

液状化対策地盤改良に関する信頼性設計

西村伸一¹・清水英良²・藤井弘章³・島田 清⁴

¹正会員 農博 岡山大学講師 環境管理工学科 (〒700 岡山市津島中2-1-1)

²正会員 農博 岐阜大学教授 生物生産システム学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

³正会員 農博 岡山大学教授 環境管理工学科 (〒700 岡山市津島中2-1-1)

⁴農博 岡山大学助教授 環境管理工学科 (〒700 岡山市津島中2-1-1)

本研究の目的は、地盤定数の空間変動と地震発生の統計的性質を考慮した、砂質地盤の液状化確率の計算手法を進展させようとするものである。簡易法では、動的せん断強度比が N 値、平均粒径、細粒分含有率などのパラメータによって決定されるが、これらの土質定数は空間的に大きく変動する。また、地震の発生は本質的に確率現象である。本提案法では、これらの点を重点的に考慮している。また、液状化に対する最適な地盤改良の決定に関して、信頼性設計理論を適用した。

Key Words: *liquefaction, reliability design, N-value, spatial variability, Monte Carlo method, historical earthquakes, sand compaction pile*

1. はじめに

通常の液状化判定を行う場合、動的せん断強度比 R は鉛直有効応力 σ'_v 、 N 値、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c から経験式を経由して決定される。最後の3つのパラメータは大きな空間変動性を有しており、液状化解析においてはこれらのパラメータの統計的性質を考慮する必要がある。本研究では第一にこの統計モデル化を行っている。

地震時せん断応力比 L は、地震発生の統計モデルに基づいて決定され、その統計モデルは、歴史地震記録に基づいて年最大加速度から決定される。なお、年最大加速度は距離減衰式を経由して決定される。

最終的に、すべての確率変数に対してモンテカルロ法を適用し、液状化確率を求める。さらに本研究では、液状化に対する最適な地盤改良が、期待総費用最小化の理論を用いて議論されている。地盤改良工法としては、サンドコンパクションパイル(SCP)工法が取り上げられている。

2. 液状化確率

一般に液状化安全率は、次の式で定義される。

$$F_L = R/L \quad (1)$$

また、地盤液状化指数が次式で定義される。

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz \quad \begin{cases} F=1-F_L & (F_L < 1.0) \\ F=0 & (F_L \geq 1.0) \end{cases} \quad (2)$$

$$w(Z) = 10 - 0.5Z \quad Z: \text{深度(m)}$$

岩崎ら¹⁾によって、液状化確率は P_L が5.0を上回る時上昇することが明らかにされており、本解析においては液状化確率を次式によって評価している。

$$P_f = P(P_L \geq 5) \quad (3)$$

ここで、 $P()$ は確率を表す。

通常、地盤は鉛直方向に比較して、水平方向に長い相関性を有している。これを考慮して、ここでは、簡単のために鉛直次元液状化解析を実施している。

3. 動的せん断強度比

道路橋示方書(平成2年版)²⁾によると動的せん断強度比 R_f は N 値、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c 、有効土被り圧 σ'_v の関数として与えられる。

$$R_f = f(N, D_{50}, F_c, \sigma'_v) \quad (4)$$

本研究の液状化解析に用いる動的せん断強度比は、(4)式と非排水繰返し三軸試験結果の相関性を考慮し、次式によって与える。

$$R = a \cdot R_l + b + \varepsilon_R \quad (5)$$

Fig.1に、解析対象地盤における、不攪乱試料の繰返し非排水三軸試験から求めた動的せん断強度比 R_{20} と R_l の関係が示されている。(5)式をFig.1に適用すると、 $a=0.62$ 、 $b=0.1$ となる。一方、 ε_R は平均値0、標準偏差0.036にしたがう正規確率変数である。

4. 地震時せん断応力比

地震時せん断応力比は次の式で与えられる。

$$L = \frac{\alpha_{\max} \sigma_v}{980 \sigma_v'} r_d \quad (6)$$

α_{\max} : 地震時地表面最大加速度

σ_v' : 鉛直全応力(kgf/cm²)

$r_d = 1 - 0.015Z$ (Z は深度(m))

α_{\max} の期待値が次の距離減衰式³⁾によって得られる。

$$\overline{\alpha_{\max}} = 403.8 \times 10^{0.265M} \times (\Delta + 30)^{-1.218} \quad (7)$$

$\overline{\alpha_{\max}}$: 平均最大加速度(gal)

M : マグニチュード Δ : 震央距離(km)

$\ln \overline{\alpha_{\max}}$ は、次に示す極値III型分布にしたがう。

$$F_{\overline{\alpha_{\max}}}(\alpha) = \exp\left[-\left\{c \ln\left(\frac{\alpha_u}{\alpha}\right)\right\}^k\right] \quad (8)$$

$\alpha \leq \alpha_u$ α_u : 上限加速度 c, k : 定数

(8)式に示す分布関数は、歴史地震記録に基づき、年最大加速度分布として決定される。岡山市南部における年最大加速度分布をFig.2に示す。地震データからパラメータ α_u, c, k を決定するのに際し、 c, k は地震の観測態勢が整った西暦1926年以降のデータを用いて決定している。一方、 α_u の決定には長期間の観測データを必要とするので、1600年以降のすべてのデータを用いて決定している。

距離減衰式の誤差を考慮すると、最終的に次の式によって α_{\max} が求められる。

$$\alpha_{\max} = 10^{\varepsilon_{\alpha}} \overline{\alpha_{\max}} \quad (9)$$

誤差パラメータ ε_{α} は平均値0、標準偏差0.197にしたがう正規確率変数である。

5. 地盤改良の統計モデル

SCPによる地盤改良の効果を水野らの方法⁴⁾を用いて考慮することにする。この場合、地盤改良後の N 値

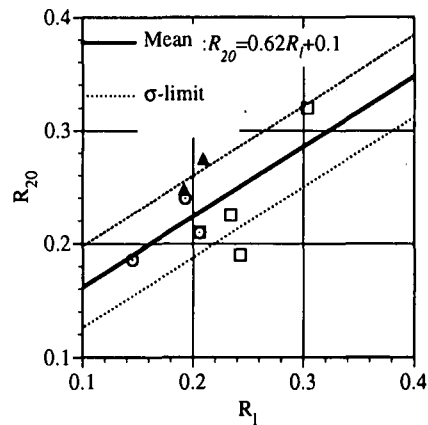


Fig.1 Relationship between R_{20} and R_l

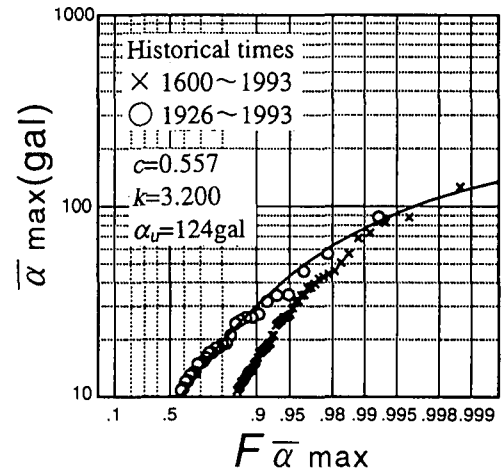


Fig.2 Cumulative distribution of $\overline{\alpha_{\max}}$ (Okayama)

である N_l の平均値が次の関数で得られる。

$$\hat{N}_l = g(N_0, \sigma_v', F_c, A_s) \quad (10)$$

A_s : 砂置換率 N_0 : 改良前の N 値

ここで、上式の誤差 ε_N を考慮すると、 N_l が次式で得られる。ここで、 ε_N は平均値0、標準偏差0.248の正規確率変数とする。

$$N_l = \hat{N}_l (1 + \varepsilon_N) \quad (11)$$

6. 土質パラメータの空間分布モデル

土質定数(N 値、平均粒径、細粒分含有率)の深度方向の分布モデルを次の式で与える。

$$Y_i = \sum_{j=0}^n a_j Z_j' + \varepsilon_i \quad (12)$$

ここで、 Y_i は深度 Z_i における N 値等の土質定数の値を表す。 a_j ($j=0, 1, 2, \dots, n$)は回帰係数、 ε_i は平均値0の正規確率変数である。 ε_i の自己相関数と相互相関関数として次の式を仮定する。

$$r_{ij}(\Delta Z) = B_{ij} \exp(-\Delta Z / \delta_{ij}) \quad (13)$$

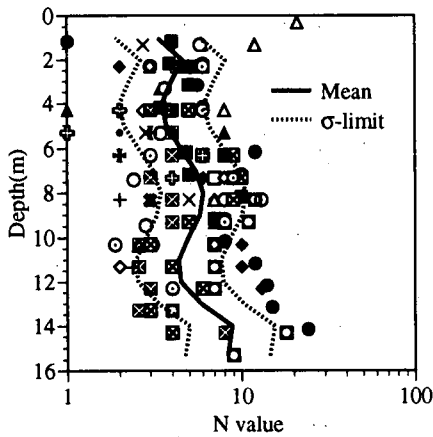


Fig.3 Distribution of N-value

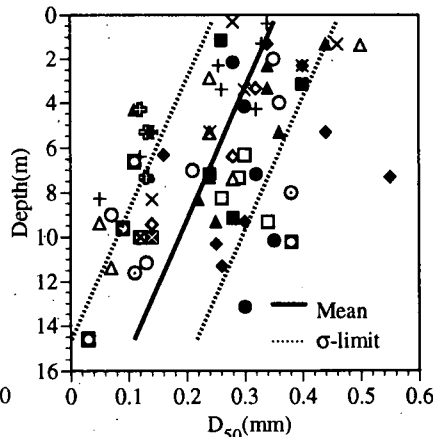


Fig.4 Distribution of median grain size

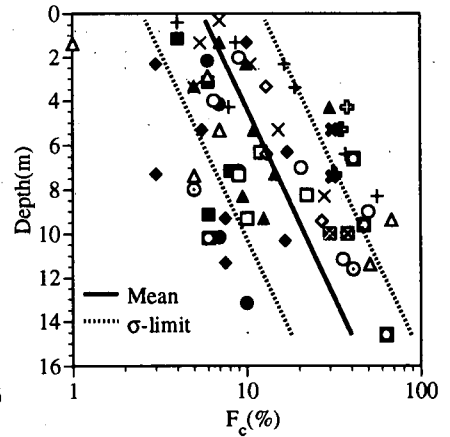


Fig.5 Distribution of fines content

Table 1 Auto- and cross- correlation parameters.

Parameter i, j	B_{ij}	δ_{ij} (m)
$\log_{10}N, \log_{10}N$	1.0	1.1
D_{50}, D_{50}	1.0	1.0*
$\log_{10}F_c, \log_{10}F_c$	1.0	1.3
$\log_{10}N, D_{50}$	0.70	1.0*
$\log_{10}N, \log_{10}F_c$	-0.68	1.1*
$D_{50}, \log_{10}F_c$	-0.81	1.1*

* Assumed values.

ΔZ : 深度 Z 方向の 2 点間の距離

B_{ij} : $\Delta Z=0$ におけるパラメータ i, j 間の相関係数

δ_{ij} : パラメータ i, j 間の相関距離

岡山市南部の解析対象地盤における $\log_{10}N, \log_{10}F_c, D_{50}$ の深度方向の一次元空間分布を Figs.3~5 に示す。これら、3つのパラメータは正規分布に適合し、図には、パラメータの分布と平均値、 σ 限界値をそれぞれ実線と点線で示している。関数(12),(13)は、AIC を最小化することによって決定される。また、決定された自己相関パラメータを Table 1 に示している。

7. モンテカルロシミュレーション

液状化確率を計算するためにモンテカルロシミュレーション法を用いる。解析では、以下に示す各確率変数に正規乱数が割り当てられる。

$$\log_{10}N, \log_{10}F_c, D_{50}, \varepsilon_R, \varepsilon_d, \varepsilon_N$$

$\log_{10}N, \log_{10}F_c, D_{50}$ は自己相関・相互相関特性を満足する必要がある。一方、 $\ln \alpha_{\max}$ には極値 III 型分布が適用される。シミュレーションは、すべてのケースにおいて 100000 回繰り返される。なお、地盤の湿潤密度は変動が小さいため、 σ_v と σ'_v は確定値として取り扱っている。湿潤密度の平均値は 1.853 tf/m^3 である。

8. 地盤改良の最適設計

ここでは、信頼性設計理論に基づき、期待総費用 C_T を最小化することによって、最適砂置換率とそのときの年液状化確率を求めている。ここで、 C_T は次の式によって得られる。

$$C_T = C_i + P_f \cdot t \cdot C_F = C_0 (1 + \mu_s A_s) (1 + \lambda \cdot P_f \cdot t) \quad (14)$$

C_i : 初期コスト (地盤改良の経費も含む)

P_f : 年液状化確率 C_F : 破壊損失

C_0 : 構造物建設の初期コスト t : 耐用年

$$\lambda = C_F / C_i \quad \mu_s = C_r \frac{4}{\pi d_s^2}$$

C_r : SCP 単位長さ と 盛土 単位体積 の 施工費 の 比 = 1.38 (松尾⁹⁾) d_s : SCP の 直径 = 70cm

9. 解析結果および考察

本研究では、岡山市南部の砂質材料で構築された盛土を解析対象としている。盛土は比較的平坦で非常に長い形状を持っているので、解析ではこれを現地盤の一部とみなしている。また、盛土は、海中に建設されており、水面は盛土の地表面から 2.4m 深のところに存在する。盛土の全域が、SCP によって改良される場合の解析を行うが、解析においては、SCP 長さ と 盛土 高 が 等しい と 考 へ っ て い る。また、砂置換率として 0.0 ~ 0.2 の範囲を考える。

Figs.6-9 は、最適の砂置換率 A_s および、年液状化確率 P_f と 破壊コスト と 初期コスト の 比 λ と の 関 係 を 示 っ て い る。Figs.6-8 は それ ぞ れ 岡 山 市 南 部 の 盛 土 対 する 耐 用 年 20 年、50 年、100 年 の 場 合 の 結 果 対 応 し て い る。一 方、Fig.9 は、仮 に 同 じ 盛 土 が 岐 阜 市 に 存 在 し た 場 合 の 解 析 を 行 っ た も の で あ る。

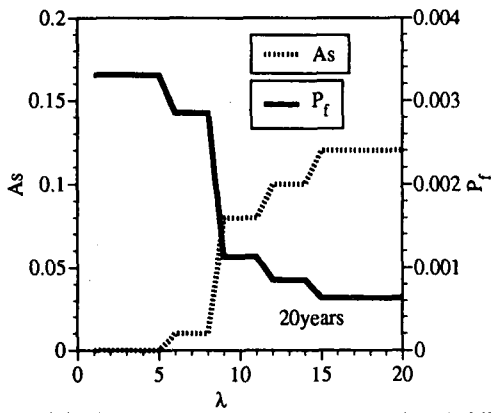


Fig.6 Optimum sand replacement rate and probability of liquefaction in Okayama (life time = 20years)

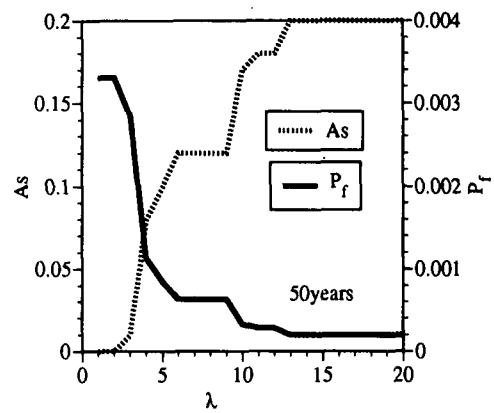


Fig.7 Optimum sand replacement rate and probability of liquefaction in Okayama (life time = 50years)

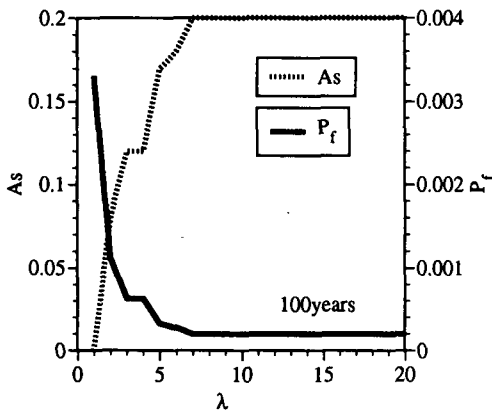


Fig.8 Optimum sand replacement rate and probability of liquefaction in Okayama (life time = 100years)

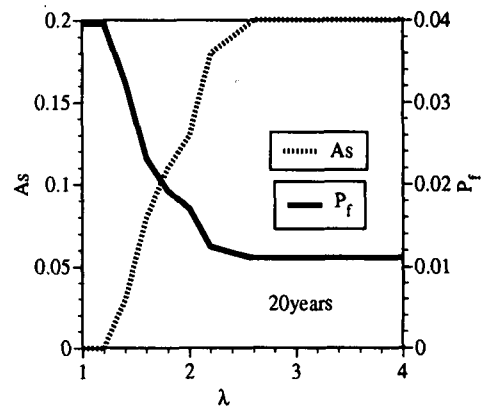


Fig.9 Optimum sand replacement rate and probability of liquefaction in Gifu (life time = 20years)

因みに、岐阜市の場合は(8)式の年最大加速度分布のパラメータが、 $\alpha_u=729\text{gal}$, $c=0.294$, $k=4.423$ となる。これは、岡山に比べて、岐阜の方が相当大きな地震が発生する頻度が高いことを示している。

解析結果によると、 A_s と P_f はおおよそ、反比例の関係にあるが、 λ の上昇とともに A_s は最大値の0.2に近付いていくのがわかる。 $\lambda=1$ の場合、すなわち初期コストと破壊コストが同じ場合は、すべてのケースにおいて、 $A_s=0.0$ 、すなわち、地盤改良を行わないのが得策という結果が得られている。また、Figs.6-8の比較において、耐用年を長くするほど、より小さな λ で A_s の値が増大する。Fig.6とFig.9の比較において、岐阜では、岡山より1オーダー大きい液状化確率が算定されている。したがって、岐阜の場合は、 $\lambda=2.6$ なる小さな値で $A_s=0.2$ に達している。

10. まとめ

(1) N 値、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c 等の土質定数の空間的変動性、および、地震発生確率特性を考慮できる液状化確率計算法を示した。地震発生確率モデルは、1600年以降の歴史地震データ記録に基づ

いている。

(2) 計算した液状化確率を用いて、SCPによる地盤改良における最適な置換率を信頼性設計理論(期待総費用最小化)によって決定した。その結果、信頼性設計理論によれば、構造物の重要度、耐用年、地域の違いによる最適置換率の違いを定量的・合理的に評価できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進：地震時地盤液状化の程度予測について、土と基礎28-4(267), 1980, pp.23-29
- 2) 道路橋示方書・同解説・耐震設計編(平成2年版), 日本道路協会, 1990
- 3) 川島一彦・相沢興・高橋和之：強震記録の重回帰分析による地震動の最大加速度・最大速度および最大変位の推定式, 土木技術資料26-2, 1984, pp.20-25
- 4) 水野恭男, 末松直幹, 奥山一典：細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法, 土と基礎35-5(352), 1987, pp.21-26
- 5) 松尾 稔：地盤工学, 技報堂出版, 1985