

# 粒度分布を変化させた砂礫材料の力学特性

原 忠<sup>1</sup>・國生 剛治<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株)ニュージェック 技術開発部 (〒542-0082 大阪府大阪市中央区島之内 1-20-19)

<sup>2</sup>正会員 工博 中央大学理工学部 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

本研究では、3種類の粒度分布の異なる砂礫材料について、供試体径 100 mm、高さ 200 mmの中型三軸試験機を用いた液状化試験を行い、均等係数や相対密度などが液状化強度に与える影響を調べた。そしてこれら砂礫材料の液状化強度は、粒度分布の違いにも関わらず、同程度の相対密度ではよい一致が得られた。一方、3種類の砂礫材料の相対密度 50%供試体で繰り返し載荷後に非排水単調載荷試験を行った結果、礫質材料の静的強度は砂質材料のそれに比べて格段に大きい値を示した。これにより、礫質材料は同じ相対密度の砂質材料と比較して、地震時の液状化強度はほぼ同程度であるが、大きな静的変形に対しては非常に大きい強度を発揮することが明らかになった。

**Key Words :** *liquefaction, triaxial test, sand-gravel soil, uniformity coefficient, relative density*

## 1. はじめに

兵庫県南部地震(1995年)では、ポートアイランドなどの埋め立て地において、礫分を 30%~60%と多く含み、シルト分まで広範囲な粒度分布を有するまさ土が大規模に液状化し、構造物等に甚大な被害を与えた。同様な礫質土の液状化は、1987年の米国ボラーピーク地震での河川堆積礫の液状化<sup>1)</sup>や1993年の北海道南西沖地震の森町赤井川地区での岩屑なだれ礫の液状化<sup>2)</sup>など、近年の地震においても少なからず見られるようになり、決してまれな現象であるとは言い難い。一般に、自然地盤は礫とともに砂や細粒分をも含んだ広い粒度分布を有する場合が多いが、このような粒度構成の礫質材料についての系統的な研究は現在まで多くはない。

本研究では、3種類の粒度分布の異なる砂礫材料について、供試体径 100 mm、高さ 200 mmの中型繰り返し三軸試験機を用いた液状化試験を行い、均等係数や相対密度が液状化強度に与える影響について考察する。また一部供試体では、繰り返し載荷後に体積変化量の測定や非排水単調載荷試験を行い、粒度分布の違いが液状化後の体積変化量、静的強度に与える影響を調べる。これら一連の試験結果より、砂礫材料の工学的性質を検討する。

## 2. 実験材料

図-1に、本研究で用いた砂礫材料の粒径加積曲線を示す。試料は利根川砂礫などから人工的に粒度配合して作成した堅硬な粒子を有する砂または礫質土である。各試料とも最小粒径は 0.075 mmに設定し、均等係数は3段階に変化させた。表-1には砂礫材料の物理特性を示す。各試料の最大・最小密度は、図-2に示す直径 195 mm、高さ 200 mmの中型モールドとバイブレーター付きキャップにより得られた値<sup>3)</sup>を用いた。試料3では、 $e_{max}=0.585$ 、 $e_{min}=0.303$ であり、砂に比べてかなり小さくなっている。

液状化試験中のメンブレン湾入効果は、各供試体毎液状化試験前に行う微小振幅載荷時の間隙水圧計測<sup>4)</sup>による補正を施した。

## 3. 液状化試験

供試体は、粒子分級の影響を最小限に押さえるためウエットタンピング法によって作成し、各試料とも相対密度の違いが液状化強度に与える影響を検討するため、相対密度を6段階に変化させた。相対密度  $Dr=90\%$ 供試体は、モールド内でのタンピングが困難なため、予め直径 100 mm、高さ 200 mm

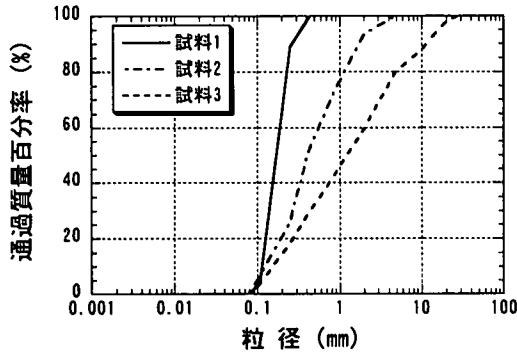


図-1 砂礫材料の粒径加積曲線

表-1 砂礫材料の物理特性

	$D_{50}$ (mm)	$U_c$	$\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	$\rho_{dmax}$ (平均値) ( $g/cm^3$ )	$\rho_{dmin}$ (平均値) ( $g/cm^3$ )	$e_{max}$	$e_{min}$
試料1	0.14	1.44	2.696	1.502	1.198	1.250	0.794
試料2	0.40	3.79	2.697	1.839	1.421	0.898	0.467
試料3	1.15	13.1	2.655	2.038	1.675	0.585	0.303

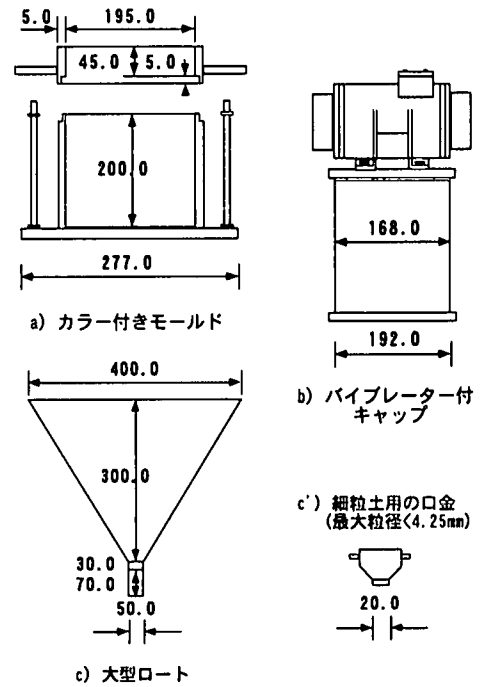


図-2 最大・最小密度試験装置 (単位:mm)

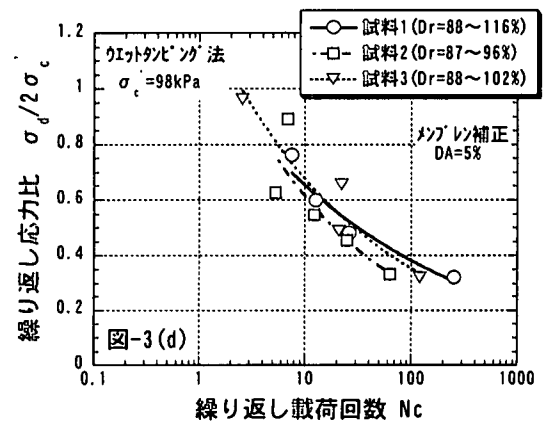
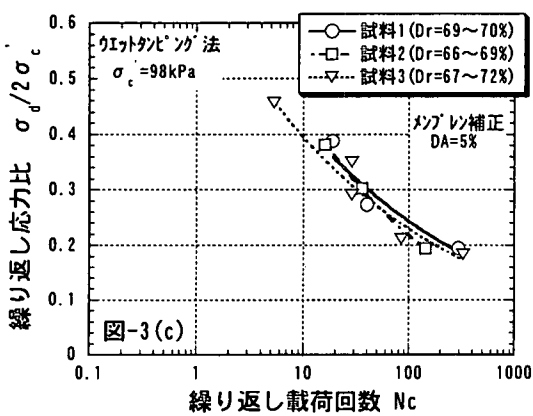
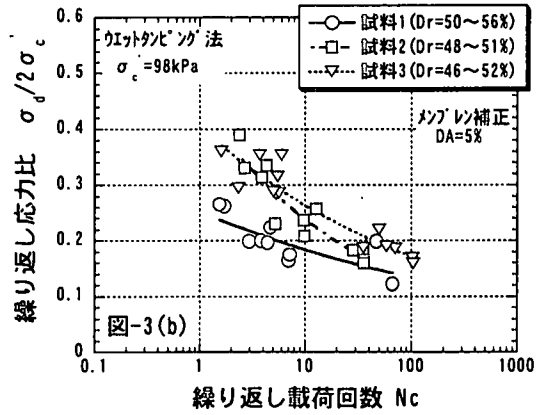
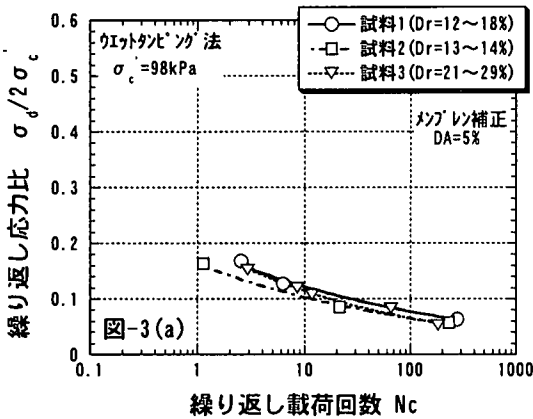


図-3 砂礫材料の液状化試験結果

のコンクリート用モールドを用いて試料を不飽和凍結法により作成し、有効拘束圧 29.4kPa で 8 時間程度放置し解凍させた。間隙水圧係数  $B$  は 0.95 に達することを目標としたが、 $Dr=90\%$  供試体では、

所定の間隙水圧係数が得られなかったため、 $B=0.90$  以上の条件を基準とした。各供試体とも有効拘束圧 98kPa で等方圧密し、液状化試験は 0.1Hz の正弦波荷重を加えて行った。

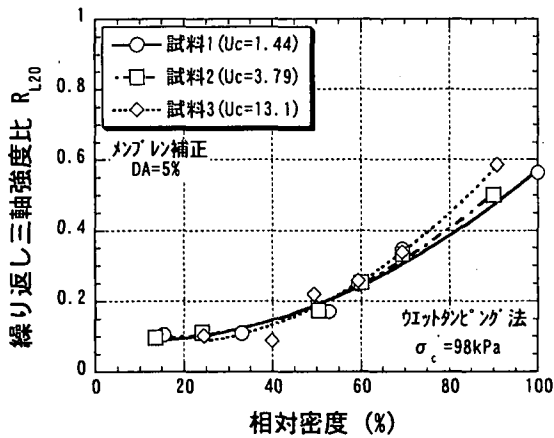


図-4 相対密度と繰り返し三軸強度比  $R_{L20}$  の関係

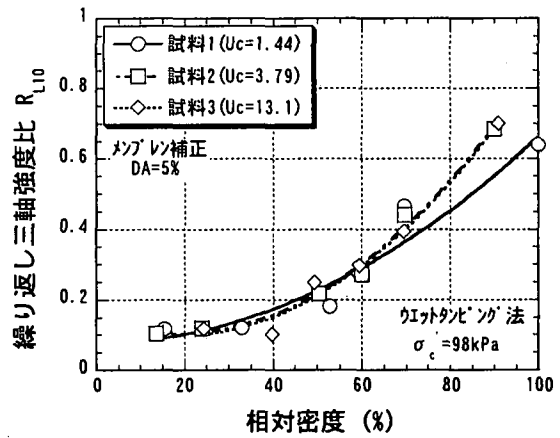


図-5 相対密度と繰り返し三軸強度比  $R_{L10}$  の関係

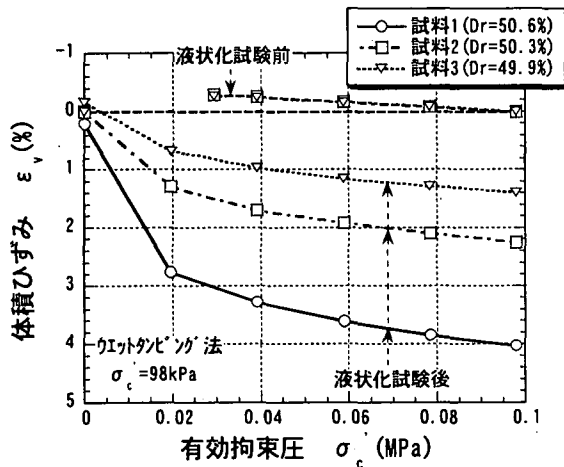


図-6 砂礫材料の圧密試験結果

図-3(a)～(d)は、異なる3種類の砂礫材料より得られた液状化試験結果の一部を、両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$  に対応する繰り返し載荷回数と繰り返し応力比の関係で整理したものである。図-3(a)の  $Dr \approx 10\%$  供試体においては、粒度分布の異なる3種類の試料とも  $DA=5\%$  で定義された液状化強度はほぼ等しく、繰り返し載荷回数に対する繰り返し応力比の変化傾向も類似している。図-3(b)の  $Dr \approx 50\%$  供試体においては、試験結果に若干のばらつきが見られるが、繰り返し載荷回数  $Nc=10, 20$  における繰り返し応力比  $R_{L10}, R_{L20}$  で比較した場合、粒度分布の異なる試料の液状化強度はそれほど異ならない。図-3(c)の  $Dr \approx 70\%$  供試体では、粒度分布の違いによる液状化強度への影響が再び見られなくなり、その変化傾向も試料によらずほぼ同一である。図-3(d)の  $Dr \approx 90\%$  供試体では、相対密度のばらつきが大きいが、繰り返し載荷回数  $Nc=10, 20$  における液状化強度は各試料とも類似しており、その変化傾向もほぼ等しい。

図-4に、砂礫材料の相対密度と両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$  に至るまでの繰り返し載荷回数  $Nc=20$  に対する繰り返し三軸強度比  $R_{L20}$  との関係をもとめる。各試料とも相対密度のある程度のばらつきを平均化して表している。これより、相対密度  $Dr \approx 50\%, 90\%$  程度でデータにばらつきが見られるが、砂礫材料の液状化強度は、粒度分布が異なっているにもかかわらず、相対密度をパラメータとした場合、ほぼ一致した結果が得られている。図-5には、砂礫材料の相対密度と両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$  に至るまでの繰り返し載荷回数  $Nc=10$  に対する繰り返し三軸強度比  $R_{L10}$  の関係を示すが、砂礫材料の液状化強度は繰り返し回数の比較的小さな範囲においても、粒度分布によらず、相対密度に対してほぼ等しい結果が得られている。従って、今回行った実験で得られた範囲では、砂礫材料の液状化強度は試料の粒度分布によらず、相対密度のみの一義的な関係を示すことがわかる。

図-6に、相対密度  $Dr \approx 50\%$  供試体の一部について行った圧密試験結果を、体積ひずみと有効拘束圧の関係でまとめる。ここでは、液状化試験前後の体積変化をピューレットにより計測し、圧密過程を一つの曲線で示している。試料1の液状化試験前の結果は得られていないが、試料2、試料3は同程度の相対密度で比較した場合、液状化試験前の圧密曲線はほぼ同一曲線上を描いている。しかし、液状化後の変化傾向は試料毎異なり、初期間隙比の多い砂質材料ほど体積ひずみの変動量が大きく、沈下量の変化も著しい。これらのことから、液状化後の力学的挙動は粒度分布毎に異なり、均等係数の大きい礫質材料ほど液状化による体積変化が小さく、沈下量も小さいことが予想される。

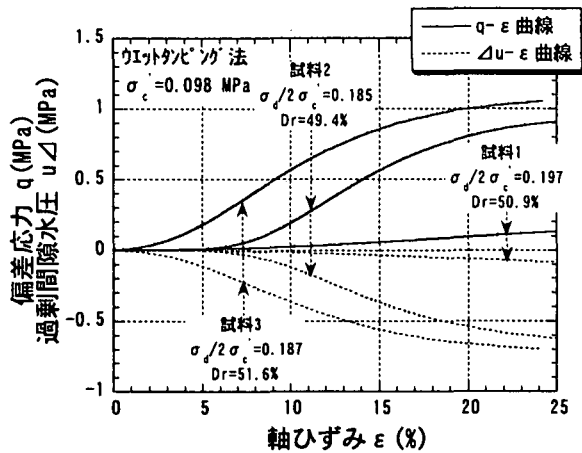


図-7 応力、過剰間隙水圧-ひずみ曲線

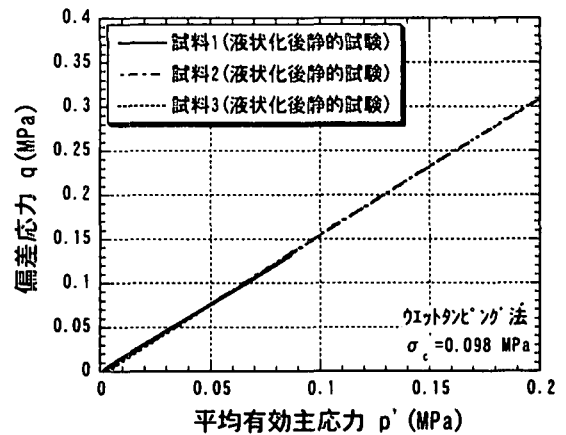


図-8 有効応力経路

#### 4. 液状化後の静的試験

砂礫材料の液状化後の力学特性を検討するため、相対密度  $Dr=50\%$  供試体の一部で、液状化後にそのまま非排水状態を保ち、ひずみ制御による非排水単調載荷試験 (CU 試験) を行った。

図-7 に、各試料毎行った非排水単調載荷試験結果の代表的な応力、過剰間隙水圧-ひずみ曲線を示す。これより、液状化試験での載荷応力比のほぼ等しいデータで比較した場合、偏差応力の最大値は均等係数の大きい礫質材料ほど卓越しており、砂質材料に比べ液状化後の静的強度が 10 倍程度も大きいことがわかる。

図-8 に、液状化-静的試験における有効応力経路を示す。これより得られたストレスパスは粒度分布の異なる試料においてもほぼ一致している。破壊包絡線より推定される試料の内部摩擦角  $\phi$  は、粒度分布の異なる材料においても  $\phi=39^\circ$  程度のほぼ等しい角度を示した。

#### 5. まとめ

- (1) 礫質土の液状化強度は、 $Dr \approx 10\%$  程度の緩い供試体や  $Dr \approx 70\%$  程度の密な供試体においては、均等係数の差異によらず相対密度に対してほぼ同一となる。しかし現状では、 $Dr \approx 50\%$ 、 $90\%$  においては、均等係数の大きい良配合の礫質材料の強度は貧配合のそれに比べて大きくなるというデータが得られている。
- (2) 従って、今回行った実験で得られた範囲では、 $Dr \approx 50\%$ 、 $90\%$  で実験データにばらつきが見られるが、全体的には砂礫材料の液状化強度は粒度分布の違いにも関わらず相対密度と一義的な関係

があるものと判断できる。

- (3) 相対密度  $Dr \approx 50\%$  供試体の一部で行った圧密試験結果から、液状化後の圧密沈下は粒度分布毎異なる傾向を示した。すなわち、同程度の相対密度で比較した場合、均等係数の大きい礫質材料の体積変化は砂質材料のそれに比べ遙かに小さく、沈下量も小さいと予想される。
- (4) 液状化後の非排水静的試験結果より、均等係数の大きい礫質材料の静的強度は砂質材料のそれに比べてきわめて大きい。従って、礫質地盤は地震時の液状化強度は同じ相対密度の砂質材料とほぼ同程度であるが、その後の大きな静的な変形に対しては非常に大きな強度を発揮することが示された。

#### 参考文献

- 1) Ishihara, K., Kokusho, T. and Silver, M.L.: Recent developments in evaluating liquefaction characteristics of local soils, State-of-the-Art Report Proc. 12th International Conference on SMFE, pp.783-786, 1989.
- 2) Kokusho, T., Tanaka, Y., Kawai, T. et al.: Case study of rock debris avalanche gravel liquefied during 1993 Hokkaido-Nansei-Oki earthquake, Soils and Foundations, Vol.35, No.3, pp.83-94, 1995.
- 3) 國生剛治, 原 忠: 礫質土の最大・最小密度試験法の検討, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集 3-A, pp.20-21, 1997.
- 4) 田中幸久, 國生剛治, 吉田保夫, 工藤康二: システムブライアンスによる砂礫の動的測定誤差の評価方法, 電力中央研究所 研究報告 U89040, 1988.
- 5) 原 忠, 國生剛治: 粒度分布の異なる砂礫材料の液状化強度, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム論文報告集, pp.395-398, 1999.