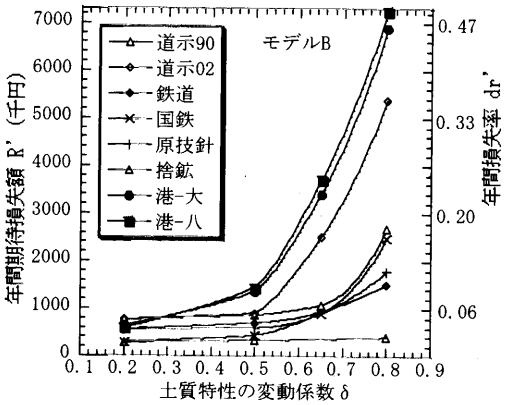


(c) モデル B, δ=0.8

図-8 B 地域におけるリスク曲線



(a) モデルA



(b) モデルB

図-9 年間期待損失曲線

4. 考察

(1) フラジリティ曲線の特徴

図-5 より，いずれの基準・指針類においても地表面最大加速度 α_{max} の増大とともに，液状化の条件付確率 P_α も大きく評価されており，液状化発生の可能性が増していくことが分かる．この傾向は，変動係数δによらず同じであるが，δが大きくなるとフラジリティ曲線が図上の左上側にシフトし，同一 α_{max} に対する液状化発生確率が高くなっている．また，基準・指針類の違いによって，フラジリティ曲線がかなり異なることが分かる．

(2) 地域の地震発生確率特性の影響

液状化の誘因は地震である．既往の手法では，想定した地震の大きさ α_{max} を用いて，計算された F_L によって液状化の発生の有無を予測する．例えば，上述の地盤モデルを対象に，各基準・指針類を用いて解析を行った．結果としては，α_{max}＝100Gal 以下の地震においては，液状化が発生しない，α_{max}＝300Gal 以上の地震であれば，ほとんど液状化が発生するという判定である．また，100Gal から 300Gal までの間の地震に対しては，液状化が発生する層としない層があり，明確な判定が困難である．また，実際に，どんな地域でも，**図-4** に示されるように，種々の大きさの地震が発生する可能性があるが，既往の手法では，地震ハザード曲線を利用することができない．

一方，本文提案した液状化のリスク評価手法では，各大きさの地震に対して，液状化発生の条件付確率を求め，地域の地震ハザード曲線を用いて液状化の発生確率を推定するので，地域の地震発生確率特性を考慮することができる．**図-4** に示す A 地域と B 地域においては，モデル B は，地震発生の可能性がモデル A より小さいので，モデル B におけるリスク曲線（**図-8**）はモデル A のリスク曲線（**図-7**）より下側に位置する（**図-8** の縦軸スケールは**図-7** の 1/4）．つまり，B 地域の液状化リスクは A 地域より小さいことになる．

(3) 地盤土質特性のばらつきの影響

α_{max}=50Galでは，既往の手法ではどの指針でも非液状化と判定されているのに対して，本手法において，δ=0.2ではすべての基準・指針類で液状化の発生確率はほぼゼロであり（**図-6(a)**），両者の整合が見られる．しかし，変動係数が大きくなるにつれ液状化の発生確率P_αが大きくなり（**図-6(b)**，**(c)**），液状化発生の可能性は*0*ではない．特に，土質特性のばらつきの指標である変動係数δ＝0.8の場合，液状化の発生確率は，この解析事例では，基準・指針類による差はあるが，0.33～0.78となっている．

地盤の土質特性のばらつきは液状化の発生確率に大きく影響を与えている．一例として，変動係数δによるフラジリティ曲線の変化をみるために，**図-10** に道示 02 による解析結果を示した．同一地震の α_{max} に対して，変動係数が大きくなるに従い，大きな液状化発生確率 P_α を示すことが分かる．ただし，α_{max}=130Gal を越えたあたりから，変動係数の推移にかかわらず，P_α はほぼ一定となっている．その

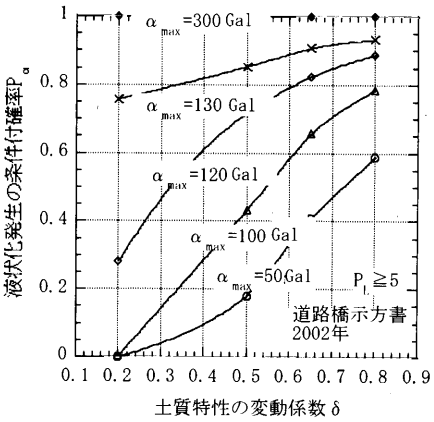


図-10 地盤の土質定数のばらつきの影響

理由は，α_{max} が一定の大きさを越えると，土質定数のばらつきに無関係に液状化が発生することによると考えられる．

また，比較的小さな α_{max} では，δの大小が P_α の値に大きく影響し，δが大きくなると P_α も大きくなることが分かる．このことから，地盤特性のばらつきが本質的なものにしろ，地盤調査段階で得られた人為的なものにしろ，比較的小さな加速度レベルにおいては，土質特性の変動係数が，液状化発生確率に対して重要なパラメータとなることが分かる．リスク曲線においては，**図-7** および**図-8** に示すように，比較的小さな期待損失レベルでは変動係数の増加に伴い年超過確率が増加し，各基準・指針類ごとのリスク曲線の差が顕著になっていくのに対して，大きな期待損失レベルでは，変動係数の推移に関わらず年超過確率は大きな変動はなくほぼ一定で，各基準・指針類ごとのリスク曲線の差はほとんどなく一定値に収束している．

年間期待損失額Rの曲線（**図-9**）においても，変動係数が大きくなるとリスクは大きく算出されることが分かった．

(4) 各基準・指針類の比較

各基準・指針類によるフラジリテイ曲線の特長について考察する．**図-5** において，道示 90（阪神淡路大震災前）と道示 02（阪神淡路大震災後）に着目すると，震災後の基準では，フラジリティ曲線が図上左側にシフトしており，震災前に比較して液状化危険度を高く(設計上は安全側に)評価していることが分かる．震災による知見や被災後の研究の成果が取り込まれているためであると考えられる．また，土質特性の変動係数δにかかわらず，捨鉱ではフラジリティ曲線が最も右側に位置しており，P_α が小さく評価されている．これは他の指針は細粒分や粒度組成などが考慮されているのに対して，捨鉱では N 値のみが用いられているために，強いて言えば概略的な評価となっているためではないかと考えられる．

一方，港湾は，フラジリティ曲線が最も左側に位置しており，P_αが大きく評価されている．ただし，２種類の異なる波形を用いた港-大と港-八との間に，さほど大きな差は見られないことが分かった．港湾については，本来は，等価N値と等価加速度を用いた判定手法であるのに対して，リスクを用いた表現に変換するために，本文ではいくつかの仮定を設けて解析を行ったために，他の結果とやや異なる結果が得られた可能性がある．ここで設けた仮定の妥当性については今後さらなる検討が必要であると考えられる．

リスク曲線においては，港湾のリスク曲線が最も上側に，捨鉱が最も下側にきている．これは，**図-5** のフラジリティ曲線で港湾が液状化の発生確率を最も大きく，捨鉱が最も小さく評価しているためであるが，見方を変えると，港湾が年超過確率からみた液状化のリスクを最も大きく，捨鉱が液状化のリスクを最も小さく評価していることになる．

(5) P_L 値の影響

本文では，液状化発生の条件付確率は

$$P_\alpha = P(P_L \geq 5) \tag{15}$$

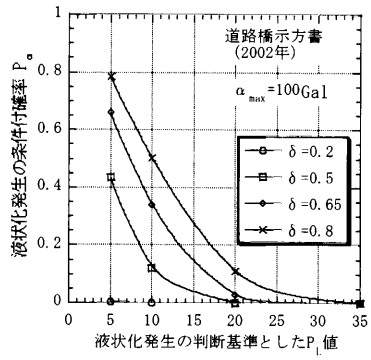
とした．しかし，これは，あくまでも便宜的な仮定であるので，判断指標$(P_L)_{lqf}$ の違いによって液状化発生の条件付確率 P_α が変化することをあらかじめ強調しておきたい．一例として，道示 02 による解析結果を**図-11** に示している．いずれの α_{max} においても，液状化発生の判断基準とする P_L 値を大きくするほど同一 α_{max} に対しては小さな P_α を示している．これは，同一解析データに対して液状化発生の判定値を高くすることで，モンテカルロ・シミュレーションの結果として，液状化と判断される該当データが少なくなっていくため発生確率が小さくなることによる．

また，本文では，$P_L \geqq 35$ をもって構造物の全壊とみなしている．この場合，**図-11** によると，α_{max}=100Gal では，液状化の発生確率はほぼ 0 となっており，構造物が全壊するような液状化が発生する可能性は極めて小さいと判断される．一方，α_{max}=300Gal では，変動係数δにより 0.04～0.34 と

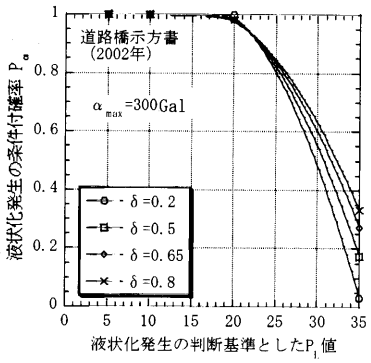
なっている．このことより，構造物が全壊するような激しい液状化を対象とすると，その発生確率はδにより 0.04～0.34 の範囲にあるということができる．さらには，$P_L \geqq 20$ までを基準にすると，α_{max}=300Gal では，液状化の発生確率はほぼ 1 となっている．これらの結果は，ひとつの事例解析結果ではあるが，フラジリティ曲線を導入することによって，液状化の発生確率と「激しさ」(P_L 値と被害額の関係が設定されるという前提による)を定量的に表しうることを示唆するものである．また，α_{max}の増大に伴い，土質特性の各変動係数による差は小さく，曲線が互いに漸近している．このことから，誘因外力が大きくなると，液状化発生と判断する P_L 値をいずれにとっても，土質特性の変動係数による P_a の違いが減少することが明らかである．なお，この他の基準・指針類においても同様の傾向が見られた．

(6) リスクによる対策工の選択基準

リスクの活用として，液状化対策工の選択には，



(a)　α_{max}=100 Gal



(b) α_{max}=300 Gal

図－11　液状化発生の判断基準の影響

リスクに基づき選択基準が以下のように定められる．

(a) 液状化を対策すべきかどうかは下式により判定する．

$$B = R_b' - R_a' - C_m > 0 \tag{16}$$

ここで，B は対策効果，R_b'と R_a'はそれぞれ対策前後のリスク，C_m は対策コストである．つまり，対策工による液状化リスクの低減額は対策工のコストより大きいことが必要である．

(b) いくつか選択可能な対策工があれば，対策効果 B が一番大きい対策工が選ばれるべきである．

従って，液状化のリスク分析を行うことより，対策工を定量的に評価・選択することができる．

5. まとめ

既往の液状化予測の手法では，地盤の土質特性の平均値と確率的に想定したある大きさの地震によって液状化の有無を評価しているが，液状化によりもたらされる損害の大きさは考慮に入っていない．また，地盤の土質のばらつき特性や地震発生の特性などが評価されていない．これに対して，本文で提案した液状化のリスク評価手法は，既往の予測手法に基づき，上述の未解明な点を改善することができる．

本文では，解析例を通じて，リスク分析手法の一連の流れを具体的に示した．２種類の地震ハザード曲線を用いて７種類の設計指針に基づいて，対象モデル地盤のリスク解析ならびに考察を行った．以下に結果をまとめる．

1) 提案したリスク分析手法は，対象地における地震ハザード曲線による誘因外力の発生の可能性や地盤の不確定性(ばらつき)等を考慮したうえ，液状化発生の確率，および，液状化による損失の規模（損失率もしくは期待損失額）を定量的に評価することができる．

2) 得られたフラジリティ曲線には以下の特徴が見られる；①地表面最大加速度の増大とともに，液状化の条件付確率も大きく評価されており，液状化発生の可能性が増していく．②変動係数δが大きくなるとフラジリティ曲線が図上の左上側にシフトし，同一 α_{max} に対する液状化発生確率が高くなる．③基準・指針類の違いによって，フラジリティ曲線がかなり異なるなどである．

3) 本文で提案した液状化のリスク評価手法では，各大きさの地震に対して，液状化発生の条件付確率を求め，対象地域の地震ハザード曲線を用いて液

状化の発生確率を推定するので，対象地域で発生する大小様々な地震に対する液状化の発生確率を評価することができる．

4)地盤の土質特性のばらつきは，液状化の発生確率に大きく影響を与える．同一 α_{max} に対して，変動係数が大きくなるに従い，大きな液状化発生確率を示す． また，比較的小さな α_{max} では，変動係数の大小が液状化発生確率の値に大きく影響する．

5)対象モデル地盤の解析結果は，用いた各基準・指針類の F_L の評価式によって大きく異なる．例えば，フラジリテイ曲線においては，道示 90（阪神淡路大震災前）と道示 02（阪神淡路大震災後）を比較すると，震災後の基準を用いると，フラジリティ曲線が図上左側にシフトしており，震災前に比較して液状化危険度を高く(設計上は安全側に)評価していることが分かった．また，捨鉱ではフラジリティ曲線が最も右側に位置しており，液状化発生確率が一番小さく評価されていることが分かった．一方,港湾は，フラジリティ曲線が最も左側に位置しており，液状化発生確率が一番大きく評価されている．

6)リスク曲線における年間損失率(年間期待損失額)は，土質特性の変動係数が大きくなると増大し，地域の地震ハザード曲線特性によって大きく変化する．

本文では，リスク曲線の導出にあたり， $P_L \geqq 35$ の場合を構造物全壊としたことや，被害分析において，液状化指数と全壊時の被害額に対する比率を，単純な二次関数形で近似したことなどが仮定されたが，これらの仮定は，今後，被害事例のさらなる検証が必要であり，さらに精度の良い方法にすることが必要と考えている．

本文で提案した手法は，液状化のリスクが定量的に評価されるので，液状化対策工の選択に有用であると考えている．

参考文献

1)古屋俊輔： リスクマネジメントに関する総説，土と基礎，Vol.51，No.10，pp.1-4，2003.

2) 善功企：災害リスクと社会資本の整備，基礎工，Vol.31，No.5，p. 1，2003.

3) 小林潔司：リスク工学の基礎理論，リスク工学の基礎理論と実務への応用に関する講習会，地盤工学会，pp.1-10，2001.

4)中村孝明：地震リスクの定量化とマネジメントの実際，リスク工学の基礎理論と実務への応用に関する講習会 地盤工学会，pp.21-30，2001.

5) 安田進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，pp.102-104， 1997.

6) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，pp.1298-1314，1999.

7) 小泉安則：新潟地震における砂の密度の変化，土と基礎，Vol.13，No.2，pp.12-19，1965.

8) 岸田英明：Damage of Reinforced Concrete Buildings in Niigata City with Special Reference to Foundation Engineering, Soil and Foundation, Vol.6, No.1, pp.71-88, 1966.

9) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake, J.SMFD, ASCE, Vol.93, No.SM3, pp.83-108, 1967.

10) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.641-648，1978.

11) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Simplified Procedure for Evaluateing Soil Liquefaction Potential, J.SMFD, ASCE, Vol.97, No.SM9, pp.1249-1273, 1971.

12) 土質工学会：土質基礎の信頼性設計，pp.53-101，1985.

13) 岩崎敏男: 地震時地盤液状化の程度の予測について，土と基礎，vol.28-4，pp.23-29，1980.

14) 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，Ⅲ-44，pp.101-111，1998.

15) 地盤工学会：液状化対策工法，2004.

16)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅴ耐震設計，pp.119-126，2002.

17)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，pp.54-59，1999.

18)土木学会：国鉄建造物等設計標準解説 基礎・杭土圧構造物，pp.74-76，1986.

19)運輸省港湾局：埋立地の液状化対策ハンドブック，pp.109-385，1999.

20)日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針，pp.132-137，1987.

21)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の指針・同解説，pp.281-288，1999.

22)日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.61-72，2001.

23) 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.

24) 吉田一亮：斜面崩壊のリスクアナリシスにおける不確実性に関する研究，九州大学修士論文，pp.42-43，

2003.
25) 岡二三生：地盤液状化の科学，近未来社，2001.
26) 三木博史： 道路斜面災害のリスク評価に関する研究，リスク工学の基礎理論と実務への応用に関する講習会，pp. 39-44，2001.
27) 兼森孝：リスク分析，土木学会誌，Vol. 85，pp. 13-17，2000.
28) 宮本幸始：設計の自由度拡大とリスクマネジメント，土木学会誌，Vol. 85，pp. 24-30，2000.

(2003. 11. 18 受付)

A PROCEDURE FOR RISK ANALYSIS ON LIQUEFACTION WITH MONTE CARLO SIMULATION

Guangqi CHEN, Kouki ZEN, Ai ISAYAMA and Kiyonobu KASAMA

In the existing design codes/standards on the evaluation of liquefaction potential, the uncertainty of soil properties and the expected loss are not taken into account. This paper proposes a new procedure for risk analysis to evaluate the potential risk of liquefaction quantitatively. Monte Carlo simulation is introduced in the proposed method to assess the uncertainty of soil properties. Risk analysis is made as a case study for a model liquefiable ground on the basis of the methods stated in the seven different design codes/standards in Japan. The result indicated that the new method enables to evaluate the probability of liquefaction and anticipated loss by constituting the hazard curve, fragility curve and risk curve.