

単粒度碎石の強度・変形特性に及ぼす密度および粒度分布の影響

The effect of density and grain size distribution on the strength and deformation properties of the poorly-graded crushed gravels

室蘭工業大学工学部 ○正 員 木幡行宏 (Yukihiko Kohata)
 室蘭工業大学大学院 三浦宏介 (Kosuke Miura)

1. まえがき

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。道床バラストの強度・変形特性を原粒度のまま室内要素試験によって検討する場合には、バラストの最大粒径が 60mm であるため、大型三軸試験装置を用いることが多いが、従来、粗粒材料の研究においては、相似粒度に調整した試料を用いても、その変形・強度特性に大きな違いは見られないとされていることから¹⁾、これまでの筆者らの研究においては、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²⁻⁴⁾。

本研究では、我が国で用いられている道床バラストの粒度分布の基準範囲内において、道床沈下が生じにくい粒度分布を求めることを目的として、実際の道床バラストについて、粗粒な場合と細粒な場合の粒度分布（2種類）に相似な粒度（相似比 1/5）に調整した単粒度碎石に対して、単調載荷三軸圧縮試験を実施し、道床バラストの強度・変形特性に及ぼす密度および粒度分布の影響について検討した。さらに、繰返し載荷履歴の有無による比較・検討を行った。

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、道床バラストの基準粒度範囲内にある2種類（粗粒な試料：A 試料 ($U_c=1.5$)、細粒な試料：B 試料 ($U_c=1.71$)）の粒度分布に対して、相似比 1/5 ($D_{max} = 13.2\text{mm}$)に粒度調整した単粒度碎石(1/5A($D_{50}=7.6\text{mm}$), 1/5B($D_{50}=6.3\text{mm}$))を用いた。図-1にそれぞれの試料の粒径加積曲線を示す。

本研究では、密度の影響を検討するために、緩い供試体(Loose)と密な供試体(Dense)を作製した。供試体の作製においては、現場での道床更替作業と同じ条件とするために、締めエネルギーを一定にすることに留意した。供試体は、直径 15 cm、高さ 36 cm の円柱モールドに碎石を6層に分け、緩い場合にはハンドスコップを用いた自由落下により、また、密な場合には各層毎に上載荷式振動バイブレーターによって3分間振動締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、繰返し載荷を与える場合には等方応力状態から繰返し載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 ($q_{max} = 110 \text{ kPa}$, $q_{min} = 10 \text{ kPa}$)の正弦波載荷を載荷周期 0.25 Hz で 10000 回与え、繰返し載荷終了後、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、繰返し載荷履歴を与えない場合および繰返

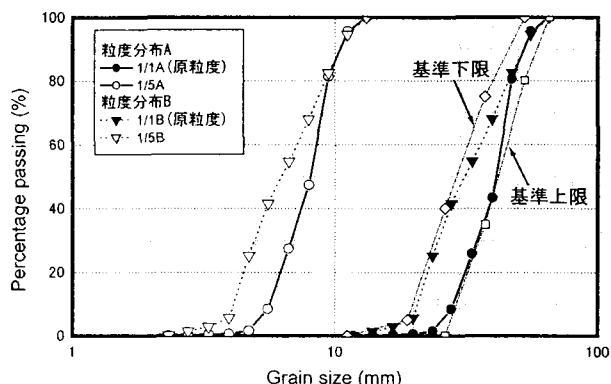


図-1 試料の粒度分布

表-1 供試体の初期乾燥密度及び相対密度

試料	供試体の初期状態	繰返し載荷履歴の有無	初期乾燥密度 (g/cm ³)	相対密度 Dr (%)
1/5A	Dense	Virgin	1.602	86.4
		Prestrained	1.613	89.6
	Loose	Virgin	1.444	35.1
		Prestrained	1.406	21.0
1/5B	Dense	Virgin	1.654	88.0
		Prestrained	1.661	90.0
	Loose	Virgin	1.418	11.1
		Prestrained	1.427	14.9

し載荷終了後の供試体に対して、軸ひずみ速度 0.05 %/min で単調載荷三軸圧縮試験（排気・排水条件）を行なった。表-1に、各供試体の初期乾燥密度と相対密度を示す。表中、Virgin は繰返し載荷履歴を与えない場合、Prestrained は繰返し載荷履歴を与えた場合を表している。相対密度を算出する際の 1/5A、1/5B 試料に対する最小密度・最大密度は、本研究で用いたモールドによる最小密度・最大密度試験を実施し、1/5A、1/5B 試料の最小密度として、1.353 g/cm³、1.389 g/cm³、最大密度として、1.650 g/cm³、1.698 g/cm³をそれぞれ得た。表-1より、供試体作製時の初期乾燥密度は、B 試料が A 試料に比べて概ね大きい傾向にある。一方、緩い場合の相対密度に注目すると、A 試料の相対密度が B 試料に比べて大きい傾向にある。これは、本研究では、緩い供試体を自由落下によって作製したが、供試体に与えるエネルギーの観点からするとバラツキが生じたため、初期状態が一定ではなかったことが考えられる。

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ろ紙などに起因する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

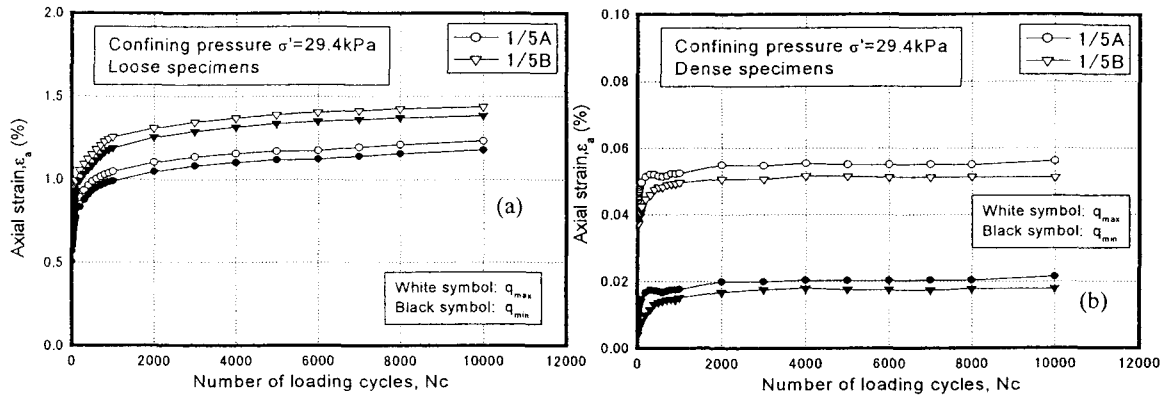


図-2 軸ひずみと載荷回数の関係：(a) 緩い場合 (b) 密な場合

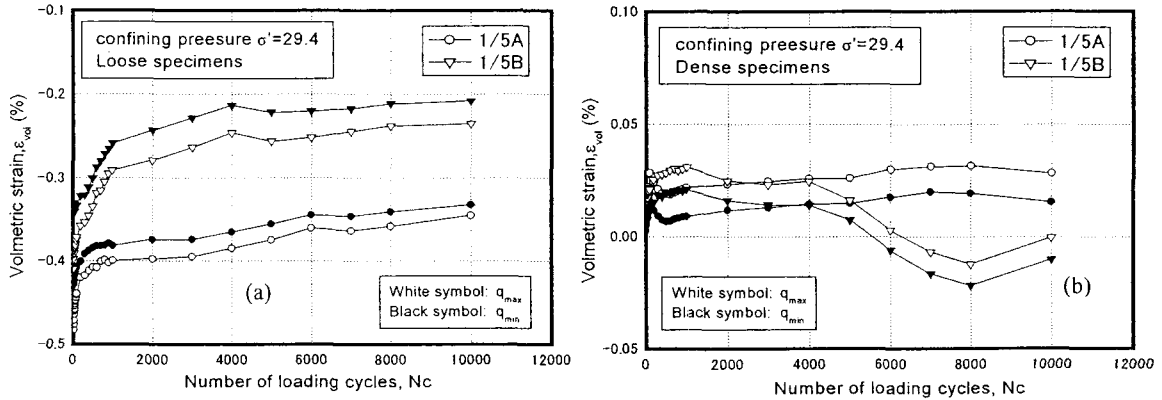


図-3 体積ひずみと載荷回数の関係：(a) 緩い場合 (b) 密な場合

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カ所に設置して、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 繰返し載荷中の変形特性

図-2(a),(b)は緩い場合と密な場合の1万回までの繰返し載荷中の累積軸ひずみ ϵ_a と繰返し載荷回数 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。緩い場合の ϵ_a は、密な場合の ϵ_a に比べて、30倍程度の累積軸ひずみが発生している。また、緩い場合には累積軸ひずみ量は、1/5Aに比べて1/5Bのほうが大きいものに対して、密な場合には、僅かではあるが、1/5Aのほうが大きい。一方、本研究と同じ試料を用いて実施した石川らの移動載荷による模型試験結果によれば、均等係数が小さく緩い場合の1/5Aのほうが移動繰返し載荷により発生する沈下量が大きいことが報告されている⁵⁾。これらの結果の違いは、本研究での緩い場合の供試体作製方法が異なることと1/5Bの相対密度が、1/5Aに比べて小さくなったことに起因しているものと思われる。図-3(a),(b)は、繰返し載荷中の累積体積ひずみ ϵ_{vol} と繰返し載荷回数 N_c の関係を示している。緩い場合には、1/5A、1/5Bともに、収縮傾向を示しているが、4000回以降では、1/5Aの累積体積ひずみの発生量が大きい。密な

場合には、1/5Aはほぼ一定、1/5Bは4000回程度から大きく膨張傾向に転じている。

以上より、繰返し載荷中の変形特性は、A試料のほうがB試料に比べて変形しやすい、すなわち沈下しやすいということが推察される。

3.2 三軸せん断中の応力～ひずみ関係

図-4に繰返し載荷履歴を与えない場合、図-5に繰返し載荷履歴を与えた場合の単調載荷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。繰返し載荷履歴の有無に関わらず、密な場合の q_{max} が緩い場合の q_{max} に比べて1.5倍程度大きい。言い換えると、 q_{max} には、繰返し載荷履歴の影響に顕著な差が見られないと言える。1/5Aと1/5Bの q_{max} を比較すると、繰返し載荷履歴の有無に関わらず、密な場合には、B試料のほうが大きい、緩い場合には、顕著な差が見られない。これは、前節で述べたように、緩い場合の供試体作製方法に起因しているものと思われる。また、緩い場合の q - ϵ_a 関係では、繰返し載荷履歴を与えない場合と与えた場合に比べて、顕著な非線形性を示している。この傾向は、微小ひずみレベルにおける q - ϵ_a 関係においても顕著である(図-4(c))。一方、軸ひずみ0.1%までの微小ひずみ領域における q - ϵ_a 関係は、繰返し載荷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、繰返し載荷時の 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。特に、繰返し載荷履歴を与えた場合の緩い供試体でS字型の程度が大きい。すなわち、緩い場合の変形特性は、

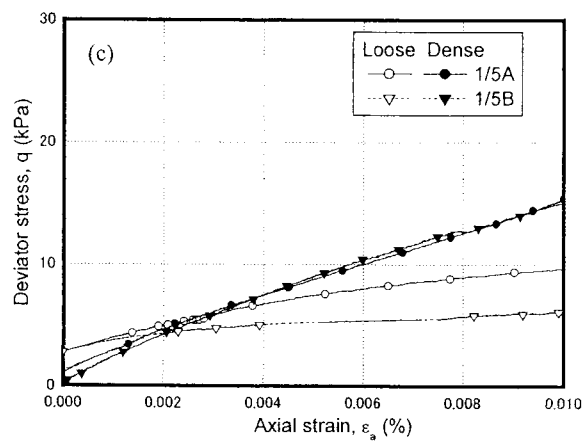
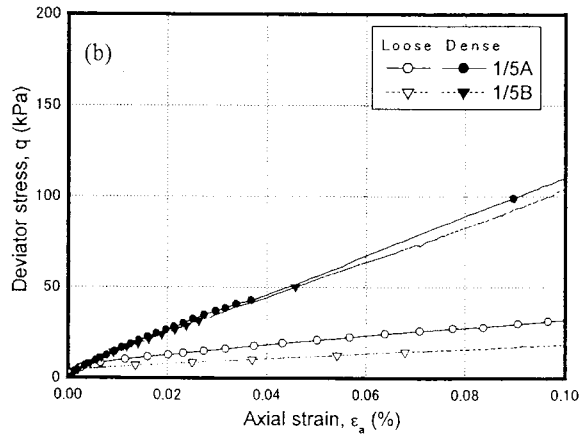
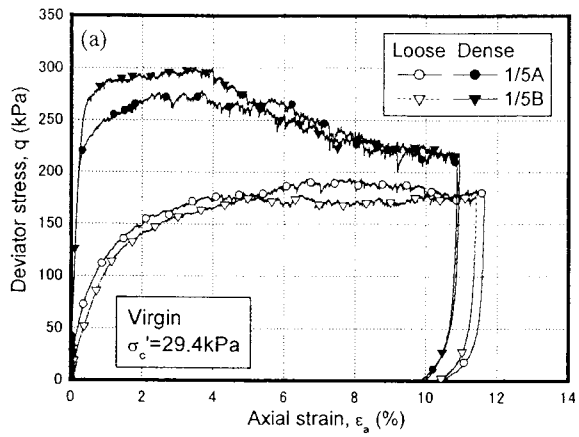


図-4 $q-\varepsilon_a$ 関係 (virgin)

繰返し載荷履歴の影響が顕著であると考えられる。

以上より、本研究の範囲内では、密な場合には、1/5Aに比べて1/5Bの q_{max} が大きいものに対して、緩い場合にはA、B試料で q_{max} に顕著な差が見られないこと、繰返し載荷履歴を与えない場合には、緩い場合の変形特性は密な場合に比べて強い非線形性を示すこと、繰返し載荷履歴を与える場合には、緩い場合の小ひずみレベルにおける $q-\varepsilon_a$ 関係のS字型の程度が大きくなることが分かった。

3.3 体積ひずみ～軸ひずみ関係

図-6は体積ひずみ ε_{vol} と軸ひずみ ε_a の関係であり、(a)は繰返し載荷履歴を与えない場合、(b)は繰返し載荷履歴を与えた場合の密度および粒度分布の違いによる比較をそれぞれ示す。繰返し載荷履歴を与えない場合には、粒

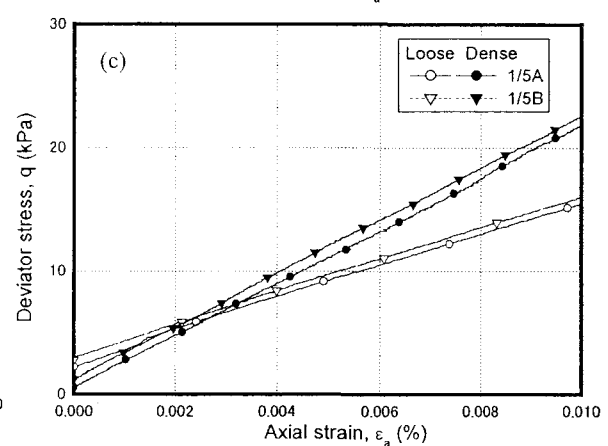
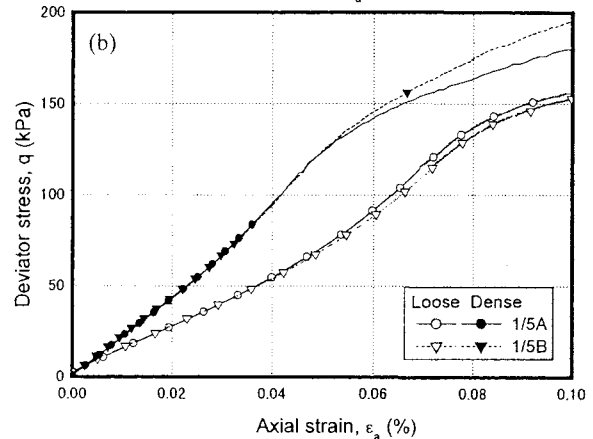
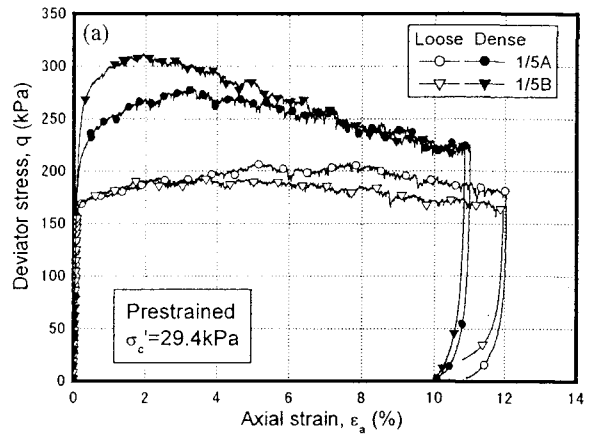


図-5 $q-\varepsilon_a$ 関係 (prestrained)

度によらず、 $\varepsilon_{vol}-\varepsilon_a$ 関係は同様の傾向を示していることから、ダイレイタンスー特性に及ぼす粒度分布の影響は顕著に見られない。一般に、ダイレイタンスー特性に及ぼす密度の影響は大きいですが、本研究の緩い場合には軸ひずみが0.7%程度まで収縮傾向を示している。一方、1/5Aと1/5Bのダイレイタンスー特性を比較すると、繰返し載荷履歴を与えない場合には顕著な差が見られないが、繰返し載荷履歴を与えた場合には、1/5Bのほうが1/5Aに比べて正のダイレイタンスー特性の程度が大きい。

3.4 変形係数のひずみレベル依存性

図-7は図-4、5に示した単調載荷三軸圧縮試験による $q-\varepsilon_a$ 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す。繰返し載荷履歴を与えな

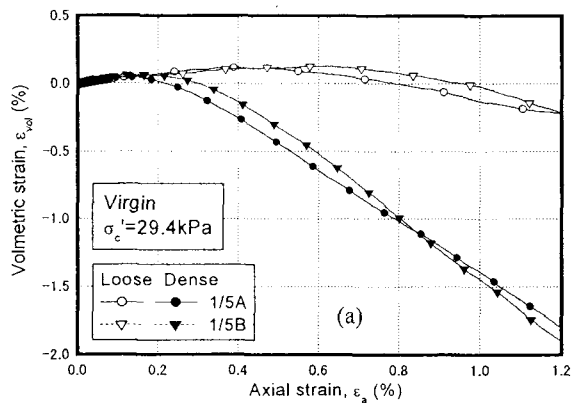


図-6 (a) $\varepsilon_{vol} - \varepsilon_a$ 関係 (virgin)

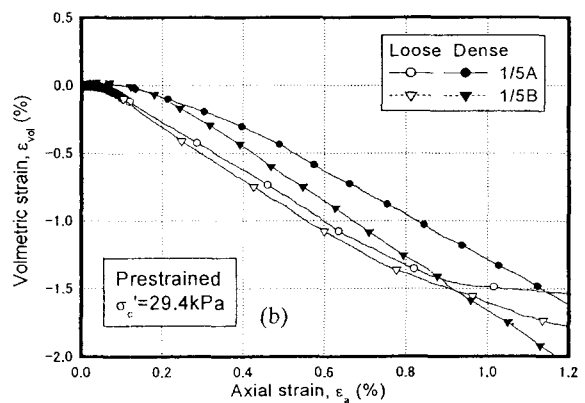


図-6 (b) $\varepsilon_{vol} - \varepsilon_a$ 関係 (prestrained)

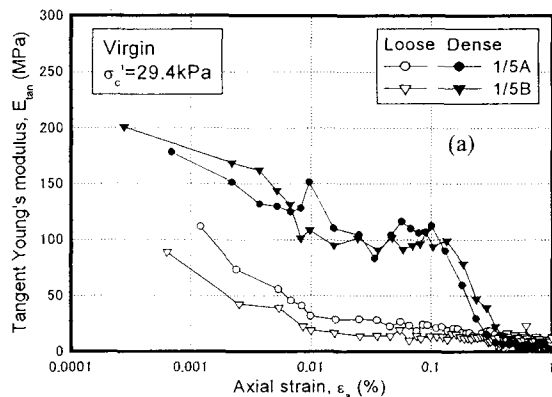


図-7 (a) $E_{tan} - q$ 関係 (virgin)

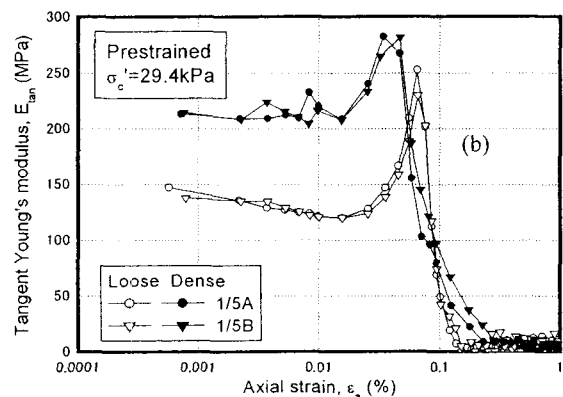


図-7 (b) $E_{tan} - q$ 関係 (prestrained)

い場合には (図-7(a)), 緩い場合の初期変形係数は, 密な場合の 1/2 程度であり, 繰返し載荷履歴を与えた場合には, 緩い場合の初期変形係数は, 密な場合の 2/3 程度である。また, 繰返し載荷履歴を与えた場合には, ε_a が 0.02 %程度 (繰返し載荷時の q_{max} に相当する $q=110$ kPa のひずみレベル) から E_{tan} が増加傾向を示しており, 特に, 緩い場合の E_{tan} は 250MPa, すなわち, 密な場合の E_{tan} と同程度の値まで増加している。このことから, 繰返し載荷履歴を与えると, 初期状態が緩い場合でも, 繰返し載荷時の最大荷重よりやや小さい荷重下では, かなりの剛性が期待できることが推察される。一方, 1/5A, 1/5B の比較では, 密度や繰返し履歴の有無に関わらず, $E_{tan} - \log \varepsilon_a$ 関係に顕著な差が見られない。

4. まとめ

実際の道床バラストの粗粒な場合と細粒な場合の粒度分布 (2種類) に相似な粒度 (相似比 1/5) に調整した単粒度碎石に対して, 強度・変形特性に及ぼす密度および粒度分布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の結果から以下の知見が得られた。

- 1) 供試体作製時の初期乾燥密度は, B 試料が A 試料に比べて概ね大きい傾向にあるが, 緩い場合には, A 試料の相対密度が, B 試料に比べて大きい傾向にある。これは, 緩い供試体を自由落下によって作製したため, 初期状態が一定ではなかったことが考えられる。
- 2) 繰返し載荷中の変形特性から, A 試料のほうが B 試料に比べて沈下しやすいことが推察される。

- 3) 本研究の範囲内では, 密な場合には, A 試料に比べて B 試料の q_{max} が大きいのに対して, 緩い場合には A, B 試料で q_{max} に顕著な差が見られなかった。
- 4) 繰返し載荷履歴を与えると, B 試料のほうが A 試料に比べて正のダイレイタンス特性の程度が大きい。
- 5) A, B 試料の比較では, 密度や繰返し履歴の有無に関わらず, $E_{tan} - \log \varepsilon_a$ 関係に顕著な差が見られない。

<謝辞> 本研究の遂行にあたっては, 鉄道総合技術研究所の関根悦夫氏, 試料の提供を同所, 河野昭子氏, 実験および結果の整理については, 室蘭工業大学4年, 山内仁志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.
- 4) 木幡ら: 相似粒度による単粒度碎石の強度・変形特性, 鉄道力学論文集, 第7号, pp.25-30, 2003.
- 5) 石川ら: 模型バラスト軌道の繰返し塑性変形挙動に及ぼす移動荷重の影響評価, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第43号, pp.263-272, 2003.