

細粒分を含む砂礫材料の液状化特性と 損失エネルギー

原 忠¹・國生 剛治²・平岡 良介³

¹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)

²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)

³正会員 工修 日本舗道(株) (〒737-0104 広島県呉市広町田 2-1-3)

本研究では、細粒分含有率の異なる砂礫材料について繰返し三軸液状化試験を行い、試料の細粒分含有率が液状化強度に与える影響を調べた。その結果、細粒分を含む砂礫材料の液状化強度は、同程度の相対密度を有する細粒分を含まない砂礫材料に比べ、低い値を示した。一方、液状化過程における応力-ひずみ曲線を比較した場合、細粒分を含む砂礫材料のせん断強度は、軸ひずみの増加に伴い急激に低下し、砂礫材料のサイクリックモビリティ特性は細粒分の増加に伴い顕著に現れにくくなることも明らかになった。また、応力-ひずみ関係に基づく単位体積当たりの損失エネルギーを計算した結果、液状化過程で累積される損失エネルギーは液状化強度同様、細粒分を含む試料が低下することがわかった。

Key Word : *liquefaction, triaxial test, sandy-gravel, relative density, fines content, stress-strain curve, cumulate dissipation energy*

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盤において、礫分や細粒分を比較的多く含むまき土からなる礫質地盤が広範囲にわたり液状化し、港湾構造物等に甚大な被害を与えた。この地震により、震源近傍での第四紀層の地盤では、最大0.6Gを越える強い加速度記録が観測されたが、これら記録では、表層の液状化による地盤の非線形性が卓越したため、地表面加速度が減少する様子が捉えられた¹⁾。このような、地盤の液状化に起因するエネルギー減衰特性を土質試験により調べることは、鉛直アレー記録に基づき地震エネルギーの収支により検討すること²⁾と並び重要であり、今後のレベル2地震動に対応した設計地震力の設定に際して大きな関わりを持つものと思われる。

本研究では、細粒分含有率を変化させた4種類の砂礫材料について、直径100mm、高さ200mmの中型繰返し三軸試験機を用いた液状化試験を行い、細粒分含有率の違いが液状化強度に与える影響を調べる。また液状化過程における応力-ひずみ関係に着目し、細粒分の増加が砂礫材料のサイクリックモビリティ特性に与える影響を検討する。

さらに、履歴ループにより計算される単位体積当たりの損失エネルギーを求め、細粒分含有率が液状化過程における砂礫地盤のエネルギー吸収能に与える影響を考察する。

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配合した堅硬な粒子を有する細粒分を含まない砂礫材料(文献³⁾で試料3と呼んでいるもの)、およびこれにまき土細粒分を加えた砂礫材料である。各材料とも最大粒径を $D_{max}=26.5$ mmに設定し、細粒分含有率は、 $F_c=10\%$ 、 20% 、 30% の3段階に変化させた。表-1にこれら試料の物理特性を示す。まき土細粒分の塑性指数 I_p はおおよそ3程度であり、ほぼ非粘性な材料であると判断される。

各試料の最大・最小密度は、直径195mm、高さ200mmの中型モールドと大型ロート、パイプレータ付キャップにより得られた値³⁾を用いた。図-2は、本試験装置により得られた最大・最小密度の平均値と細粒分含有率 F_c の関係をまとめたものであるが、細粒分を含む砂礫材料の最大・最小密度は、最大密度が $F_c=10\%$ 、最小密度が $F_c=20\%$ で

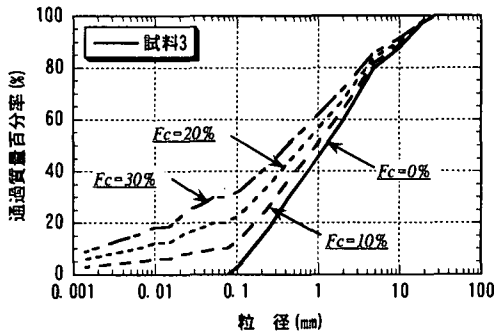


図-1 砂礫材料の粒径加積曲線

表-1 砂礫材料の物理特性

	D_{50} (mm)	U_c	ρ_s (g/cm^3)	ρ_{dmax} (平均値) (g/cm^3)	ρ_{dmin} (平均値) (g/cm^3)	e_{max} (平均値)	e_{min} (平均値)
試料3 (Fc=0%)	1.15	13.1	2.655	2.038	1.675	0.585	0.303
試料3 +Fc=10%	0.92	26.1	2.608	2.009	1.536	0.698	0.298
試料3 +Fc=20%	0.84	253	2.649	2.090	1.685	0.572	0.267
試料3 +Fc=30%	0.39	443	2.641	2.104	1.624	0.626	0.255

ピークを示しており、その後は減少傾向に転じている。これは、Fc=10%~20%程度の範囲では、細粒分が砂礫からなる骨格の間隙を埋めることにより密度を増加させる役割をなすが、Fc=30%程度では個々の砂礫が細粒分に埋もれた形となるため、試料の最大・最小密度が減少したと考えられる。

3. 液状化試験結果⁴⁾

供試体は、粒子分級による影響を最小限に押さえるため、予め所定の乾燥密度に対応した量の乾燥試料を、別途用意した容器内において配合し含水させた後、モールド内で一定に締め固めるウェットタンピング法により作成した。間隙水圧係数Bが0.95に達していることを確認した後、有効拘束圧 $\sigma'_c=98\text{kPa}$ で一時間程度等方圧密し、0.1Hzの正弦波を両振幅ひずみDAが10%に至るまで非排水状態で加えて液状化試験を行った。液状化試験中のメンブレン貫入効果は、各試料毎に液状化試験前に行う微小振幅荷重時の間隙水圧計測⁵⁾により補正した。

図-3 は本研究で用いた砂礫材料の液状化試験結果を、両振幅軸ひずみDA=5%に対応した繰返し荷重回数Ncと繰返し荷重応力比の関係として整理したものである。これより、細粒分を含む砂礫材料の液状化強度は細粒分を含まない試料に比べ小さい値を示しており、Nc=20以下の繰返し荷重回数での応力比の増加もあまり見られない。

図-4 に、細粒分含有率とDA=5%で定義される繰返し荷重回数Nc=20での液状化強度比 R_{L20} の関係を示す。これより、細粒分を含む砂礫材料の液状化強度は、供試体相対密度が $Dr=50\%$ とほ

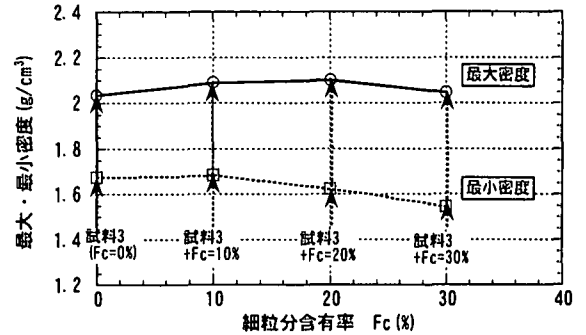


図-2 最大・最小密度と細粒分含有率の関係

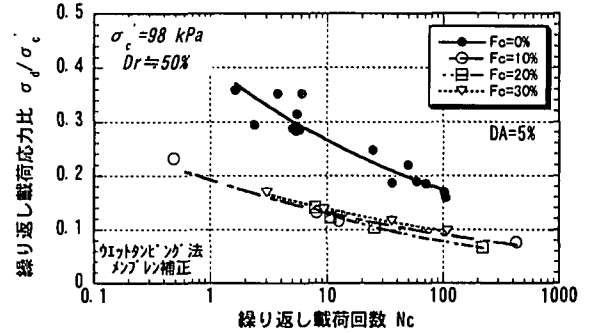


図-3 液状化試験結果

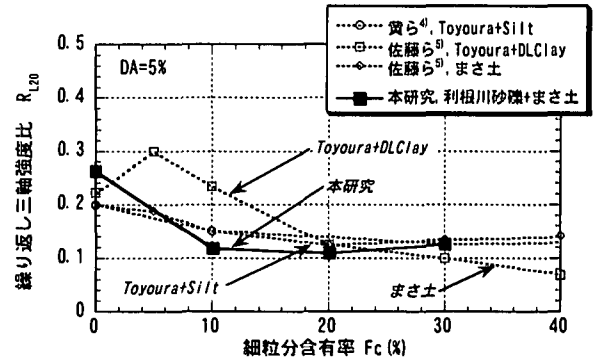


図-4 細粒分含有率-液状化強度 R_{L20} 関係

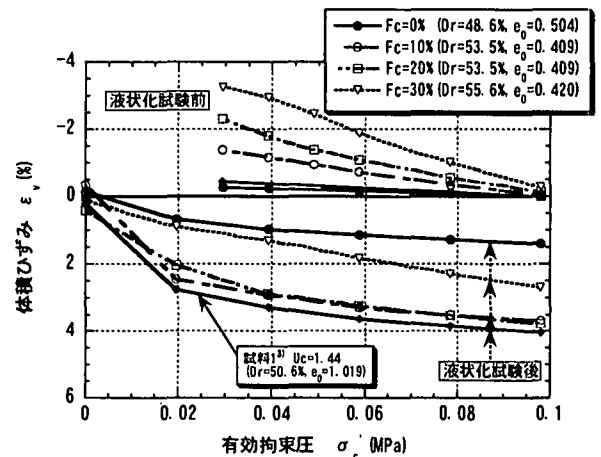


図-5 液状化前後の圧密曲線

ぼ同程度であるにも関わらず、Fc=10%の細粒分でその強度が大幅に減少することがわかる。また、細粒分含有率が液状化強度に与える影響は、本研究で用いた試料では既にFc=10%で最大限に発揮され、細粒分含有率がそれ以上に増加した場合もほぼ一定値を示している。これは、細粒分を含む

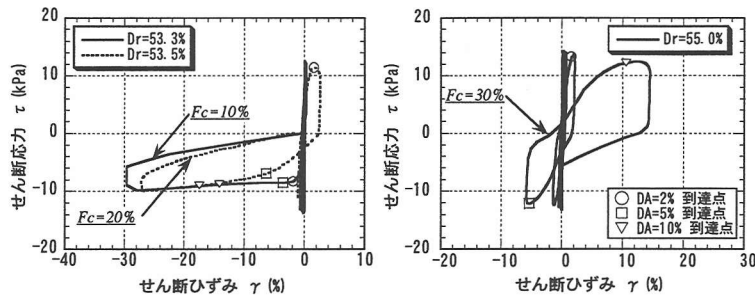


図-6 応力-ひずみ曲線 ($F_c=10, 20, 30\%$)

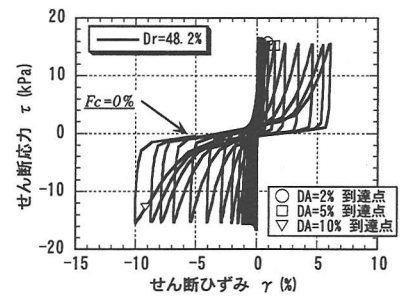


図-7 応力-ひずみ曲線 ($F_c=0\%$)

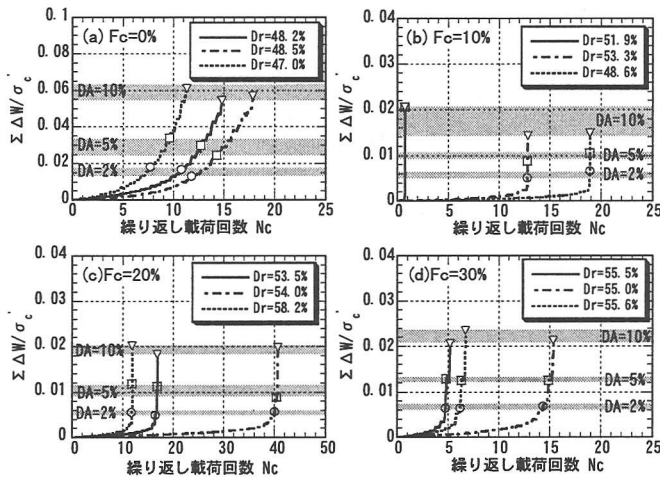


図-8 繰返し載荷回数-累積損失エネルギー関係

試料の液状化強度が、 $F_c=10\%$ の場合に既に砂礫粒子の間隙を埋めるシルトのせん断特性に支配されているためと考えられる。図中には細粒分含有材料について行った同様な研究成果^{9),7)}を示すが、本研究はそれらと類似した変化傾向を示している。

図-5に、 $Dr=50\%$ 供試体の一部について、液状化試験前後に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示す。液状化試験前の圧密曲線は供試体セット時の29.4kPaから試験時の98kPaまで描かれているが、細粒分を含まない試料3に対し、細粒分を含む試料では、 F_c が10, 20%, 30%と増加する毎に98kPaに至るまでの体積ひずみが大きく表されている。液状化試験では、各試料とも $DA=10\%$ まで繰返し載荷した結果、間隙水圧はほぼ100%上昇しており、その状態から圧密試験を行っている。これより、液状化後の圧密曲線は試料3に比べ、細粒分を含む砂礫材料では、体積ひずみの変化量が大きく、特に $F_c=10, 20\%$ 供試体で著しい体積変化が生じている。同図中には均等係数 $U_c=1.44$ の砂質材料(試料1)の同様な関係を示す³⁾が、 $F_c=10, 20\%$ 供試体の液状化後の体積ひずみ量とほぼ同程度であり、その変化傾向もきわめて類似している。これらのことから、液状化後の体積変化特性は、細粒分含有率により異なり、液状化により同じ大きさのせん断ひずみが生じても、細粒分を含む砂礫材料は含まない材料

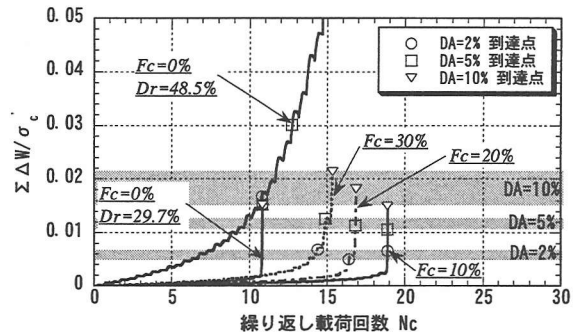


図-9 繰返し載荷回数-累積損失エネルギー関係の比較

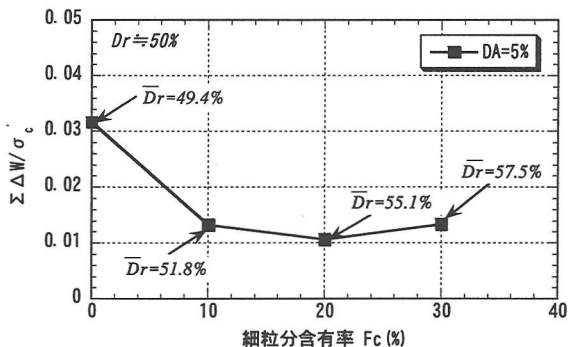


図-10 細粒分含有率-累積損失エネルギー関係

に比べ、液状化による体積変化が大きく、地盤の沈下量も大きくなることが推定される。

4. 応力-ひずみ関係と累積損失エネルギー

図-6に、載荷応力比がほぼ等しい細粒分含有砂礫材料における応力-ひずみ曲線を示す。図-7は細粒分を含まない試料3の同様な関係である。両者ともに50%程度の相対密度であるが、図-7の細粒分を含まない砂礫材料の応力-ひずみ曲線では、軸ひずみが比較的低い範囲からサイクリックモビリティが生じており、大ひずみに至るまでせん断強度の回復が顕著に見られる。それに対し、図-6の細粒分を含む砂礫材料では、 $DA=10\%$ に達した時点でのせん断強度は急激に低下しており、図-7に見られるような大ひずみ領域での強度の回復は見られない。

図-8(a)～(d)に、砂礫材料における繰返し載荷回数と累積損失エネルギー(ΔW)の関係を示

す。ここでの累積損失エネルギーは、図 6, 7 に示す液状化試験中での応力-ひずみ関係が描く履歴ループの面積を、両振幅軸ひずみ DA が 10% に至り液状化試験を終了するまで累積計算したものである。縦軸は、初期有効拘束圧 ($\sigma'_c=98$ kPa) で除し、正規化した値 ($\Delta W/\sigma'_c$) を示している。これより、各試料ともひずみの増加とともに累積損失エネルギーが増加する様子がうかがえる。また多少のばらつきは見られるが、各試料とも液状化試験での載荷応力比が異なるにも関わらず、 $DA=2\%, 5\%$ に至るまでの累積損失エネルギーはほぼ等しい。これにより、液状化やそれに伴う軟化特性は、供試体に加わる応力履歴によらず、累積損失エネルギーによって表せる可能性が考えられる。

図-9 に、細粒分含有率の異なる供試体の繰り返し載荷回数と累積損失エネルギーの関係を比較する。同図中には細粒分を含まない試料 3 の $Dr=30\%$, $Dr=50\%$ 供試体の同様の関係⁸⁾も示している。これより、 $DA=2\%, 5\%, 10\%$ での細粒分を含む試料の累積損失エネルギーは、細粒分のない試料 3 に比べ半分以下で明らかに小さく、 $Dr=30\%$ 供試体の緩い試料のそれに類似している。図-10 は、図-9 に示す $DA=5\%$ での累積損失エネルギーを細粒分含有率との関係をまとめたものであるが、図-4 と同様、 $F_c=10\%$ 程度で試料に蓄積される累積損失エネルギーは大きく減少し、細粒分がそれ以上増加した場合もほぼ一定値を示している。

以上の検討から、砂礫材料に含まれる細粒分は、液状化強度特性のみならず試料に蓄積されるエネルギーに大きな影響を与えていることが推察される。また、応力-ひずみ関係より得られるサイクリックモビリティ特性は、砂礫材料が細粒分を多く含むほど顕著に現れにくいと判断できる。従って、 F_c を 10% 程度以上含む砂礫材料は細粒分を含まない材料に比べ、累積損失エネルギーで評価される試料のエネルギー吸収能は小さいが、液状化での剛性の著しい低下により地震動の低減特性が現れるような性質を有していると思われる。

5. 結 論

細粒分含有率の異なる礫質材料を用いた液状化試験結果から、以下の主要な知見が得られた。

- (1) 細粒分を含む砂礫材料の液状化強度は、細粒分を含まないそれに比べ減少する。繰り返し載荷回数 N_c の小さい範囲での繰り返し載荷応力比の増加もあまり見られない。

- (2) 細粒分を含む砂礫材料の応力-ひずみ関係は、ほぼ同程度の相対密度を有する細粒分を含まない試料に比べ、サイクリックモビリティ特性が大きく異なり、大ひずみ時の強度の回復が見られない。
- (3) 細粒分を含む砂礫材料は、細粒分ほぼ同程度の相対密度を有する細粒分を含まない試料に比べ、液状化による体積変化が大きく、地盤の沈下量も大きくなることが推定される。
- (4) 砂礫材料の累積損失エネルギーは、両振幅軸ひずみ $DA=2\%, 5\%$ における比較では、載荷応力比が異なる場合においてもほぼ等しい値を示す。つまり、液状化に達するまでのエネルギー消費量は、応力履歴によらずほぼ一定と見なせる可能性があり、試料のエネルギーによる液状化判定の可能性がうかがえる。
- (5) 細粒分を含む砂礫材料のエネルギー吸収能は同程度の相対密度で比較した場合、細粒分を含まない試料に比べ、明らかに小さい。しかし、容易に液状化し、剛性が低下することによる地震動の低減効果が考えられる。

参考文献

- 1) Kokusho, T. and Matsumoto, M.: Nonlinearity in site amplification and Soil properties during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, Soils and Foundations special issue No.2, pp.1-9, 1998.
- 2) 國生剛治, 本山隆一: 地震波の上昇波と下降波の分離による表層地盤でのエネルギー収支, 土木学会論文集, No.652 /Ⅲ-51, pp.257-262, 2000.6
- 3) 原 忠, 國生剛治: 砂礫の液状化強度および液状化後の非排水せん断におよぼす粒度分布の影響, 土木学会論文集 No.645 /Ⅲ-50, pp.245-253, 2000.3
- 4) 平岡良介: 礫質土の物理特性が液状化強度特性に与える影響, 中央大学理工学研究科土木工学専攻修士論文, 2000.
- 5) 田中幸久, 國生剛治, 吉田保夫, 工藤康二: システムコンプ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.
- 6) 黄 大振, 柳沢栄司, 菅野高弘: シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文集 No.463, pp.25-33, 1993.3
- 7) 佐藤正行, 小田匡寛, 風間秀彦, 小瀬木克己: 細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No561, pp.271-282, 1997.3
- 8) 原 忠, 天野真輔, 國生剛治, 大石富彦: 繰り返し三軸試験機による砂礫材料の損失エネルギーの検討, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.53-54, 2000.