

損失エネルギーに着目した土の繰返しせん断特性

中央大学大学院 学生会員 ○齊藤 王二郎
 中央大学 正会員 斎藤 邦夫
 中央大学 正会員 石井 武司

1. はじめに

本研究では砂分を調整した中間土と、硅砂7号、汐留粘土に対してひずみ制御非排水繰返し三軸試験を行った。それより得られた応力-ひずみ関係から、繰返しせん断に伴う剛性低下率と累積損失エネルギーを算出することで材料の違いによる繰返しせん断特性を評価した。

2. 使用試料

表 - 1 試料の物理特性

本研究で用いた試料は、中間土であるSK50、SK60、SK70と硅砂7号(Dr=82%)及び汐留粘土である。中間土は汐留埋立地から採取したIp=40の汐留粘土に硅砂7号を混合し、人工的に砂分量を50%、60%、70%に調整したものである。これらは、液性限界の2倍の含水比に調整し、圧密圧力100kPaで予備圧密することで作成した。なお、中間土のSKは汐留(Siodome)・硅砂(Keisa)の頭文字であり、数字は砂分含有量を表わしている。各試料の物理特性を表1に示す。

試料名	汐留粘土	硅砂7号	SK50	SK60	SK70
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.70	2.65	2.65	2.65	2.65
液性限界 W_L (%)	66.4	NP	42.9	39.1	30.6
塑性限界 W_P (%)	27.2	NP	21.9	22.9	24.0
塑性指数 I_p	39.2	NP	21	16.2	6.6
砂分 (%)	8.5	97.8	50	60	70
シルト分 (%)	41.5	2.2	23.2	18.8	14.4
粘土分 (%)	50	0	26.8	21.2	15.6

3. 試験方法

供試体寸法は直径5cm、高さ10cmである。中間土と汐留粘土は、予備圧密したものをトリミング法により所定の形状に成形した。硅砂7号はDr=80%になるよう空中落下方により作成した。また供試体の飽和は、中間土では20kPaの拘束圧下で脱気水を十分通水させ、硅砂7号については炭酸ガスを通気させた後、中間土と同様にして飽和させた。これによりB値はすべての供試体で0.96以上の値となった。次いで、背圧 $q_3=200$ kPa、有効拘束圧 $\sigma'_c=200$ kPaで等方圧密した。非排水繰返し三軸試験は、ひずみ制御で行い軸ひずみ片振り振幅 $\epsilon_a=0.5\%$ 、周波数 $f=0.1$ Hz、繰返し回数 $N=100$ 回として载荷した。载荷試験中のデータ計測間隔は10回/sである。

4. 試験結果と考察

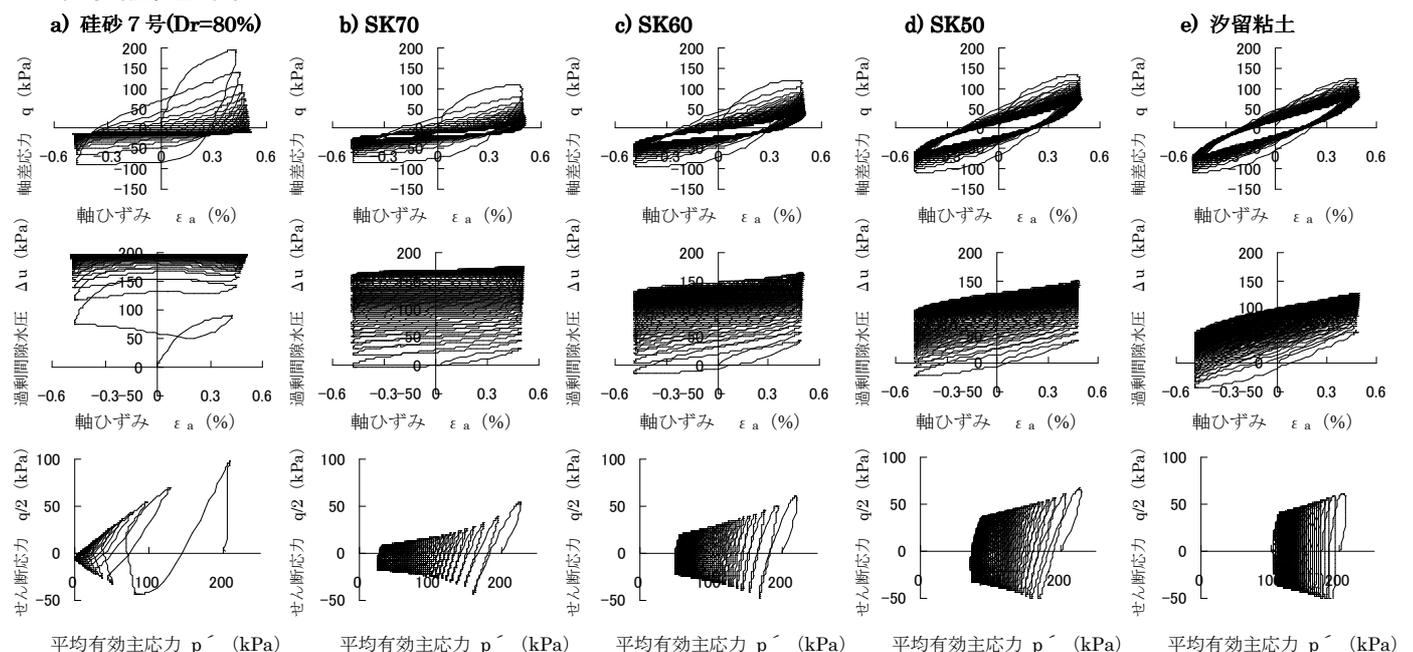


図-1 ひずみ制御繰返し三軸試験結果

キーワード：中間土、ひずみ制御繰返し非排水三軸試験、剛性低下率、累積損失エネルギー

4.1. 繰返し載荷に伴う剛性低下

ひずみ制御による繰返し三軸試験結果を図-1に示す。グラフは上から、軸差応力 $q \sim$ 軸ひずみ ϵ_a 関係、過剰間隙水圧 $\Delta u \sim$ 軸ひずみ ϵ_a 関係、有効応力経路である。また、この結果から求めた剛性低下率 $G_N/G_1 \sim$ 繰返し回数 $\log N$ 関係と、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c \sim$ 繰返し回数 $\log N$ 関係をそれぞれ図-2と図-3に示す。ここで、 G_1 、 G_N とはそれぞれ、 $q \sim \epsilon_a$ 関係を $\tau \sim \gamma$ 関係に換算して求めた繰返し回数1回目とN回目の割線せん断剛性である。両図より、①砂分が多い程、繰返し載荷に伴う剛性低下率は大きい、②砂分が多い程、繰返し載荷に伴う過剰間隙水圧比の上昇量は大きいことを見出した。①と②は密接に関連しており、過剰間隙水圧の上昇、すなわち有効拘束圧の減少がせん断剛性の低下を引き起こしている。それを示したのが、図-4の剛性低下率～過剰間隙水圧比関係である。硅砂は他の試料とは大きく異なり、過剰間隙水圧の上昇に伴い直線的にせん断剛性が低下していることが分かる。汐留粘土と中間土は似た挙動を示すが、等過剰間隙水圧下における剛性低下率は試料ごとに異なり、砂分が少ない試料ほど剛性低下率は小さい。これは砂分が少ない試料、すなわち粘土分が多い試料ほど有効拘束圧に依存しない強度が発揮されているためと思われる。

4.2. 剛性低下率～累積損失エネルギー関係

繰返し載荷に伴い土の要素に蓄積される累積損失エネルギーは、ヒステリシスループに囲まれた面積の累積値で計算できる。単位体積 (1cm^3) 当たりの累積損失エネルギーは、 $q \sim \epsilon_a$ 関係を $\tau \sim \gamma$ 関係に換算し、ベクトルの外積を利用することで求めた。図-5に正規化累積損失エネルギー $\Sigma W/\sigma'_c \sim$ 繰返し回数 N 関係を示す。これより、硅砂7号は累積損失エネルギーが一定値に収束しており、土が蓄えられる塑性ひずみエネルギーに上限があることがわかる。一方、中間土と汐留粘土では累積損失エネルギーは常に増加しており、硅砂に比べエネルギー吸収能力が高いといえる。図-6は図-2と図-5を組み合わせた、剛性低下率～正規化累積損失エネルギー関係である。この関係を用いることで、地震時に想定地盤へ入力するエネルギーから地盤の強度低下を予測することが可能となる。すなわち、[エネルギー]=[力]×[変形量]であり、損失エネルギーはひずみレベルと応力比の両者を総括したパラメータとなり得る。

5. まとめ

砂分が多いほど繰返し載荷に伴う、せん断剛性の低下率、過剰間隙水圧の上昇量、累積損失エネルギーの蓄積量が大きい。今回の研究ではこれらの挙動を明確に捉えることができ、設計パラメータとしての剛性低下率～正規化累積損失エネルギー関係を算出できた。

【参考文献】1) 増田昌昭、風間基樹、柳澤栄司：ひずみ制御繰返し三軸試験による土の非排水繰返し強度評価、第32回地盤工学研究発表会(1997) 2) 原忠・天野真輔ら：繰返し三軸試験機による砂礫材料の損失エネルギーの検討、第35回地盤工学研究発表会(2000)

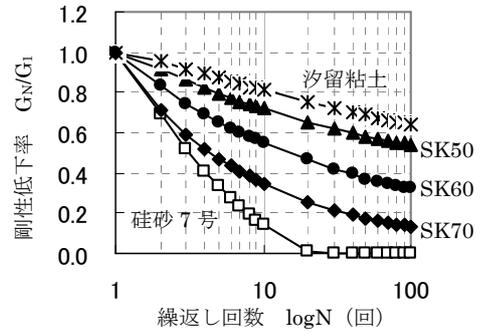


図-2 せん断剛性低下率 - 繰返し回数関係

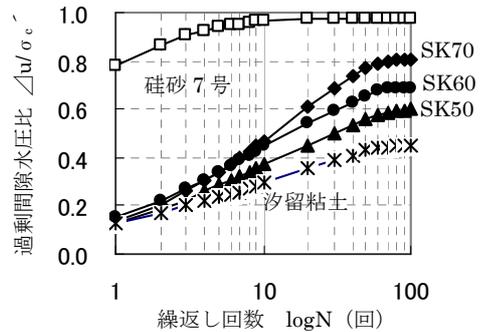


図-3 過剰間隙水圧比 - 繰返し回数関係

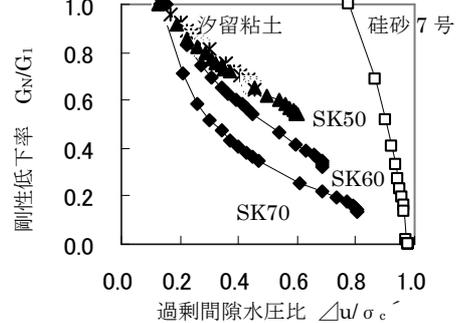


図-4 剛性低下率 - 過剰間隙水圧比関係

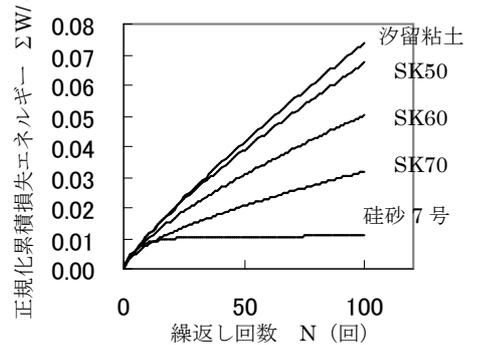


図-5 正規化累積損失エネルギー - 繰返し回数関係

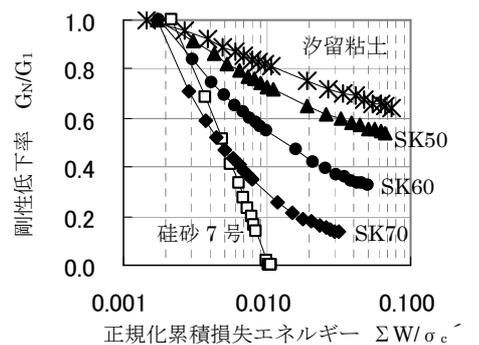


図-6 剛性低下率 - 正規化累積損失エネルギー