

静的三軸圧縮試験による液状化強度の予測

小川 正二*・亀井 健史*・常田 亮**・柏原 敏郎***

PREDICTION OF LIQUEFACTION STRENGTH BY STATIC TRIAXIAL COMPRESSION TESTS

Shoji OGAWA, Takeshi KAMEI, Makoto TOKIDA and Toshiro KASHIWABARA

Usually, liquefaction strength in a sandy deposit has been estimated by performing laboratory cyclic undrained triaxial tests. By contrast, it has been widely known that static triaxial compression test are more convenient test than cyclic triaxial tests. Accordingly, detailed information is still required concerning the relationship between static strength and dynamic strength. In this paper, the comparison of strength characteristics resulting from static and dynamic triaxial tests are shown.

It was found that in static triaxial compression test the shapes of strength curve in the planes of the cyclic stress ratio and the logarithm of the number of cycles are similar to the test results from cyclic triaxial test. This indicates the possibility of estimating liquefaction strength from static triaxial compression tests.

Key words: consolidated undrained shear/liquefaction/repeated load/sand/triaxial compression test

1. ま え が き

1964年の新潟地震以来多くの研究者によって砂地盤の液状化に関する研究が行なわれ、多大な成果があげられている。それらの成果は、土木構造物及び基礎の設計等において広く使用されるようになってきた¹⁾。

液状化の発生予測法は、多くの研究者によって提案されているが、その主要な手法を列記すると以下に示すごとく大きく分類できるものと考えられる。

- 1) 地震により液状化した地盤の調査結果より得られた粒度分布、N値、地下水位等の条件を、対象地盤の条件と比較することによって地震時の液状化の可能性を判定する方法²⁾。
- 2) 地震応答解析を行なう代わりに、近似的な地中内応力振幅を求め、この値をN値、平均粒径、地下水位等を用いて表わした液状化抵抗と比較することで判定を行う方法。判定法としては、Seed-Idrissの方法³⁾、岩崎、龍岡の方法⁴⁾等がある。

- 3) SH波の重複反射理論や有限要素法等を用いて地震等の地盤内せん断応力を推定し、非排水条件のもとでの液状化抵抗と比較して判定を行なう方法で、地震応答解析のために多くの手法が提案されている^{5),6),7)}。

以上のような液状化判定法をふまえて、本論文では簡便な非排水三軸圧縮試験のみを用いて、静的非排水三軸繰り返し試験より求められる初期液状化回数及び応力振幅を推定する方法を提案すると共に、動的非排水三軸繰り返し試験結果との比較、検討を行なった。

2. 試験方法

2.1 試 料

実験に用いた砂は、新潟県中蒲原郡黒埼町において採取した砂で、その物理的性質及び粒度分布は、表-1及び図-1に示す。なお、図-1には土田⁸⁾によって提案された液状化の発生しやすい粒度曲線の範囲を示してある。

2.2 試験方法

実験用の供試体は、図-2、図-3に示す落下装置とフィルターを用いて空中落下方式により気乾状態で作成した。この方法は、フィルターの口径と個数を変えることによって供試体の密度を任意に定めることができ、その精度は良好であった。

原稿受付：昭和62年3月5日

*長岡技術科学大学 工学部建設系

**長野工業高等専門学校 土木工学科

***関東天然瓦斯株式会社

Table 1 Index properties of soil sample

Gs	e max	e min	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)
2.68	1.00	0.61	0.35	0.17

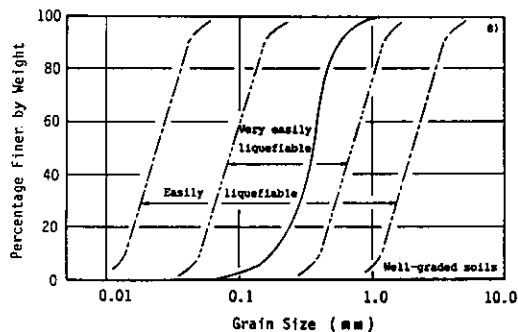


Fig. 1 Grain size distribution curve of soil sample

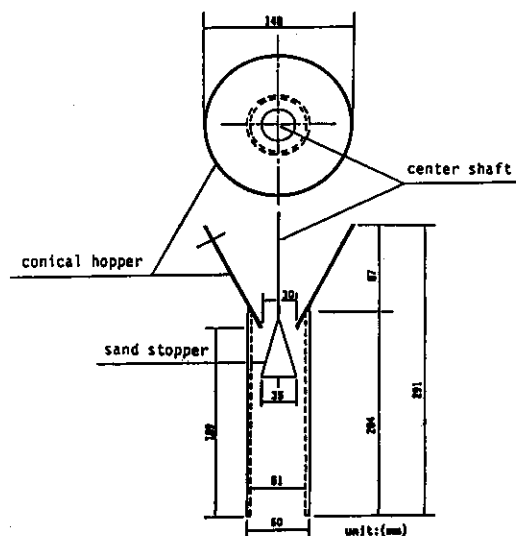


Fig. 2 Pluviation apparatus (conical hopper)

供試体作成後、脱気水を通水させて試料を飽和させ、100 kpa の圧密圧で等方圧密を行った。通水終了時に B 係数をチェックし、 $B > 0.96$ であることを飽和の条件とした。圧密終了後、100 kpa のバックプレッシャーを与えることにより飽和度を高めた。

非排水三軸圧縮試験は、相対密度(Dr)が 35%, 50%, 65% の 3 種類の供試体について、ひずみ速度が 0.3%/min のひずみ制御方式で行った。

静的非排水三軸繰り返し試験は、相対密度が 35% ~ 70% の範囲の 6 種類の供試体について、応力振幅 (σ_d/σ'_o) を 0.20, 0.25, 0.30 の 3 段階に設定して、ひずみ速度が 0.3%/min のひずみ制御方式で行った。本実験の特徴は、従来の三軸繰り返し試験が載荷振動数によって制御されていたのに対して、繰り返し載荷をひずみ速度によって制御するところにある。

また、供試体作成から試験開始までの手順は、図-4 のフローチャートに示すとおりである。

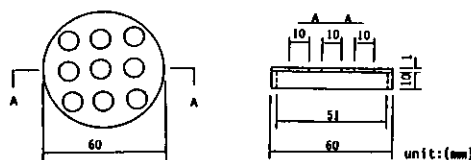


Fig. 3 Pluviation apparatus (filter)

3. 試験結果

3.1 非排水三軸圧縮試験

1) 有効応力経路と応力定数

非排水せん断時の有効応力経路は、図-5 に示すように、拘束圧力が同じである場合、相対密度の低下に伴い平均有効主応力 ($p' : (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$) の低下が著しくなる。ここで、 σ'_a は軸方向の主応力であり、 σ'_r は半径方向の主応力である。

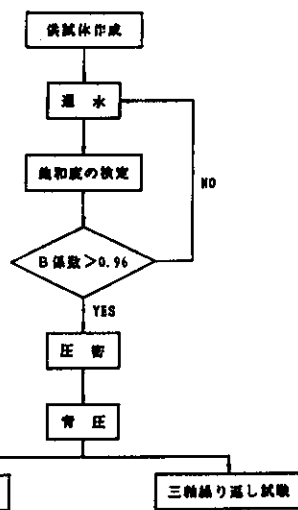


Fig. 4 Experimental procedures in the present study

一方、同一の相対密度である場合、有効応力経路の形状は、拘束圧力の大きさに関係なくほぼ相似形となる⁹⁾。したがって、異なる拘束圧力における有効応力経路は、ある特定の拘束圧力の有効応力経路を求めることにより推定することができることになる。

いま、図-6の有効応力経路モデル上の変相点Bを規定する量として $U_{qp} = P_{AB}/Q_{AB}$ を定義し、これを応力定数とする。ここで変相点とは、平均有効主応力(p')が最小となる点であり、正規圧密土の場合、体積変化が収縮領域から膨張領域へ移行する点である。この応力定数は、有効応力経路が拘束圧力の大きさに関係なくほぼ相似形となることから、すべての拘束圧力における応力経路上の変相点を規定する量となる。図-7に示すように、応力定数は相対密度のみの影響を受け、相対密度が50%以下になると急激に増加する傾向がある。

3.2 静的非排水三軸繰り返し試験

1) 軸ひずみ及び間隙水圧と載荷回数との関係

本研究では、静的非排水三軸繰り返し試験の結果より、初期液状化を次のように定義し決定した。

初期液状化：“圧縮状態で間隙水圧の波形に凹みが見られる時”

応力振幅 (σ_a/σ'_o) が0.25で、相対密度が55%の場合の繰り返し載荷時における軸ひずみの変化は、図-8に示すように、15サイクルまではほとんど増加せず、16サイクル目で急激に増加している。

一方、間隙水圧は、動的非排水繰り返し試験¹⁰⁾で見られると同様に、段階的に各載荷回数ごとに蓄積され(図-9)、16サイクル目で急増し有効拘束圧と等しくなり、間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_o$) が100%の状態に至る。

ここでは、 $\sigma_a/\sigma'_o = 0.25$ 、 $Dr = 55\%$ の場合を例にとりあげたが、他の条件においても軸ひずみは、初期液状化が発生するまでほとんど増加せず、初期液状化が生じると急激に増加し、間隙水圧は各載荷毎に蓄積され、初期液状化が生じると急増し有効拘束圧と等しくなる傾向を示した。既往の研究¹¹⁾によれば、側圧一定のもとで軸圧を増減させる応力制御による繰り返し載荷試験 ($\sigma_a/\sigma'_o = 0.50$ 、 $Dr = 57\%$) においても、軸ひずみ及び間隙水圧は、本研究の結果と同様の傾向を示すことが報告されている。

2) 初期液状化回数と相対密度、応力振幅の関係

図-10は、相対密度をパラメータにしたときの応力振幅 (σ_a/σ'_o) と初期液状化回数 (N_L) の関係を示している。図より明らかであるように、相対密度が大きいほど初期液状化が発生するときの応力振幅は、大

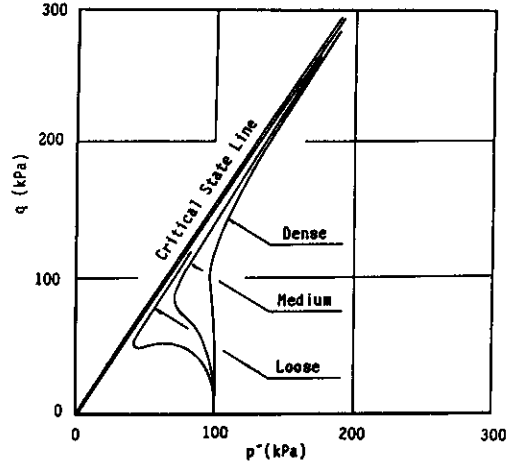


Fig. 5 Typical effective stress paths

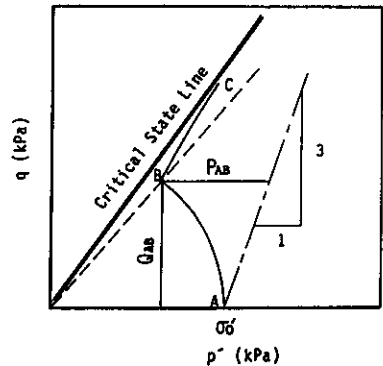


Fig. 6 Effective stress path model

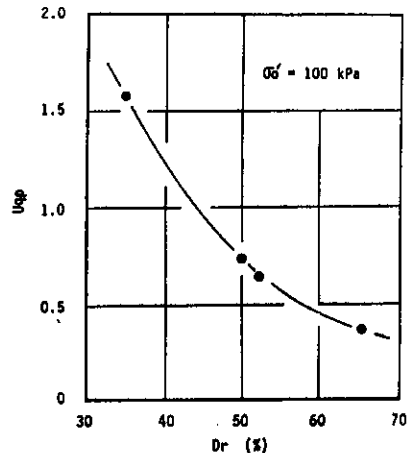


Fig. 7 Relationship between stress parameter U_{qp} and relative density

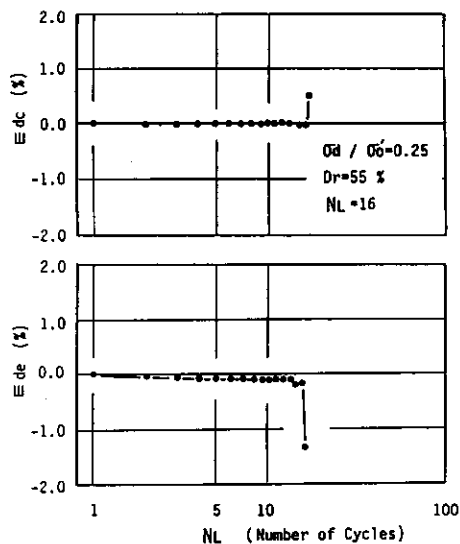


Fig. 8 Axial strains during static cyclic loading

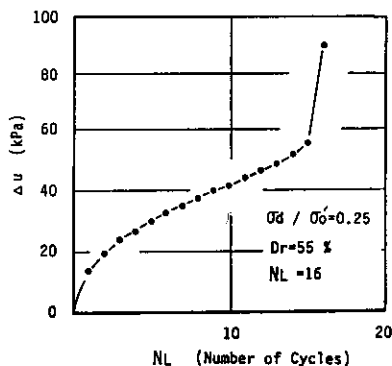


Fig. 9 Pore-water pressure developments during static cyclic loading

きくなっている。

一方、応力振幅をパラメーターにしたときの相対密度(Dr)と初期液状化回数(N_L)の関係は、図-11のようになり、動的非排水三軸繰り返し試験^{12),13)}において報告されていると同様に、応力振幅が大きいほど同じ載荷回数で液状化を生ずるときの相対密度は大きくなる。すなわち、相対密度が同じならば、応力振幅が大きいほど液状化は発生しやすくなると言える。

4. 応力定数(U_{qp})を用いた液状化予測法

4.1 初期液状化回数(N_L)の予測

非排水三軸圧縮試験を用いて、静的非排水三軸繰り

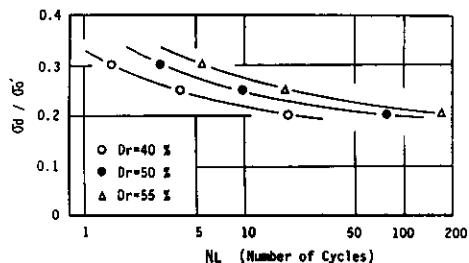


Fig. 10 Relationship between stress ratio (σ_d/σ'_0) and number of cycles

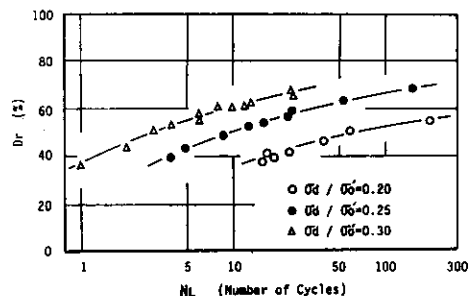


Fig. 11 Relationship between relative density and number of cycles

返し試験より得られる初期液状化回数(N_L)を推定する方法として、3.1で定義した応力定数(U_{qp})を用いる方法を提案する。

図-7及び図-11より初期液状化回数(N_L)と応力定数の逆数(1/U_{qp})の関係を求めると、図-12に示すようになり、N_Lと1/U_{qp}は片対数上で直線関係にある。この関係は、次式のように表わすことができる。

$$\log N_L = a/U_{qp} + b \quad (4-1)$$

ただし、定数a, bは、応力振幅の関数として求められ、本研究の範囲では、次式のようになる。

$$a = (\sigma_d/\sigma'_0) / \{3.52 \times (\sigma_d/\sigma'_0) - 0.514\} \quad (4-2)$$

$$b = -6.61 \times (\sigma_d/\sigma'_0) + 1.727 \quad (4-3)$$

この関係より、ある地盤の初期液状化回数は、非排水三軸圧縮試験より応力定数(U_{qp})を求め、応力振幅を仮定することによって、式(4-1)より推定することができる。

図-13は、応力振幅 $\sigma_d/\sigma'_0 = 0.25$ の場合について、式(4-1)を適用して初期液状化回数を推定した結果である。図に示すように計算値は、静的非排水三軸繰り返し試験結果と非常に良く一致していることがわかる。

4.2 応力振幅(σ_d/σ'_0)の推定

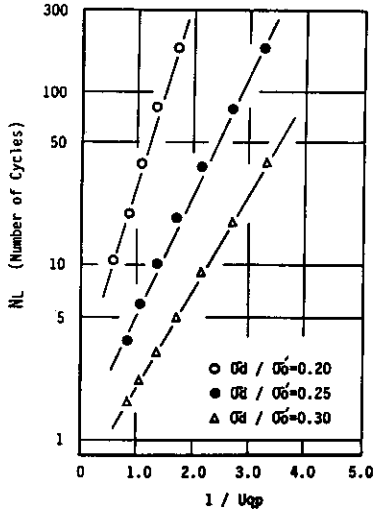


Fig. 12 Relationship between number of cycles and inverse of stress parameter ($1/U_{qp}$)

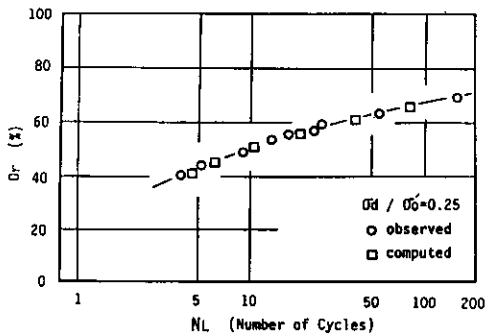


Fig. 13 Comparison of computed and observed values of number of cycles

次に、ある載荷回数で液状化が発生するのに必要な応力振幅(σ_d/σ'_0)を、応力定数(U_{qp})を用いて推定する方法を提案する。応力振幅と応力定数の関係(図-14)は、図-7及び図-10より求められ、応力定数が低下するに伴い応力振幅は大きくなる傾向を示している。この関係は、次式によって表わすことができる。

$$\log(\sigma_d/\sigma'_0) = c + \log d \quad (4-4)$$

ここで、本研究の範囲において定数 c は図-15より、 $\log d$ は次式より求められる。

$$\log d = -N_L / (1.284 \times N_L + 4.603) \quad (4-5)$$

したがってある載荷回数において、初期液状化が発生するのに必要な応力振幅は、載荷回数と応力定数を与えることによって式(4-4)より推定できる。

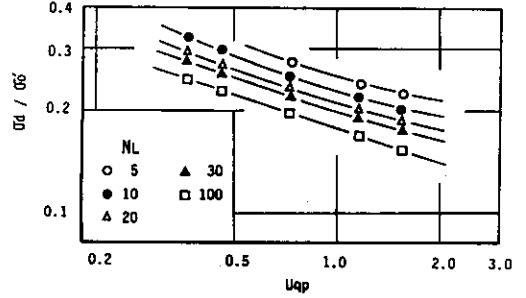


Fig. 14 Relationship between stress ratio (σ_d/σ'_0) and stress parameter U_{qp}

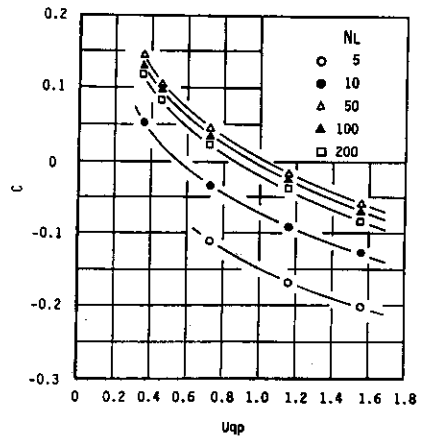


Fig. 15 Relationship between coefficient c and stress parameter U_{qp}

式(4-4)より推定した応力振幅($Dr=40\%$, 50%)は、図-16に示すように、静的非排水三軸繰返し試験結果と良く一致している。

5. 動的非排水三軸繰返し試験結果への適用

上述した静的非排水三軸繰返し試験結果を柴田¹⁴⁾及び小川ら¹⁵⁾の動的非排水三軸繰返し試験結果と比較し、非排水三軸圧縮試験より求めた応力定数(U_{qp})を用いた応力振幅の推定法の妥当性を検討した。

柴田¹⁴⁾及び小川ら¹⁵⁾は、応力制御方式による動的非排水三軸繰返し試験を行っており、試験条件は表-2に示すとおりである。

本研究より得られた応力振幅(σ_d/σ'_0)と初期液状化回数(N_L)の関係と柴田¹⁴⁾及び小川ら¹⁵⁾の実験結果を比較すると、図-17が得られる。なお、小川らの実験結果¹⁵⁾は $\tau_d/\sigma'_0 \cdot N_L$ の関係について求めたものであるの

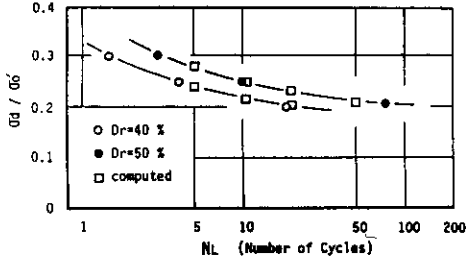


Fig. 16 Comparison of computed and observed values of stress ratio (σ_d/σ_o)

で、 $\tau_d = \sigma_d/2$ の関係より $\sigma_d/\sigma'_o \cdot N_L$ の関係を算定した。ここで τ_d は 45° 面上のせん断応力である。図-17 に示すように、相対密度 55%、有効拘束圧 100 kpa のとき、本研究より得られたある載荷回数における応力振幅は、動的な非排水三軸繰返し試験より得られた応力振幅の約 53% の大きさであり、1.9 倍することによって動的試験結果^{14),15)} とほぼ一致することがわかる。

この倍率が相対密度 (Dr) や拘束圧力 (σ'_o) 等によって、どのような影響を受けるかについては、本研究より説明することはできない。しかし、静的な非排水三軸繰返し試験結果から動的な非排水三軸繰返し試験結果を、ある程度推定することは可能であると言える。したがって、上述した倍率が明らかになれば、本研究で提案した応力定数を用いた応力振幅の推定法により、ある程度動的な非排水三軸繰返し試験結果を推定することができるものと考えられる。

6. 結 論

非排水三軸圧縮試験より得られる有効応力経路から応力定数を定義し、静的な非排水三軸繰返し試験より得られる初期液状化回数及び応力振幅を推定する方法を提案した。また、静的な非排水三軸繰返し試験結果と従来の動的な非排水三軸繰返し試験結果^{14),15)} とを比較、検討した結果、次のような結論が得られた。

1) 初期液状化回数の推定

ある相対密度で液状化が生じるときの初期液状化回数は、応力定数及び応力振幅を与えることによって、次式より推定できる。

$$\begin{aligned} \log N_L &= a/Uq_p + b \\ a &= (\sigma_d/\sigma'_o) / \{3.52 \times (\sigma_d/\sigma'_o) - 0.514\} \\ b &= -6.61 \times (\sigma_d/\sigma'_o) + 1.727 \end{aligned}$$

2) 応力振幅の推定

ある載荷回数で液状化が生じるときの応力振幅の大

Table 2 Experimental Procedures^{14),15)}

研究者	小 川	柴 田
セン断方法	三 軸 側圧一定、軸圧のみ変動	
試料の寸法	直径 5 cm 高さ 12.6 cm	直径 3.5 cm 高さ 8.0 cm
スリーブの材質と厚さ	生 ゴ ム 0.25 mm 0.15 mm	
試料作成方法の詳細	①マイターボックスを用いて乾燥砂をてん充 ②上端を真空度 40 cmHg で吸引しながら下端より給水 ③上端からの気泡の流出がなくなった時点で試料を完全飽和とみなし、等方圧にて過圧密 (過圧密比=2.0)	①モールド中に飽和して詰めた砂試料を凍結する ②凍結試料をモールドからとり出し、三軸セルにセットする ③等方圧にて融解正規圧密させる (試験開始時における B 値は 0.8~0.9)
有効平均主応力 (kg/cm ²)	1.0	0.5, 1.0
バック・プレッシャー (kg/cm ²)	1.0	1.0
初期乾燥密度 (g/cm ³)	1.425~1.572	1.442~1.603
相対密度 (%)	32~74	37~82
応力波形	正弦波	トロコイド波 (正弦波に近似)
周波数	2 Hz	1 Hz
初期液状化定義	ヒズミ振幅の増大しはじめる点	間ゲキ水圧の平均値の増加率または他方向ヒズミの増加率の急増する点

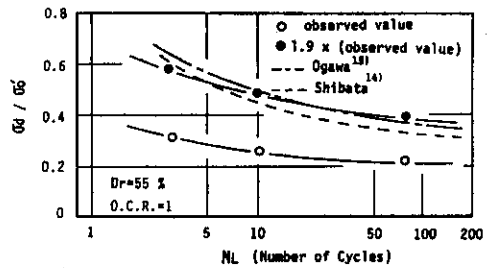


Fig. 17 Comparison of liquefaction strengths resulting from cyclic and static triaxial tests

きさは、応力定数と初期液状化回数を与えることによって、次式より推定できる。

$$\begin{aligned} \log(\sigma_d/\sigma'_o) &= c + \log d \\ c &: \text{図-15 参照} \\ d &= -N_L / (1.284 \times N_L + 4.603) \end{aligned}$$

3) 静的非排水三軸繰り返し試験より得られた応力振幅は、動的非排水三軸繰り返し試験結果の約53%にあたり、1.9倍することにより動的非排水三軸繰り返し試験結果にはほぼ一致した。このことより、静的非排水三軸繰り返し試験結果にある定数を掛けることによって、動的非排水三軸繰り返し試験結果を推定することが可能であると考えられる。

以上のことより、静的非排水三軸繰り返し試験結果と動的非排水三軸繰り返し試験結果の倍率を決定できるならば、本研究で提案した推定法により、動的非排水三軸繰り返し試験結果を推定することが可能であると考えられる。

謝 辞

本研究を行なうにあたり本学和田技官には、実験装置の製作、改良に御協力いただいたことを、ここに感謝致します。

参考文献

- 1) 土質工学会：地盤の液状化，土質工学会，1984。
- 2) 斎藤迪孝：飽和砂質地盤の液状化による被害と対策，第16回土質工学シンポジウム論文集，pp. 49-54，1971。
- 3) Seed, H. b. and I. M. Idrees: Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *J. SMFD, ASCE*, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273, 1971。
- 4) 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. 641-648，1971。
- 5) Schnable, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed: SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontal Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972。
- 6) Martin, P. P. and H. B. Seed: Simplified Procedure for Effective Stress Analysis of Ground Response, *J.GED, ASCE*, Vol. 105, No. GT6, pp. 739-758, 1979。
- 7) Finn, W. D. L., P. M. Byrne and G. R. Martin: Seismic Response and Liquefaction of Sand, *J. GED, ASCE*, Vol. 102, No. GT8, pp. 841-856, 1976。
- 8) 土田肇：飽和砂質土の振動実験結果に基づいた液状化の予測，第16回土質工学シンポジウム論文集，pp. 33-38，1971。
- 9) 常田亮，小川正二，亀井健史：低拘束圧下における飽和砂のせん断特性，長岡技術科学大学研究報告，No. 9, pp. 35-42, 1987。
- 10) Shibata, T., Yukitomo, H. and Miyoshi, M.: Liquefaction process of Sand during Cyclic Loading, *Soils and Foundations*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-16, 1972。
- 11) 谷本真一，樺村隆晴，菅好徳，大浦智：繰返し荷重による飽和砂の破壊について，第5回土質工学研究発表会講演集，pp. 105-108, 1970。
- 12) 柴田徹，行友浩：飽和砂の繰り返し載荷による液状現象の研究，土木学会論文報告集，No. 180, pp. 83-89, 1970。
- 13) 小川正二，柳沢栄司，長池政彦：振動応力を受ける飽和砂の液状化機構について，第4回土質工学研究発表会講演集，pp. 79-82, 1969。
- 14) 柴田徹：飽和砂の液状化に関する一斉試験結果，土と基礎，Vol. 20, No. 1, pp. 67-68, 1972。
- 15) 小川正二，三井澄夫，和田正：飽和砂の液状化への変動せん断応力および過圧密の影響，土質工学会論文報告集，Vol. 16, No. 4, pp. 77-83, 1976。