

相似粒度による単粒度碎石の強度・変形特性に及ぼす繰返し载荷履歴の影響

The effect of cyclic prestraining on the strength and deformation characteristics of the poorly-graded crushed gravels on the similar grain size distribution

室蘭工業大学工学部 ○正 員 木幡行宏 (Yukihiro Kohata)
(財)鉄道総合技術研究所 正 員 関根悦夫 (Etsuo Sekine)

1. まえがき

従来、粗粒材料の研究においては、原粒度の最大粒径が大きいために、室内試験では相似粒度やせん頭粒度に調整した試料を用いる場合が多い¹⁾。これまでの筆者らの研究においても、鉄道の道床バラストの粒度分布に相似な粒度で試験を行ってきたが^{2,3)}、厳密に相似な粒度に調整した単粒度碎石を用いた三軸せん断特性の比較検討を行っていない。一方、鉄道の軌道部で用いられる道床バラストの粒度分布は、基準となる上限と下限の粒径加積曲線の範囲内で規定されているが、沈下が生じにくい粒度分布については示されていない。

そこで、本研究では、バラストの強度・変形特性の基礎的研究として、道床バラストの粒度分布に相似な4種類の粒度に調整した単粒度碎石に対して、繰返し履歴を与えた場合と与えない場合について、単調载荷三軸圧縮試験および繰返し三軸試験を実施し、粒度分布が異なる場合の強度・変形特性に及ぼす繰返し载荷履歴の影響について検討した。

2. 試料および実験

実験に用いた単粒度碎石は、甲州産の安山岩碎石で、2種類の道床バラストの粒度分布に対して、相似比を1/3および1/5の相似粒度に調整した4種類の単粒度碎石(以下、1/3A、1/5A、1/3B、1/5Bと呼ぶ)である。図-1にそれぞれの試料の粒度分布を示す。なお、図中に示すように、均等係数を1.5に調整した試料をA試料、1.71に調整した試料をB試料とした。

供試体は、締固めエネルギーを一定にすることを目的として、直径15 cm、高さ36 cmの円柱モールドに碎石を6層に分け、各層毎に上载荷式振動バイブレーターによって3分間振動締固めを行って作製した。供試体作製終了後、等方応力状態で拘束圧29.4 kPaを負圧によって与え、14時間程度圧密した。その後、繰返し载荷を与える場合には等方応力状態から繰返し载荷の中心荷重である $q = 60 \text{ kPa}$ の異方応力状態にし、軸差応力振幅100 kPa ($q_{\text{max}} = 110 \text{ kPa}$, $q_{\text{min}} = 10 \text{ kPa}$)の正弦波载荷を载荷周期0.25 Hzで10000回与え、繰返し载荷終了後、供試体を29.4 kPaの等方応力状態に戻した。等方圧密終了後、繰返し载荷履歴を与えない場合および繰返し载荷終了後の供試体に対して、軸ひずみ速度0.05%/minで単調载荷三軸圧縮試験(排気・排水条件)を行なった。また、繰返し三軸試験は、等方圧密終了後もしくは10000万回の繰返し载荷終了後に、29.4 kPaの等方応力状態から载荷周波数0.1 Hzで各ステップ毎に15回の繰返し载荷を両振り正弦

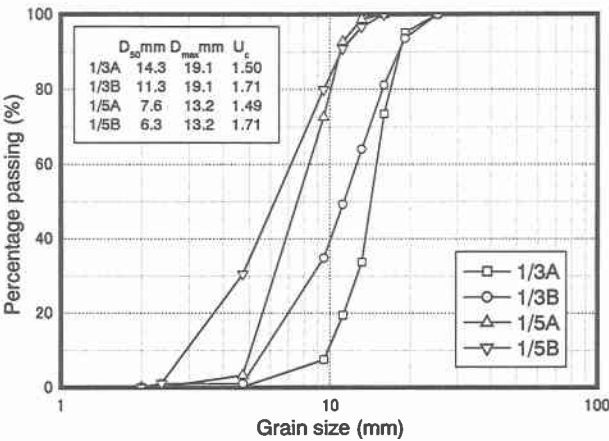


図-1 試料の粒度分布

表-2 供試体の初期乾燥密度

試料名	せん断時 载荷方法	繰返し载荷 履歴の有無	初期乾燥密度
1/3A	ML	Virgin	1.602 (g/cm ³)
		prestrained	1.583 (g/cm ³)
	CL	Virgin	1.580 (g/cm ³)
		prestrained	1.592 (g/cm ³)
1/3B	ML	Virgin	1.584 (g/cm ³)
		prestrained	1.618 (g/cm ³)
	CL	Virgin	1.629 (g/cm ³)
		prestrained	1.617 (g/cm ³)
1/5A	ML(01)	Virgin	1.602 (g/cm ³)
		prestrained	1.613 (g/cm ³)
	CL	Virgin	1.586 (g/cm ³)
		prestrained	1.590 (g/cm ³)
1/5B	ML(01)	Virgin	1.654 (g/cm ³)
		prestrained	1.661 (g/cm ³)
	CL	Virgin	1.641 (g/cm ³)
		prestrained	1.638 (g/cm ³)

波によって行った。表-1に、各供試体の初期乾燥密度を示す。表中、Virginは繰返し载荷履歴無し、Prestrainedは繰返し载荷履歴有りを表している。また、MLは単調载荷三軸圧縮試験、CLは繰返し三軸試験に用いた供試体を表しており、1/5試料のML(01)は、昨年度、軸ひずみ速度0.02%/minで実施した単調载荷三軸圧縮試験の結果である。供試体作製時の初期乾燥密度は、B試料がA試料に比べて大きい傾向にあり、1/3試料と1/5試料では顕著な差は見られない。

試験装置は、中型三軸試験装置を用い、供試体成形時に生じる供試体上下端面の緩み層や紙などに起因する

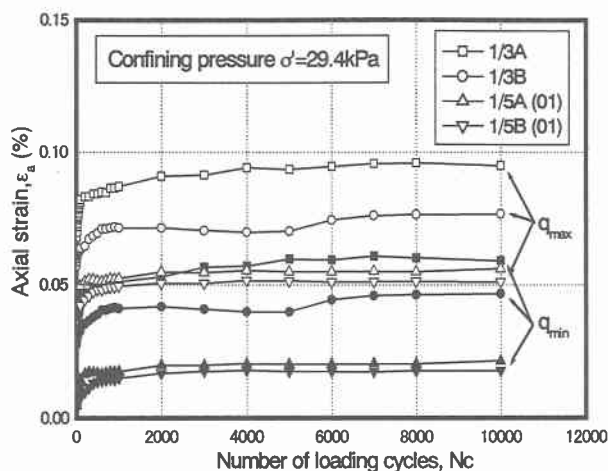


図-2 軸ひずみと載荷回数との関係

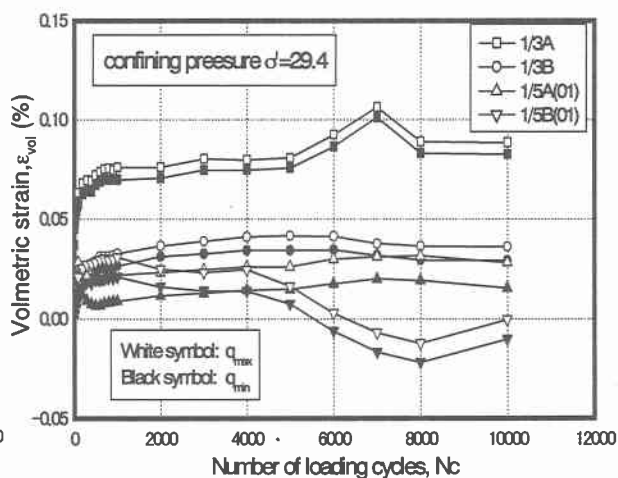


図-3 体積ひずみと載荷回数との関係

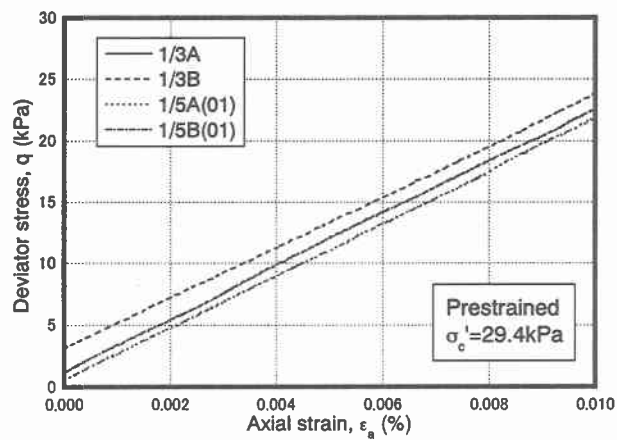
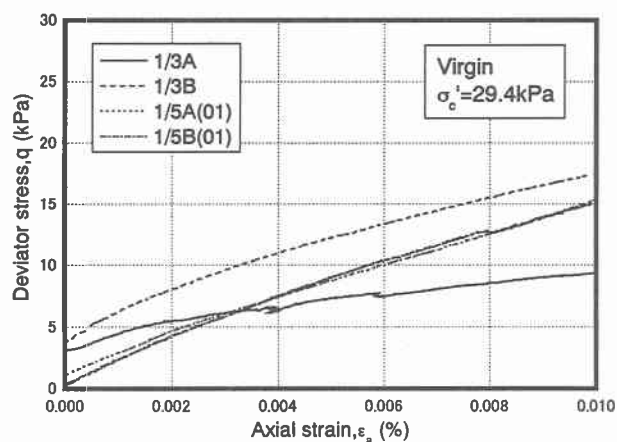
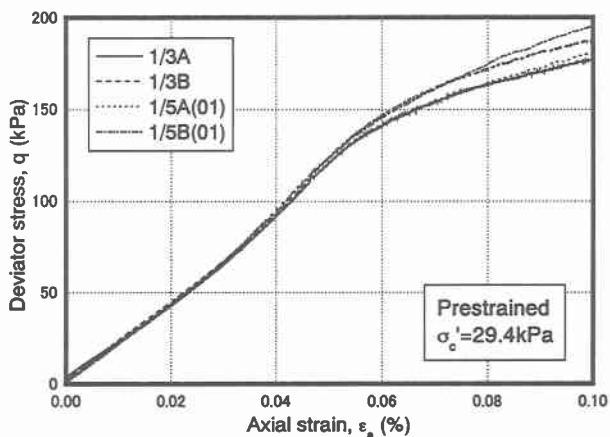
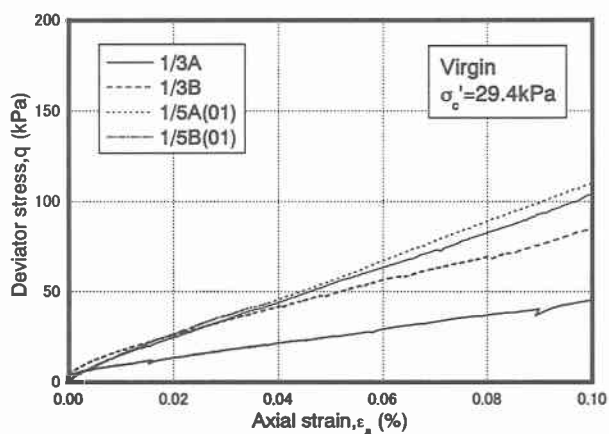
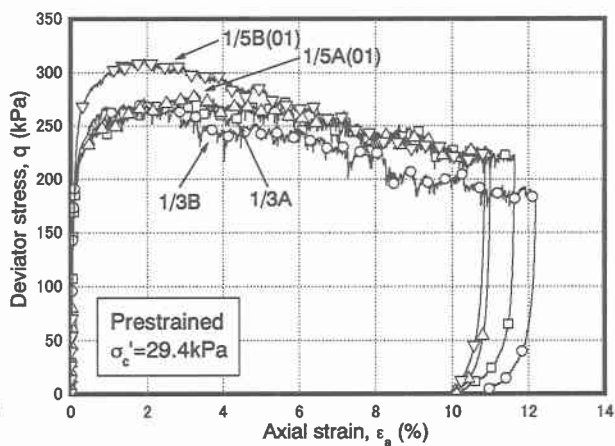
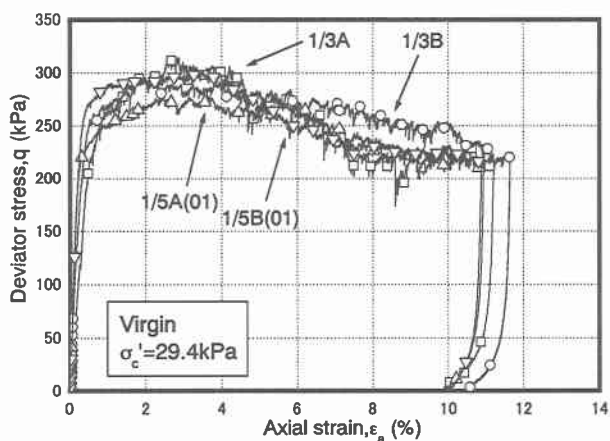


図-4 $q-\epsilon_a$ 関係 (virgin)

図-5 $q-\epsilon_a$ 関係 (prestrained)

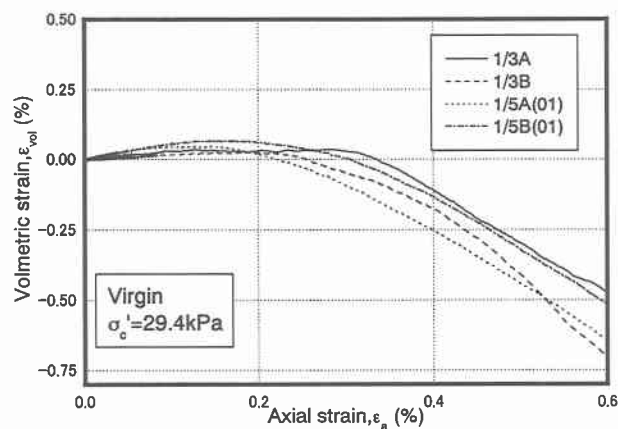


図-6 (a) $\epsilon_{vol} - \epsilon_a$ 関係 (virgin)

ベディングエラーの影響を考慮して、軸変位を局所変形測定装置 (Local Deformation Transducer, LDT) によって供試体側面で直接測定した。なお、LDT では軸ひずみが約 2% までしか測定できないため、それを越える範囲の軸ひずみはキャップの変位を測定する非接触変位計と外部変位計による測定値からベディングエラー量を差し引いて補正した値を用いた。また、1 対の非接触変位計を供試体の上下 2 力所に設置して、側方変位を供試体側面で直接測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 単調荷重三軸圧縮試験の応力～ひずみ関係

図-2 は 10000 万回までの繰返し荷重中の累積軸ひずみ ϵ_a と繰返し荷重回数 N_c の関係を示している。なお、図中において、 q_{max} は履歴ループにおける最大軸差応力時の累積軸ひずみを、 q_{min} は履歴ループにおける最小軸差応力時の累積軸ひずみをそれぞれ示している。繰返し荷重中の ϵ_a は、1/5A、1/5B で $N_c \approx 2000$ 程度で収束傾向となるのに対して、1/3A、1/3B では $N_c \approx 6000$ 程度で収束傾向にある。また、繰返し荷重終了時の ϵ_a の値を比較すると、1/3A が最も大きく、1/3B、1/5A、1/5B の順に小さくなっている。図-3 は繰返し荷重中の累積体積ひずみ ϵ_{vol} と繰返し荷重回数 N_c の関係を示している。1/3A は 6000～8000 回の間に膨張傾向を示すが、全体的に見ると、荷重初期から荷重終了時まで収縮傾向にあると言える。一方、1/5B は荷重初期にわずかに収縮傾向を示した後、 $N_c \approx 4000$ 程度から大きく膨張に転じている。荷重初期に注目すると、1/3 試料は収縮傾向、1/5 試料は膨張傾向にあることが特徴的である。図-4 に繰返し荷重履歴無し、図-5 に繰返し荷重履歴有りの単調荷重三軸圧縮試験による軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a の関係をそれぞれ示す。最大軸差応力 q_{max} に注目すると、繰返し荷重履歴を与えない場合には、すべての試料で顕著な差は見られないが、繰返し荷重履歴を与えた場合には、1/3 試料に比べて 1/5 試料の q_{max} が大きい傾向にあり、特に 1/5B が大きい。繰返し荷重履歴の有無での比較では、1/5 試料の q_{max} に顕著な差が見られないのに対して、1/3 試料では繰返し荷重履歴の影響により、繰返し荷重履歴を与えた場合の q_{max} は与えない場合の q_{max} に比べて小さい。一方、軸ひずみ

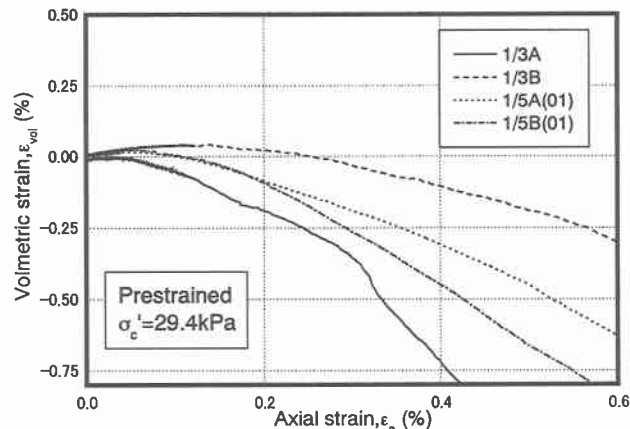


図-6 (b) $\epsilon_{vol} - \epsilon_a$ 関係 (prestrained)

0.1% までの小ひずみ領域における $q - \epsilon_a$ 関係は、繰返し荷重履歴を与えた場合には S 字型を示している。これは従来の粗粒材料の変形特性に関する報告と同様であり、繰返し荷重時の q_{max} における範囲内で弾性的性質が卓越したためであると考えられる。0.01% までの微小ひずみ領域における $q - \epsilon_a$ 関係は、繰返し荷重履歴を与えた場合には、ほぼ線形であるのに対して、与えない場合には非線形であり、特に 1/3A 試料で非線形性が顕著である。図-6 は体積ひずみ ϵ_{vol} と軸ひずみ ϵ_a の関係である。繰返し荷重履歴を与えない場合には、粒度によらず、荷重初期に膨張傾向を示した後、収縮傾向に転じており、ダイレイタンス特性に及ぼす粒度分布の影響は顕著に見られない。一方、繰返し荷重履歴を与えた場合には、粒度によってダイレイタンス特性は異なり、1/3A で膨張傾向が最も大きく、1/3B で最も小さい。

3.2 変形係数のひずみレベル依存性

図-7 は図-4、5 に示した単調荷重三軸圧縮試験による $q - \epsilon_a$ 関係における接線勾配で定義した接線変形係数 E_{tan} のひずみレベル依存性を示している。繰返し荷重履歴を与えない場合には (図-7(a))、粒度によらず E_{tan} は ϵ_a の増加とともに減少傾向にあり、初期剛性は A 試料に比べて B 試料が大きい傾向にある。一方、履歴を与えた場合には (図-7(b))、粒度によらず $E_{tan} - \log \epsilon_a$ 関係はほぼ等しく、初期の E_{tan} は 200 MPa 程度であり、0.01% 程度まで一定である。その後、繰返し荷重時の q_{max} に相当する $q = 110$ kPa のひずみレベル、すなわち $\epsilon_a = 0.04$ % 程度まで E_{tan} は増加傾向を示した後、減少に転じている。

図-8 には、等方応力状態から実施した繰返し三軸試験によって得られた等価ヤング率 E_{eq} および履歴減衰係数 h と片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ の関係を示す。本研究は、低拘束圧状態にあると考えられる道床バラストの強度・変形特性の検討であるため、本実験では拘束圧を 29.4 kPa に設定した。そのため、等方応力状態から両振りで実施した繰返し三軸試験では、伸張側での荷重を大きくすることができなかったため、片振幅軸ひずみを 0.03% 程度までしか実施できなかった。したがって、図-8 は小ひずみレベルでの結果である。粒度分布、繰返し荷重履歴の有無に関わらず、 $E_{eq} - \log (\epsilon_a)_{SA}$ 関係、 $h - \log (\epsilon_a)_{SA}$ 関係は

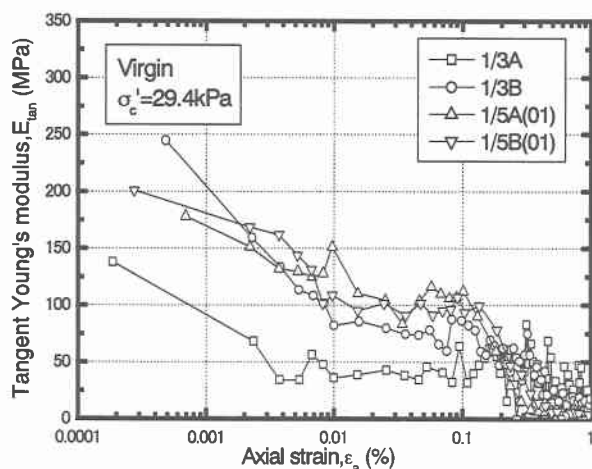


図-7 (a) E_{tan} - q 関係 (virgin)

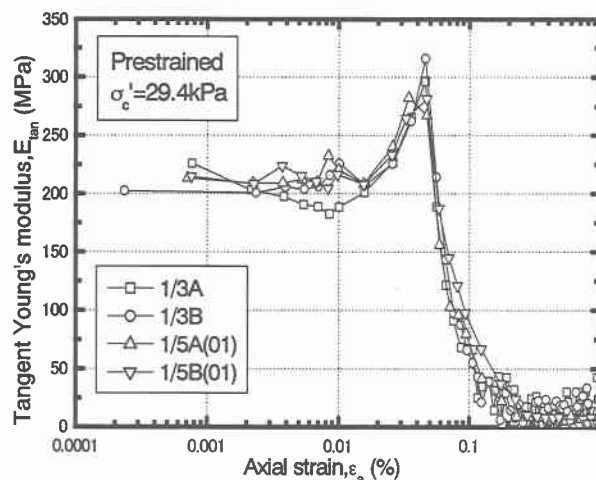


図-7 (b) E_{tan} - q 関係 (prestrained)

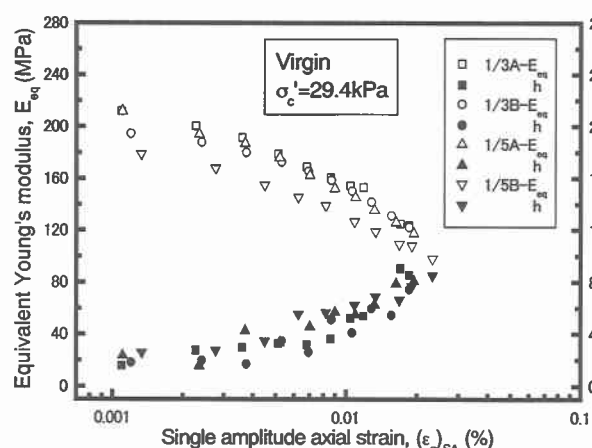


図-8 (a) E_{eq} , h -(ϵ_a)_{SA} 関係 (virgin)

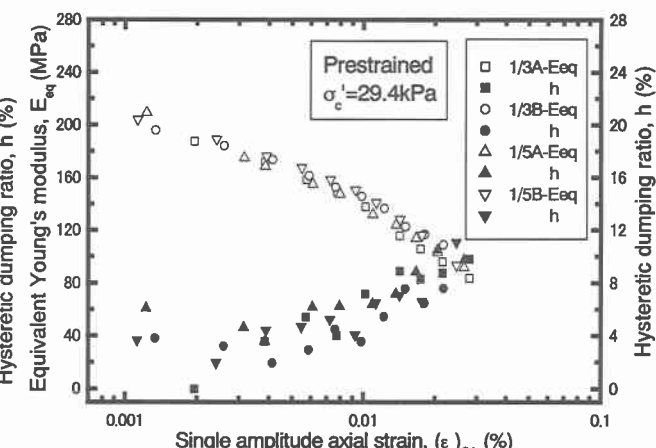


図-8 (b) E_{eq} , h -(ϵ_a)_{SA} 関係 (prestrained)

ほぼ等しい。特に、繰返し載荷履歴を与えた場合、単調載荷試験で見られたような変形係数の増加傾向は見られない。また、初期剛性についてもすべての試料で同程度の値（200 MPa 程度）を示している。一方、履歴減衰係数は、繰返し載荷履歴を与えた場合、載荷初期から減少した後、増加傾向を示している。

4. まとめ

均等係数が異なる2種類の道床バラストに相似な粒度で調整した4種類の単粒度碎石に対して、粒度分布および繰返し載荷履歴の影響を検討するために実施した単調載荷三軸圧縮試験、繰返し載荷三軸試験の結果から以下の知見が得られた。

- 1) 締固めエネルギーを一定にして供試体を作製する場合には、均等係数が大きいB試料の初期乾燥密度が大きい傾向にある。
- 2) 圧縮側での繰返し載荷中において、載荷初期には粒径が大きい1/3試料で収縮傾向、粒径が小さい1/5試料で膨張傾向を示す。
- 3) 繰返し載荷履歴を与えない場合の相似粒度での q_{max} はほぼ等しいが、繰返し載荷履歴を与えた1/3試料で q_{max} が減少したことから、粒径が大きい場合に繰返し載荷履歴の影響が見られる。

歴の影響が見られる。

- 4) 繰返し載荷履歴を与えると、せん断中のダイレイタンスー特性は粒度分布により異なる。
- 5) 粒度分布、繰返し載荷履歴の有無に関わらず、 E_{eq} - $\log(\epsilon_a)_{SA}$ 関係、 h - $\log(\epsilon_a)_{SA}$ 関係はほぼ等しく、繰返し載荷履歴を与えた場合には、単調載荷試験で見られたような変形係数の増加傾向は見られない。

＜謝辞＞ 本研究の遂行にあたっては、試料の提供を JR 東日本（鉄道総研出向）の石川達也氏（現 北海道大学大学院）、実験および結果の整理については、室蘭工業大学 4 年、井口充君、三浦宏介君に多大な協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 粗粒材料の現場締固め、土質工学会、1990。
- 2) 木幡ら：繰返し載荷履歴を受ける単粒度碎石の変形特性、鉄道力学論文集、第5号、pp.61-65、2001。
- 3) 只野尚徳、木幡行宏：単粒度碎石の三軸せん断特性に及ぼす粒子形状の影響、地盤工学会北海道支部技術報告集、第41号、pp.183-192、2001。