

砂質土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 ○守真武弘
 九州工業大学工学部 正会員 永瀬英生 清水恵助 廣岡明彦
 九州工業大学工学部 学生会員 井手上真人

1.はじめに

液状化現象については、1964年の新潟地震において注目されるようになり、精力的に研究が行われてきた。その中で、液状化強度の評価方法も重要課題の一つとして挙げられる。一般に、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実地盤の液状化強度を推定することが必要とされてきた。本研究では、非排水繰返し三軸試験を行い、細粒分を含む砂質土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、繰返し载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%混合したものであり、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载荷周波数を0.1Hzとし、不規則波の場合では、十勝沖地震(1968年)の際に八戸で観測されたNS方向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、油圧载荷装置を用いて、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を液状化強度比 R_{1max} と定義することとした。それを用いて次式より、補正係数 C_2 を求めた。

$$R_{1max} = C_2 \times R_{120}$$

3.実験結果

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

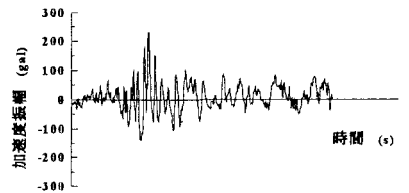


図1 加速度時刻歴(十勝沖地震)

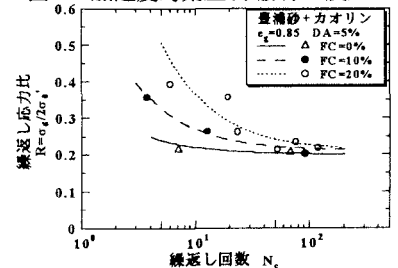


図2 R と N_c の関係

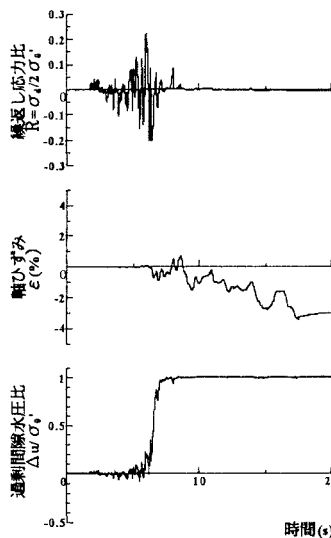


図3 時刻歴(EM-test FC=0%)

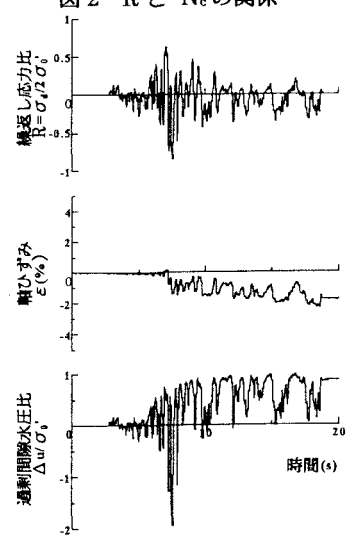


図4 時刻歴(EM-test FC=20%)

表1 R_{lmax} の平均と補正係数 C_2

	R_{lmax}		R_{lmax} の平均	R_{l20}	C_2
	CM-test	EM-test			
豊浦砂(FC=0%)	0.425	0.259	0.342	0.208	1.644
豊浦砂(FC=10%)	0.673	0.373	0.523	0.240	2.180
豊浦砂(FC=20%)	1.28	0.880	1.08	0.296	3.624

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、砂粒子間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 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、繰返し载荷を受け、供試体の過剰間隙水圧が上昇し、液状化に達すると、細粒分を含まない供試体は繰返し応力が伝わりにくくなるためと考えられる。

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、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ってくると、 $\Delta u/\sigma'_0$ 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 が上昇してくる。これは、軸ひずみがある程度生じることにより、正のダイラタンスー特性が発揮され、強度が回復されるためと考えられる。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増加するときの軸ひずみは大きいことが分かる。

4.まとめ

繰返し三軸試験装置を用いて不規則荷重を受ける砂質土の液状化特性を調べた結果、次のような挙動が観測された。1)補正係数 C_2 は豊浦砂の場合、細粒分含有率 FC の増加に伴い増加した。2)細粒分を含む場合、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かった。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増加するときの軸ひずみは大きくなった。

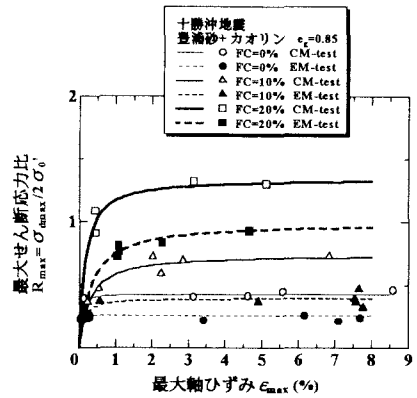


図5 R_{lmax} と ϵ_{max} の関係

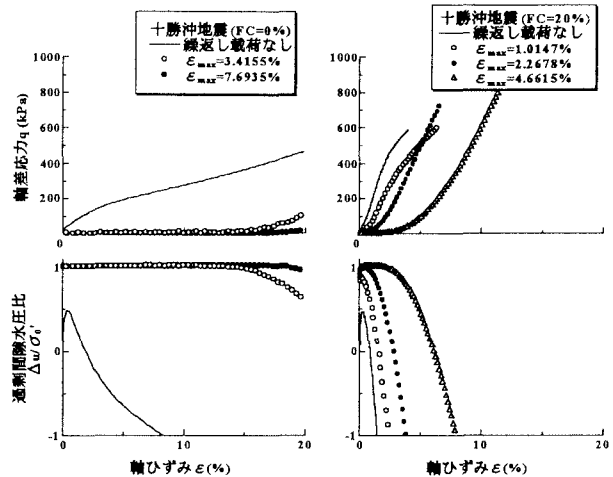


図6 繰返し载荷後の非排水せん断特性(FC=0%、20%)