

細粒分を含む砂の液状化強度特性に与える荷重の不規則性の影響

九州工業大学大学院 学生会員 ○井手上真人

九州工業大学工学部 正会員 永瀬英生 清水恵助 廣岡明彦

1.はじめに

液状化に関する研究の中で、液状化強度の評価方法を確立することは重要課題の一つとして挙げられる。砂の液状化強度を表す指標として、液状化強度比 R_{120} が用いられているが、地震時においては、せん断応力が不規則に変化するため、 R_{120} を用い、不規則性を考慮した砂地盤の液状化強度を推定することが検討されてきた。しかしながら、研究対象となる砂の種類については十分に明らかにされていないのが現状である。そこで本研究では、非排水繰返し三軸試験を行い、細粒分を含む砂の液状化強度特性に及ぼす荷重の不規則性の影響について検討を行った。また、繰返し載荷後の非排水せん断特性についても検討を行った。

2.試料および実験方法

試料は、豊浦砂のみと豊浦砂にカオリンを重量含有率 10%、20% 混合したものである。不飽和砂凍結法により粒状間隙比 $e_g=0.85$ になるように供試体を作製した。粒状間隙比 e_g は次式で定義される。

$$e_g = \frac{\rho_s}{\rho_d(1-FC)} - 1$$

ρ_s ; 土粒子の密度 (g/cm³)
 ρ_d ; 試料の乾燥密度 (g/cm³)
 FC ; 細粒分含有率 (%)

供試体は直径 7.5cm、高さ 15.0cm の円柱形であり、圧密条件は拘束圧 49kPa の等方圧密とした。

正弦波を用いた繰返し試験では載荷周波数を 0.1Hz とし、不規則波の場合には、1968 年十勝沖地震(八戸港)の NS 成分の加速度波形を用い、その時間スケールは実地震波と同一とした。図 1 にその加速度波形を示す。本研究では、繰返し三軸試験装置を用いているため、不規則波の場合、せん断波形の最大値を圧縮側(CM-test)と伸張側(EM-test)にそれぞれ作用させた実験を行った。なお、油圧載荷装置を用いて、不規則荷重を制御した。

正弦波を用いた試験では繰返し回数 20 回で両振幅軸ひずみ DA=5%を生じさせる繰返し応力比を液状化強度比 R_{120} とし不規則波の場合は、最大軸ひずみ ϵ_{max} が 2.5%のときの CM-test と EM-test の最大せん断応力比の平均値を液状化強度比 R_{lmax} と定義した。それらを用いて次式により、補正係数 C_2 を求めた。

$$R_{lmax} = C_2 \times R_{120}$$

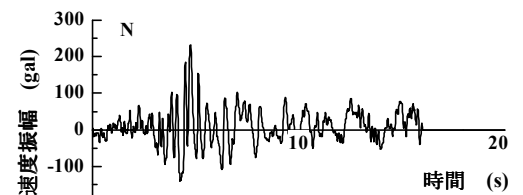


図 1 加速度時刻歴(十勝沖地震)

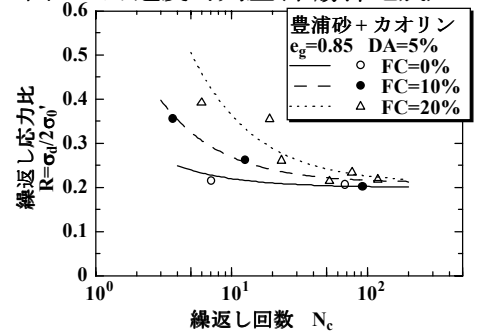


図 2 R と Nc の関係(正弦波)

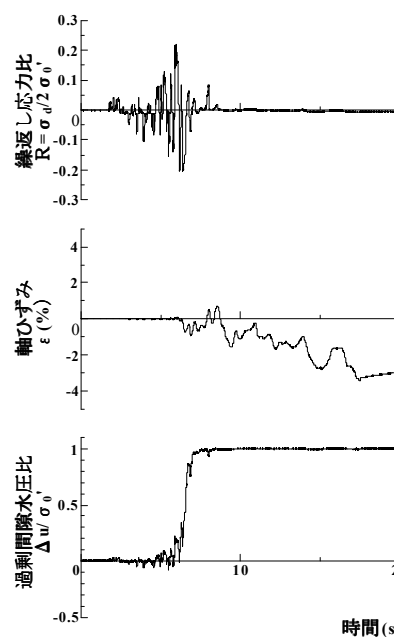


図 3 時刻歴(EM-test FC=0%)

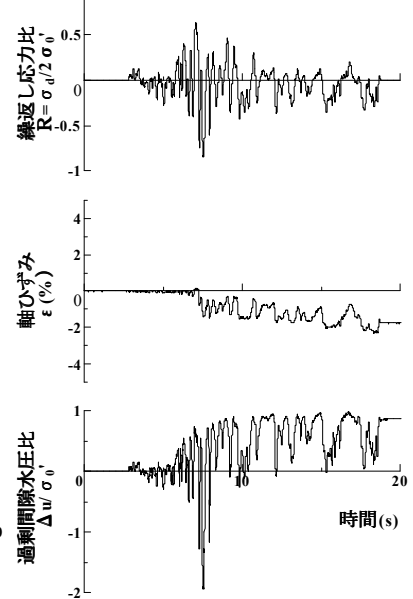


図 4 時刻歴(EM-test FC=20%)

液状化、砂、不規則荷重、繰返し載荷、非排水せん断試験

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 Tel 093-884-3111 Fax 093-884-3110

表 1 R_{lmax} の平均値と補正係数 C_2

	R_{lmax}		R_{lmax} の 平均値	R_{l20}	C_2
	CM-test	EM-test			
豊浦砂(FC=0%)	0.425	0.259	0.342	0.208	1.64
豊浦砂(FC=10%)	0.673	0.373	0.523	0.240	2.18
豊浦砂(FC=20%)	1.28	0.880	1.08	0.296	3.62

3.実験結果および考察

正弦波を用いた繰返し三軸試験における繰返し応力比 R と繰返し回数 N_c の関係を図 2 に示す。これを見ると、粒状間隙比 e_g が一定の場合、細粒分含有率 FC が大きくなるほど液状化強度比 R_{l20} も大きくなっていることが分かる。これは細粒分含有率 FC が大きくなると試料がより高密度化し、細粒分も骨格の一部になることによって、砂粒子の間隙に粘着力が発揮されるためと考えられる。

図 3、図 4 に不規則波(EM-test)を用いた繰返し三軸試験による代表的な時刻歴を示す。正弦波を用いた試験では一旦液状化が発生すると、軸ひずみは 10%以上に増大するが、不規則波の試験では図 3 に示すように繰返し载荷を受けても、軸ひずみは高々数%とあまり大きくは発生していない。これは応力比のピーク付近を過ぎて過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma'_0$ が上昇し、液状化する頃には応力比が減少していくという波形の不規則性が砂の挙動に現れたためと考えられる。

最大せん断応力比 R_{max} と最大軸ひずみ ϵ_{max} の関係を図 5 に示す。これより、細粒分の増加に伴い、液状化強度は増加することが分かる。CM、EM-test における最大せん断応力比を R_{lmax} とし、これらの平均値により算定された補正係数 C_2 を表 1 に示す。この表より、細粒分含有率 FC の増加に伴い、補正係数 C_2 は増加することが分かる。これは、細粒分が砂粒子の間隙に混入することによって供試体に粘性が増し、その結果、速度効果を受けやすくなり、 FC の増加に対する不規則波を用いたときの液状化強度比 R_{lmax} の増加率が正弦波の場合の R_{l20} の増加率より大きくなったためと思われる。

図 6 に繰返し载荷後の非排水せん断試験結果として、軸差応力 q および過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma'_0$ と軸ひずみ ϵ の関係を示す。これらの試験条件は、十勝沖地震波形(EM-test)、 $FC=0\%$ および 20% である。豊浦砂のみの場合、液状化が生じた供試体は、静的载荷の初期状態において、ほとんど応力を発揮せず、ほぼ完全に強度が失われた状態になっている。その間は過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma'_0$ も一定で液状化状態を維持している。そして、軸ひずみがある程度大きくなると、 $\Delta u / \sigma'_0$ が徐々に下がり始めるのと同時に、供試体の強度が回復して軸差応力 q が増加してくる。これは、軸ひずみがある程度生じることにより、正のダイラタンシー特性が発揮され、強度が回復されたためと考えられる。また、細粒分を含んだ供試体の場合、繰返し载荷を受け、ある程度軸ひずみ ϵ_{max} が発生しないと、強度は完全には失われなことが分かる。さらに、繰返し载荷時に生じた最大軸ひずみ ϵ_{max} が大きいほど、強度が回復するときの軸ひずみは大きくなる。

4.まとめ

繰返し三軸装置を用いて細粒分を含む砂の液状化強度特性に与える荷重の不規則性の影響を調べた結果、次のような挙動が観測された。1)補正係数 C_2 は、細粒分含有率 FC の増加に伴い増加する。2)細粒分を含む砂の場合、繰返し载荷を受け、ある程度軸ひずみ ϵ_{max} が発生しないと、強度は完全には失われな。また、繰返し载荷時に生じた最大軸ひずみ ϵ_{max} が大きいほど、強度が回復するときの軸ひずみは大きくなる。

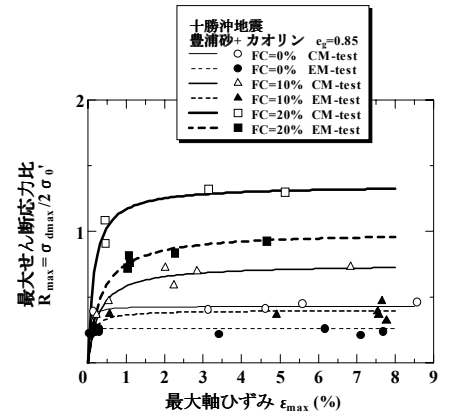


図 5 R_{max} と ϵ_{max} の関係

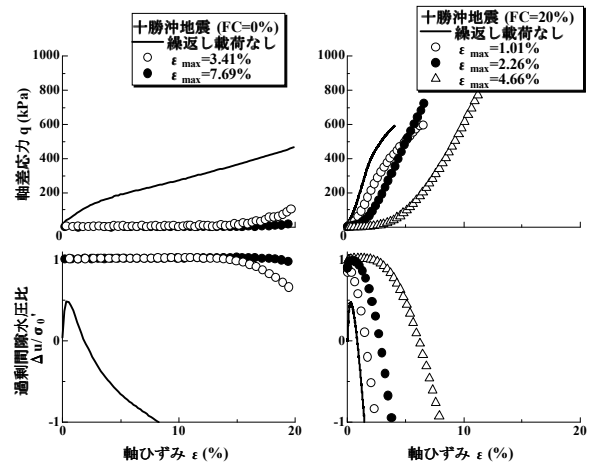


図 6 繰返し载荷後の非排水せん断特性 (FC=0%、20%)