



三軸試験による粗粒土の液状化強度決定と原位置液状化強度の推定

田中, 泰雄
杉本, 繁俊
足立, 直之
利根川, 光司

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 8:97-102

(Issue Date)

2004-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00422463>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00422463>



三軸試験による粗粒土の液状化強度決定と 原位置液状化強度の推定

Liquefaction Strength of Coarse-Grained Soil as Determined by Triaxial Test and In-Situ Liquefaction Strength

田中 泰雄⁽¹⁾
Yasuo Tanaka
杉本 繁俊⁽²⁾
Shigetoshi Sugimoto
足立 直之⁽³⁾
Naoyuki Adachi
利根川 公司⁽⁴⁾
Kouji Tonegawa

概要：地震時における地盤の液状化が都市基盤に甚大な被害をもたらす事は、今までの地震被害からみて明らかなことである。そのため、液状化について多くの研究が行われてきている。今までは粒径が小さく均一な飽和砂質地盤のみが研究対象であったが、阪神淡路大震災による粒土分布の良い粗粒土の液状化が報告され、粗粒土についての液状化研究が近年注目されてきている。このような背景から、本研究室では大型中空ねじり試験装置（以下、大型中空）を用いた粗粒土の液状化研究を行ってきた⁽¹⁾。一般に、粗粒土のような平均粒径の大きな資料においてはメンブレン貫入（以下、MP）が液状化強度を評価する際に大きな誤差を生む要因であることが知られている。そこで本研究では、粗粒土を用いた MP の影響を補正した中型三軸試験（以下、中型三軸）による液状化強度の決定を行い、昨年度の大型中空ねじり試験結果と、比較、検討を行った。なお、今回は MP 補正装置の自動化を行い、試験精度の上昇を試みた。その結果、中型三軸試験結果は従来の大型中空ねじり試験結果と同様な傾向を示した。また、両者の液状化強度差を比較したところ、きれいな砂と同様な強度差は得られない事が判明した。

キーワード：液状化、三軸試験、中空ねじり試験、砂礫、メンブレン貫入（MP）

1 はじめに

阪神淡路大震災では、従来は液状化し難いといわれてきた砂礫地盤が液状化をおこし、従来の液状化現象の概念を覆した。震災以降、砂礫材料を用いた液状化研究が盛んに行われてきたが、砂礫材料の液状化特性に関する研究はまだ十分といえず、未解明な点が多いことが現状であり、明確な設計指針をだすことが急務となっている。

本研究では、中型三軸試験による液状化試験を MP 補正装置を用いて実施し、原位置強度の評価方法として信頼性の高い大型中空の試験結果との比較、検討を行った。

2 実験装置及び実験方法

2.1 実験試料

本研究では実験試料として、神戸市西区産の大阪層群の砂礫を最大粒径 20mm に尖頭して、水洗いしてから炉乾燥したものを使用した。資料の物理特性と粒径加積曲線を、本研究室で液状化試験用に用いられてきた珪砂と併せて表-1 及び図-1 に示す。

2.2 実験装置

今回使用した中型三軸試験の供試体寸法は、外径 100mm、高さ 200mm であり、使用したメンブレン厚は 0.3mm である。中型三軸試験装置では、供試体に、軸荷重、セル圧、背圧それぞれに独立に与えることができる。軸荷重はセル内のロードセルによって計測され、セル圧および間隙水圧は圧力変換器によって計測した。体積変化量は、供試体からの排水量を電子天秤によって計測した。変位は、軸ピストンの上部に設置したアルミ板の変位を LVDT により計測した。

また、本年度は杉本⁽⁷⁾が去年度で手動制御として開発したMP貫入量の補正装置を、コンピュータによる自動制御に改良した。

こうして、軸荷重、軸変位、セル圧、背圧、シリンダーの軸変位の、5つの電圧測定値を、増幅装置によって拡大して12bitの分解能を持つA/Dカードによってパーソナルコンピュータに取り込み、計測用プログラム“Lab VIEW”によって自動計測を行った。また、応力制御の電空レギュレーターにはA/Dカードのアナログ電圧出力チャンネルから電圧を与えることにより自動制御を行った。図-2 に試験装置概略図を示す。

試料	西区砂礫	珪砂
土粒子の密度 ρ_s (t/m ³)	2.67	2.62
最大密度 ρ_{max} (t/m ³)	1.95	1.57
最小密度 ρ_{min} (t/m ³)	1.54	1.25
最大粒径 (mm)	19	0.85
平均粒径 (mm)	1.7	0.22
均等係数 U_c	15	2.0
曲率係数 U_c'	0.82	1.1

表-1 物理特性

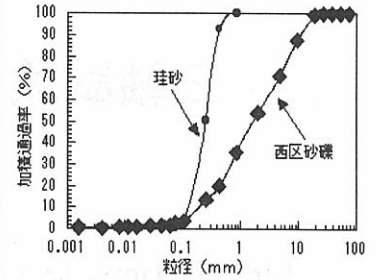


図-1 粒径加積曲線

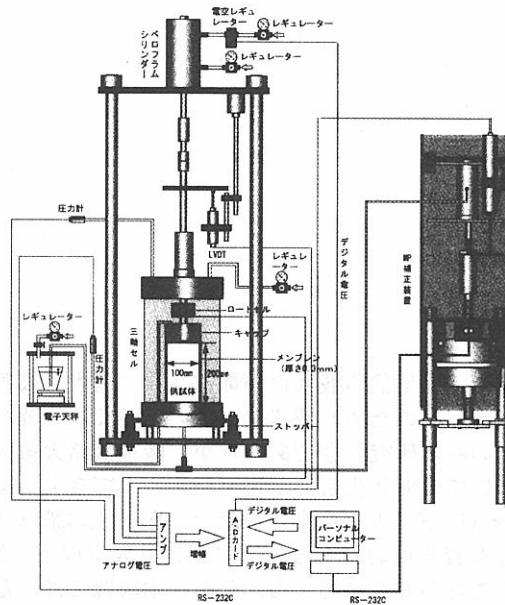


図-2 装置概略図

2.3 供試体作成方法

供試体は空中落下法によって相対密度が60%になるように作成した。図-3に示す試料投入装置によって、試料を自由落下させる。供試体を0.04MPaの負圧によって自立させ、装置を組み立て負圧からセル圧に変換し、電空レギュレーターによる軸方向応力制御を開始し、等方応力状態に保たせた。この状態で、炭酸ガスによる通気、脱気水による通水を行い、その後、0.1MPaのバックプレッシャー(背圧)を与える。背圧供給後、CO₂が脱気水に溶け供試体が飽和するまで放置し、B値を測定する。B値が0.95以上で供試体が飽和しているとみなし、実験を続行した。

2.4 等方圧密・除荷・再圧密過程

背圧供給後の有効拘束圧が0.04MPaの供試体に対して有効拘束圧 p' が0.1MPaになるまで圧密を開始する。この際、電空レギュレーターによる軸方向応力制御によって、供試体は常に「セル圧＝軸方向応力」の等方圧密応力が加わっている。載荷終了後、 $p' = 0.1$ MPaを保ったまま間隙比が落ち着くまで放置する。圧密終了後、有効拘束圧 p' が0.005MPaになるまで等方除荷を行った。除荷終了後、間隙比が落ち着くまで放置した後、再圧密を行った。再圧密終了後、間隙比が落ち着いたのを確認してから非排水繰り返し三軸試験を行った。

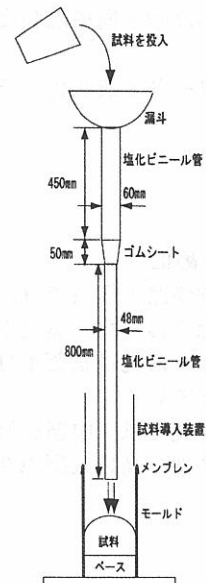


図-3 試料投入装置

2.5 非排水繰返しせん断過程

再圧密終了後の有効拘束圧 $p' = 0.1 \text{ MPa}$ の供試体に非排水条件のもとで、電空レギュレーターによって一定振幅の正弦波になるように自動制御された繰返し圧縮伸張応力を与えた。载荷は、昨年までは過剰間隙水圧比が 95% に達するまで行っていたが、繰返し応力比の違いによって、過剰間隙水圧比が 95% に達しても発生する軸ひずみの値に開きがあることから、本年度は、DA（軸ひずみ両振幅）が 5% を超えるまで行った。

3 メンブレン貫入補正装置

3.1 メンブレン貫入 (MP) について

土の供試体を三軸試験や中空ねじり試験で試験する際、供試体をゴムのメンブレンで覆い、側方を水圧あるいは空気圧により拘束して実験を行うのが一般的である。このゴムメンブレンは伸縮性に富むため、試料が粒状体の場合、内部と外部との圧力差によって供試体の境界面を形成しているメンブレンが図-4 のように粒子間に貫入してしまうことになる。この現象をメンブレンペネトレーション(メンブレン貫入, MP)と呼ぶ。

メンブレン貫入は粒径の大きさ、メンブレンの厚さに影響を受けるが、主として粒径の大きさに依存することが示されている。ゆえに礫材料を用いる場合、MP 量が大きく発生することになる。この MP 貫入量は内部・外部の圧力差である有効拘束圧によって変化するため、試験中の体積変化計測には注意が必要となる。すなわち供試体の体積変化の測定は、供試体内からの水の出入りを計測することによって行うことが多いので、MP 貫入による変化を含むと、真の体積変化を得ることが困難となる。

一方、非排水繰返しせん断過程では、圧密時とは反対に間隙水圧の上昇によりメンブレン貫入量が減少し、その減少部分に間隙水が流入することにより、真の非排水条件が保たれなくなる。その結果、過剰間隙水圧の消散が起こり有効応力の減少が生じ、液状化強度を過大評価してしまう。礫材料においては、MP 量が大きいと、液状化強度も過大評価しすぎるため、メンブレン貫入の適切な評価、補正を行うことが大変重要になってくる。

MP の影響を考慮した液状化強度の決定方法としては、試験中に MP 補正を行う方法と、試験後に強度を補正する方法がある。本研究においては、試験中に MP 補正を行う方法を採用することとした。

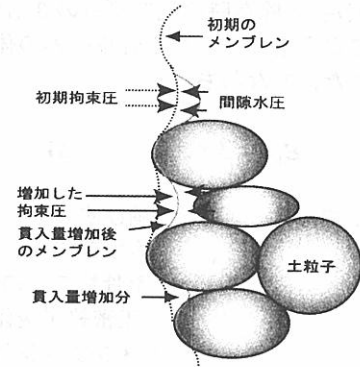


図-4 メンブレン貫入

3.2 メンブレン貫入補正装置

これまでの液状化試験中における MP 補正は手動によるものであったが、今回、コンピュータによって自動制御できる図-5 に示す MP 補正装置を作成した。この装置は注水用のシリンダーとメガトルクモーターを組み合わせたもので、メガトルクモーターの回転変位をコンピュータで制御して、任意の軸変位をピストンに与えることによってシリンダー内の間隙水を注入・抽出する装置である。また、制御できる注入・抽出量は軸ピストンに設置された LVDT の変位量とシリンダーの断面積の積で与えられ、理論精度は $(7.0686 \times 0.0001) \text{ cm}^3$ である。この量は MP の最大量である 8 cm^3 の 0.0088% の精度で注

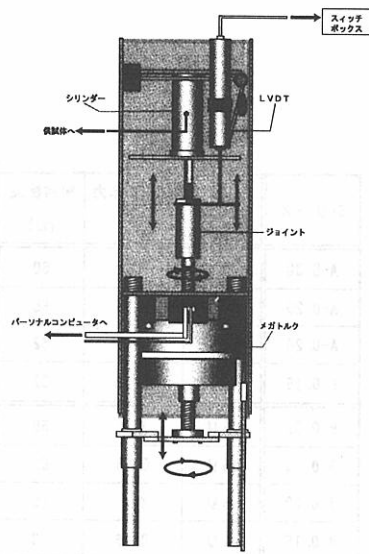


図-5 MP 補正装置

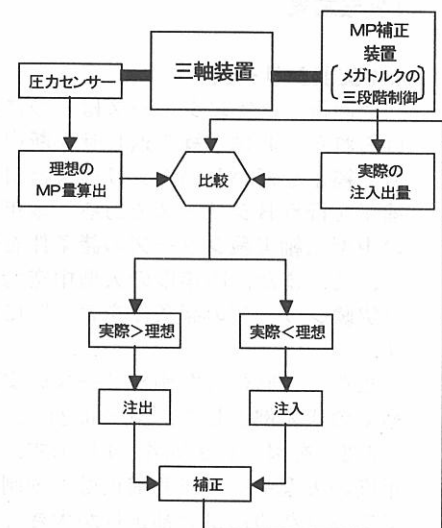


図-6 システムのフローチャート

入出することができ、高精度の補正ができる。制御方法としては、図-6 に示すように、有効拘束圧の変化を圧力センサーで計測し、その変化量に応じて必要な注入出量を算出する。次に、メガトルクモーターの回転変位を3段階に制御することにより、与えた注入出量と理想のMP補正量を比較し、その誤差量をプログラムで判断し、理想のMP補正量となるようメガトルクを回転させ間隙水を注入出することにより補正を行うものである。

3. MP量の計算方法

今回は Vaid ら⁽²⁾の方法によってMP量を算出した。Vaid らは、除荷時の供試体の挙動が等方的であると仮定し、除荷時の軸ひずみの3倍がMP量を含まない土骨格のみの体積ひずみであると仮定した。そして、そこから計算された土骨格のみの体積変化量を、MP量を含む体積変化量から減じることによってMP量を求めた。すなわち、

$$\varepsilon_v = 3 \times \varepsilon_a, \quad \Delta V_s = V \times \frac{\varepsilon_v}{100}, \quad MP = \Delta V - \Delta V_s$$

ここで、
 ε_a : 軸ひずみ (%)
 ε_v : 体積ひずみ (%)
 ΔV_s : 土骨格のみの体積変化量 (cm³)
 V : 圧密終了後体積 (cm³)
 MP : メンブレン貫入量 (cm³)
 ΔV : MPによる排水量も含まれた体積変化量 (cm³)

こうして、除荷時の様々な有効拘束圧におけるMP量を計算し、MP-p' 関係を算出した。

3.4 MP補正方法

MP補正を行うにあたっては上述のMP-p'関係のうちで平均的なデータを選定し、その平均値について図-7のような6次式で近似することにより、今回の実験のMP補正曲線とした。この6次式によるMP-p'関係を用いて、非排水繰返しせん断中に変化する $\Delta p'$ に対応する ΔMP 量をコンピュータによって随時計算し、MP補正装置を用いて間隙水を注入出し、随時補正を行った。

また、今回は実験後に液状化曲線を補正する方法（中村ら⁽³⁾の C_N-C_{RM} 関係）も行った。

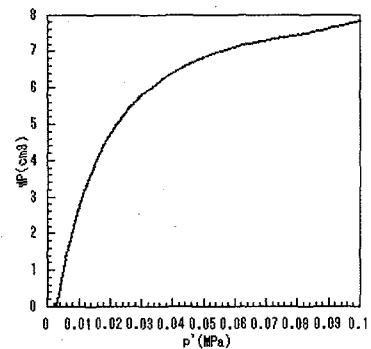


図-7 MP補正曲線

4 実験結果

4.1 実験シリーズ

今回行った実験シリーズは二つに分けられる。非排水繰返しせん断中にMP補正を行わないAシリーズとMP補正を行うBシリーズである。本年度の中型三軸実験シリーズの諸条件を表-2に、また、昨年度の大型中空ねじり実験シリーズの諸条件を表-3に示す。

また、今回行った両シリーズの実験結果の代表例として、「A-0.2」と「B-0.2」を図-8及び図-9に示す。昨年度の大型中空のMP補正は手動制御であったためにMP補正量が大きくなる終盤において応力経路にばらつきがみられた。しかし、今回はMP補正を自動制御したことにより滑らかな応力経路が描けていることがわかる。つま

シリーズ	MP補正	せん断応力比	相対密度 (%)
A-0.30	なし	0.3	60
A-0.25	なし	0.25	58
A-0.20	なし	0.2	62
A-0.15	なし	0.15	62
B-0.30	あり	0.3	59
B-0.25	あり	0.25	62
B-0.20	あり	0.2	62
B-0.15	あり	0.15	59

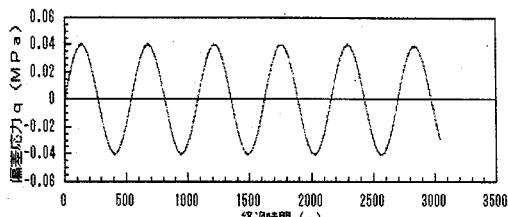
表-2 中型三軸実験シリーズ

シリーズ	MP補正	せん断応力比	相対密度 (%)
C-0.35	なし	0.35	63
C-0.25	なし	0.25	59
C-0.20	なし	0.2	64
C-0.15	なし	0.15	62
D-0.35	あり	0.35	62
D-0.25	あり	0.25	63
D-0.20	あり	0.2	60
D-0.15	あり	0.15	59

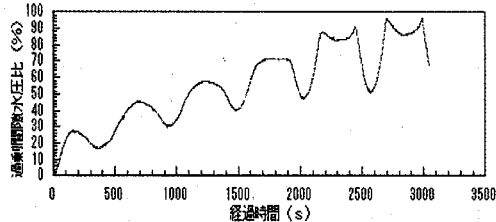
表-3 大型中空ねじり実験シリーズ

り、大型中空の補正よりも高精度の補正が中型三軸においては行われたといえる。

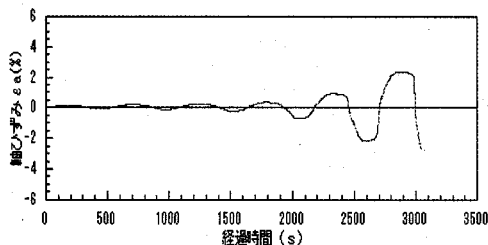
西区砂礫 $D_r=81.55\%$ 繰り返し応力比0.20 周期分 MP補正あり 1.23



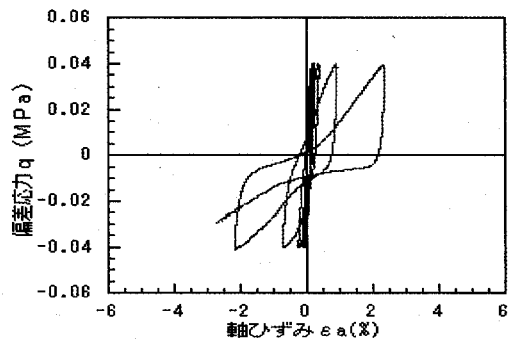
a) 偏差応力～時間変化



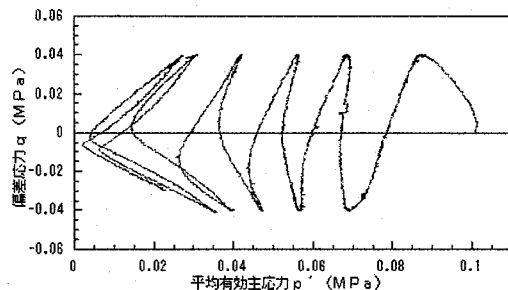
b) 間隙水圧～時間変化



c) 軸ひずみ～時間変化



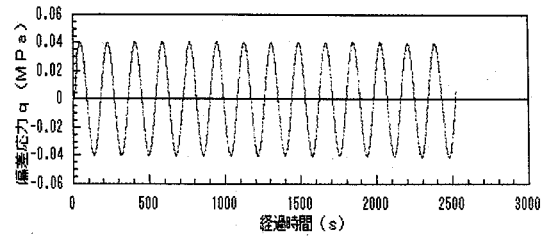
d) 偏差応力～軸ひずみ変化



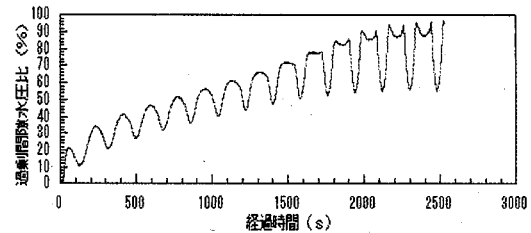
e) 応力経路

図-8 中型三軸の MP 補正ありの
応力経路 (応力比 0.2)

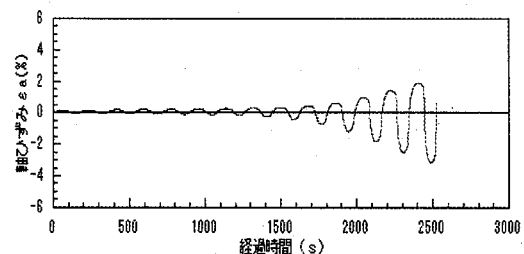
西区砂礫 $D_r=82.08\%$ 繰り返し応力比0.20 周期分 1.8



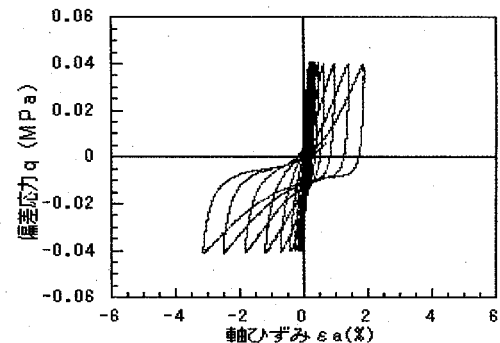
a) 偏差応力～時間変化



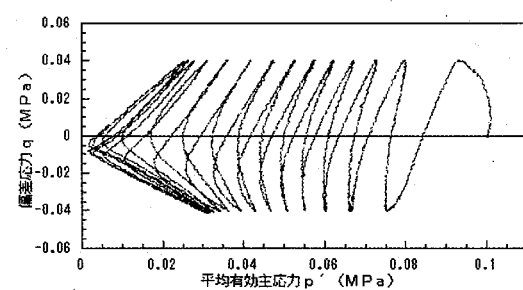
b) 間隙水圧～時間変化



c) 軸ひずみ～時間変化



d) 偏差応力～軸ひずみ変化



e) 応力経路

図-9 中型三軸の MP 補正なしの
応力経路 (応力比 0.2)

4.2 液状化強度曲線の比較

図-8, 9 の比較からも分かるように, MP補正ありとMP補正なしの場合とでは, 繰返し回数が大きく違い, MPが液状化強度に与える影響の大きさがわかる. 中型三軸試験のMP補正あり(Bシリーズ)の液状化強度曲線及びMP補正なし(Aシリーズ)の試験結果に中村らによる補正方法を適用して得られる強度曲線を図-10に示す. また, 昨年度の大型中空ねじり試験結果を図-11に示す. また, MP補正ありの中型三軸と大型中空の液状化曲線を図-12に示す. 図から, すべてのシリーズにおいてMP補正を行ったほうが液状化強度が低くなりMPが液状化強度に与える影響が大きいことがわかる. また, 中型三軸と大型中空の液状化曲線について見てみると, 中村らによる方法($C_N - C_{RM}$ 関係を用いた補正)による補正のほうがMP補正装置による補正よりも若干小さな強度を示していることがわかる. 次に, 中型三軸と大型中空のMP補正装置により補正した液状化強度を比較して見ると, 大型中空のほうが液状化強度が大きくなり, 一般的にきれいな砂でいわれる両試験の違いと一致する傾向を示す. 三軸と中空ねじりの液状化強度差については, 山下・土岐⁽⁴⁾によって研究されている. 山下・土岐は, 豊浦砂などの砂試料を対象に堆積方法を変化させて, 粒子構造が異なる供試体を作成し, 三軸試験による液状化強度が中空ねじり試験とどのような差異を示すのか検討した. その結果, 供試体の構造異方性の相違によって液状化強度は異なり, 特に繰返し三軸試験においてその差が顕著に現れると示している. そこで両者の強度差について山下・土岐の結果を基に検討してみると, 図-13のような結果が得られた. この検討の詳細は他で発表しているのでそちらを参照されたい. 図のように今回用いた粗粒土においては, きれいな砂について得られる結果を用いると, 強度を過小評価することが分かった.

5 まとめ

本研究では粗粒土の真の液状化強度を求めることを目標として研究を行ってきた. 従来の手動制御のMP補正装置では精度の良い補正ができていたとはいえなかった. しかし, 今回のMP補正装置の自動化により高精度の補正ができ, 試験精度の大きな向上となった. 今後も両装置を利用して粗粒土の液状化特性について更なる研究をしていくつもりである.

参考文献

- 1) 田中泰雄, 杉本繁俊, 足立直之: 大型中空ねじり試験によるメンブレン貫入補正後の粗粒土の液状化強度の決定, 地盤工学研究発表会, pp. 1999-2000, 2003.
- 2) Yoginderl, P. Vaid and Dawit Negussey: A Critical Assessment of Membrane Penetration in the Triaxial Test, American Society for Testing and materials, pp70-76, 1984
- 3) 中村 幸司, 時松孝次, 吉見吉昭: 非排水試験結果に対する Membrane Penetration の影響の簡便な補正方法, 第23回土質工学会研究発表会講演集, pp. 657-658, 1988.
- 4) 山下聡, 土岐祥介: 繰返し三軸試験と中空円筒ねじり試験による液状化強度の比較, 第26回土質工学研究発表会, pp. 725-728, 1991.
- 5) Yasuo Tanaka, Shigetoshi Sugimoto, Naoyuki Adachi: Liquefaction strength of coarse-grained soils as determined by large torsional test and the membrane penetration effect on the strength, World Conference on Earthquake Engineering, No.1089, 2004

著者: 1) 田中 泰雄, 都市安全研究センター, 教授; 2) 杉本 繁俊, 自然科学研究科地球環境科学専攻, 大学院生; 3) 足立 直之, 自然科学研究科建設学専攻, 大学院生; 4) 利根川 公司, 自然科学研究科建設学専攻, 大学院生

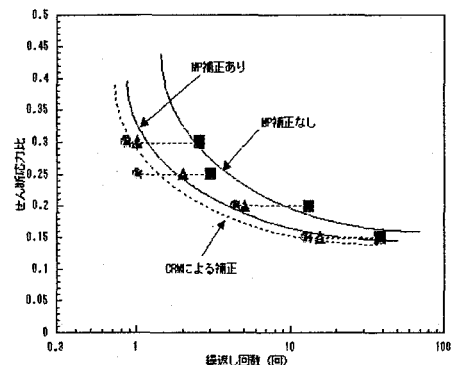


図-10 中型三軸の液状化曲線

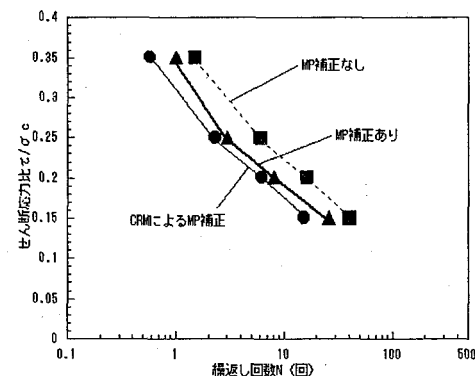


図-11 大型中空ねじりの液状化曲線

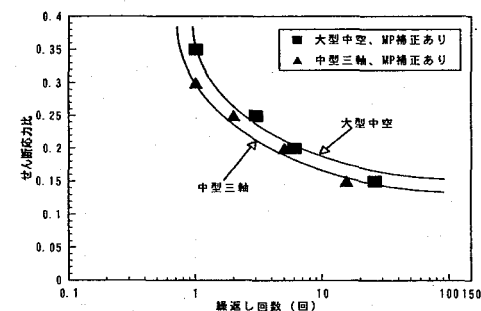


図-12 大型中空と中型三軸の液状化曲線の比較

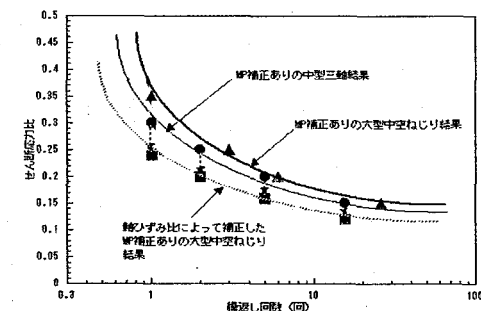


図-12 山下・土岐の結果に基づいた液状化強度曲線の補正

Liquefaction Strength of Coarse-Grained Soil as Determined by Triaxial Test and In-Situ Liquefaction Strength

Yasuo Tanaka

Shigetoshi Sugimoto

Naoyuki Adachi

Kouji Tonegawa

ABSTRACT

This paper deals with liquefaction strength of coarse grained soil as determined by triaxial test and in-situ liquefaction strength. The liquefaction strength of coarse grained soil with the correction of membrane penetration effect was investigated by using a medium size triaxial test. Then the result of triaxial tests were discussed with respect to the difference between the hollow cylinder and the triaxial tests on the liquefaction strengths. As to the liquefaction strength curve, the liquefaction strength obtained from the large torsional hollow cylinder test is higher than that from the medium triaxial test. It was also found that the automated membrane penetration compensation apparatus functioned well with a good accuracy.

