



大型中空ねじり試験による粗粒土の液状化強度の決定とメンブレン貫入補正について

田中, 泰雄
杉本, 繁俊
足立, 直之

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 7:39-47

(Issue Date)

2003-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00405987>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00405987>



大型中空ねじり試験による粗粒土の 液状化強度の決定とメンブレン貫入補正について

Liquefaction Strength of Coarse-Grained Soil as Determined by Large Torsional Test and The Membrane Penetration Effect on The Strength

田中 泰雄⁽¹⁾
Yasuo Tanaka
杉本 繁俊⁽²⁾
Shigeto Shi Sugimoto
足立 直之⁽³⁾
Naoyuki Adachi

概要：地震時の地盤の液状化による被害については、従来から多くの研究が行われてきた。しかし、1995年の阪神淡路大震災では、神戸港域の人工島であるポートアイランドや六甲アイランドにおいて、これまで液状化し難いとされていた礫分を含む粒度の良い真砂土埋立地盤が液状化した。現在大阪湾臨海部では神戸空港を始め、多くの人工埋立て地が造成されているが、同様な礫分を含む埋立て材料に対する液状化研究が急務となっていることは明らかである。このような背景を反映し、本研究室では礫質土のような粗粒材を対象とした大型の中空ねじり試験装置を開発し、粗粒材料の液状化強度特性について検討を行ってきた^{(1), (2)}。本研究においては、大型中空ねじり試験装置を用いて、非排水繰返し载荷中に直接メンブレン貫入 (MP) 補正を行い、粗粒材料の液状化強度を検討した。その結果、液状化試験中に直接 MP 補正を行って得られる強度は、従来より提案されている MP 補正式から得られる強度より大きくなることが判明した。

キーワード：液状化、中空ねじり試験、砂礫、メンブレン貫入 (MP)

1. はじめに

日本は地震大国であり、昔から地震による被害を受けてきた。そうした地震による被害の1つに液状化被害がある。従来の液状化に対する研究は、均一な粒度分布を持つきれいな砂を対象とするのが一般的であったが、1995年の阪神大震災での神戸ポートアイランドや六甲アイランドにおいては、多くの礫分を含み粒度分布が良く、それまでは液状化しないと思われていた真砂土の埋立地盤が液状化した⁽³⁾。こうした背景を受けて近年、全国の研究機関において砂礫材料の液状化研究が盛んに行われるようになった。しかし、砂礫材料の液状化研究はまだまだ多いとは言えず、特に液状化試験におけるメンブレン貫入 (MP) の影響についての研究が必要と考えられる。

本研究では大型中空ねじり試験装置を用いて、MPが砂礫材料の液状化特性に与える影響について検討することを目的とし、液状化試験中にMP補正を行って真の液状化強度を求めようとするものである。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

本研究では非排水繰返し载荷等を自動制御する為に、応力载荷用の手動空気圧レギュレータを電空レギュレーターに変換した。電空レギュレーターは、ある入力電圧に対して決まった圧力を出力するレギュレーターである。プログラムによって与える電圧を制御することによって出力圧力を調整し、それによって、载荷応力を自動制御するものである⁽⁴⁾。装置に備え付けられた電空レギュレーターは2つであり、それらは軸方向応力制御用とせん断応力制御用である。

また、本年度は試験中にMP補正する為の装置を作成した⁽⁵⁾。図-2.1にMP補正装置を示す。装置上部のハンドルを回してピストンに鉛直変位を与えることによって、内部を水で満たしたシリンダーから水注入出する装置である。ピストンの変位量は、ピストンに設置された水平なアルミ板の変位をLVDTで測定することによって求める。注入出する水の量はピストンの変位量に、既知のシリンダー断面積を乗じることによって計算する。また、ねじりせん断力は1対のペロフラムシリンダーによって与えられ、セル内に設置された2方向ロードセルによって鉛直荷重とトルクを計測した。コンピューターによる計測項目は、軸荷重、

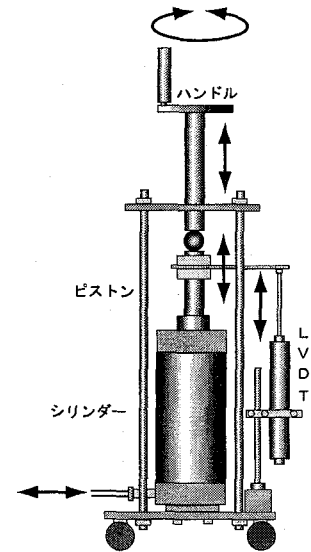


図-2.1 MP補正装置⁽⁵⁾

トルク、軸変位、回転角、セル圧、間隙水圧、体積変化量、ピストンの変位の8つであり、計測プログラムによって自動計測を行った。計測プログラムにはNational Instrument社の「Labview 6.0i」を用いている。供試体寸法は外径50cm、内径30cm、高さ60cmの中空供試体である。図-2.2に本年度の装置の概略図を示す。

2.2 実験試料

本研究に用いた試料は神戸市西区産の砂礫である。これをふるいにかけ、19mm以下に尖頭し、水洗いして炉乾燥させたものを試料として用いた⁽⁴⁾。図-2.3に試料の粒径加積曲線を珪砂のものと併せて示す。珪砂は本研究室で液状化研究に從來から用いられているものであり、珪砂6号と7号を重量比1:1の比で混合したものである。

2.3 最大密度、最小密度試験

松本らの研究^{(1), (2)}では、最大密度決定方法として内径15cmのモールドに試料を詰め、パイプレーターによって締め固める方法を採用した。本年度は埋立て材料に対して良好な結果を示すとされる岩崎ら⁽⁶⁾の試験方法を参考にすることにした。それは締め固め試験を援用して最大密度を決定する方法である。すなわち、様々な締め固めエネルギーと、それらによって締め固めた乾燥密度の関係が双曲線近似されると仮定し、締め固めエネルギーが ∞ のときの乾燥密度を最大密度とする方法である。本年度は時間の都合上、標準エネルギーの締め固め試験のみを行い、そこから得られる最大乾燥密度 1.95 t/m^3 を最大密度とした。また、従来のパイプレーターの方法では最大密度として 1.81 t/m^3 を得たが、今回の方法の最大密度の方が大きい値が得られていることが分かる。最小密度試験は従来と同じく、同じ内径15cmのモールドに漏斗を用いて試料を落下高さ

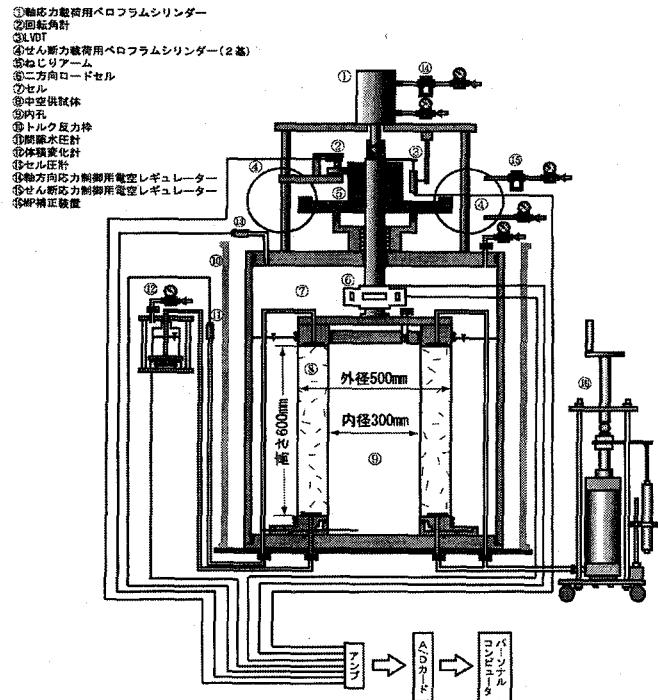


図-2.2 試験装置の概略図

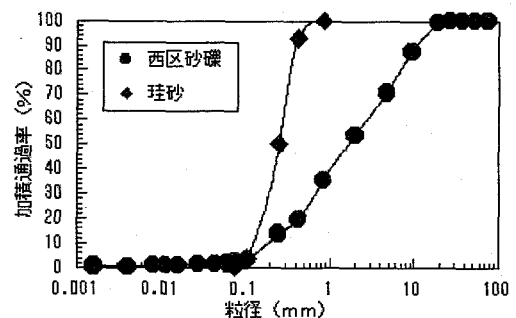


図-2.3 試料の粒径加積曲線

0 で空中落下させたときの値を採用した。こうして得られた西区砂礫の最大、最小密度やその他の物理特性を珪砂と併せて表-2.1 に示す。

表-2.1 試料の物理特性

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

2.4 供試体作成方法

供試体は直径約 5cm のホースを介しての漏斗法で作成した。その後 0.04MPa の負圧によって自立させた後、装置を組み立て拘束圧をセル圧に切り換えた。そして、炭酸ガスによる通気、脱気水による通水を行い、0.1MPa の背圧を与えた。炭酸ガスが溶けるまで供試体を放置した後 B 値を測定し、0.95 以上で飽和していると見なし、実験を続行した。

2.5 等方圧密・除荷過程

背圧供給後に、有効平均主応力 p' が 0.04MPa の供試体に対して p' が 0.1MPa になるまで圧密載荷を行った。圧密載荷終了後は、間隙比が落ち着くまで一定時間放置した。

圧密終了後に等方除荷を行ったが、メンブレン貫入量決定の為の「MP- p' 」関係を求めるものである。除荷終了後、間隙比が落ち着くまで一定時間放置した後、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返しせん断試験を行った。

2.6 非排水繰返しせん断過程

再圧密終了後の $p' = 0.1$ MPa の供試体について、非排水条件のもとで、一定振幅の正弦波の繰返しせん断応力を与えた。載荷は過剰間隙水圧比が 95% を超えるまで行った。

3. メンブレン貫入 (MP) について

3.1 メンブレン貫入 (MP)

一般に三軸試験や中空ねじり試験の供試体は、セル水との遮断を行う為にゴムメンブレンで拘束する。このメンブレンは伸縮性に富むため、内外圧差、すなわち有効拘束圧によって図-3.1 のように供試体の間隙に貫入する。この現象をメンブレン貫入 (以下 MP) と呼ぶ。MP 量は試験中の有効拘束圧の値によって変化する為、試験結果に誤差を与える原因となる。例えば圧密時においては、MP 量を含む排水量が体積変化量として測定される為、体積変化量が過大に計測され、そこから計算される間隙比の変化量も実際より大きくなってしまう。

しかし、液状化試験で MP が与える最も深刻な試験誤差は、非排水繰返しせん断時に発生する。同過程では、間隙水圧が上昇することによって有効拘束圧が減少し、それに伴って MP 量が減少しようとする。このため減少部分に間隙水が流入し、その結果、間隙水圧が消散し、真の非排水状態を保てなくなってしまう。従って、有効応力が真の非排水状態の時よりも減少し、その結果として液状化強度を過大評価してしまう。故に、粗粒材の液状化試験では MP の影響を考慮することは必要不可欠である。

3.2 MP に対する研究

これまでの液状化研究から、MP に関して以下のようなことが判明している。

MP 量は、供試体の平均粒径や、相対密度、粒子の形状、粒子鉱物の種類、メンブレンの厚さ等、様々なものが起因すると考えられているが、Frydman らの研究⁽⁷⁾から、MP 量は主に平均粒径に依存し、その他は重要な因子では無いことが

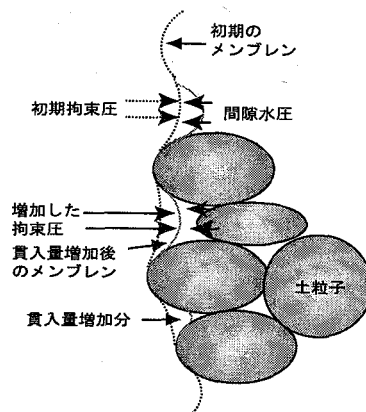


図-3.1 MP の概念図

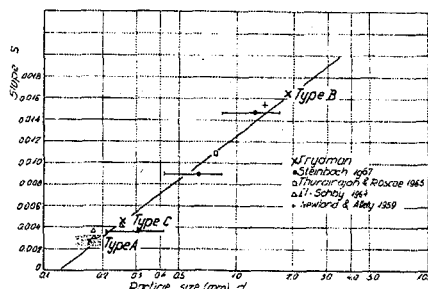


図-3.2 平均粒径とMP量の関係⁽⁷⁾

示されている（図-3.2）。

また、MP量の算出方法には、Roscoe ら⁽⁸⁾の供試体の内部に剛なロッドを設置することによってメンブレンの表面積比を変化させて算出する方法や、Vaid ら⁽⁹⁾の除荷時の挙動から算出する方法等様々なものがあるが、方法によって算出されるMP量にかなりのバラツキがある為（図-3.3）、一概にどの方法が良いとは言えないのが現状であると思われる⁽¹⁰⁾。また、それぞれの方法には装置上の制約がある為、結局、用いる装置に適した方法から選択するか、その他の方法を考案する必要があると思われる。

3.2 本研究におけるMP量の計算方法

今回は Vaid らの方法⁽⁹⁾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 (cm^3)
 V : 圧密終了後体積 (cm^3)
 MP : メンブレン貫入量 (cm^3)
 ΔV : MPによる排水量も含まれた体積変化量 (cm^3)

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。

3.2 MPの補正方法

以上のように、除荷時から求めたMP-p' 関係を用いて、圧密過程の体積変化量についてMP量を補正し、非排水繰返しせん断過程においてもMP補正を行いながら液状化強度を求めた。なお、液状化試験により強度を決定する方法として、以下に述べるように、MP補正を行わずに得られる試験結果に事後補正を加える方法と、今回実施したように非排水せん断試験中に随時MP補正を行う方法とがある。

まず液状化試験結果を事後補正する方法として、中村らの方法がある。中村らは、ある繰返し応力比に対してMP補正無しで得られる繰返し回数と、MP補正を加えて得られる繰返し回数とを比較し、両者の比で定義される指標 C_N について検討した結果⁽¹¹⁾、 C_N の値は Martin⁽¹²⁾らが提案したMPによる影響を表す指標 C_{RM} と一義的な関係にあるとしている。なお、指標 C_{RM} はMP量を検討供試体の骨格のみの圧縮量で除したものである。図-3.4はこの関係を示したもので、この供試体について指標 C_{RM} を決定すれば、 C_N - C_{RM} 曲線を用いて試験後にMPの影響が補正できるとした。

一方、試験中に補正を行う方法では、圧力制御方法と変位制御方法があり、前者は時松ら⁽¹³⁾の行った非排水繰返しせん断中に間隙水压を調整する方法である（図-3.5 参照）、後者は、平川⁽¹⁴⁾のように強制的にMP補正量の間隙水を供試体に注入する方法である（図-3.6 参照）。本年度は前述のよう

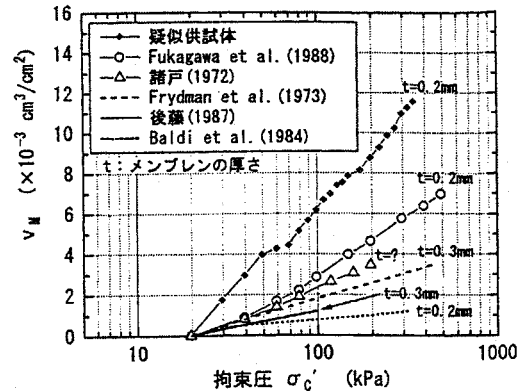


図-3.3 算出方法によるMP量の違い⁽¹⁰⁾

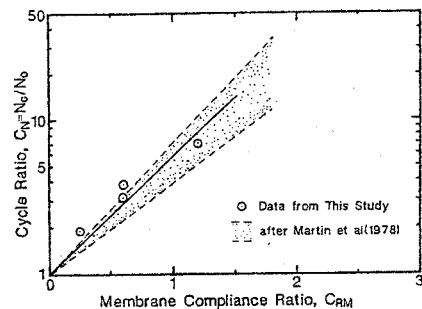


図-3.4 C_N - C_{RM} 曲線⁽¹¹⁾

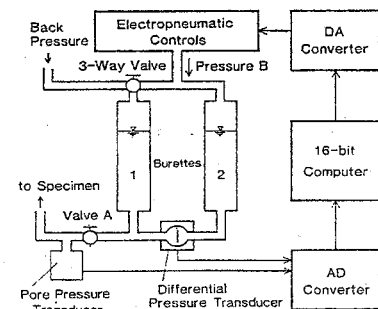


図-3.5 圧力制御によるMP補正装置⁽¹³⁾

に、平川らの装置を参考にして補正装置を作成し、非排水繰返しせん断中に有効拘束圧が減少するときは減少したMP量と同じだけの間隙水を供試体に注入し、逆に有効拘束圧が増加するときは増加したMP量と同じだけの間隙水を供試体から抽出して、MPの影響を補正することとした。

本年度は、MP補正装置を用いて試験中に行う補正と、中村らの試験後に行う補正の両方を行い、それらの結果を比較した。

4. 実験結果

4.1 実験シリーズ

今回行った実験シリーズでは非排水繰返しせん断中にMP補正を行わないAシリーズと非排水繰返しせん断中にMP補正を行うBシリーズの2つを行った。実験シリーズの諸条件を表-4.1に示す。

4.2 試験中及び試験後のMP補正方法

Aシリーズの除荷時の軸ひずみ、また軸ひずみの3倍として求めた土粒子骨格のみの体積ひずみ、並びにMP量を含む供試体全体の体積ひずみのそれぞれを平均主応力 p' についてプロットしたものを図-4.1に示す。軸ひずみの3倍とした体積ひずみは供試体全体の体積ひずみよりかなり小さく、MP量の補正が重要であることがわかる。次に、Vaidらの方法によって図-4.1の結果からMP量を計算したMP- p' 曲線を図-4.2に示す。同図に示すように、全てのAシリーズにおけるMP- p' 関係は相似であることが分かり、これらの平均値を図中に示す6次式で近似した。この6次式によるMP- p' 関係を用いて、Bシリーズの非排水繰返しせん断中に変化する $\Delta p'$ に対応する ΔMP 量をコンピューターによって随時計算し、その値を画面に表示させることによって、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。

一方、図-4.2のMP量から C_{RM} の値を計算したところ、その平均値は0.64となった。そこで、図-3.4の C_N-C_{RM} 曲線から $C_{RM}=0.64$ に対応する C_N を計算したところ2.6となった。後述するように、この値を用いたMPの中村らの事後補正方法と、今回実施した試験時補正方法との比較を行った。

4.3 A、Bシリーズの試験結果

MP補正を加えずに液状化試験を行った例として、「A-0.2」の実験結果を図-4.3に示す。図から液状化までの応力経路が滑らかに再現されており、装置の応力制御自動化によって、高い試験精度で試験が実施されていることが分かる。

一方、試験時にMP補正を加えた例として、「B-0.2」の試験結果を図-4.4に示す。試験中にMPの影響を補正したことによって「A-0.2」に比べて载荷中の間隙水圧が大きくっており、液状化までの繰返し回数が減少していること

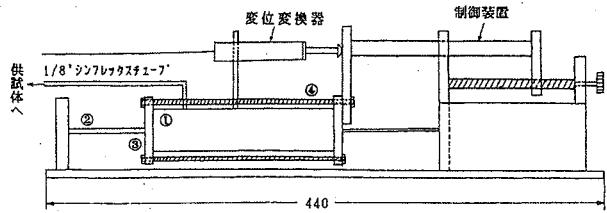


図-3.6 変位制御によるMP補正装置⁽¹⁴⁾

表-4.1 実験シリーズ

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

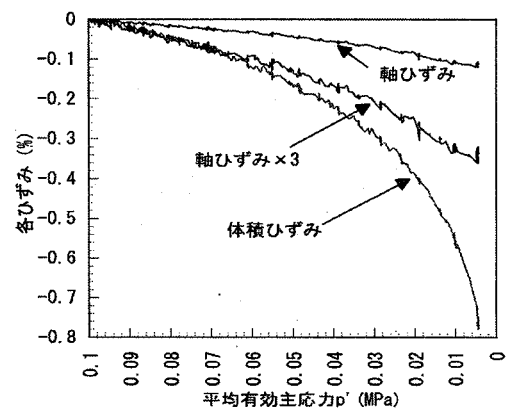


図-4.1 各ひずみ- p' 関係

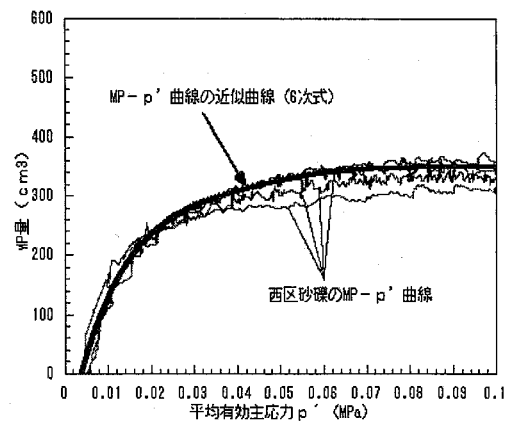
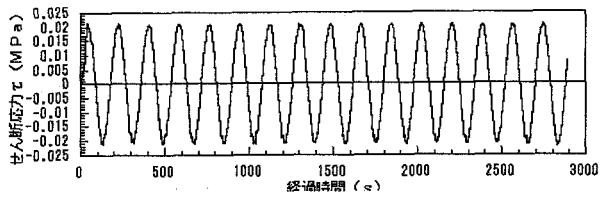
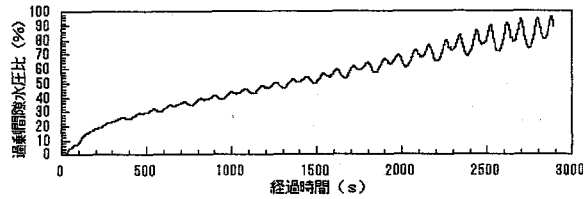


図-4.2 MP- p' 関係と近似曲線

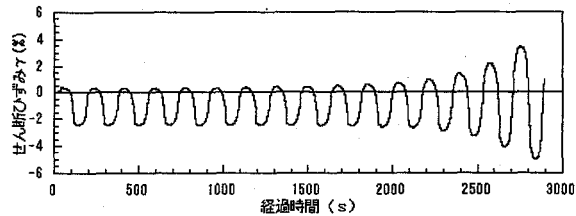
が分かる。また、MP 補正装置の作動を手動で制御したため、「A-0.2」に比べて応力経路に若干のばらつきが見られることが分かる。



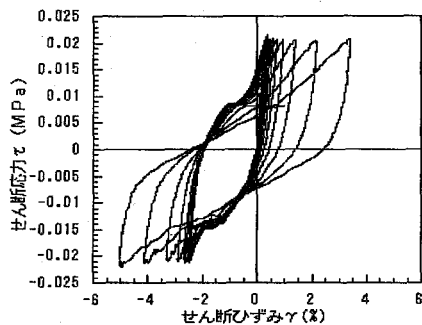
a) せん断応力～時間変化



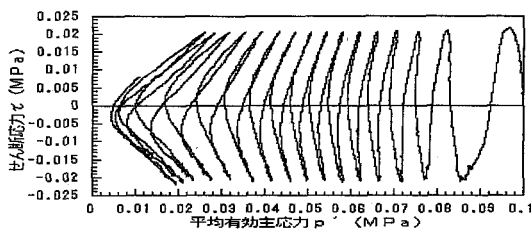
b) 間隙水圧～時間変化



c) せん断ひずみ～時間変化

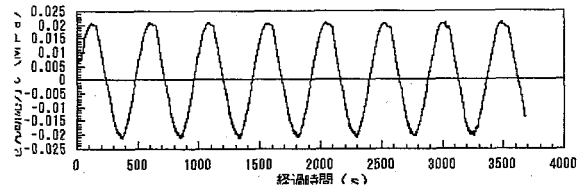


d) せん断応力～せん断ひずみ

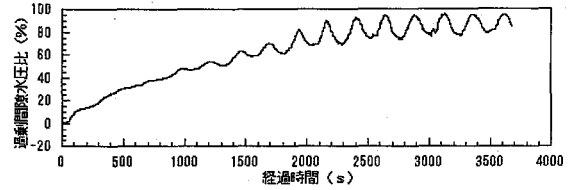


e) 有効応力経路

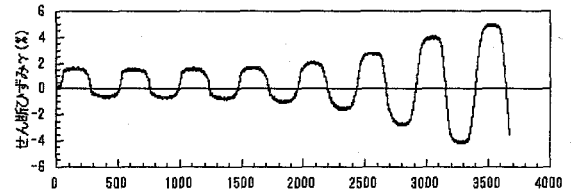
図-4.3 西区砂礫の試験結果
(繰返し応力比 0.2, MP 補正なし)



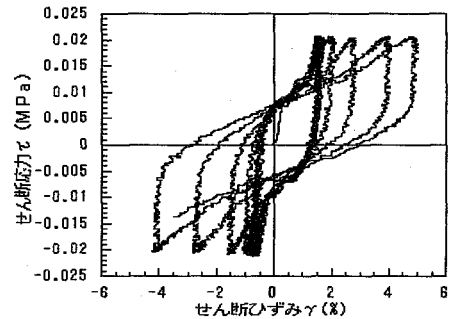
a) せん断応力～時間変化



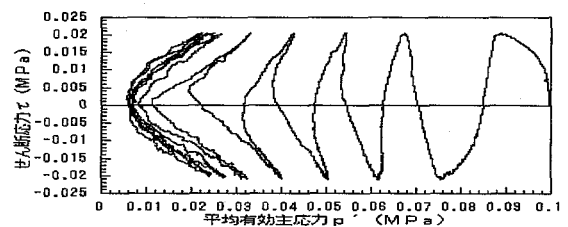
b) 間隙水圧～時間変化



c) せん断ひずみ～時間変化



d) せん断応力～せん断ひずみ



e) 有効応力経路

図-4.4 西区砂礫の試験結果
(繰返し応力比 0.2, MP 補正あり)

4.4 液状化強度曲線の比較

西区砂礫の液状化強度曲線について、MPの影響があるAシリーズ、試験中にMPの影響を補正したBシリーズ、及び、 C_N-C_{RM} 曲線を用いて試験後にAシリーズのMPの影響を補正した結果(Cシリーズ)を図-4.5に示す。一般的な傾向と同様に、MPの影響を補正したB、C、両シリーズにおいて繰返し回数が減少し、液状化強度が減少したことが分かる。また、同図から、直接的な補正による結果よりも、間接的な補正による結果の方が液状化強度が若干小さいことが分かる。この結論については今後も検討が必要であるが、今回のMPの算出において、Vaidらの方法によりMP量を推定する場合には等方弾性体を仮定しているが、実験結果では若干等方性とは異なる傾向が得られていたこともあり、MP量算定法についての今後の検討が必要と思われる。いずれにしても、こうした西区砂礫のような礫分を含む粒度分布の良い砂礫材料においては、液状化強度に与えるMPの影響は多大であり、補正の有無によって液状化強度が大きく異なることが分かる。

5. まとめ

本研究では、MPが砂礫材料の液状化強度に与える影響を検討することを主目標として研究を行った。その為にMP補正装置を作成し、試験中に補正を行ったが、MPが砂礫材料に与える影響の大きさを再確認することができた。また、本年度は従来の試験精度を向上させる目的で、応力制御を自動化したり、最大密度試験に締め固めを利用した方法を使用したりしたが、一応の成果は得られたと思っている。今後は本研究装置を用いてMPが砂礫材料の液状化特性に与える影響について更なる研究を重ねていくつもりである。

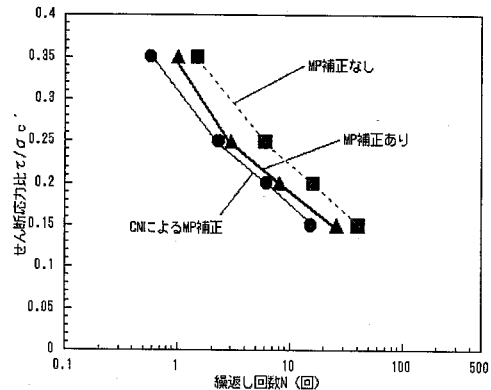


図-4.5 液状化曲線の比較

参考文献

- 1) 松本正暁：粗粒材の液状化強度研究のための大型中空ねじり試験装置の開発、神戸大学大学院自然科学研究科修士論文、2001
- 2) 田中泰雄、松本正暁、杉本繁俊、山崎勝久：大型中空ねじり試験機を用いた盛土材の液状化強度試験、建設工学研究所論文報告集第43-B号、pp. 261-266、2001
- 3) 中村裕昭、福原 誠、小野 諭、束原 純、小森次郎：1995年兵庫県南部地震地盤災害調査—液状化調査—、第30回土質工学研究発表会講演集、pp. 69-70、1995
- 4) 杉本繁俊：大型中空ねじり試験による粗粒土の液状化強度の決定とMPの影響について、神戸大学大学院自然科学研究科修士論文、2003
- 5) 足立直之：大型中空ねじり試験機の液状化試験におけるMP補正について、卒業論文、神戸大学工学部建設学科、2003
- 6) 岩崎好規・諏訪靖二・本郷隆夫・藤原正明・山内淑人・柴田 徹：粗粒材の密度変化に伴うN値特性とその施工管理への利用、粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム、土質工学会、pp. 99~104、1986
- 7) Frydman, S., Zeitlen, J. G. and Alpen, I.: The Membrane Effect in Triaxial Testing of Granular Soils, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 1, No. 1, pp. 37-41, Jan., 1973.
- 8) Roscoe, K. H. and Schofield, A. N. and Thurairajah, A.: in Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM Special Technical Publication 361, American Society for Testing and Materials, pp. 111-128, 1963.
- 9) Yoginder P. Vaid and Dawit Negussey: A Critical Assessment of Membrane Penetration in the Triaxial Test: American Society for Testing and materials, pp. 70-76, 1984
- 10) 加藤 進：砂の三軸試験におけるメンブレン貫入現象について、地盤工学会論文報告集、Vol. 37、No. 1、pp. 143-149、1997
- 11) 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
- 12) Martin, G. R., Finn, W. D. L. and Seed, H. B.: Effects of system compliance on liquefaction tests, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT4, pp. 463-479, 1978
- 13) Kohji Tokimatsu, Kohji Nakamura: A liquefaction test without membrane penetration effects: Soil and Foundations, Vol. 26, No. 4, pp. 127-138, 1986

14) 平川和之：繰返し非排水三軸載荷による相馬砂の降伏応力の変化と AE 特性、神戸大学大学院工学研究科修士論文、1992

著者：1)田中 泰雄、都市安全研究センター、教授；2)杉本 繁俊、自然科学研究科建設工学専攻、大学院生；3)足立 直之、神戸大学工学部建設学科、学部生

Liquefaction Strength of Coarse-Grained Soil as Determined by Large Torsional Test and The Membrane Penetration Effect on The Strength

Yasuo Tanaka

ShigetoShi Sugimoto

Naoyuki Adachi

ABSTRACT

This paper deals with the effect of membrane penetration on the liquefaction strength of coarse grained soil. A large hollow cylinder torsional test apparatus was developed in Kobe University and used to determine the liquefaction strength of coarse grained soil that is used for reclamation project in Kobe Port. A comparison was made on the liquefaction strengths as determined from the large hollow cylinder torsional test both with and without membrane penetration effect. It is shown that there is a considerable effect of the membrane penetration on the liquefaction strength of coarse grained soil. It is also shown that the correction of the membrane penetration effect during the test yields a slightly different liquefaction strength that can be obtained by applying a post-test correction on the test results without membrane correction.

