

神戸大学工学部 正 谷本喜一
 神戸大学工学部 正 ○ 野田 耕
 奈良市役所 寺村二郎

1. まえがき 地震に際して、ある地盤が液状化するかどうかを予測することは極めて重要で、そのために多くの研究が実施されてきた。その結果、提案された予測方法は、①過去の事例や調査結果に基づく経験的方法、②標準爆破試験による方法、③地盤応答解析と室内試験を併用する方法、④設計地表加速度と室内試験による方法に大別される。そこで、筆者らはこれらの既往の方法とは異なり、過去の事例における地震の条件と現地土質の条件に関する基本的データのみを統計的に処理して液状化の予測を行なう方法を提案^(1,2)してきた。しかし、そこでは、基本的データを無差別に組合わせて液状化ポテンシャルを定義し、その値の大小関係によって判断しようとしたので、解析における種々の仮定や実験における誤差の入りこむ余地がないという統計的手法の長所は持っているが、同時に液状化の機構そのものには直接関手していないという弱点をあわせて持っていた。このような点を補うために、今回は複雑な実験や面倒な解析を要しないという統計的手法の特長を生かしつつ、液状化の機構をも考慮した方法を検討してみたのでその結果について報告する。

2. 液状化ポテンシャル 液状化ポテンシャルは種々の要因によって決定されると思われる。たとえば、地盤の条件や地震の規模などである。そこで、従来は液状化ポテンシャルがこのような要因の一次式であらわされるとして統計処理した手法について報告してきたが、統計的手法の持つ最大の弱点である液状化の機構に関手しないという点に何らの考慮も払っていないので、今回は Seed と Idriss の提案した簡便法³⁾に準拠して T_1 (等価均一せん断応力に起因する変数) と T_2 (初期液状化を発生させるに必要なせん断応力に起因する変数) を新たに定義することにより統計処理を実施した。

Seed らは、土中の深さ Z の水平面に作用する等価均一せん断応力 τ_{av} を次式で与えた。

$$\tau_{av} = 0.65 \cdot C_d \cdot \gamma \cdot Z \cdot \alpha / g \quad (1)$$

ここで、 α は地震時の地表における最大加速度、 γ は土の単位重量、 C_d は土中のせん断応力を剛体内の水平面に作用するせん断応力から求める場合の換算係数である。

また、初期液状化の発生に必要なせん断応力 τ_l を次の式で示した。

$$\tau_l = (\sigma_{dp}/20\sigma'_v)_{50} \cdot Dr/50 \cdot Cr \cdot \sigma'_v \quad (2)$$

ここで、 σ_{dp} 、 σ'_v は室内繰返し三軸試験における軸差応力、初期有効拘束圧であり、 Dr は相対密度、 Cr は三軸試験結果を現地の土へ適用するための補正係数、 σ'_v は水平面に作用する鉛直有効応力である。簡便法においては液状化発生の予測は τ_{av} と τ_l の大小関係で判定される。

今回統計的な処理を行なうに当たって、次のように、 T_1 と T_2 の2変数を定義した。

$$T_1 = \{\delta_t H + \gamma_{sat} (Z - H)\} \cdot a / g, \quad T_2 = N \{\delta_t H + \gamma_{sub} (Z - H)\} \quad (3)$$

ここで、 δ_t 、 γ_{sat} 、 γ_{sub} はそれぞれ地下水面より上方の土の見かけ単位重量、飽和単位重量、水中単位重量であり、 H は地下水面の深さ、 N は標準貫入試験打撃数、 a は地表最大加速度、 Z は検討している地中の深さである。 T_1 と T_2 の定義は、 T_1 が(2)式の右辺から補正係数部分 $0.65 C_d$ を除いたものであり、 T_2 は(3)式の右辺の $(\sigma_{dp}/20\sigma'_v)_{50} \cdot Dr/50$ を N に比例するものとして、 $T_2 = N \sigma'_v$ とおいたものである。

この T_1 と T_2 を2つの要因として液状化ポテンシャルを $L = k_1 T_1 + k_2 T_2$ なる一次式で表わすものとする。ここで、過去のデータを用いて各係数 k_1 、 k_2 を決定する記であるが、それは次の方針による。①液状化した群 $L_j^{(1)}$ と液状化しなかった群 $L_j^{(2)}$ の平均値 $\bar{L}^{(1)}$ と $\bar{L}^{(2)}$ ができるだけはなれており、②各群内での変動ができるだけ小さ

くなるように l_0 を決定する。すなわち、次式の G が最大となるように l_0 を決定することである。

$$G = (\bar{L}^{(1)} - \bar{L}^{(2)}) / \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} (L_j^{(p)} - \bar{L}^{(p)})^2 \quad (4)$$

ここで、 $\bar{L}^{(p)}$ は P 群の L の平均値、 $L_j^{(p)}$ は P 群の j 番目の L の値、 N_p は P 群の属するデータの数である。 G を最大にするような l_0 は次の連立方程式を解くことによって求められる。

$$\left. \begin{aligned} S_{11} l_1 + S_{12} l_2 &= d_1 \\ S_{21} l_1 + S_{22} l_2 &= d_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $d_n = \bar{T}_n^{(1)} - \bar{T}_n^{(2)}$ 、 $S_{mn} = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} (T_{mj}^{(p)} - \bar{T}_m^{(p)})(T_{nj}^{(p)} - \bar{T}_n^{(p)})$ であり、 $\bar{T}_n^{(p)}$ は P 群に属するデータの n 番目の要因の平均値であり、 $T_{mj}^{(p)}$ 、 $T_{nj}^{(p)}$ はそれぞれ P 群に属する j 番目のデータの m 、 n 番目の要因の値である。

3. 液状化ポテンシャルの決定 的中率のよい液状化ポテンシャル式を得るためには、重要な要因を選択し、数多くの正確なデータを収集することであるが、今回の試みに対しては以前から採用しているSeedらのまとめたデータ³⁾を若干補正したもの^{1),2)}を用いることにした。選択要因としては、簡便法同様、地下水面深さ $H^{(m)}$ 、 N 値、地表最大加速度 $a^{(g)}$ 、対象としている深さ $z^{(m)}$ の4つであり、 $\gamma_t = 1.8 \text{ t/m}^3$ 、 $\gamma_{\text{sat}} = 1.9 \text{ t/m}^3$ 、 $\gamma_{\text{sub}} = 0.9 \text{ t/m}^3$ と仮定した。そのときの液状化ポテンシャル式は、次のようになる。

$$L = 21.52 T_1 - T_2 \quad (6)$$

$L^{(1)}$ 、 $L^{(2)}$ の両群の的中率が等しくなるように境界値 L_0 を決定すると、 $L_0 = -16.8$ となり、そのときの両群の的中率は共に、 $R = 82.9\%$ となる。液状化ポテンシャルの分布図は、図-1に示したようになる。

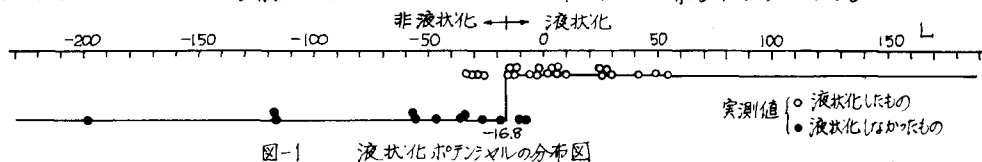


図-1 液状化ポテンシャルの分布図

4. 他のデータへの適用 Whitmanのまとめたデータ⁴⁾に対して(6)式を適用してみた。この場合の液状化ポテンシャルの分布図は図-2に示したとおりで、的中率は $R = 7/9$ (77.8%)となった。

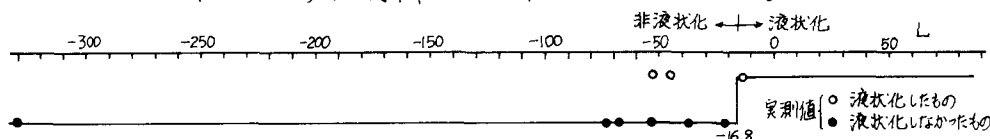


図-2 液状化ポテンシャルの分布図

5. 他の手法との比較 従来検討してきた手法との比較を行なうと表-1のようになる。これによると的中率のみを考えるならば、要因の選択法によって最良結果を得ることが可能であるが、それらの差は極めてわずかであり、液状化の機構について考慮した点を考え合わせると今回の手法がかなり有効なものであると判断される。

表-1 各手法の比較

種類	説明	要因数	的中率	種類	説明	要因数	的中率
1	液状化ポテンシャルを主要な要因の一次関数として用いる方法	4	78.5%	3	主要な要因のうちから更に選択した要因を用いる方法	4	90.1%
		5	79.1			5	86.9
		6	85.0			4	79.4
2	各要因の変数を標準化して用いる方法	4	81.7	5	今回実施した方法	4	82.9
		6	85.3			4	82.9

(**): 未発表(寺村二郎, 神大卒業論文)

参考文献 1) TANIMOTO, K. & NODA, T.: Prediction of Liquefaction Occurrence of Sandy Deposits During Earthquakes by a Statistical Method, Proc. of JSCE., No. Z56, PP 79~89, Dec. 1976
 2) 谷本孝一, 野田 耕 : 液状化ポテンシャルの統計的評価, 第11回土質工学研究発表会講演集, PP809~812, 1976
 3) Seed, H.B. & Idriss, I.M.: Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Proc. of ASCE, Vol. 97, No. SM 9, PP 1249~1273, 1971
 4) Whitman, R.V.: Resistance of Soil to Liquefaction and Settlement, Soils and Foundations, Vol. XI, No. 4, PP 68~81, 1971