

衝撃型の不規則荷重を受ける砂の液状化強度特性

九州工業大学工学部 正会員 ○ 永瀬 英生
 九州工業大学工学部 正会員 廣岡 明彦
 九州工業大学工学部 学生会員 田村 英佑
 元九州工業大学大学院 井手上 真人

1.はじめに : これまで数多くの研究者達によって行われてきた液状化現象に対する研究の中で、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。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。そこで本研究では、十勝沖地震および兵庫県南部地震で観測された不規則波を用いて砂の繰返し三軸試験を行い、液状化強度特性に及ぼす密度の影響について検討した。

2.試料および実験方法 : 試料には豊浦砂を用い、所定の相対密度になるように空中落下法により供試体を作製した。供試体は直径 7.5cm、高さ 15.0cm の円柱形であり、圧密条件は有効拘束圧 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 年十勝沖地震の際に八戸で観測された NS 方向の加速度波形、1995 年兵庫県南部地震の際にポートアイランド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た。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。また、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 における最大せん断応力比の平均値を液状化強度比 R_{lmax} と定義することとした。それらを用いて次式より、補正係数 C_2 を求めた。

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

3.実験結果 : 図 1 に相対密度 $D_r=40\%$ 、70%および 90%の供試体における正弦波を用いた繰返し三軸試験で得られた繰返し応力比 R と両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に到るまでの繰返し回数 N_c の関係を示す。これを見ると、相対密度が大きくなるほど液状化強度比 R_{120} も大きくなっているのがわかる。また $D_r=90\%$ においては、繰返し回数が 10 回付近で繰返し応力比 R が急激に立ち上がっているのがわかる。これは相対密度が大きくなるほど土の間隙が小さくなり、供試体の粒子骨格自体がより堅固なものとなったためであると考えられる。

次に、図 2、3 に不規則波(兵庫県南部地震)を用いたときの繰返し三軸試験による代表的な時刻歴の結果を示す。 $D_r=90\%$ の場合を見ると、 $D_r=40\%$ の場合と比べて過剰間隙水圧比の挙動が液状化に至るまでの過程から液状化に達してからも大きく変動しているのが見られる。これは、 $D_r=90\%$ のときは $D_r=40\%$ の場合に比べ、

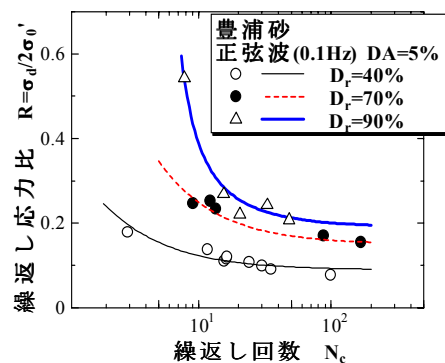


図1 Rと N_c の関係

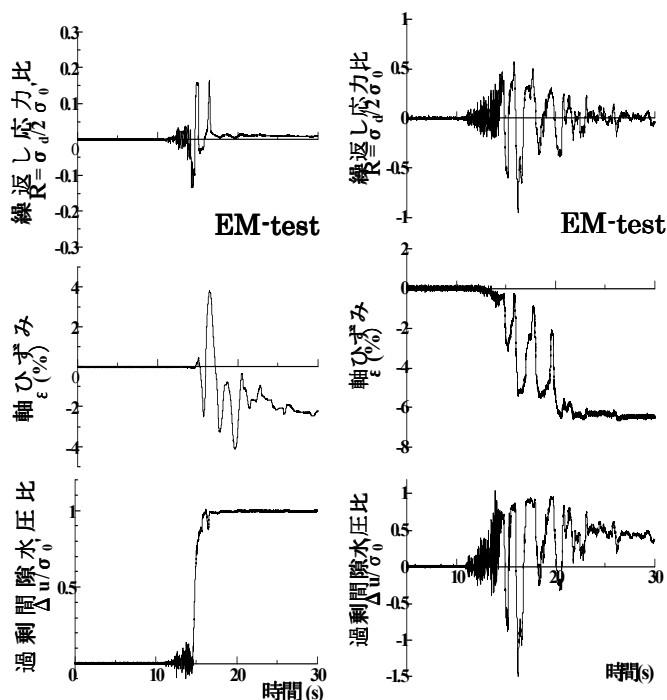


図2 時刻歴 ($D_r=40\%$)

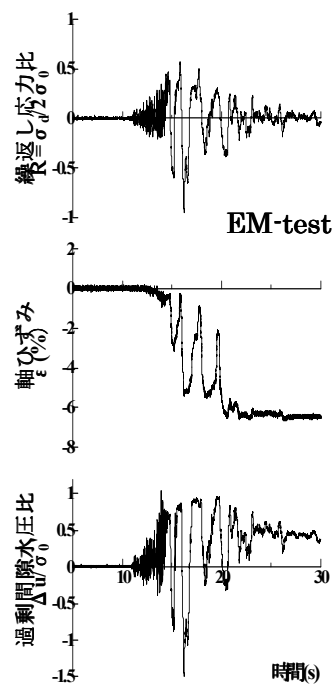


図3 時刻歴($D_r=90\%$)

間隙が小さく堅固な粒子骨格が形成されるため、より大きなせん断抵抗を発揮し、正のダイレタンシー傾向が現れているためであり、また液状化に至ってからはせん断応力の作用により、過剰間隙水圧比が減少して有効応力が増加する、いわゆる、サイクリックモビリティ現象が現れたためであると考えられる。

液状化強度比 R_{lmax} の平均から算定された補正係数 C_2 を表 1 に示す。図 4 には最大せん断応力比 R_{max} と最大軸ひずみ ε_{max} の関係を示す。一般に密度が大きくなることにより、供試体はより弾性的になり、正弦波を用いた場合の液状化強度比 R_{l20} と不規則波を用いた場合の液状化強度比 R_{lmax} の差は小さくなり、補正係数 C_2 は小さくなっていくと考えられていたが、本研究結果ではそのようになっていない。これは相対密度 $D_r=90\%$ において正弦波を用いた試験では、図 1 からわかるように相対密度 $D_r=40\%$ 、 70% のときと比べて液状化強度比 R_{l20} があまり増加していないのに対し、 $D_r=90\%$ のときの不規則波を用いた試験では図 4 よりわかるように液状化強度比 R_{lmax} は非常に大きくなっているためと考えられる。

液状化強度比 R_{lmax} の平均から算定された補正係数 C_2 を表 1 に示す。図 4 には最大せん断応力比 R_{max} と最大軸ひずみ ε_{max} の関係を示す。一般に密度が大きくなることにより、供試体はより弾性的になり、正弦波を用いた場合の液状化強度比 R_{l20} と不規則波を用いた場合の液状化強度比 R_{lmax} の差は小さくなり、補正係数 C_2 は小さくなっていくと考えられていたが、本研究結果ではそのようになっていない。これは相対密度 $D_r=90\%$ において正弦波を用いた試験では、図 1 からわかるように相対密度 $D_r=40\%$ 、 70% のときと比べて液状化強度比 R_{l20} があまり増加していないのに対し、 $D_r=90\%$ のときの不規則波を用いた試験では図 4 よりわかるように液状化強度比 R_{lmax} は非常に大きくなっているためと考えられる。

表 1 液状化強度比 R_{lmax} の平均と補正係数 C_2

せん断波形	R_{lmax}		R_{lmax} の平均	R_{l20}	C_2
	CM-test	EM-test			
十勝沖地震($D_r=40\%$)	0.256	0.156	0.206	0.111	1.86
十勝沖地震($D_r=90\%$)	0.536	0.453	0.495	0.264	1.87
兵庫県南部地震($D_r=40\%$)	0.300	0.196	0.248	0.111	2.23
兵庫県南部地震($D_r=90\%$)	0.514	0.603	0.559	0.264	2.12

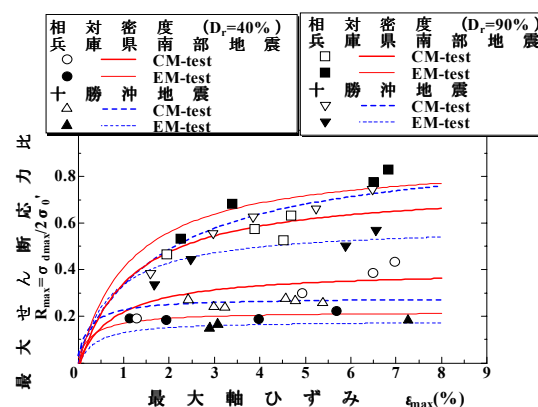


図 4 R_{max} と ε_{max} の関係

4.補正係数 C_2 と繰返し回数 N_c の関係 : 図 1 より正弦波による試験で得られた R_{l20} をいくつかの繰返し回数に対して読み取り、較正係数 C_2 を求めてみた。図 5 に補正係数 C_2 と繰返し回数 N_c の関係を示す。これを見ると、相対密度 $D_r=40\%$ の場合と相対密度 $D_r=90\%$ の場合を比較すると、どちらも繰返し回数 N_c が減少するにつれて補正係数 C_2 も減少している。しかし、相対密度 $D_r=90\%$ においては C_2 の値がより大きく変化しているのがわかる。特に繰返し回数が 10 回付近で大きく変化し、 $D_r=40\%$ の C_2 の値より小さくなっている。これは、繰返し回数を少なくすることによって正弦波が、数回しか大きいせん断応力が作用しない不規則波と砂に与えるダメージが等価となるせん断波形に近づき、補正係数 C_2 が減少したものと考えられる。 $D_r=90\%$ においては、繰返し回数 5~10 回程度の繰返し応力比を液状化強度比とすると、 C_2 の値が 1 に近づいていき正弦波による液状化強度比が不規則波によるものと同程度に近づき、正弦波による液状化強度比が実地震波を想定したものにより近づくと考えられる。これまでの研究によると、補正係数 C_2 は地震波形、供試体密度、試料の種類等に大きく影響されることが明らかになっている。そのため実験で得られる値の範囲が大きくなり補正係数としてはふさわしくない傾向を示した。つまり補正係数の値の範囲が狭まることが望まれる。これは慣例に従い、すべてのケースにおいて繰返し回数 20 回での繰返し応力比を液状化強度比とみなしたことによってしている。以上のことより補正係数 C_2 の有効性を高めるためには繰返し回数 5~10 回での繰返し応力比を液状化強度比とするなど、液状化強度の定義を再検討することが必要になっていると考えられる。

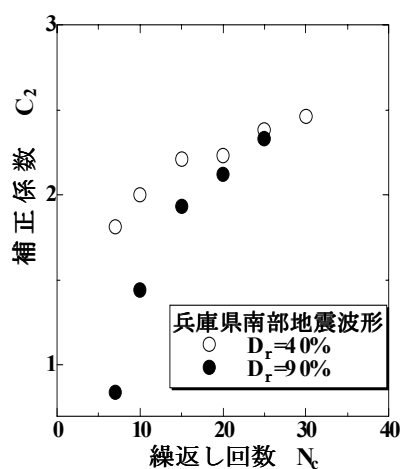


図 5 C_2 と N_c の関係

程度に近づき、正弦波による液状化強度比が実地震波を想定したものにより近づくと考えられる。これまでの研究によると、補正係数 C_2 は地震波形、供試体密度、試料の種類等に大きく影響されることが明らかになっている。そのため実験で得られる値の範囲が大きくなり補正係数としてはふさわしくない傾向を示した。つまり補正係数の値の範囲が狭まることが望まれる。これは慣例に従い、すべてのケースにおいて繰返し回数 20 回での繰返し応力比を液状化強度比とみなしたことによってしている。以上のことより補正係数 C_2 の有効性を高めるためには繰返し回数 5~10 回での繰返し応力比を液状化強度比とするなど、液状化強度の定義を再検討することが必要になっていると考えられる。

5.まとめ : 繰返し三軸試験装置を用いて衝撃型の不規則荷重を受ける砂の液状化強度特性を調べた結果、補正係数 C_2 を求める際、その分母となる液状化強度の定義、すなわちそれを求めるための繰返し回数について再検討する必要があることが明らかになった。