

不規則荷重による繰返し載荷を受けた砂の非排水せん断特性

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
日本技術開発(株) (元九州工業大学) 押川亮彦

1.はじめに

兵庫県南部地震では、中程度に密な砂質地盤においても液状化が発生し、地盤のせん断強度や剛性が低下して、構造物が甚大な被害を受けたことが明らかになっている。よって、中密な砂の液状化強度や液状化した砂の変形特性を知ることは、非常に重要であると考えられる。

本研究では、正弦波および兵庫県南部地震の際に観測された不規則波を用いた繰返し三軸試験を行った後に、非排水せん断試験を行い、砂の液状化によるせん断剛性の変化について検討を行った。

2.試料および実験方法

試料には豊浦砂を用い、空中落下法により、相対密度 $D_r=40$ 、70% で供試体を作製した。供試体は直径 7.5cm、高さ 15.0cm の円柱形のものであり、圧密条件は有効拘束圧 49kPa の等方圧密とした。

載荷装置としては油圧式のものを用いた。正弦波を用いた繰返し試験では載荷周波数を 0.1Hz とし、不規則波の場合においては兵庫県南部地震の際にポートアイランドの地表面で観測された最大卓越方向 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。本研究では三軸試験装置を用いているため、せん断波形の最大値を圧縮側に作用させた試験(CM-test)と伸張側に作用させた試験(EM-test)の 2 通りの試験を行った。

正弦波を用いた場合は、両振幅軸ひずみ DA が 5.0% 以上に達した後、繰返し載荷を止め、非排水状態を維持したまま、ひずみ制御方式で三軸圧縮試験を行った。不規則波を用いた場合は、EM-test 終了後に非排水三軸圧縮試験を行った。

3.実験結果および考察

図 2 に不規則波を用いた試験より得られた代表的な時刻歴を示す。正弦波の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 2 に示すように液状化が生じてても、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 u'/σ'_v が上昇し、液状化する頃には応力比が急激に減少していくという波形の不規則性が砂の挙動に現われたためと考えられる。

CM、EM-test において最大軸ひずみ $\epsilon_{max}=2.5\%$ が生じるときの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、豊浦砂における補正係数 C_2 は $D_r=70\%$ のほうが大きく、衝撃型地震に対する値 $1.82^{1)}$ に比べ、大きな値を示すことが分かった。

図 3 に繰返し載荷後の非排水せん断試験より得られた軸差応力 q と軸ひずみ ϵ の関係を示す。繰返し載荷により液状化が生じると、初期状態においてほとんど軸差応力を発揮せず、完全に強度が失われた状態にな

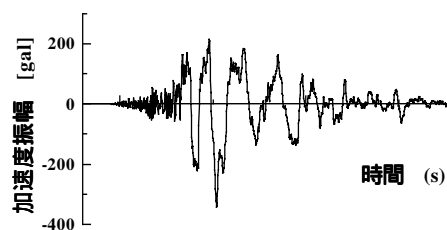


図 1 加速度時刻歴

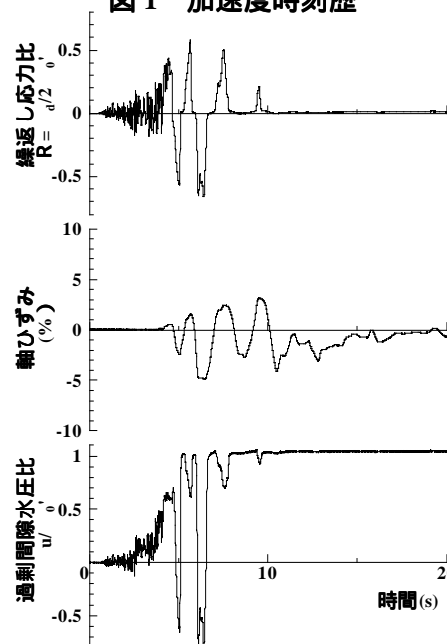


図 2 時刻歴 (EM-test)

表 1 R_{lmax} の平均と補正係数 C_2

豊浦砂	R_{lmax}		R_{lmax} の平均	R_{l20}	C_2
	CM-test	EM-test			
$D_r = 40\%$	0.300	0.213	0.256	0.111	2.309
$D_r = 70\%$	0.775	0.550	0.663	0.204	3.248

っているが、軸ひずみがある程度大きくなると、正のダイラタンシー特性が発揮され、過剰間隙水圧比 u'/σ'_0 が減少し、強度が回復している。正弦波を用いた試験では、繰返し応力比 R による影響はほとんど見られなかった。これは繰返し載荷時の最大軸ひずみ ϵ_{max} が両試験において、ほぼ等しかったためと考えられる。一方、不規則波を用いた試験では、 ϵ_{max} が大きくなるほど、強度が回復するときの軸ひずみは大きくなっている。また、不規則波を用いた場合のほうが小さい軸ひずみで強度が回復した。これは、不規則波の場合のほうが、最大軸ひずみ、および繰返し応力履歴の程度が小さかったためと考えられる。

各試験における剛性低下率 $E_1/E_{0,i}$ と繰返し載荷時に生じた軸ひずみ ϵ_c の関係を図4に示す。ここでは、 E_1 を各軸ひずみにおける軸差応力 $q \sim$ 軸ひずみ曲線の割線係数、 $E_{0,i}$ を繰返し載荷なしの場合における軸ひずみ $\epsilon = 0.05\%$ のときの割線係数とそれぞれ定義し、剛性低下率 $E_1/E_{0,i}$ を求めた。軸ひずみ ϵ_c は正弦波を用いた場合、繰返し載荷時に生じた伸張側の最大軸ひずみであり、不規則波を用いた場合は最大軸ひずみ ϵ_{max} である。

この図より、剛性は、密度の小さいほうが、軸ひずみ ϵ_c の増加に伴い急激に低下していることが分かる。また、正弦波を用いた試験のほうが不規則波の場合よりも剛性低下が大きくなっている。ただし、これはせん断波形の違いで軸ひずみ ϵ_c の値が大きく異なっていることによると考えられる。そこで、相対密度が同一で、せん断波形の異なる2つの結果を重ね合わせてみると、 $D_r=40\%$ および $D_r=70\%$ の両ケースにおいて、データはそれぞれ同一傾向を示しているように見える。このように、軸ひずみ ϵ_c の増加に伴う剛性の低下傾向は、せん断波形の影響を受けない可能性があると考えられる。

4. 結論

本研究では以下の挙動が観測された。すなわち、1) 本研究で用いた兵庫県南部地震の波形における補正係数 C_2 は豊浦砂の場合、密度によって異なり、衝撃型地震の波形における値 $1.82^{1)}$ に比べ大きな値を示した。2) 繰返し載荷後の非排水せん断試験では、不規則波の場合、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が大きくなった。なお、剛性低下率に与える密度およびせん断波形の種類の影響についてはさらに検討する必要がある。

<参考文献> 1) 安田進(1988)：液状化の調査から対策工まで、鹿島出版会、2) 柳畑亨(1998)：三軸試験装置による緩い砂質土の非排水せん断特性に関する基礎的研究、九州工業大学博士論文

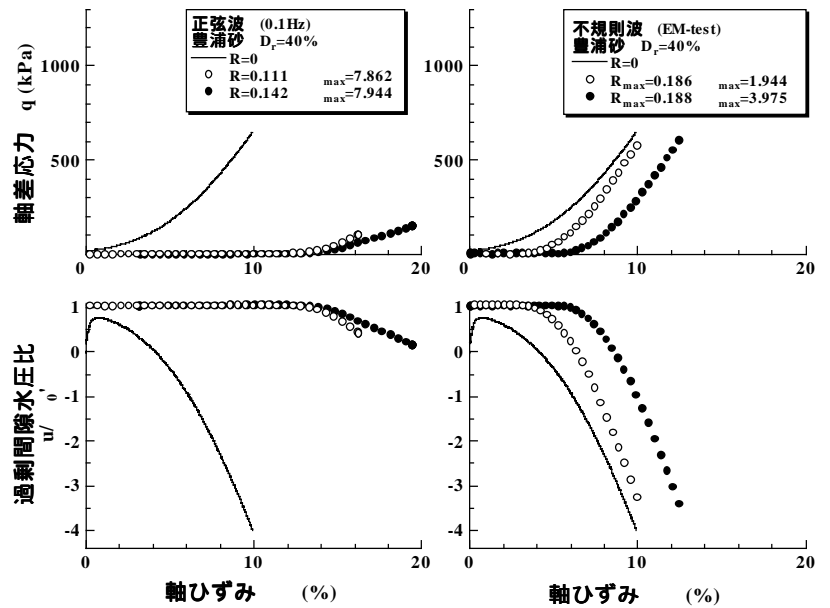


図3 軸差応力 q と軸ひずみ ϵ の関係

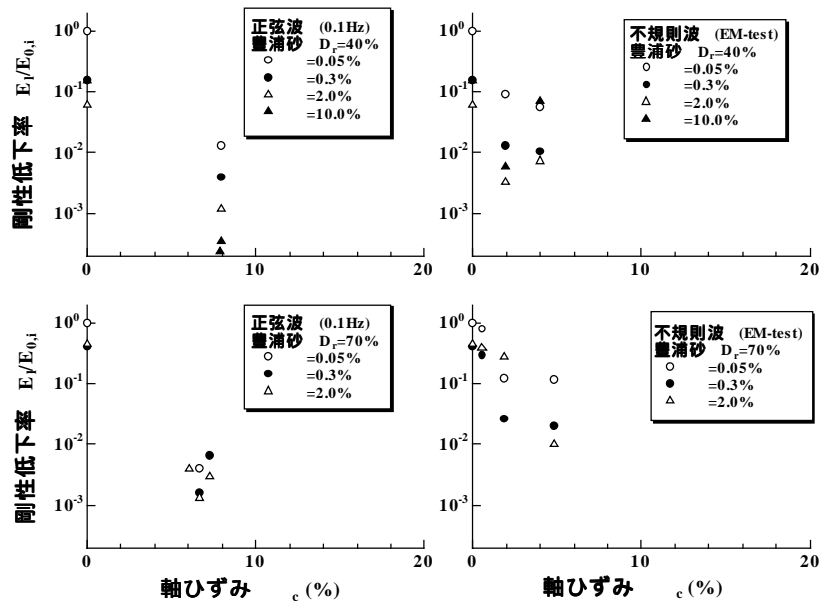


図4 剛性低下率 $E_1/E_{0,i}$ と軸ひずみ ϵ_c の関係