

# 粒状材料の繰返し変形挙動に及ぼす 移動輪荷重の影響評価

石川達也<sup>1</sup>・関根悦夫<sup>2</sup>・三浦清一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8)

E-mail : t-ishika@eng.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 博(工) (財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>3</sup>正会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8)

列車通過時にバラスト軌道が受ける荷重履歴を模擬した室内要素試験方法の確立を目的に、粗粒材料を対象としたねじり単純せん断試験機の一つである多重リングせん断試験機を用い、移動輪荷重により生じる主応力軸の連続的な回転が粒状材料の繰返し変形挙動に及ぼす影響を明らかにするとともに、移動輪荷重繰返し作用下にある粒状構造物の変形挙動予測に関する多重リングせん断試験の適用性について検討した。その結果、移動輪荷重繰返し載荷時に道床が受けた荷重履歴を模擬した多重リングせん断試験結果が、模型試験で得られた道床の繰返し塑性変形挙動に近いことを見出すとともに、粒状材料で構成される路盤構造の変形挙動予測に適した材料特性の評価方法として、多重リングせん断試験が有効であることを示した。

**Key Words** : cyclic plastic deformation, moving wheel load, principal stress axis rotation, granular material, ballasted track

## 1. はじめに

従来、鉄道線路施設の効率的な維持管理を行うために、バラスト軌道(図-1)の道床や路盤を対象とした変形・沈下特性検討のための模型試験が数多く実施されている<sup>1),2),3)</sup>。これらの試験では多くの場合、模型軌道のある断面に集中荷重を加える定点載荷方式が用いられ、定点載荷方式の繰返し集中荷重で列車荷重を模擬してきた。しかし、近年国内外の研究者から、定点載荷方式では実現象を過度に簡略化する可能性が指摘されている<sup>4),5)</sup>。その一因として、定点載荷では、道床・路盤の土要素において主応力軸が繰返し載荷中に回転しないが、実現象では、荷重の移動に伴って道床・路盤の土要素の応力は大きさ

と同時に方向も時々刻々と変化していることが挙げられる<sup>6),7)</sup>。実際、主応力軸の回転を考慮した模型試験として、静的荷重を作用させた載荷輪を走行させる移動載荷試験が模型路盤や模型軌道に対して行われ、繰返し定点載荷試験とは異なる挙動が確認されている<sup>8),9),10)</sup>。

一方、バラスト軌道の道床は、「道床バラスト」と呼ばれる単粒度碎石で一般に構成されているが、移動輪荷重を受ける道床バラストの強度・変形特性検討のための室内要素試験として、これまで、主に繰返し三軸圧縮試験が用いられてきた<sup>11),12)</sup>。しかし、繰返し載荷中に主応力軸が回転しない拘束圧一定・応力振幅一定の片振り繰返し三軸圧縮試験では、移動輪荷重載荷時に碎石や礫のような粒状材料が受ける応力状態あるいは応力履歴を充分再現しえない可能性が指摘されている<sup>13)</sup>。実際、砂もしくは粘性土のような粒径の小さい土を対象として、移動輪荷重を受ける土の力学挙動を検討した東畑ら<sup>14),15)</sup>、桃谷ら<sup>16)</sup>の研究においても、主応力軸回転が土の強度・変形特性に強い影響を及ぼすことが示されている。

このため、これまで筆者らは、主応力軸回転の影響を評価可能な粗粒材料を対象とした要素試験機の開発を目的として、ねじり単純せん断試験機の一つである多重リングせん断試験機を試作し、砂や礫などの粒状材料に対して実施した中空ねじりせん断試験や三軸圧縮試験との比較検討を通して、試作した試験機の性能評価および試

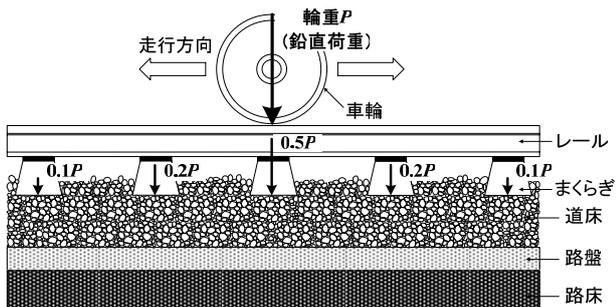


図-1 バラスト軌道の縦断面図

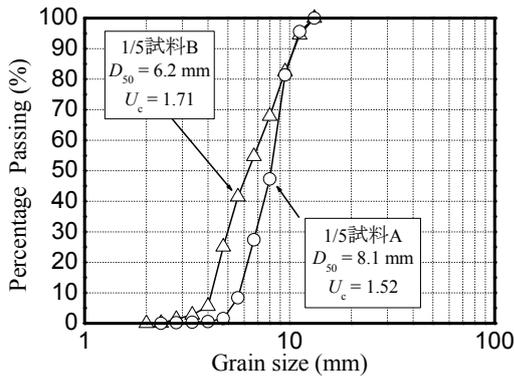


図-2 試料の粒径加積曲線

験結果の適用性について検討を行ってきた<sup>17),18)</sup>。その結果、多重リングせん断試験機が粗粒材料のねじり単純せん断試験機として有用であることを検証するとともに、主応力軸回転の有無や回転方法などせん断試験法の違いが粒状材料の強度・変形特性に影響を及ぼすことを示した。しかし、これらの研究では、多重リングせん断試験を既存のせん断試験方法に近い試験条件で行っており、列車通過時にバラスト軌道が受ける応力状態を模擬したものではありません。より実現象に近い試験方法の確立と、粒状材料の繰返し変形挙動に及ぼす移動輪荷重の影響を評価することが今後の研究課題となっていた。

本研究では、このような状況をふまえて、多重リングせん断試験機を用い、移動輪荷重繰返し载荷時にバラスト軌道が受ける荷重履歴を模擬した室内要素試験方法の確立を目的として検討を行う。具体的には、列車通過による荷重の増減と主応力軸方向の変化を考慮した、実現象に近い荷重载荷方法を確立して多重リングせん断試験を行い、主応力軸の連続的な回転が粒状材料の繰返し変形挙動に及ぼす影響を検討するとともに、模型試験で得られたバラスト軌道の繰返し塑性変形挙動との比較検討により、移動輪荷重繰返し作用下にあるバラスト軌道の変形挙動予測に対する多重リングせん断試験の適用性について検討を行う。

## 2. 試料と試験方法

### (1) 試料

試験に用いた試料は、実軌道で使用されている山梨県大月市で産出される安山岩の道床バラストと同じ岩種の碎石を1/5相似粒度に調整した単粒度碎石である。また、本試験では、「1/5試料A」、「1/5試料B」と称する粒度が異なる2種類の試料を用いるが、両試料は1/5縮尺模型バラスト軌道に対して行った载荷試験<sup>13)</sup>で用いた試料と同一粒度の試料である。図-2に両試料の粒径加積曲線を示す。なお、我が国の鉄道で用いられている道床バラストの粒度は、ある範囲内に収めることが示方書で規定され

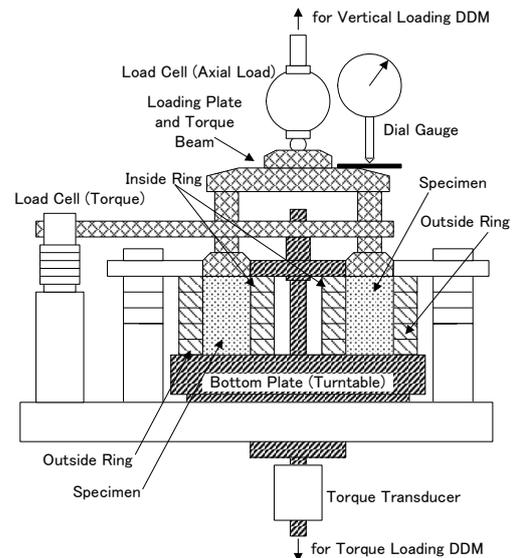


図-3 多重リングせん断試験機

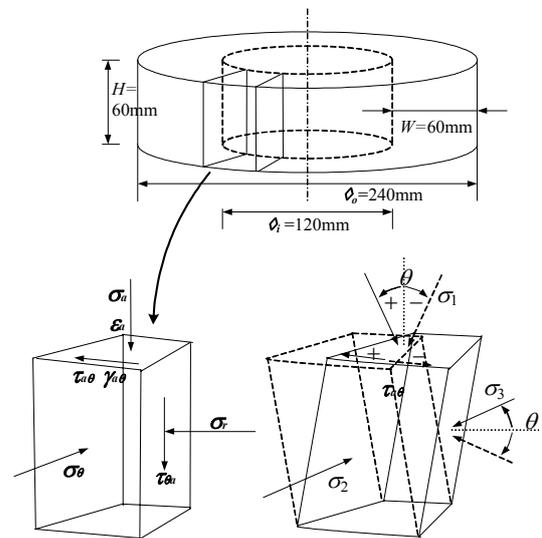


図-4 供試体の応力・ひずみの定義

ているが、本試験で用いた「1/5試料A」と「1/5試料B」は、それぞれ示方書で規定されている粒度範囲内で最も粗粒な粒度と最も細粒な粒度に調整したものである。

### (2) 試験装置

多重リングせん断試験機<sup>17)</sup>の概略を図-3に示す。本試験機では供試体を支持する下盤がトルク载荷用ダイレクトドライブモータ (DDM) により回転し、上盤・下盤・内外リングで拘束された供試体にねじり力を加えることができる。また、上盤に設置した鉛直方向の DDM を駆動し、供試体に軸荷重を与えることができる。この際、内外リングが上盤・下盤から独立しており、試料や他のリングとの間に摩擦を生じない設計になっている。供試体寸法は、幅  $W=60\text{mm}$  (内径  $\phi_i=120\text{mm}$ , 外径  $\phi_o=240\text{mm}$ )、高さ  $H$  はリング (1 段当たり  $20\text{mm}$ ) の段数を変えることで  $H=40\sim 100\text{mm}$  に設定できる。本研究では、模型試験<sup>13)</sup>の道床厚が  $50\text{mm}$  であることを考慮し、3 段

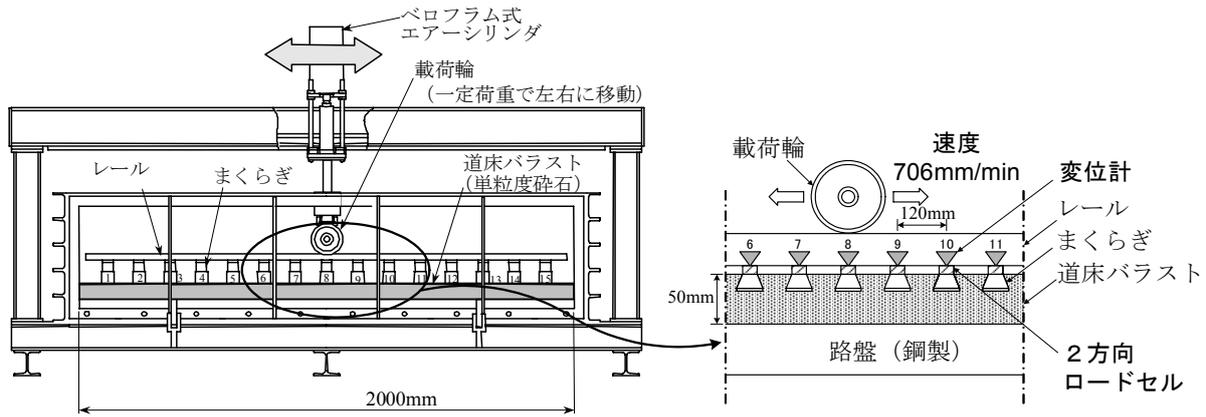


図-5 移動輪荷重試験装置・模型バラスト軌道の概略図

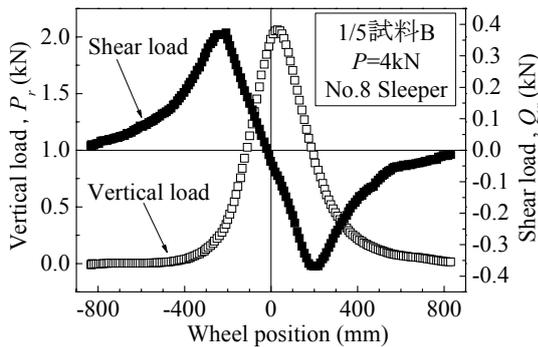


図-6 模型バラスト軌道の移動載荷試験結果

表-1 多重リングせん断試験の試験条件一覧

試験名	輪重	鉛直応力 ( $\sigma_a$ ) <sub>max</sub>	せん断応力 ( $\tau_{\theta}$ ) <sub>max</sub>	初期乾燥密度	
				1/5 試料 A	1/5 試料 B
単調載荷	—	156.8 kPa	最大値まで	1.42 g/cm <sup>3</sup>	1.48 g/cm <sup>3</sup>
繰返し載荷 (移動載荷)	2kN	80.0 kPa	12.8 kPa	1.42 g/cm <sup>3</sup>	1.48 g/cm <sup>3</sup>
	4kN	155.6 kPa	25.5 kPa	1.42 g/cm <sup>3</sup>	1.48 g/cm <sup>3</sup>
	6kN	231.1 kPa	38.3 kPa	1.43 g/cm <sup>3</sup>	1.47 g/cm <sup>3</sup>
繰返し載荷 (定点載荷)	2kN	80.0 kPa	—	1.43 g/cm <sup>3</sup>	1.48 g/cm <sup>3</sup>
	4kN	155.6 kPa	—	1.43 g/cm <sup>3</sup>	1.48 g/cm <sup>3</sup>
	6kN	231.1 kPa	—	1.43 g/cm <sup>3</sup>	1.48 g/cm <sup>3</sup>

( $H=60\text{mm}$ ) に固定して試験を行った (図-4)。

試験時の計測は、鉛直応力 $\sigma_a$ 、せん断応力 $\tau_{\theta}$ 、鉛直変位 $u$  (鉛直ひずみ $\epsilon_a$ )、せん断ひずみ $\gamma_{ad}$ について行った。多重リングせん断試験における応力・ひずみは、図-4のように定義する。このうち、鉛直応力および鉛直変位は、図-3に示す上盤に設置した軸荷重測定用ロードセルおよび外部変位計 (Dial Gauge) でそれぞれ計測した。せん断ひずみは、トルク載荷用 DDM に与える回転角変位の制御値と外部変位計による鉛直変位から算定される。せん断応力は、下盤に設置したトルク変換器と上盤に設置したトルク測定用ロードセルで各々計測した。ただし、繰返し載荷試験では、トルク測定用ロードセルの機構上の問題から、トルク変換器のみで計測した。なお、多重リングせん断試験機では、側方応力は計測できない。

### (3) 試験方法

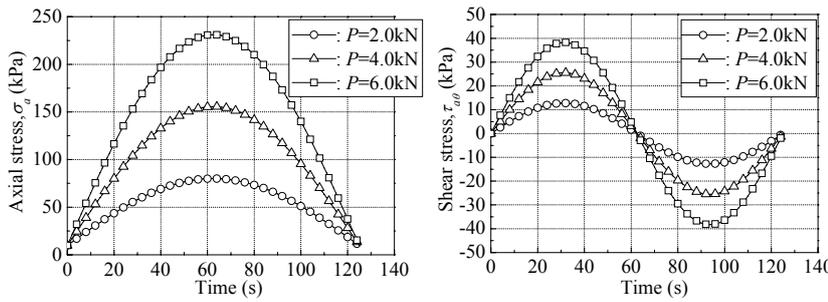
本研究では、1/5 試料A と 1/5 試料B を用い、幅  $W=60\text{mm}$ 、高さ  $H=60\text{mm}$  の供試体に対して圧密排気条件の単調載荷試験および繰返し載荷試験を行った。各試験の試験条件と供試体の初期乾燥密度を表-1 に示す。試験に用いる供試体は、内外リング間に気乾燥試料をリング 1 段当たりの高さと同じ 20mm の層に分けて投入し、同一試料の模型試験の密度に近づくよう各層毎に突き固めて作製した。その後、単調載荷試験では、供試体を鉛直応力 $\sigma_a=156.8\text{kPa}$

で 1 時間程度圧縮した上で、 $\sigma_a=156.8\text{kPa}$  一定の定圧条件下で、せん断ひずみ速度  $0.1\%/min$  の単調ねじりせん断を行った。なお、鉛直応力 $\sigma_a$  は後述する繰返し載荷試験の鉛直応力振幅 $(\sigma_a)_{max}$  を参考に決定した。一方、繰返し載荷試験では、模型バラスト軌道に対して行った移動載荷方式と定点載荷方式の繰返し載荷試験を模擬するために、載荷方式の異なる 2 種類の多重リングせん断試験をそれぞれ以下のように実施した。

#### a) 鉛直・せん断応力載荷試験

移動輪荷重作用下の道床バラストが受ける荷重履歴を模擬するために、模型バラスト軌道の移動載荷試験<sup>13)</sup>で計測された応力を載荷重として多重リングせん断試験を実施する。図-5 は、移動輪荷重載荷試験装置・模型バラスト軌道の概略図である。移動輪荷重載荷試験装置とは、鉛直荷重を作用させた载荷輪を往復走行可能な試験装置である。試験に用いた模型軌道は、縮尺比 1/5 とし、模型レール、模型まくらぎ (15 本)、模型道床、模型路盤で構成されている。図-6 は、模型バラスト軌道の移動載荷試験 (輪重  $P=4.0\text{kN}$ ) で 2 方向ロードセル<sup>19)</sup>を用いて測定された、载荷輪の移動に伴い模型中央のまくらぎ No.8 (図-5) が受ける鉛直方向とせん断方向の荷重波形の一例である。ただし、図の横軸は、まくらぎ No.8 と载荷輪間の距離を示している。

図から、まくらぎ直下の道床が受ける鉛直荷重は、ま



(a) 鉛直応力の時刻歴 (b) せん断応力の時刻歴

図-7 多重リングせん断試験の繰返し载荷パターン

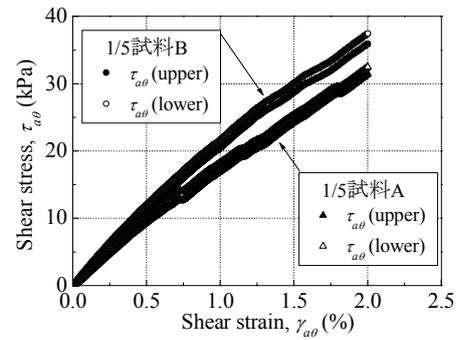


図-8 単調载荷試験結果

くらぎ直上に载荷輪がある場合に最大となり、離れるに従って減少すること、および同せん断荷重は、まくらぎ直上に载荷輪がある場合にゼロとなり、当該まくらぎを境にして作用方向が反転することがわかる。このような計測結果を参考にして、多重リングせん断試験の1回の繰返し载荷中の鉛直応力 $\sigma_a$ とせん断応力 $\tau_{\theta}$ の载荷パターンを図-7のように設定した。ただし、本研究では、载荷輪が無限遠の距離から特定のまくらぎに接近し、当該まくらぎ上を通過してまた無限遠に離れるまでに受ける荷重履歴を1回の繰返し载荷と定義する。なお、鉛直応力 $\sigma_a$ とせん断応力 $\tau_{\theta}$ は、図-6の鉛直荷重 $P_r$ とせん断荷重 $Q_r$ を制御し易い正弦波形に理想化した上で、まくらぎ底面積で除して算出している。また、鉛直応力・せん断応力ともに、前述の移動载荷試験における载荷輪の走行速度と走行回数を考慮して、同試験と同様の载荷周波数 $f=0.008\text{Hz}$ 、繰返し载荷回数 $N_c=200$ 回とした。さらに、模型試験の輪重が変化した場合( $P=2.0, 6.0\text{kN}$ 等)を想定して、鉛直応力・せん断応力の振幅を変更して多重リングせん断試験を行った(図-7)。

#### b) 鉛直応力载荷試験

载荷方式の違いがバラスト軌道の繰返し塑性変形挙動に与える影響を要素試験で評価するため、定点荷重作用下の道床バラストが受ける荷重履歴を模擬して多重リングせん断試験を実施する。図-6からも明らかのように、まくらぎ直上に载荷輪を固定した場合、まくらぎ直下の道床が受けるせん断荷重はゼロとなる。このため、定点载荷方式の模型試験を想定した場合には、鉛直応力のみが適当であると考えられる。そこで、前述した鉛直・せん断応力载荷試験の鉛直応力 $\sigma_a$ (図-7)のみを供試体に载荷する多重リングせん断試験を実施した。この荷重条件は、移動载荷試験時にまくらぎが受ける荷重波形と同等の荷重振幅と周期を有する正弦波鉛直荷重(荷重振幅: $P_r=2.0\text{kN}$ )を载荷する定点载荷試験の荷重履歴を再現したものである。このため、鉛直応力の载荷周波数、繰返し载荷回数はそれぞれ $f=0.008\text{Hz}$ 、 $N_c=200$ 回とした。なお、多重リングせん断試験の供試体は、半径方向

への変形が剛なリングによって拘束されるため、土槽側面方向への変形を拘束した模型土槽内の道床と同様、鉛直応力と水平応力が異なる $K_0$ 状態にある。一般に、このような異方応力状態からせん断応力を作用させた場合、主応力軸方向は連続的に回転するとされている。一方、せん断荷重が生じない定点载荷方式の模型試験やせん断応力を载荷しない鉛直応力载荷方式の多重リングせん断試験では、土要素の主応力軸は载荷中に回転しないと考えられる。

### 3. 試験結果と考察

#### (1) 単調载荷試験結果

多重リングせん断試験は、試料や他のリングとの間に摩擦を生じないように機構に設計されているものの、完全にはその影響を排除できないと考えられる。摩擦抵抗を無視できない場合には、上盤で計測されたせん断応力は、下盤で計測されたせん断応力よりも低くなることが予想される。そこで、せん断中の摩擦の影響を検討するために、単調载荷試験で上・下盤のせん断応力を比較した。図-8は、下盤で計測されたせん断応力 $\tau_{\theta}$ と上盤で計測されたせん断応力 $\tau_{\theta}$ をそれぞれ用いた、せん断応力 $\tau_{\theta}$ ～せん断ひずみ $\gamma_{\theta}$ 関係を比較したものである。図から、同一せん断ひずみレベルで上・下盤で計測されたせん断応力を比較した場合、各試験とも、両者のせん断応力はほぼ等しいことがわかる。したがって、粒度や初期乾燥密度の違いに関わらず、せん断応力は損失無く試料上層まで伝達されており、単粒度碎石を用いた多重リングせん断試験では、せん断中に摩擦が試験結果に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

#### (2) 繰返し载荷試験結果

##### a) 鉛直・せん断応力载荷試験

図-9(a)に、輪重 $P=4.0\text{kN}$ の移動载荷を想定した試験から得られた1/5試料Aの鉛直応力 $\sigma_a$ ～鉛直変位 $u$ 関係を、同図(b)に、同一試験条件の移動载荷試験でまくらぎNo.8

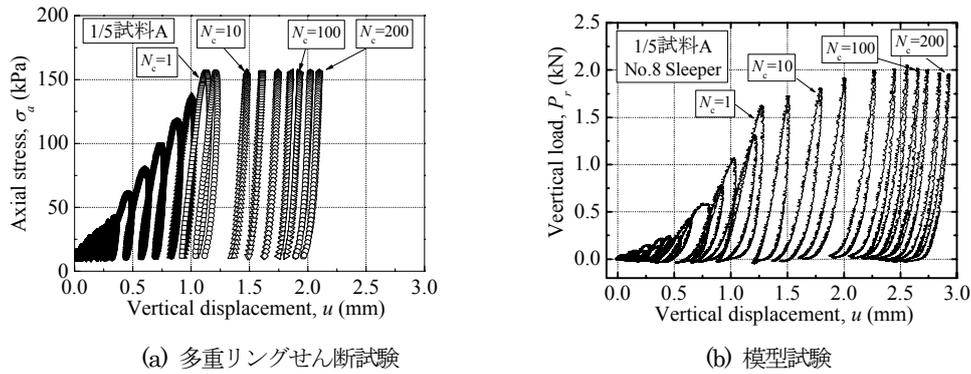


図-9 鉛直方向の荷重～変位関係 (移動荷方式)

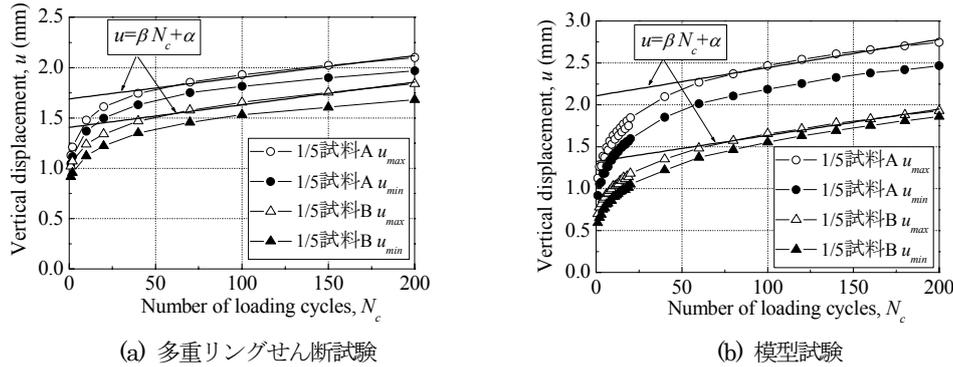


図-10 鉛直変位量  $u$ ～繰返し荷回数  $N_c$  関係 (移動荷方式)

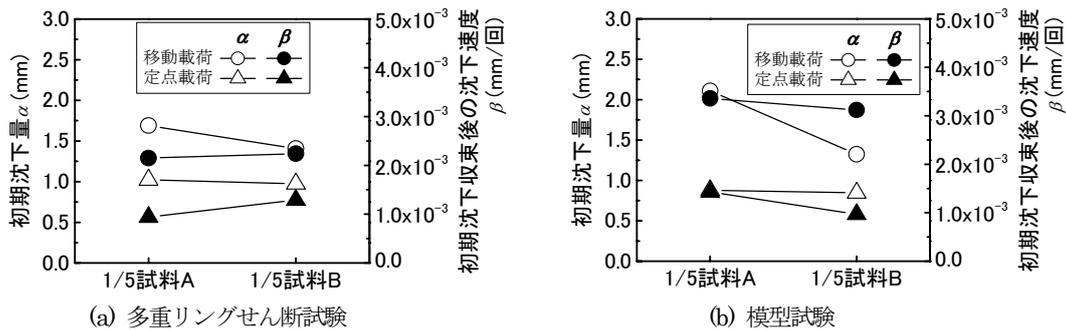
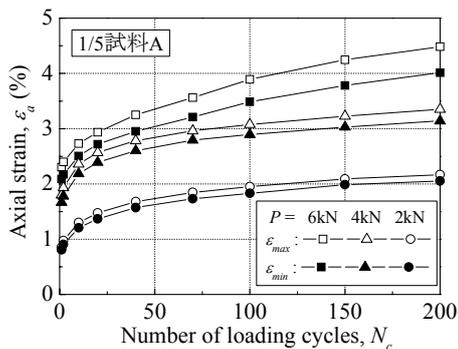


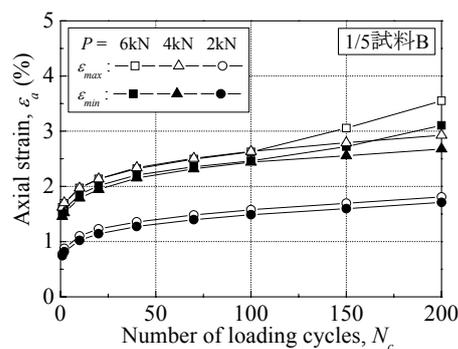
図-11 試験条件による沈下特性の変化

が受ける鉛直荷重  $P_r$ ～鉛直変位  $u$  関係を示す。なお、模型試験では急激な荷重増荷により模型バラスト軌道が軌道縦断面方向に不同沈下しないように所定の輪重に到達するまで、静的荷重を車輪の走行に伴い徐々に増加させているが (図-9(b))、多重リングせん断試験でも同様に、所定の輪重増荷時の応力振幅に到達するまで、模型試験の静的荷重の増加に応じて鉛直・せん断応力の振幅を段階的に増加させて荷重・除荷を行う段階式繰返し荷重を行った。ただし、本研究では、初めて所定の輪重に相当する荷重が荷重された場合、繰返し荷回数  $N_c=1$  と数えた (図-9(a))。図から、多重リングせん断試験の  $\sigma_a$ ～ $u$  関係と模型試験の  $P_r$ ～ $u$  関係は、繰返し荷に伴うヒステリシス・ループの形状変化や残留変位の発生傾向が非常に似通っていることがわかる。また、図-10(a)は、輪重  $P=4.0\text{kN}$  の移動荷を想定した試験から得られた各試料の鉛直変位  $u$ ～繰返し荷回数  $N_c$  関係を、同図(b)は、同

一試験条件の移動荷試験でまくらぎ No.8 の鉛直変位  $u$ ～繰返し荷回数  $N_c$  関係を示したものである。ただし、図中の  $u_{max}$  は1回の繰返し荷中に鉛直応力  $\sigma_a$  が最大となった時の鉛直変位を、同じく  $u_{min}$  は1回の繰返し荷終了時の鉛直変位をそれぞれ表している。ここで、 $u_{max}$  はまくらぎ直上に荷重輪がある状態を、 $u_{min}$  は荷重輪が通過後に最も遠ざかった状態をそれぞれ表している。図から、各試料とも繰返し荷初期には残留鉛直変位の増加は大きく塑性の卓越する傾向を示すが、繰返し荷回数の増加に伴い、残留鉛直変位の増加量が減少し弾性化が進行することがわかる。このため、沈下傾向は、繰返し荷初期段階 ( $N_c=40$  回程度まで) の急激な沈下部分とその後の緩やかな沈下部分とに分けることができると考え、鉄道構造物等設計標準 (案) 軌道構造 [有道床軌道] <sup>20</sup> に準じて、繰返し荷による初期沈下量  $\alpha$  と初期沈下収束後の沈下速度  $\beta$  を算定し、図-11(a)に整理した。その結果、

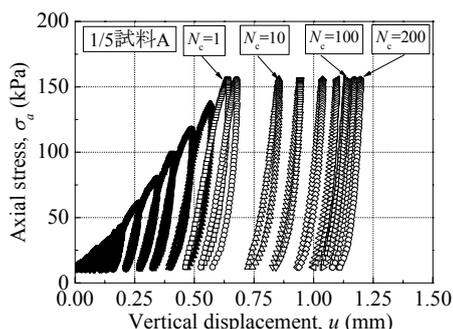


(a) 1/5 試料 A の試験結果

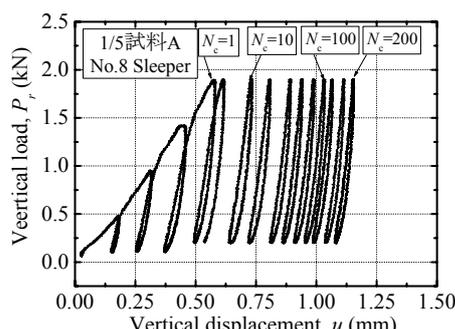


(b) 1/5 試料 B の試験結果

図-12 輪重の違いによる沈下特性の変化

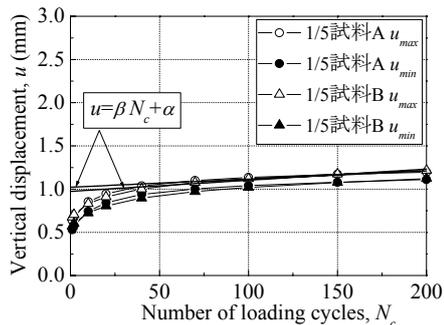


(a) 多重リングせん断試験

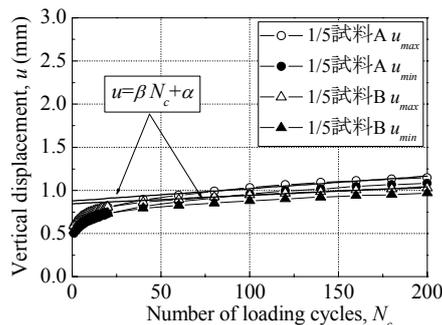


(b) 模型試験

図-13 鉛直方向の荷重～変位関係 (定点荷方式)



(a) 多重リングせん断試験



(b) 模型試験

図-14 鉛直変位量  $u$  ～ 繰返し荷回数  $N_c$  関係 (定点荷方式)

初期沈下量  $\alpha$  は 1/5 試料 A が 1/5 試料 B より大きくなり、沈下速度  $\beta$  は 1/5 試料 B が 1/5 試料 A より若干大きくなった。一方、図-12 は、輪重を  $P=2.0\text{kN}$ 、 $6.0\text{kN}$  に変えた場合の繰返し荷試験から得られた各試料の鉛直ひずみ  $\varepsilon_a$  ～ 繰返し荷回数  $N_c$  関係を示したものである。図から、荷重強度が増加すると累積鉛直ひずみも輪重に比例し、増加することがわかる。

#### b) 鉛直応力荷試験

図-13 は、多重リングせん断試験の鉛直応力  $\sigma_a$  ～ 鉛直変位  $u$  関係と模型試験の鉛直荷重  $P_r$  ～ 鉛直変位  $u$  関係を、図-14 は、両試験の鉛直変位  $u$  ～ 繰返し荷回数  $N_c$  関係を、それぞれ輪重  $P=4.0\text{kN}$  相当の定点荷を想定した同一試料の試験結果について比較したものである。図から、定点荷方式の試験についても、両者の試験結果は非常に似通っていることがわかる。また、前述の鉛直・せん

断応力荷試験と同様に、繰返し荷による初期沈下量  $\alpha$  と初期沈下収束後の沈下速度  $\beta$  を試験結果から算出し、図-11(a)に整理した。その結果、試料の違いによる初期沈下量  $\alpha$  や初期沈下収束後の沈下速度  $\beta$  の大小関係について、鉛直・せん断応力荷試験と同様な傾向が得られた。

### 4. 繰返し変形挙動に及ぼす移動輪荷重の影響評価

#### (1) 各試験結果の比較

まず、移動荷試験に相当する鉛直・せん断応力荷試験結果と定点荷試験に相当する鉛直応力荷試験結果の比較 (図-11(a)) から、同じ粒度の場合、初期沈下量  $\alpha$  および沈下速度  $\beta$  とともに鉛直・せん断応力荷試験の方が鉛直応力荷試験よりも大きくなること、および粒度の違いによる初期沈下量  $\alpha$  の差は鉛直応力荷試験より

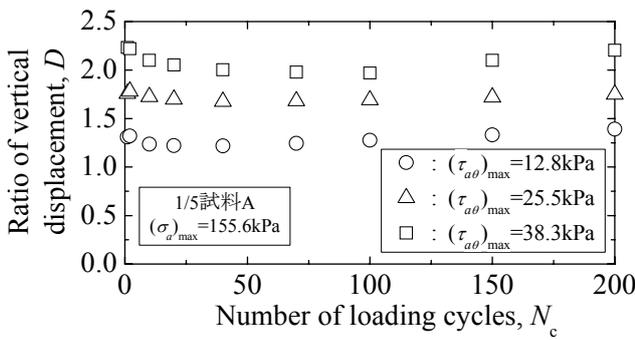


図-15 鉛直変位比  $D$ ～繰返し载荷回数  $N_c$  の関係

も鉛直・せん断応力载荷試験でより顕著に現れることがわかる。このように、せん断応力载荷の有無により累積鉛直変位の発生傾向に違いが生じたことは、せん断中の主応力軸回転や中間主応力の変化が粒状材料の力学的挙動に強い影響を及ぼすことを示す結果である。また、同様な傾向は、模型バラスト軌道に対する移動载荷方式および定点载荷方式の繰返し载荷試験結果（図-10(b), 図-14(b)）から得られた各試料の初期沈下量  $\alpha$  と沈下速度  $\beta$ （図-11(b)）でも確認された。このことは、バラスト軌道の変形・沈下特性を検討する室内要素試験としての多重リングせん断試験の有用性を示すものであり、本試験で行った車輪の通過による荷重増減と主応力軸方向の変化を考慮した载荷方法が実現象に近い荷重制御方法であったことを立証する結果であると考えられる。なお、図-10(a)(b)から、繰返し载荷試験中の累積鉛直変位は、多重リングせん断試験よりも模型試験の方が各試料とも若干大きい。この要因としては、試験中の拘束条件が異なることが挙げられる。多重リングせん断試験の供試体は、側面はリング、上面は上盤、下面は下盤で拘束されている。しかし、移動载荷試験の供試体は、側面はアクリル板、下面は剛性路盤で拘束されているものの、上面はまくらぎが等間隔に配置されているだけで完全に拘束されていない。このため、荷重を受けたまくらぎ下の道床バラストが非拘束状態のまくらぎ間に側方流動することは容易に考えられる。多重リングせん断試験結果を用いて模型バラスト軌道のFEM解析を実施した結果<sup>21)</sup>によると、このような試験条件の違いを考慮した場合には、多重リングせん断試験と模型試験の繰返し塑性変形挙動は定性的に一致するだけでなく、定量的にもほぼ一致することが示されている。このことは、移動輪荷重繰返し作用下にあるバラスト軌道の変形挙動予測に対する多重リングせん断試験の適応性の高さを実証する結果である。

## (2) 主応力軸回転の影響

まず、せん断応力の载荷が累積鉛直変位の発生に及ぼす影響について、鉛直応力  $\sigma_a$  とせん断応力  $\tau_{a\theta}$  の組合せを変えて行った多重リングせん断試験結果を基に考察する。

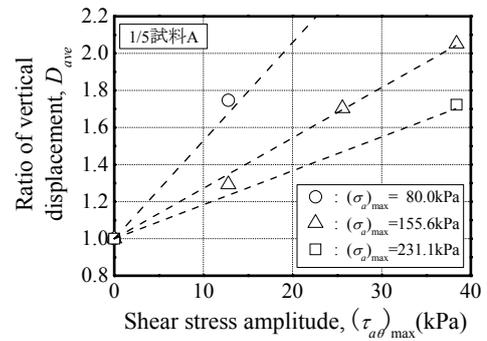


図-16 繰返し変形挙動に及ぼす移動荷重の影響

図-15 は、同一試料に対して行った鉛直・せん断応力载荷試験と鉛直応力载荷試験から得られた、各繰返し载荷回数における鉛直変位  $u$  の比  $D$ （式(1)で定義し、以下「鉛直変位比」と称す）と繰返し载荷回数  $N_c$  の関係である。

$$D = \frac{u(N_c)_{ml}}{u(N_c)_f} \quad (1)$$

ここに、 $u(N_c)_{ml}$ ：繰返し载荷回数  $N_c$  における鉛直・せん断応力载荷試験の鉛直変位  $u$ 、 $u(N_c)_f$ ：繰返し载荷回数  $N_c$  における鉛直応力载荷試験の鉛直変位  $u$  である。同図は、鉛直応力振幅  $(\sigma_a)_{max} = 155.6\text{kPa}$  一定（輪重  $P = 4.0\text{kN}$  に相当）として、せん断応力振幅  $(\tau_{a\theta})_{max} = 12.8, 25.5, 38.3\text{kPa}$  と変化した試験結果（輪重  $P = 2.0, 4.0, 6.0\text{kN}$  と変化した場合に相当）を示している。図を見ると、各せん断応力振幅とも、鉛直変位比  $D$  は繰返し载荷初期に若干変動が見られるものの、その後はほぼ一定になると考えられる。同様な傾向は、試料や载荷条件によって値は異なるが、他の試験条件でも認められた。したがって、鉛直・せん断応力载荷方式と鉛直応力载荷方式、すなわち移動载荷方式と定点载荷方式で行った多重リングせん断試験から得られる鉛直変位は、繰返し载荷回数に依らず試料種別・载荷条件毎にほぼ一定の割合にあると考えられる。

次に、鉛直変位比  $D$  に及ぼす载荷条件の影響について検討する。図-16 は、1/5 試料 A の試験結果から得られた平均鉛直変位比  $D_{ave}$ ～せん断応力振幅  $(\tau_{a\theta})_{max}$  関係を、鉛直応力振幅  $(\sigma_a)_{max}$  毎に示したものである。ただし、平均鉛直変位比  $D_{ave}$  とは、 $N_c = 40$  回以降の鉛直変位比  $D$  がほぼ一定と仮定できる部分に対して求めた  $D$  の平均値である。図から、鉛直応力振幅が減少する程あるいはせん断応力振幅が増加する程、平均鉛直変位比  $D_{ave}$  は増加することがわかる。そこで、せん断応力振幅  $(\tau_{a\theta})_{max}$  と鉛直応力振幅  $(\sigma_a)_{max}$  を説明変数とする平均鉛直変位比  $D_{ave}$  の推測式(2)を用いて、 $(\sigma_a)_{max} = 155.6\text{kPa}$  一定の試験から得られた  $D_{ave}$ ～ $(\tau_{a\theta})_{max}$  関係を、図-16 中の破線のように近似した。

$$D_{ave} = a \frac{(\tau_{a\theta})_{max}}{(\sigma_a)_{max}} + 1 \quad (2)$$

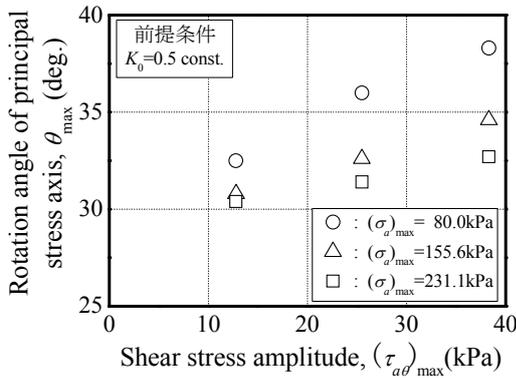


図-17 荷重条件による主応力軸回転角の違い

ここに、 $a$  : 試料に依存する係数である。さらに、式(2)の係数  $a$  の同定結果を基に、異なる鉛直応力振幅の  $D_{ave} \sim (\tau_{a\theta})_{max}$  関係を図中破線のように予測した。図から、載荷条件に依らず、式(2)により平均鉛直変位比  $D_{ave}$  が充分推定できることがわかる。

最後に、粒状材料の繰返し変形挙動を検討する上で平均鉛直変位比  $D_{ave}$  の意味合いについて考察する。前述のように、鉛直・せん断応力載荷試験では土要素の主応力軸は載荷中回転するが、鉛直応力載荷試験では主応力軸の回転は生じない。中間主応力  $\sigma_2$  が式(4)のように表されると仮定した場合、主応力軸回転角  $\theta_{max}$  は、土要素に作用する最大主応力  $\sigma_1$ 、中間主応力  $\sigma_2$ 、最小主応力  $\sigma_3$  を用いて、式(3)のように表される。

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \sqrt{\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}} \quad (3)$$

$$\sigma_1, \sigma_3 = \frac{\sigma_a + K_0 \sigma_a}{2} \pm \sqrt{(\sigma_a - K_0 \sigma_a)^2 + 4\tau_{a\theta}^2}, \quad \sigma_2 = K_0 \sigma_a \quad (4)$$

ここに、 $K_0$  : 静止土圧係数である。多重リングせん断試験では、側方応力の計測を行っていないため、精確に主応力軸回転角  $\theta_{max}$  を算定することはできない。そこで、本研究では、静止土圧係数  $K_0$  を一定値 ( $K_0=0.5$ ) と仮定して、主応力軸回転角  $\theta_{max}$  を算定することとした。せん断応力振幅  $(\tau_{a\theta})_{max}$  と鉛直応力振幅  $(\sigma_a)_{max}$  の組合せを変えて、式(3)、(4)に代入し得られた結果を、図-17 に示す。値の妥当性については、今後さらに検討する必要があるものの、図から、鉛直応力振幅が同じであればせん断応力振幅が増加する程、またせん断応力振幅一定であれば鉛直応力振幅が減少する程、主応力軸回転角は大きくなる傾向にあることがわかる。また、図-16 と図-17 を比較すると、応力状態の変化に対する試験中の主応力軸回転角  $\theta_{max}$  と平均鉛直変位比  $D_{ave}$  の増減傾向は一致しており、累積鉛直変位は主応力軸回転角の増加とともに増加する傾向にある。以上のことから、 $D_{ave}$  は累積鉛直変位に対する主応力軸回転の影響を評価する一つの指標であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、移動体通過による荷重の増減と主応力軸方向の変化を考慮した、実現に近い荷重制御方法を用いて多重リングせん断試験を行い、移動輪荷重繰返し作用下にある粒状構造物の変形挙動予測に関する多重リングせん断試験の適用性について検討した。その結果、移動輪荷重繰返し載荷時に道床が受けた荷重履歴を模擬した多重リングせん断試験結果が、模型試験で得られた道床の繰返し塑性変形挙動に近いことを示し、多重リングせん断試験が移動輪荷重を受ける粒状材料の力学特性評価に有効であることを検証した。本研究で得られた主な知見をまとめると次のとおりである。

- せん断応力は損失無く試料上層まで伝達されており、試料とリング間などにおけるせん断中の摩擦が単粒度碎石の力学挙動に及ぼす影響は少ない。
- せん断応力載荷の有無により沈下傾向が異なったことから、せん断中の主応力軸回転や中間主応力の変化は粒状材料の力学的挙動に強い影響を及ぼす。
- 粒度の差異による累積鉛直変位の違いは、定点載荷を想定した鉛直応力載荷試験よりも移動載荷を想定した鉛直・せん断応力載荷試験で顕著に表れる。
- 移動載荷方式の多重リングせん断試験から得られる各繰返し載荷回数の累積鉛直変位は、同一条件の定点載荷方式の試験結果よりも定数倍大きくなる。
- 累積鉛直変位は主応力軸回転角の増加とともに増加する傾向にあるが、その増加程度を表す鉛直変位比は、せん断応力振幅と鉛直応力振幅を説明変数とした式で予測できる。

今後はさらに、多重リングせん断試験で載荷条件や道床厚が変化した場合の粒状構造物の変形挙動予測を進め、鉄道線路施設の合理的な維持管理方法の構築に寄与する考えである。

**謝辞** : 本研究の遂行にあたっては、前北海道大学大学院杉山圭大氏に実験結果の整理について多大なご協力を頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。なお、本研究の一部は、平成 15 年度～平成 16 年度科学研究費補助金 (基盤研究(C)(2))、課題番号 : 15560420、研究代表者 : 石川達也) の交付を受けて実施されたものである。

## 参考文献

- 石川達也, 名村明 : 実物大試験による道床バラスト部繰返し変形特性の検討, 土木学会論文集, No.512/IV-27, pp.47-59, 1995.
- 関根悦夫, 木幡行宏, 蔣関魯, 矢崎澄雄, 長戸博 : 道床バラストの強度・変形特性, 鉄道総研報告, Vol.14, No.4, pp.13-18, 2000.

- 3) Hwang, S.K., Lee, S.H. and Choi, C.Y.: Performance of the reinforced railroad roadbed of crushed stones under the simulated cyclic loading using multi purpose loading system, *The world congress in railway research (WCRR2001)*, 2001.
- 4) Gerald, P., and Richard, J.B.: Performance of large-scale model single tie-ballast systems, *Transportation Research Record*, 1134, pp.7-14, 1987.
- 5) 垂水尚志：道床・路盤・路床に関する研究開発の経緯，鉄道総研報告，Vol.7, No.2, pp.1-10, 1993.
- 6) 平川大貴，川崎紘誉，桃谷尚嗣，龍岡文夫：軌道模型実験における載荷方法の影響，第55回年次学術講演会講演概要集，3-A, pp.428-429, 2000.
- 7) 村本勝己，関根悦夫，桃谷尚嗣：軌道模型の繰返し載荷試験における載荷方法の影響，第56回年次学術講演会講演概要集，3-A, pp.434-435, 2001.
- 8) Hirakawa, D., Kawasaki, H., Tatsuoka, F. and Momoya, Y.: Effects of loading conditions on the behaviour of railway track in the laboratory model tests, *The bearing capacity of roads, railway and airfields. Proc. 6th intern. conf.*, Lisbon, pp.1295-1305, Rotterdam: Balkema, 2002.
- 9) Ishikawa, T. and Sekine, E.: Effects of Moving Wheel Load on Cyclic Deformation of Railroad Ballast. *Proc. of Railway Engineering-2002*, London, [1/1(CD-ROM)], 2002.
- 10) Momoya, Y., Sekine, E. and Tatsuoka, F.: Deformation characteristics of railway roadbed and subgrade under moving-wheel load, *Soils and Foundations*, 45(4), pp.99-118, 2005.
- 11) 村本勝己，関根悦夫，蔣関魯：繰返し荷重をうける道床バラストの粒度と強度・変形特性に関する検討，第36回地盤工学会研究会概要集，pp.1185-1186, 2001.
- 12) Kohata, Y., Jiang G.L. and Sekine, E.: Deformation characteristics of railroad ballast as observed in cyclic triaxial tests, *Poster Session Proc. of the 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, 16-20 August 1999, pp.21-22, 1999.
- 13) 石川達也，関根悦夫，三浦清一，中村貴久：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.
- 14) 原田尚幸，東畑郁生，川崎祐征，須長誠：移動荷重を受ける路盤土の変形特性，第28回土質工学研究発表会概要集，pp.1539-1542, 1993.
- 15) Towhata, I., Kawasaki, Y., Harada, N. and Sunaga, M.: Contraction of soil subjected to traffic-type stress application, Shibuya, et al. (eds.), *Pre-failure Deformation of Geomaterials, Proc. intern. symp.*, Sapporo, 12-14 September 1994, pp.305-310, Rotterdam: Balkema, 1994.
- 16) 桃谷尚嗣，関根悦夫，渡辺健治，篠田昌弘，館山勝，龍岡文夫：繰返し載荷による砂の変形特性に与える主応力軸の回転の影響，第40回地盤工学会研究会概要集，pp.463-464, 2005.
- 17) 石川達也，堀田大介，柏谷匡胤，三浦清一：粗粒材料を対象とした単純せん断試験機の試作と性能評価，第39回地盤工学会研究発表会講演集，pp.863-864, 2004.
- 18) 杉山圭大，石川達也，三浦清一，関根悦夫：多重式リングせん断試験機による碎石の繰返し変形挙動に及ぼす主応力回転の影響の検討，第40回地盤工学会研究発表会講演集，pp.545-546, 2005.
- 19) 谷和夫，龍岡文夫，山口顕：砂地盤上の帯基礎の模型支持力実験（第2報），第21回土質工学研究発表会講演集，pp.1165-1166, 1986.
- 20) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説「軌道構造〔有道床軌道〕（案）」，鉄道総合技術研究所，1997.
- 21) 石川達也，細田充，関根悦夫，三浦清一：移動荷重作用下の粒状構造物の変形挙動解析法の検討，第41回地盤工学会研究発表会講演集，pp.1071-1072, 2006.

## EFFECT EVALUATION OF MOVING WHEEL LOAD ON CYCLIC DEFORMATION OF GRANULAR MATERIAL

Tatsuya ISHIKAWA, Etsuo SEKINE and Seiichi MIURA

The objective of this paper is to propose a new testing method to examine the effects of moving wheel load on cyclic plastic deformation of railroad ballast in terms of the strength and deformation characteristics. Applicability of a newly developed multi-ring shear test, which can make the principal stress axes rotate, to an element test of granular materials subjected to moving wheel load was examined by comparing the laboratory element test results with the moving wheel loading test results of small scale model track. As the results, it was revealed that the mechanical behavior of railroad ballast under moving wheel loads is very similar to that of granular material subjected to the principal stress axis rotation during shear. Accordingly, it was confirmed that the multi-ring shear test is appropriate for simulating the actual stress states inside substructures under moving wheel loads.