

液状化した砂の変形特性に及ぼす地震動の継続時間の影響について

九州工業大学 学生会員 ○鬼塚充明
九州工業大学大学院 学生会員 遠藤正悟
九州工業大学大学院 正会員 永瀬英生 廣岡明彦

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震により東京湾岸の埋立地において液状化が発生し、その被害は甚大なものとなった。よって、南海トラフ地震をはじめとする近い将来再び起こると予想される巨大地震に備えて、液状化予測・対策の技術向上が必要とされている。そこで、本研究では地震動の継続時間が液状化後の変形特性に及ぼす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た。試料の物理的性質は、土粒子密度 $\rho_s = 2.645(\text{g/cm}^3)$ 、最大間隙比 $e_{\max} = 0.981$ 、最小間隙比 $e_{\min} = 0.608$ である。供試体は外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の中空円筒形とし、空中落下法により所定の相対密度になるように作製した。供試体作製後には、脱気水を通水して間隙圧係数 B 値が 0.95 以上となるように供試体を飽和化し、初期有効拘束圧 $\sigma'_0 = 49\text{kPa}$ で等方圧密を行った。繰返し载荷には正弦波形と図 1 に示す浦安市で観測された東方地方太平洋沖地震波形および図 2 に示す神戸市で観測された兵庫県南部地震波形のそれぞれの時間軸を 20 倍したものを用いた。载荷に用いた東北地方太平洋沖地震波形は 50.0~160.0(s)の範囲、兵庫県南部地震波形は 0~100.0(s)の範囲とした。繰返し試験に引き続き、液状化した状態で非排水条件を保ったまま静的単調载荷試験を行い、せん断剛性の低下度合を調べた。静的単調载荷はひずみ制御方式にて行い、载荷速度は $\dot{\gamma} = 5\%/min$ とした。

3. 実験結果

相対密度 $D_r = 45, 65, 85\%$ の供試体に東北地方太平洋沖地震波形を用いて液状化させた後の静的単調载荷試験により得られたせん断応力とせん断ひずみの関係を図 3, 4, 5 に、同様に、兵庫県南部地震波形を用いた際の静的単調载荷試験により得られたせん断応力とせん断ひずみの関係を図 6, 7, 8 にそれぞれ示す。

液状化後の静的単調载荷試験によりせん断応力とせん断ひずみの関係を求めると、一般に図 9 に示すような下に凸のバイリニアとなる。ここで、供試体の剛性が回復する変化点を抵抗変曲点とし、その点までに要する区間を微小抵抗領域 γ_L 、抵抗変曲点までの割線勾配をせん断剛性 G_1 、抵抗変曲点からの回復領域の割線勾配をせん断剛性 G_2 と定義する。また、繰返し载荷を行わず、静的せん断試験のみを行った供試体のデータを static とした。この static のせん断ひずみ 0.1% に対する割線勾配をせん断剛性 $G_{0,i}$ と定義し、 $G_1/G_{0,i}$ を剛性低下率とする。

また静的単調载荷試験の試験結果については、繰返し载荷時の応力

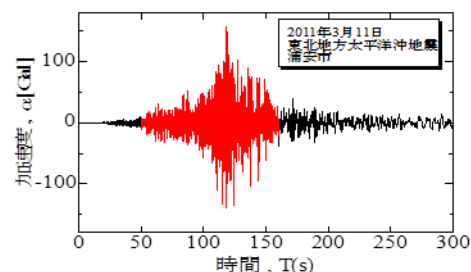


図 1 東北地方太平洋沖地震波形

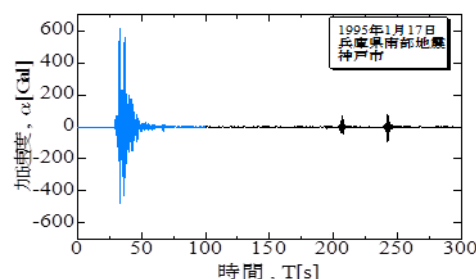


図 2 兵庫県南部地震波形

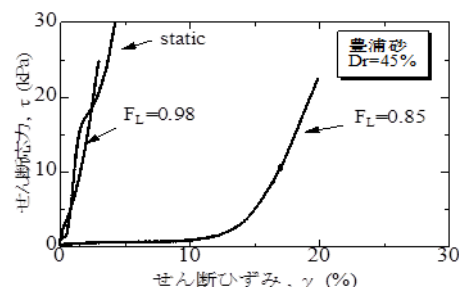


図 3 せん断応力とせん断ひずみの関係 (Dr=45%, 東北地方太平洋沖地震)

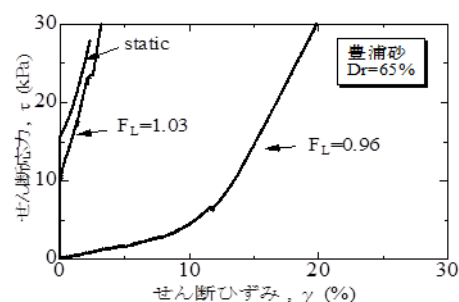


図 4 せん断応力とせん断ひずみの関係 (Dr=65%, 東北地方太平洋沖地震)

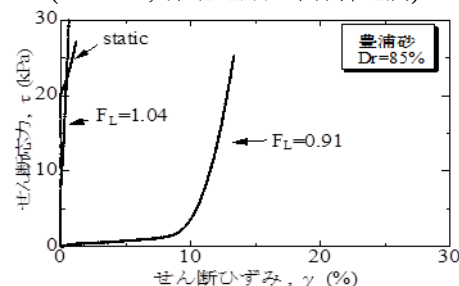


図 5 せん断応力とせん断ひずみの関係 (Dr=85%, 東北地方太平洋沖地震)

比 R と液状化強度比 R_L を用いた液状化安全率 F_L 値 (R_L / R) で整理する。

東北地方太平洋沖地震波形を与えたとき図 3～5 より、それぞれの相対密度において供試体が液状化していない $F_L > 1.0$ の結果では、せん断応力を大きくしても、せん断ひずみはあまり増加していないことがわかる。また、供試体が液状化している $F_L \leq 1.0$ の結果では、小さなせん断応力で大きなせん断ひずみが発生し、剛性低下が起こっていることが読み取れる。

兵庫県南部地震波形を与えたとき図 6～8 より、それぞれの相対密度において東北地方太平洋沖地震波形を与えたときと同様に、 $F_L > 1.0$ の結果では、せん断応力を大きくしても、せん断ひずみはあまり増加せず、 $F_L \leq 1.0$ の結果では、小さなせん断応力で大きなせん断ひずみが発生し、剛性低下が起こっていることが読み取れる。

図 3～8 から得られた剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ と液状化安全率 F_L 値の関係を図 9 に示す。図 9 より、いずれのケースにおいても、 F_L 値が小さくなるほど $G_1/G_{0,i}$ の値は小さくなっており、液状化の程度が大きいほど剛性低下が激しいことが見てとれる。 $F_L \leq 1.0$ では微小抵抗領域において、せん断剛性は約 $1/100 \sim 1/10000$ まで著しく低下することがわかる。また、 $F_L > 1.0$ の場合、せん断剛性はほぼ低下せず、供試体が液状化している $F_L \leq 1.0$ の場合との差が非常に大きくなっていることがわかる。

東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の結果を比較すると、相対密度 $Dr=65, 85\%$ の場合において、液状化安全率 F_L 値が同じでも東北地方太平洋沖地震波形を用いたときの方が剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ が小さくなっていることがわかる。つまり、継続時間の長い地震の方がより剛性が低下し、液状化による被害が大きくなっている。これは、地震動の継続時間が長い分、液状化した後も地震動が続いたため、土粒子構造が激しく壊されたためと考えられる。なお、相対密度 $Dr=45\%$ の結果については、上記とは異なる傾向を示しているため、今後の課題としたい。

4. 結論

本研究では、東北地方太平洋沖地震の特徴である地震動の継続時間が長いことに着目し、その特徴が液状化後の変形特性に及ぼす影響について調べた。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) いずれのケースにおいても供試体が液状化していない場合、せん断応力を大きくしてもせん断ひずみはあまり増加せず、液状化した場合、小さなせん断応力で大きなせん断ひずみが発生し、剛性低下が起こった。
- 2) $F_L \leq 1.0$ では、せん断剛性は約 $1/100 \sim 1/10000$ まで著しく低下し、 $F_L > 1.0$ の場合、せん断剛性はほぼ低下せず、供試体が液状化している $F_L \leq 1.0$ の場合との差が非常に大きくなった。
- 3) 相対密度 $Dr=65, 85\%$ の場合において、地震動の継続時間が長い地震では、地震動の継続時間が短い地震と比べて、より剛性が低下し、液状化による被害が大きくなった。

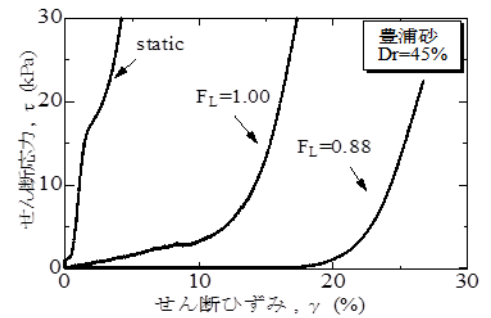


図 6 せん断応力とせん断ひずみの関係 ($Dr=45\%$, 兵庫県南部地震)

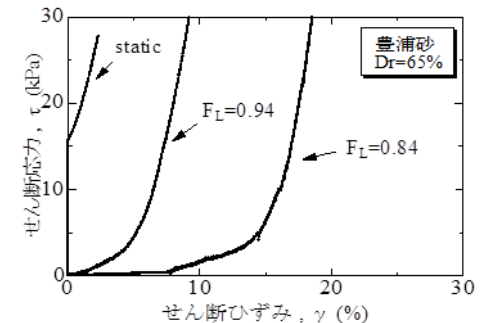


図 7 せん断応力とせん断ひずみの関係 ($Dr=65\%$, 兵庫県南部地震)

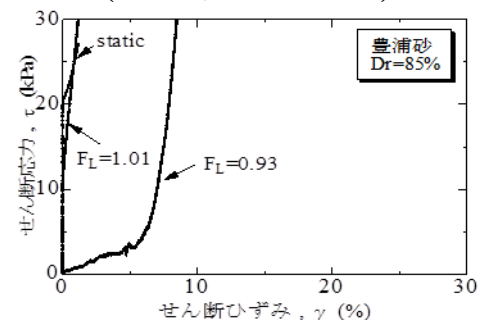


図 8 せん断応力とせん断ひずみの関係 ($Dr=85\%$, 兵庫県南部地震)

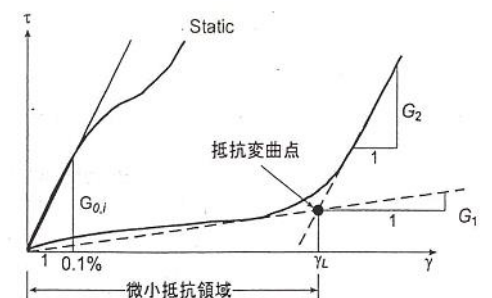


図 9 せん断応力とせん断ひずみの関係

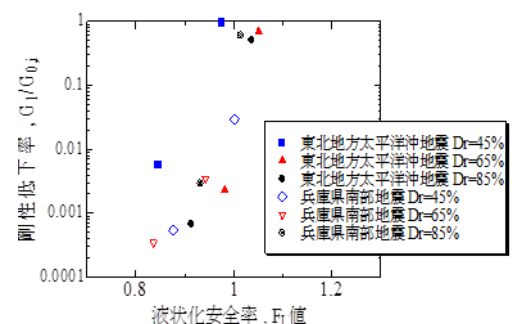


図 10 剛性低下率と液状化安全率の関係