

東京電機大学大学院 学生会員 ○寺内哲也 森本弘光

東京電機大学理工学部 正会員 安田 進

イスタンブール工科大学 Erken Ayfer

1. はじめに

兵庫県南部地震では数多くの港湾構造物が液状化による被害を受けた。ケーソン岸壁の前傾や滑動、沈下といった変状が生じたのに加え、その背後地盤で大規模な地盤流動が発生した。そこで本研究では、地盤の流動を検討するために必要な種々の土の液状化後の変形特性を繰返しねじりせん断試験より調べた。

2. 実験装置及び方法

試験装置には、単調载荷用の電動モーターを有した繰返しねじりせん断試験装置を用いた。供試体は外径10cm、内径6cm、高さ10cmである。また、イスタンブール工科大学では外径10cm、内径6cm、高さ20cmの供試体を用いた。

試料には豊浦砂とポートアイランド北部の港島トンネルの工事現場で採取した“まさ土”をまず用いた。ただし、実験に用いたまさ土は26.5mmふるいを通過したもののみ($\rho_s=2.65$, $D_{50}=3.10$ mm, $e_{\max}=1.057$, $e_{\min}=0.537$)とした。まさ土の相対密度は50%、80%とし、湿潤状態でモールドの中に5層に分けて試料を詰めて作成した。また、豊浦砂は空中落下法を用いて、相対密度50%となるように作成した。更にイスタンブールの標準的な砂とそれにシルト分10%を加えたものを用いた。各試料の粒径加積曲線を図1に示す。両者とも、空中落下法により作成した。ただし、落下高さ $h=30$ cm一定とした。各試料とも背圧 2kgf/cm^2 、有効拘束圧 1kgf/cm^2 のもとで等方圧密した後、非排水状態において、所定の回数だけ繰返し载荷を行った。繰返し载荷は、周波数0.1Hzの正弦波とした。そして、繰返し回数 $N_c=20$ 回で丁度液状化($DA=7.5\%$ で定義)する場合を液状化に対する安全率 $F_L=1.0$ とした。また、その時の応力比を R_L と定義した。繰返し载荷後、非排水状態を保ったままで、静的単調载荷を行った。静的単調载荷はひずみ制御で行い、载荷速度は10%/min.とした。実験方法は繰返し回数を一定の20波として繰返しせん断力 L を変えた方法である。この場合の F_L は $F_L=R_L/L$ となる。

3. 実験結果

(1)液状化に伴う応力～ひずみ関係の変化

代表的な例として図2(a)～(c)にまさ土($Dr=80\%$)の実験結果を示す。なお、(b)は(a)の拡大図である。まさ土の特徴として液状化した供試体でも、せん断ひずみが約数%程度まで、わずかな抵抗力を発揮し、そこから徐々に剛性が回復していく傾向を示した。それに対し、豊浦砂は载荷直後のせん断ひずみ～せん断応力曲線の勾配は非常に小さく、殆ど強度を持たずに10～25%程度のひずみが発生した。そしてその後、せん断抵抗が急速に回復し、過剰間隙水圧も下がった。せん断剛性が回復するのは変形が大きくなると土粒子同士が再び接触し合っ、正のダイレイタンスが発生するようになったためと考えられる。これはすべての土において、この初期接線勾配は F_L の値が小さいほど徐々に小さくなり、せん断抵抗応力が殆ど発生しない低剛性の区間が大きくなっている。

(2)せん断剛性の低下率 $G_1/G_{0.1}$ と F_L の関係

図3に示すように、各ケースにおける液状化後の単調载荷時のせん断応力～ひずみ関係は、液状化、地震、砂、室内試験

〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂 TEL 0492-96-2911 FAX 0492-96-6501

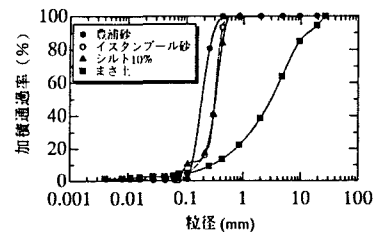


図1 種々の土の粒径加積曲線

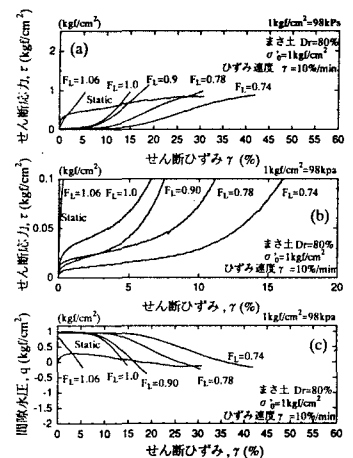
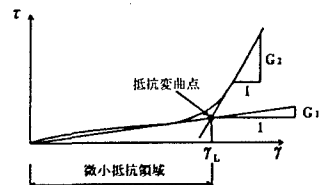


図2 せん断ひずみ～せん断応力と間隙水圧の関係

(まさ土: $Dr=80\%$, 方法 2, $N_c=20$)図3 τ と G_1 , G_2 の定義

力～せん断ひずみ曲線から初期接線勾配 G_1 を読み取り、液状化に伴う剛性の低下率 $G_1/G_{0,i}$ を求めた。ただし、 $G_{0,i}$ は静的単調载荷のみの供試体で、せん断ひずみが 0.1% 時の割線剛性とした。図 4 にはまさ土について $G_1/G_{0,i}$ と F_L 、相対密度 Dr (○:50%, ▲:80%) の関係を示す。 $F_L=1.0$ での $G_1/G_{0,i}$ は約 1/200～1/300 程度せん断剛性が低下した。完全に液状化していない状態の供試体は粘りを発揮して、せん断剛性の低下が顕著に現れてきていない。 F_L が 1.0 より小さくなると剛性低下率はより大きく低下した。また、密度が低いほど $G_1/G_{0,i}$ は大きくなった。図 5 に豊浦砂についての $G_1/G_{0,i}$ と F_L の関係を示す。 $F_L=1.0$ で $G_1/G_{0,i}$ は約 1/1000～1/2000 程度となり、 F_L が小さくなるほど $G_1/G_{0,i}$ は小さくなる傾向を示した。豊浦砂とまさ土を比べた場合、まさ土のせん断剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ はかなり小さいことがわかった。図 6 にイスタンブール砂 ($h=30\text{cm}$) とシルト含有率 10% についての $G_1/G_{0,i}$ と F_L の関係 (○:イスタンブール砂, ▲:シルト分 10%) を示す。前者は $F_L=1.0$ で $G_1/G_{0,i}$ は約 1/300 程度となり、豊浦砂よりかなり液状化後の剛性低下率が小さいことが言える。この理由として粒径の違いが考えられる。また、シルト 10% を混ぜた土も他の土同様、液状化後の剛性低下率は $F_L=1.0$ で $G_1/G_{0,i}$ は約 1/500 程度低下した。細粒分を含んだ砂は粘りを発揮し液状化後の剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ は小さくなったと考えられる。

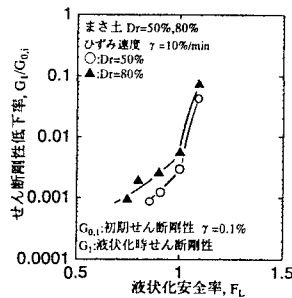


図 4 $G_1/G_{0,i}$ と F_L の関係
(まさ土: $Dr=50\%$, 80%)

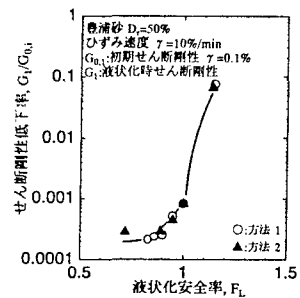


図 5 $G_1/G_{0,i}$ と F_L の関係
(豊浦砂: $Dr=50\%$)

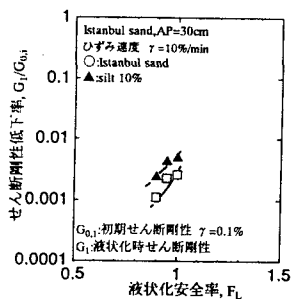


図 6 $G_1/G_{0,i}$ と F_L の関係
(Istanbul sand, silt: $AP=30\text{cm}$)

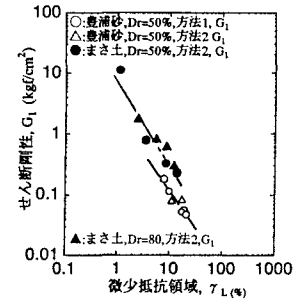


図 7 $G_1/G_{0,i}$ と G_1 の関係

(3) 微小抵抗領域 γ_L と G_1 の関係

図 3 に示すように、供試体の剛性が変曲点をもって急激に回復するまでに要する区間を文献 1) と同様に微小抵抗領域 γ_L と定義する。図 7 にまさ土と豊浦砂についての γ_L と G_1 、相対密度 Dr (○:50%, ▲:80%) の関係を示す。図に示されるように γ_L は G_1 が小さいほど大きい傾向となった。そして、豊浦砂では $\gamma_L \sim G_1$ 関係は密度に関係なく、まさ土では密度が大きくなると G_1 が小さくなる傾向を示した。また、 γ_L の値はまさ土の方が小さいことがわかった。従って、あるせん断力までに回復するひずみ量は標準砂とまさ土ではかなりの違いがあると言える。

(4) せん断剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ と粒径の関係

図 8 にせん断剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ と細粒分含有率 F_c の関係を示す。この図に見られるように細粒分含有率 F_c が大きいほど、せん断剛性低下率が小さい傾向を示した。

5. 結論

粒径の異なる 4 種類の土に対し液状化後の変形特性に関する実験を行った。その結果、液状化した砂の供試体の剛性は液状化以前の剛性に比べて大きく低下し、液状化が激しく発生した場合更に大きく低下することがわかった。細粒分を多く含むまさ土、シルト分 10% は砂地盤に比べ、液状化後の剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ 、微小抵抗領域 γ_L とともに小さいことがわかった。また、イスタンブール砂は豊浦砂に比べ液状化後の剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ は小さいことがわかった。

【参考文献】 1) S. Yasuda, H. Nagase, H. Mine, Y. Uchida: The Mechanism and A Simplified Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction, 地盤工学会論文報告集, Vol. 32, No. 1, pp. 149-160, 1992.

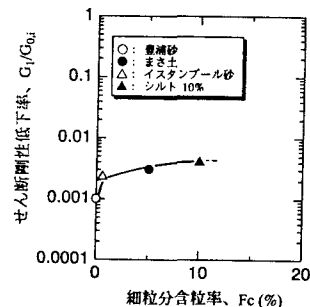


図 8 $G_1/G_{0,i}$ と F_c の関係