

粗粒材料の動的せん断強度と ダイレイタンシー特性の関係

岩下友也¹・館野 悟²・吉田 等³・津國正一⁴

¹正会員 工修 建設省土木研究所 ダム部フィルダム研究室研究員(〒305 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 建設省土木研究所 ダム部フィルダム研究室研究員(〒305 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 工修 建設省土木研究所 ダム部フィルダム研究室長(〒305 茨城県つくば市旭1番地)

⁴正会員 工修 (株)竹中土木 技術本部(元土木研究所交流研究員)(〒104 東京都中央区銀座8丁目21番1号)

粗粒材料の過剰間隙水圧の発生特性および動的せん断強度特性を明らかにするため、礫材質の異なる3種の粗粒材料について、相対密度、拘束圧の試験条件を変化させ、繰返しおよび単調載荷ねじり単純せん断試験、繰返しおよび単調載荷三軸試験を実施した。その結果、粗粒材料の過剰間隙水圧は、密な砂のケースと同様に、初期の繰返しせん断で急激に上昇すること、密に締固めた粗粒材料の最大過剰間隙水圧比は1にまで上昇せず、有効応力は0まで低下しないことがわかった。さらに、過剰間隙水圧の発生量と余裕間隙比の関係を明らかにし、粗粒材料のダイレイタンシー特性と過剰間隙水圧の発生特性、そして動的せん断強度の関係を示した。

Key Words : coarse-grained material, cyclic loading, dilatancy, dynamic shear strength,
pore water pressure, torsional simple shear test, triaxial test

1. はじめに

砂の液状化強度に関する研究は、数多く行われており、飽和砂の液状化は、ダイレイタンシーに起因する有効応力の低下にともなって発生すると考えられている。また、有効応力の低下は、間隙水圧の上昇によるものである。しかし、粗粒材料の動的強度に関して系統的に研究した例は少ない。

これまでに著者らは、碎石や河床砂礫の再構成材料を対象として、非排水条件の大型の繰返し三軸試験および繰返し中空ねじり単純せん断試験を実施してきた。その結果、密に締固めた供試体では、繰返し載荷により発生する負の過剰間隙水圧のために動的せん断強度が増大する¹⁾。また、同一粗粒材料について相対密度と拘束圧の異なる試験条件による繰返し三軸試験を行った結果、最大ダイレイタンシー係数がある値より大きくなる条件では、過剰間隙水圧の発生量が減少し、有効応力が0にまで低下しないため、動的せん断強度が増大する²⁾。

本論文では、粗粒材料の非排水繰返し載荷による過剰間隙水圧の発生特性および動的せん断強度特性を検討するため、中空ねじり単純せん断試験および三軸試験を実施した。粗粒材料と砂の過剰間隙水圧の上昇過程を比較し、粗粒材料の過剰間隙水圧の発生特性を明

らかにした。また、礫材質の異なる3種の粗粒材料について、余裕間隙比とダイレイタンシー特性が過剰間隙水圧ならびに動的せん断強度特性に及ぼす影響について検討した。

2. 試験の概要

試験は、礫材質の異なる3種の粗粒材料を用いて、大型の繰返し載荷および単調載荷中空ねじり単純せん断試験(CTSS 試験および MTSS 試験)、大型の繰返し載荷および単調載荷三軸試験(CTX 試験および MTX 試験)を実施した。

(1) 試験材料

試験に用いた材料は、粗粒 A 材 (斑れい岩の碎石)、粗粒 B 材 (安山岩質の河床砂礫)、粗粒 C 材 (塊状の輝緑凝灰岩の碎石)、豊浦砂 I である。その物理特性を表-1 に示す。また、粗粒 A,B,C 材は、図-1 に示す粒度分布に調整した。

(2) 試験供試体

a) 中空ねじり単純せん断試験

供試体は、外径 800mm、内径 400mm、高さ 800mm の大型中空供試体である。供試体の作製は、試料を6

表-1 試験材料の物理特性

	粗粒A材 (荒川いり砂)	粗粒B材 (荒川いり砂)	粗粒C材 (荒川いり砂)	豊浦砂Ⅰ	豊浦砂Ⅱ ⁴⁾	宮城砂 ⁴⁾
最大粒径 D_{max} (mm)	63.5	63	63	—	—	—
平均粒径 D_{50} (mm)	10	10	10	—	0.17~0.2 ³⁾	0.2
均等係数 U_c	30	30	30	—	1.44~1.85 ³⁾	—
最大間隙比 e_{max}	0.479	0.432	0.569	0.979	0.95~0.99 ³⁾	—
最小間隙比 e_{min}	0.113	0.187	0.142	0.603	0.61~0.64 ³⁾	—
余隙間隙比 e_0-e_{min}	0.05~0.20	0.04, 0.106	0.082	0.075	0.24~0.80	—
相対密度 Dr	56,66,80,89%	80,85%	85%	80%	21.1,49.8% ⁴⁾	33.5~90.5% ⁴⁾

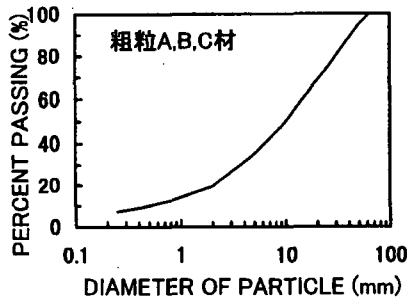


図-1 粗粒材料の粒度分布

表-2 試験方法および条件

試験名	MTSS試験	CTSS試験	MTX試験	CTX試験
試験法	ねじり単純せん断	三軸	三軸	三軸
載荷方法	単調載荷	繰返し載荷	単調載荷	繰返し載荷
制御方法	ひずみ制御	応力制御	ひずみ制御	応力制御
載荷速度	0.5%/min	0.05Hz(正弦波)	0.5%/min	0.1Hz(正弦波)
飽和条件	飽和			
圧密条件	等方圧密			
排水条件	排水	非排水	排水	非排水

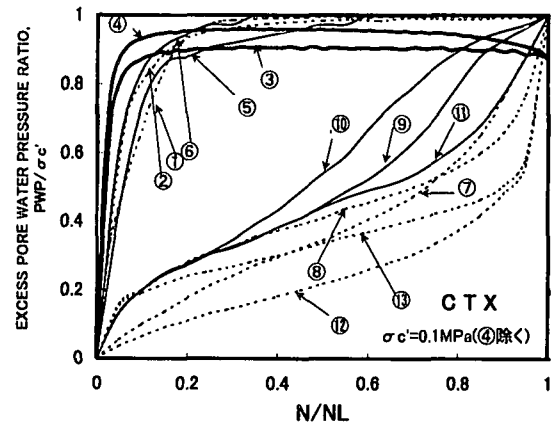
層分に分け、各層を振動ランマーで締固め、相対密度 $Dr=56,80,89\%$ とした。端面のすべりを防止するための下部鋼製刃(長さ 180mm,幅 43mm,高さ 43mm×4 個)をペディスタルに設置し、上部では6層目の試料投入の際、リング鋼製刃(外径 795mm,内径 405mm,高さ 43mm,厚さ 5mm)を埋め込み、材料と同時に締固めた。

b) 三軸試験

供試体は、直径 300mm、高さ 600mm である。供試体の作製は、試料を6層分に分け、各層を振動ランマーで締固め、相対密度 $Dr=56,66,80,89\%$ とした。このとき6層目の締固め後、端面に大粒径の材料が含まれることから粒子間にくぼみを生じる。このくぼみには、粒径 0.8~2.0mm 程度の同一材料を埋めて整形した。また、メンブレンペネトレーションの影響を少なくするため、ゴムスリーブ(厚さ 2mm)の表面のくぼみにはベントナイトを埋めて、さらにもう一枚のゴムスリーブ(厚さ 2mm)を装着した。

(3) 試験方法

供試体は B 値 0.96 以上に飽和させ、有効拘束圧 $\sigma'c'=0.1,0.2,0.39,0.59\text{MPa}$ で等方圧密させた。また、ねじり単純せん断試験および三軸試験は、拘束圧を一定に制御してねじり単純せん断および軸力載荷した。表-2にそれぞれの試験の方法および条件を示す。



材料	$Dr(\%)$	e_0-e_{min}	$\tau d/\sigma'c$
① 粗粒A材	56	0.2	0.19
② 粗粒A材	56	0.2	0.27
③ 粗粒A材	80	0.09	1.31
④ 粗粒B材	85	0.04	0.77
⑤ 宮城砂	89.6 ⁴⁾	—	0.818
⑥ 宮城砂	90.5 ⁴⁾	—	0.578
⑦ 宮城砂	38.7 ⁴⁾	—	0.205
⑧ 宮城砂	33.5 ⁴⁾	—	0.156
⑨ 宮城砂	52.0 ⁴⁾	—	0.228
⑩ 宮城砂	41.6 ⁴⁾	—	0.246
⑪ 宮城砂	43.2 ⁴⁾	—	0.178
⑫ 豊浦砂Ⅱ	21.1 ⁴⁾	0.24~0.3	0.145
⑬ 豊浦砂Ⅱ	49.8 ⁴⁾	0.8	0.174

図-2 過剰間隙水圧の上昇過程 (CTX 試験)

3. 試験結果と考察

(1) 過剰間隙水圧の発生特性

図-2は、CTX試験による粗粒材料および砂の過剰間隙水圧 PWP の上昇過程を示す。縦軸は、繰返し載荷1波毎の過剰間隙水圧 PWP を拘束圧 $\sigma'c'$ で割った過剰間隙水圧比 $PWP/\sigma'c'$ である。横軸は、繰返し載荷波数 N と両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ を発生させるのに必要な繰返し載荷波数 NL の比 N/NL である。図中の①~④は、比較的緩詰めの粗粒A材のケースと密詰めの粗粒A,B材のケースを示し、⑤,⑥は、密詰めの宮城砂のケース⁴⁾を示す。⑦~⑬は、緩詰めの宮城砂⁴⁾と豊浦砂Ⅱ⁴⁾のケースを示す。比較的緩い粗粒A材のケース(①,②)および密な粗粒A,B材のケース(③,④)そして密な宮城砂のケース(⑤,⑥)の $PWP/\sigma'c'$ は、載荷初期段階で急激に上昇している。その後、 $N/NL=0.5$ 付近で比較的緩い粗粒A材のケース(①,②)と密な宮城砂のケース(⑤,⑥)の $PWP/\sigma'c'$ は1に達し、有効応力は0まで低下している。しかし、密な粗粒A材とB材のケース(③,④)では、 $PWP/\sigma'c'$ は1にまで達していない。一方、緩詰めの砂のケース(⑦~⑬)の $PWP/\sigma'c'$ の上昇過程は、粗粒A,B材(①~④)や密な宮城砂のケース(⑤,⑥)と異なり、載荷初期段階では PWP はあまり増加せず、 $N/NL>0.6$ の後半で急激に上昇し、 $PWP/\sigma'c'$ は1に達する。

CTX試験による比較的緩詰め $Dr=56\%$ の粗粒A材

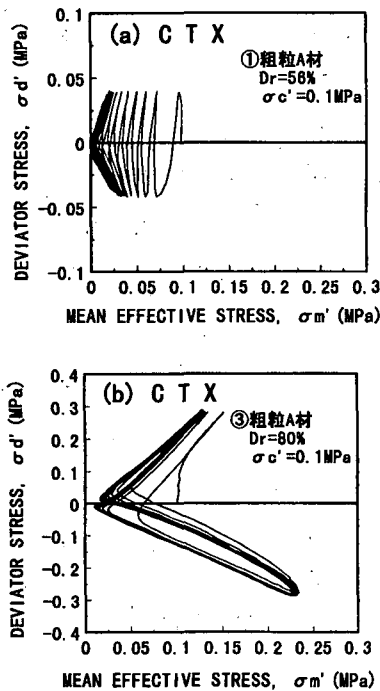


図-3 ストレスパス (CTX 試験)

のケース①と密詰め $Dr=80\%$ の粗粒 A 材のケース③のストレスパスを図-3 に示す。両ケースともにサイクリックモビリティ状態に達している。図-3(a)の比較的緩いケース①の平均有効主応力 σ_m' は、荷重中立軸で 0 にまで低下している。それに対し、図-3(b)の密なケース③の σ_m' は、0 にまで低下しない。

過剰間隙水圧の上昇によって生じる有効応力の低下は、排水条件の繰返し载荷による体積収縮量と表裏一体の関係にある。乾燥状態で繰返しせん断による体積収縮の限界（最小間隙比 e_{min} ）に達するまでに残された体積収縮の余裕量（余裕間隙比 $e - e_{min}$ ）が大きいとき、それを飽和非排水状態でせん断を加えたならば間隙水圧の上昇量も大きい。この余裕間隙比 $e - e_{min}$ は、 $(1 - Dr) \cdot (e_{max} - e_{min})$ と書き換えられ、締めりぐあいと材料自体の密度特性で決まる量の積で表される⁹⁾。

余裕間隙比 $e - e_{min}$ と最大過剰間隙水圧比 PWP_{max}/σ_c' の関係を図-4 に示す。図-4(a)は、CTSS 試験の結果であり、図-4(b)は、CTX 試験による結果である。ここで、圧密前の初期間隙比を e_0 とし、 $e_0 - e_{min}$ を余裕間隙比とした。材料、相対密度、拘束圧の異なる条件に対して、CTSS、CTX 試験の結果は、ともに $e_0 - e_{min}$ が大きく、拘束圧 σ_c' が大きいほど PWP_{max}/σ_c' は、1 に近い傾向にある。

(2) 動的せん断強度に及ぼすダイレイタンスの影響

密な粗粒材料の非排水条件での動的せん断強度は、ダイレイタンスに起因する過剰間隙水圧の発生量に

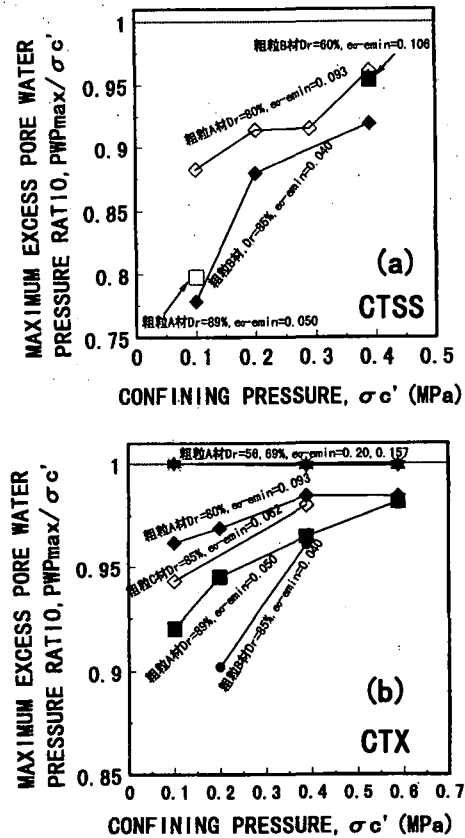


図-4 最大過剰間隙水圧比と拘束圧の関係

大きな影響を受ける¹²⁾。そこで、礫材質の異なる粗粒 A,B,C 材と密な豊浦砂 I についての余裕間隙比 $e_0 - e_{min}$ と MTX 試験による最大ダイレイタンス係数 $(-dv/d\varepsilon)_{max}$ の関係を図-5 に示す。 $e_0 - e_{min}$ が小さく、また、拘束圧 σ_c' が小さいほど $(-dv/d\varepsilon)_{max}$ は大きい。また両者の関係は、材料が異なる場合でも図中に示す同一拘束圧 σ_c' のライン上にほぼ載っている。

図-6 は、ねじり単純せん断試験および三軸試験による $(-dv/d\gamma)_{max}$ と PWP_{max}/σ_c' の関係を示す。図-6(a)は、ねじり単純せん断試験(MTSS,CTSS)による結果を示す。両者の間には直線関係があり、 $(-dv/d\gamma)_{max}$ が大きいほど、 PWP_{max}/σ_c' は小さい。また、図-6(b)に示す三軸試験(MTX,CTX)による結果も同様の傾向を示す。

CTSS 試験の結果から、繰返し载荷 10 回で標準片振幅せん断ひずみ $\gamma_{ss} = (2.25\%, 3.0\%, 3.75\%)$ を発生させるのに必要なせん断応力比を動的せん断強度 $SR_{10}(\gamma_{ss})$ とした。ここで、粗粒材料を対象としているため、メンブレンの貫入によるメンブレン・コンプライアンスの影響が大きいことを考慮し、メンブレン・コンプライアンスの補正として、繰返しせん断応力比を一律 10% 低減した⁹⁾。 $SR_{10}(\gamma_{ss} = 2.25 \sim 3.75\%)$ と $(-dv/d\gamma)_{max}$ の関係を図-7 に示す。両者には、直線関係があり、 $(-dv/d\gamma)_{max}$ が大きくなると、 $SR_{10}(\gamma_{ss})$ も大きくなる。また、図中の①～③は、 γ_{ss} がそれぞれ

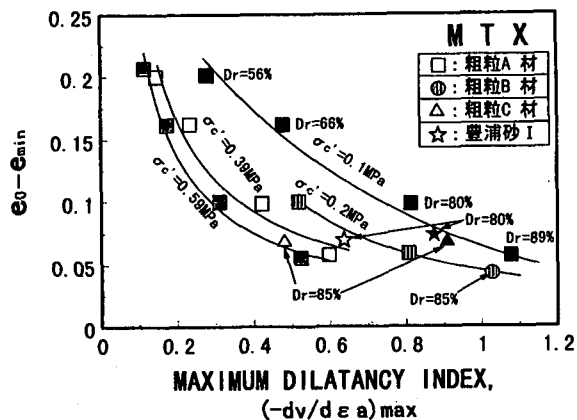


図-5 余裕間隙比と最大ダイレイタンス係数の関係

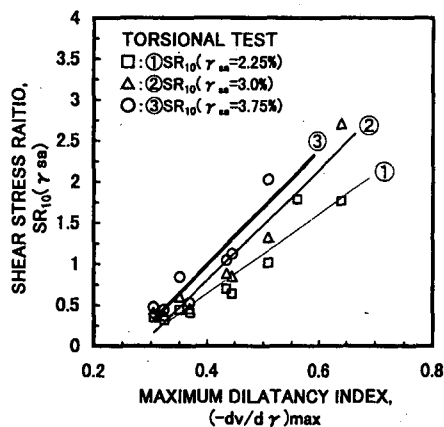


図-7 動的せん断強度（せん断応力比）と最大ダイレイタンス係数の関係

2.25%, 3.0%, 3.75%の SR_{10} のプロットを回帰した直線である。 γ_{ss} の増分は、均等に 0.75% であるが、①～③の勾配変化は、 γ_{ss} が大きくなるほど小さくなっている。

図-6, 7 より最大間隙水圧比 PWP_{max}/σ'_c および動的せん断強度 $SR_{10}(\gamma_{ss})$ は、供試体のダイレイタンス特性に影響を受け、最大ダイレイタンス係数と直線的な関係にある。最大ダイレイタンス係数は、図-5 に示したように、余裕間隙比 $e_0 - e_{min}$ と拘束圧 σ'_c で整理できる。また、 $e_0 - e_{min}$ は、 $(1 - Dr) \cdot (e_{max} - e_{min})$ と表現できることより、供試体の締めりぐあいと材料自体の密度特性によって決まる。以上のことより、粗粒材料の動的せん断強度は、拘束圧 (σ'_c) と締めりぐあい (Dr)、および材料自体の密度特性 ($e_{max} - e_{min}$) から推定できるといえる。

4. まとめ

礫質の異なる 3 種の粗粒材料について、ねじり単純せん断試験と三軸試験を実施し、粗粒材料の過剰間隙水圧の発生特性および動的せん断強度特性を検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

①粗粒材料の過剰間隙水圧の上昇過程は、密な砂の

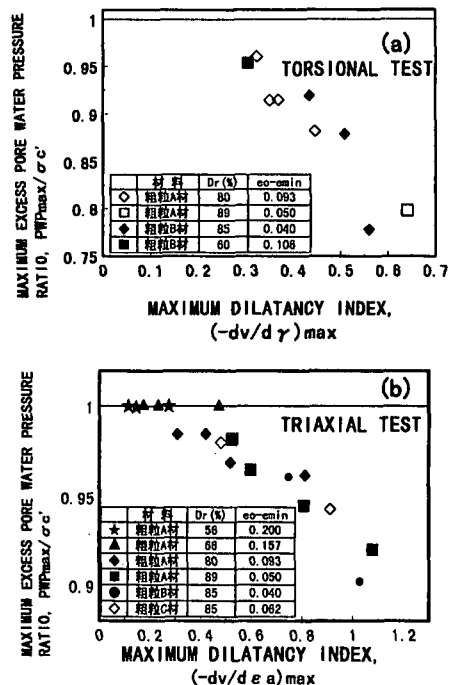


図-6 最大過剰間隙水圧比と最大ダイレイタンス係数の関係

ケースと同様であり、繰返し载荷の初期段階で急激に上昇する。また、密な粗粒材料では最大過剰間隙水圧比は 1 にまで上昇せず、有効応力は 0 まで低下しない。

②余裕間隙比 $e_0 - e_{min}$ は、過剰間隙水圧 PWP の発生量に影響を及ぼし、 $e_0 - e_{min}$ が大きくなると PWP の発生量は大きい。

③最大ダイレイタンス係数が大きいほど、過剰間隙水圧比は小さく、また、動的せん断強度を規定するせん断応力比は大きくなり、その関係は直線的である。

参考文献

- 1) 津國正一, 岩下友也, 館野 悟, 中村 昭: 初期せん断応力が作用する密な粗粒材料の動的強度特性, 第 31 回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, pp.1077-1078, 1996.7.
- 2) 館野悟, 岩下友也, 津國正一, 中村昭: 礫形状の異なる密な粗粒材料の動的強度特性, 第 51 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, pp.224-225, 1996.9.
- 3) 館野悟, 岩下友也, 吉田等, 津國正一: 粗粒材料の動的せん断強度特性に及ぼすダイレイタンス特性の影響, 第 52 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 1997.9.
- 4) 今井常雄, 田耕一郎: 動的くり返しせん断による砂質土の間隙水圧上昇過程, 第 5 回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.601-608, 1978.
- 5) 石原研而: 土質力学の基礎, 鹿島出版会, 1982.
- 6) 安田成夫, 中村昭, 高橋三津彦, 多賀恭一: 繰返しねじり単純せん断試験による粗粒材料の動的強度, 第 29 回土質工学研究発表会講演集, 土質工学会, pp.895-896, 1993.6.