

移動輪荷重を受ける粒状材料の 累積損傷度理論による塑性変形解析

関根悦夫¹・石川達也²・三浦清一³

¹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)

²正会員 博(工) 北海道大学大学院准教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)

³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)

バラスト軌道は、列車走行により粒状材料である道床バラストに塑性変形を生じるため、効率的な維持管理を行うには、移動輪荷重繰返し作用下における道床の変形挙動を予測する必要がある。本研究では、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考慮可能なバラスト軌道の塑性変形挙動解析法について検討した。その結果、主応力軸回転場の道床バラストの累積ひずみ特性を考慮した FEM 解析を用いて、道床の繰返し塑性変形量の簡易推定方法を提案した。また、模型試験結果との比較検討により提案した推定法の妥当性を検証し、累積損傷度理論を応用した場合、簡易な線形弾性解析でも移動輪荷重繰返し作用下のバラスト軌道の弾塑性挙動をある程度推定できることを示した。

Key Words : FEM, cumulative damage, cyclic plastic deformation, moving wheel load, granular materials, principal stress axis rotation

1. はじめに

日本の在来線線路の約 90%を占めるバラスト軌道(図-1)では、繰返し作用する列車荷重により、粒状材料である道床バラスト(単粒度碎石)で構成されるバラスト道床(以下「道床」と略す)と呼ばれる部位に塑性変形が生じる。この塑性変形に伴う軌道面の不同沈下は、列車の走行安全性や乗り心地等に影響を与えるため、軌道面の変形量を定期的に測定し、基準値を超過した場合には補修作業を行っている。このため、効率的な軌道の維持管理を行うには、繰返し作用する列車荷重下の道床の変形特性を解明する必要がある。筆者らはこれまで、バラスト軌道の変形挙動解明の一環として、道床を対象と

した変形・沈下特性検討のための室内要素試験や模型載荷試験を実施し^{1),2),3)}、それらの試験結果をもとにして、道床バラストの繰返し三軸圧縮試験結果と FEM 解析を用いた道床の繰返し塑性変形量の簡易推定方法を提案している⁴⁾。

しかしながら、これらの研究では、主に、模型軌道のある断面に集中荷重を加える定点載荷方式の繰返し荷重で列車荷重を模擬しているため、国内外の研究者^{5),6)}から指摘されている、定点載荷方式の試験では実現象を過度に簡略化する可能性については、十分な説明がなされていない。実際、実現象に即した模型載荷試験として、静的荷重を作用させた載荷輪を模型路盤や模型軌道上で走行させる移動載荷試験を行った研究^{7),8),9)}によると、繰返し定点載荷試験とは異なる挙動が確認されている。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ている^{10),11)}。

また、筆者らが、実現象に近い荷重制御方法の室内要素試験として、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て行った多重リングせん断試験結果^{12),13)}では、主応力軸回転を与えた場合、繰返し載荷に伴

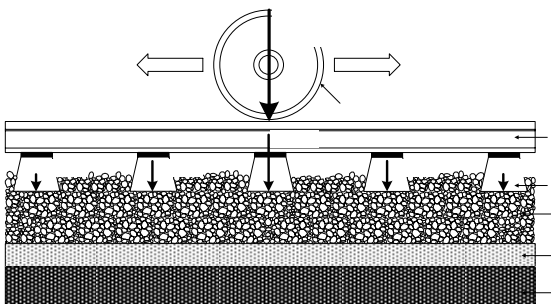


図-1 バラスト軌道の縦断面図

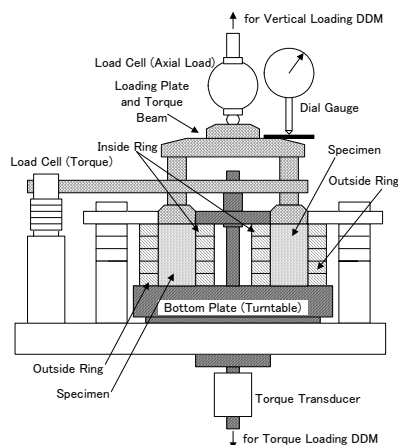


図-2 多重リングせん断試験機

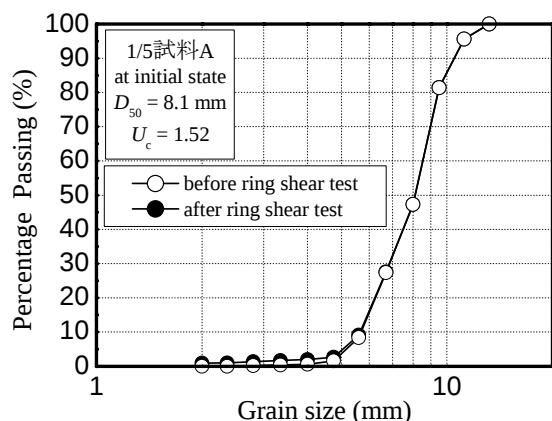


図-3 試料の粒径加積曲線

う累積鉛直変位は、無回転の場合に比べて大きくなること、および繰返し载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に比べ、粒状材料で構成される路盤構造の材料特性の評価方法として、前述の多重リングせん断試験が有用であることが指摘されている。このため、道床の繰返し塑性変形量を予測する構造解析手法においても、主応力軸回転の影響を考慮した室内要素試験結果を基礎データとすることが予測精度の向上に不可欠であると考えられる。したがって、主応力軸が回転しない繰返し三軸圧縮試験結果を利用する、前述のFEM解析を用いた道床の繰返し塑性変形量の簡易推定方法は、定点での集中荷重の繰返しに対する道床の挙動予測に適用が限定されている。

一方、舗装に用いられている粒状路盤材料についても塑性変形に関する解析的検討は行われており^{14), 15), 16)}、修正Cam-Clayモデルに基づいた変形解析によりコンクリート舗装における粒状路盤の繰返し塑性変形の追跡や粒状路盤材料の三軸圧縮試験の弾塑性解析を行い、静的载荷・繰返し载荷条件での適用性を確認しているものの、移動輪荷重のような主応力軸回転場における繰返し荷重載荷時の粒状路盤構造の塑性変形解析に適用した研究例は、現在のところあまり見あたらない。

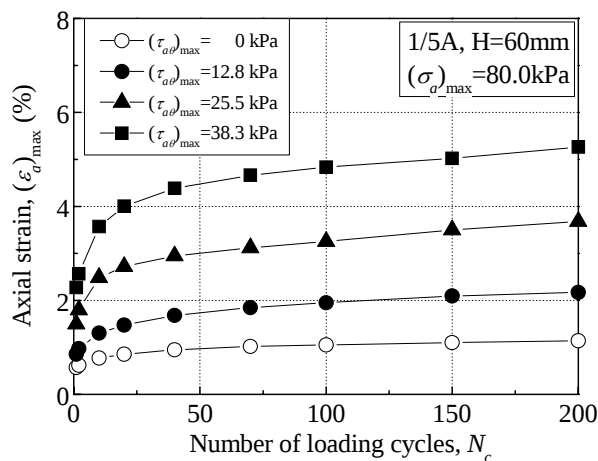


図-4 多重リングせん断試験の軸ひずみ～繰返し载荷回数関係

本研究では、このような状況を踏まえ、道床のような粒状路盤構造が移動輪荷重を繰返し受ける際の塑性変形量の簡易推定方法について検討する。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、実現に近い荷重載荷方法で実施した道床バラストの多重リングせん断試験結果と、試験結果から得られた道床バラストの累積ひずみ特性を考慮した FEM 解析を用いて、道床の簡易な塑性変形挙動解析方法を提案する。続いて、同方法によって模型バラスト軌道の繰返し移動載荷試験のシミュレーションを行い、模型試験結果との比較検討により提案した解析方法の妥当性を検証する。

2. 主応力軸回転場の累積ひずみ特性の定量化

本章では、1/5 縮尺模型バラスト軌道の移動載荷試験⁹⁾で粒状路盤構造が受けた応力履歴（実測された鉛直応力、せん断応力）を模擬して、多重リングせん断試験機（図-2）を用いて、実現に近い荷重載荷方法で実施した単粒度碎石（道床バラストの 1/5 相似粒度試料（図-3）、以下「1/5A試料」と称す）の多重リング試験結果¹⁷⁾をもとに、粒状路盤材料の累積ひずみ特性を定量的に評価する。

(1) 粒状路盤材料の累積ひずみ特性

図-4 に、1/5A 試料の鉛直・せん断応力載荷試験 $((\sigma_a)_{\max}=231.1\text{kPa}, (\tau_{a\theta})_{\max}=12.8, 25.5, 38.3\text{kPa})$ と鉛直応力載荷試験 $((\sigma_a)_{\max}=231.1\text{kPa}, (\tau_{a\theta})_{\max}=0\text{kPa})$ から得られた累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max}$ ～繰返し载荷回数 N_c 関係を示す。ここで、累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max}$ は、1 回の繰返し载荷中に鉛直応力 σ_a が最大となった時（まくらぎ直上に载荷輪がある状態）に観測された、せん断開始直後から累積軸ひずみ量である。また、鉛直・せん断応力載荷試験と鉛直応力載荷試験はそれぞれ以下のような繰返し载荷試験である。

(a) 鉛直・せん断応力載荷試験

鉛直応力 σ_a とせん断応力 $\tau_{a\theta}$ を繰返し载荷することによ

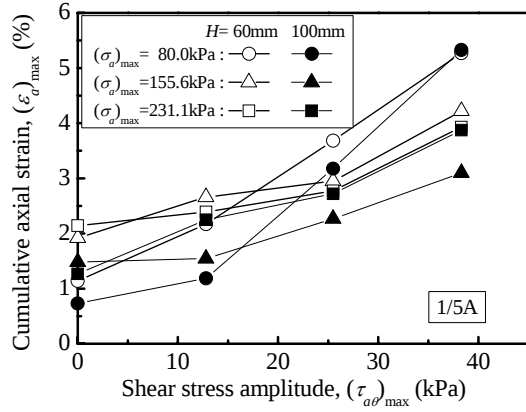


図-5 累積軸ひずみ～せん断応力振幅関係

り、主応力軸回転が生じる応力状態で行う試験で、本試験の载荷条件は、軌道模型の移動载荷試験の载荷条件（载荷周波数 f 、繰返し载荷回数 N_c etc.）を模擬している。

(b) 鉛直応力载荷試験

鉛直応力 σ_a を繰返し载荷することにより、主応力軸回転が生じない応力状態で行う試験で、本試験の载荷条件は、軌道模型の定点载荷試験の载荷条件を模擬している。

また、図-5に、繰返し载荷回数 $N_c=200$ 回载荷時の、累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max}$ ～せん断応力振幅 $(\tau_{a\theta})_{\max}$ 関係（1/5A試料）を鉛直応力振幅別に示す。ただし、図中の $(\tau_{a\theta})_{\max}=0\text{kPa}$ の点は鉛直応力载荷試験の試験結果を、 $(\tau_{a\theta})_{\max}\neq 0\text{kPa}$ の点は鉛直・せん断応力载荷試験の試験結果を示したものである。図から、鉛直応力振幅 $(\sigma_a)_{\max}$ が同一であれば、鉛直・せん断応力载荷試験の方が鉛直応力载荷試験よりも累積軸ひずみは大きくなり、せん断応力振幅の増加に伴って増加することがわかる。また、累積軸ひずみは鉛直応力振幅 $(\sigma_a)_{\max}$ が小さいほどせん断応力振幅 $(\tau_{a\theta})_{\max}$ の変化による影響が大きい。以上のように、せん断応力の载荷条件により累積軸ひずみの発生傾向に違いが生じたことは、せん断中の連続的な主応力軸の回転が粒状路盤材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と考えられる。

(2) 主応力軸回転場の累積ひずみ量の推定

a) 主応力軸固定場の場合

既往の研究⁴⁾では、主応力軸固定場（定点荷重）における道床バラストの累積軸ひずみ量は、繰返し三軸試験結果により式(1)のように表されると仮定している。

$$(\varepsilon_a)_{\max} = \left(\frac{SR_d}{a1 \cdot (1 - a2 \cdot SR_s^{a3}) \cdot N_c^{a4}} \right)^{a5 \cdot N_c^{a6}} \quad (1)$$

ここに、 SR_s ：初期せん断応力比、 $SR_s = \sigma_r / (2\sigma_m)$ 、 SR_d ：動的せん断応力比、 $SR_d = \sigma_d / (2\sigma_m)$ 、 σ_s ：初期軸差応力、 σ_a ：繰返し応力振幅、 σ_m ：平均主応力、 $(\varepsilon_a)_{\max}$ ：累積軸ひずみ（主応力軸固定場）、 $a1 \sim a6$ ：係数である。本研究では、

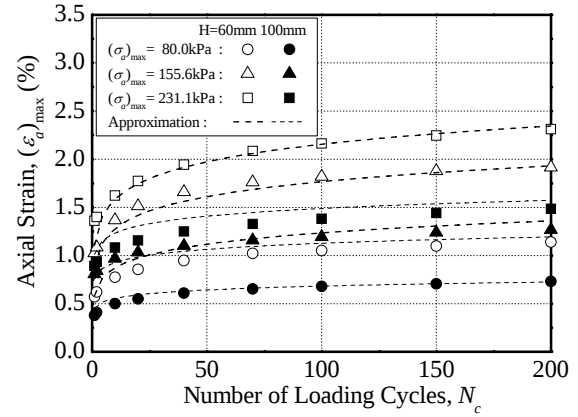


図-6 累積軸ひずみの推定結果（主応力軸固定場）

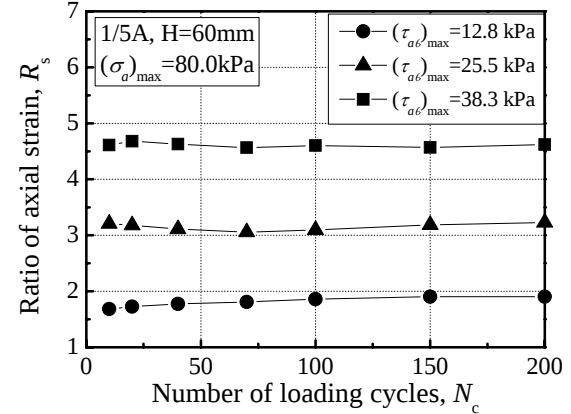


図-7 軸ひずみ比～繰返し载荷回数関係

式(1)を多重リングせん断試験結果に適用するために、側圧係数の応力レベル依存性を考慮して新たな係数 $a7$ 、 $a8$ を導入し、式(1)の σ_s 、 σ_a 、 σ_m を式(2)のように表した。

$$\begin{aligned} \sigma_s &= ((\sigma_a)_{\min} - (\sigma_r)_{\min}) = ((\sigma_a)_{\min} - a8 \cdot (\sigma_a)_{\min}) \\ \sigma_d &= ((\sigma_a)_{\max} - (\sigma_r)_{\max}) - \sigma_s \\ &= ((\sigma_a)_{\max} - a7 \cdot (\sigma_a)_{\max}) - ((\sigma_a)_{\min} - a8 \cdot (\sigma_a)_{\min}) \\ \sigma_m &= ((\sigma_a)_{\min} + (\sigma_r)_{\min}) / 2 = ((\sigma_a)_{\min} + a8 \cdot (\sigma_a)_{\min}) / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $(\sigma_a)_{\max}$ ：最大鉛直応力（負荷時）、 $(\sigma_r)_{\max}$ ：最大側方応力（負荷時）、 $(\sigma_a)_{\min}$ ：最大鉛直応力（除荷時）、 $(\sigma_r)_{\min}$ ：最大側方応力（除荷時）、 $a7 \sim a8$ ：係数である。主応力軸固定場における粒状路盤材料の累積ひずみ量を推定するために、前述の多重リングせん断試験（鉛直応力载荷試験）結果をもとに、式(1)と式(2)の各係数を供試体高さ毎にそれぞれ同定した。図-6は、式(1)から得られた各繰返し载荷回数の累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max}$ の推定値（図中の実線）を、供試体高さ別に試験結果（1/5A試料）と比較したものである。図から、推定値は試験データに対してほぼ妥当なものとなっており、式(1)が主応力軸固定場（定点荷重）における、道床バラストのような粒状路盤材料の累積ひずみ特性の推定に有効であることがわかる。なお、最大鉛直応力負荷時の側圧係数に相当する $a7$ の同定結果が0.50であったことを考慮して、最大主応力軸回転角 $\theta_{\max}$ を算定すると、図-4に示す鉛直・せん断応力载荷試験の

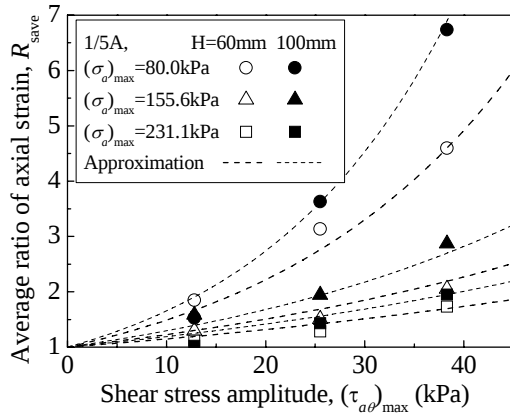


図-8 平均軸ひずみ比～せん断応力振幅関係

応力範囲では、 $\theta_{\max}=30\sim40^\circ$ であった¹³⁾。

b) 主応力軸回転場の場合

式(1)を、主応力軸回転場（移動荷重）に適用するために、載荷方式の異なる二種類の多重リングせん断試験（1/5A試料の鉛直・せん断応力載荷試験と鉛直応力載荷試験）結果の比較から、累積ひずみ特性に対する主応力軸回転の影響を評価する。各繰返し載荷回数における累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max}$ の比 R_s （式(3)で定義し、以下「軸ひずみ比」と称す）と繰返し載荷回数 N_c の関係を求め、図-7に示す。

$$R_s = \frac{\varepsilon_{a,ml}(N_c)}{\varepsilon_{a,fl}(N_c)} \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{a,ml}(N_c)$ ：繰返し載荷回数 N_c における鉛直・せん断応力載荷試験の累積軸ひずみ、 $\varepsilon_{a,fl}(N_c)$ ：繰返し載荷回数 N_c における鉛直応力載荷試験の累積軸ひずみである。図を見ると、各せん断応力振幅とも、軸ひずみ比 R_s は繰返し載荷初期に若干変動が見られるものの、 $N_c=40$ 回以降はほぼ一定になる。そこで、軸ひずみ比 R_s がほぼ一定と仮定できる繰返し載荷回数に対してその平均値を求め、平均軸ひずみ比 R_{save} とした。図-8は、1/5A試料の試験結果から得られた平均軸ひずみ比 R_{save} ～せん断応力振幅 $(\tau_{a\theta})_{\max}$ 関係を供試体高さ別に示したものである。図から、供試体高さが異なれば $R_{\text{save}}\sim(\tau_{a\theta})_{\max}$ 関係は異なるものの、両供試体高さとも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、平均軸ひずみ比 R_{save} は増加することがわかる。

このため、 $R_{\text{save}}\sim(\tau_{a\theta})_{\max}$ 関係を、せん断応力振幅と鉛直応力振幅を説明変数とする式(4)により近似し、係数 a を供試体高さ毎にそれぞれ同定した。図-8に、式(4)を用いて供試体高さ毎に R_{save} を推定した結果を、試験結果と比較して示す。

$$R_{\text{save}} = \exp \left(a \frac{(\tau_{a\theta})_{\max}}{(\sigma_a)_{\max}} \right) \quad (4)$$

ここに、 a ：試料、供試体高さに依存する係数である。図

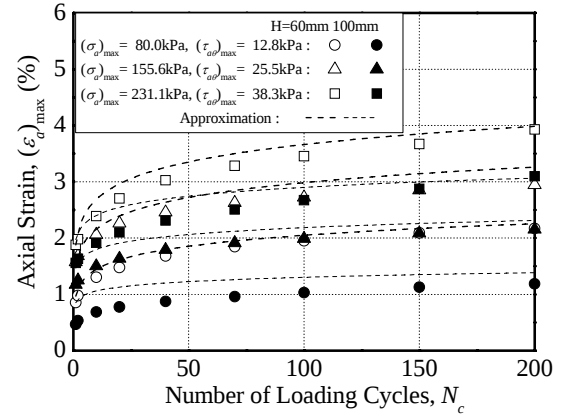


図-9 累積軸ひずみの推定結果（主応力軸回転場）

から、載荷条件、供試体高さによらず、式(4)により平均軸ひずみ比 R_{save} を充分推定できることがわかる。一般に、中間主応力一定と仮定した場合、鉛直応力が同一であればせん断応力が増加する程、またせん断応力が同一であれば鉛直応力が増加する程、主応力軸回転角は大きくなる。このため、図-8は主応力軸回転角の増加により、累積軸ひずみが増加することを示す結果であり、累積軸ひずみ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。

以上のことから、本研究では、繰返し移動輪荷重を受ける粒状路盤材料の累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max}$ が、先に係数を同定した式(1)、式(2)と式(4)から、式(5)のように推定できると考える。

$$(\varepsilon_a)_{\max} = \exp \left(a \frac{(\tau_{a\theta})_{\max}}{(\sigma_a)_{\max}} \right) \cdot \left(\frac{SR_d}{a1 \cdot (1 - a2 \cdot SR_s^{a3}) \cdot N_c^{a4}} \right)^{a5 \cdot N_c^{a6}} \quad (5)$$

図-9は、式(5)から得られた各繰返し載荷回数の累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max}$ の推定値（図中の破線）を、供試体高さ別に多重リングせん断試験（鉛直・せん断応力載荷試験）結果（1/5A試料）と比較したものである。図から、推定値は、試験データに比べて若干大きめの値を示しているものの、繰返し載荷に伴う累積軸ひずみの増加傾向は良く捉えており、式(5)が主応力軸回転場（移動荷重）における、粒状路盤材料の累積ひずみ特性の推定に、多重リングせん断試験を実施した試験条件の範囲（1/5A試料、供試体高さ60～100mm、 $(\sigma_a)_{\max}=80.0\sim231.1$ kPa、 $(\tau_{a\theta})_{\max}=12.8\sim38.3$ kPa、繰返し載荷回数200回、載荷周波数0.008Hz）において有効であることがわかる。なお、 $(\tau_{a\theta})_{\max}=0$ の場合、式(5)と式(1)は一致することから、式(5)は主応力軸固定場（定点荷重）に対しても適用可能である。

3. 累積損傷度理論を応用した累積変形解析方法

本章では、繰返し荷重作用時の粒状路盤構造の塑性変形挙動予測に対する粒状路盤材料の累積ひずみ特性の適用方法について検討する。なお、本研究では、地盤材料

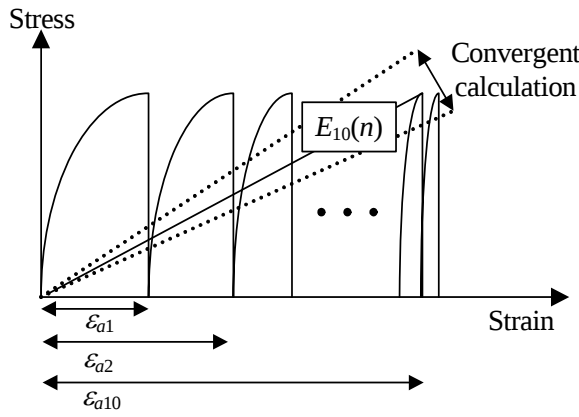


図-10 累積損傷度理論の基本的な考え方

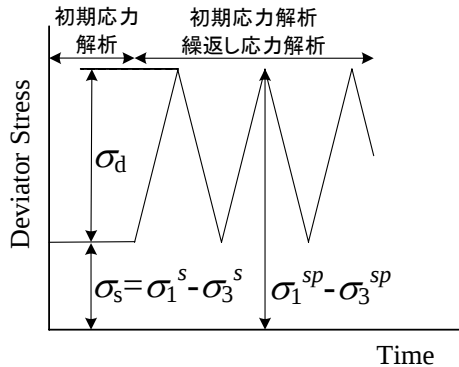


図-12 最大主応力・最小主応力と σ_s/σ_d の関係

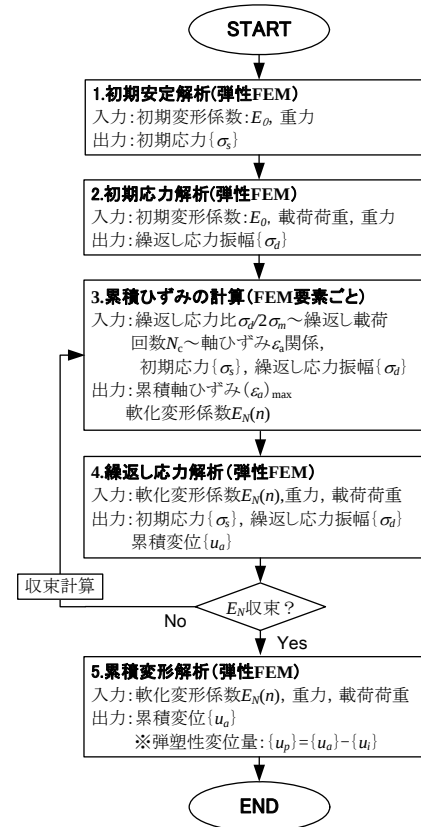


図-11 累積損傷度を応用した累積変形解析手順

の累積ひずみ特性を考慮し、そのせん断剛性を低下させて、繰返し荷重載荷時の土構造物の弾塑性変形を推測する理論を、「累積損傷度理論⁴⁾」と称することにする。

累積損傷度理論を応用したFEMによる累積変形解析では、道床バラストの累積ひずみ特性を考慮し、図-10のように道床を表すFEM要素の変形係数を低下（損傷）させた線形弾性解析により、繰返し荷重載荷時の道床の弾塑性変形を推測する。FEM解析における道床の変形係数の設定方法および弾塑性変形量の推定方法の概略を図-11に示す。ここで、損傷後の変形係数（軟化変形係数 $E_N(n)$ ）は、道床バラストの累積ひずみ特性が式(5)のように表されることから、式(6)により算定する。

$$E_N(n) = \sigma_d / \varepsilon_{aN}(n) \quad (6)$$

ここに、 $\varepsilon_{aN}(n)$ ：式(5)により算出される繰返し載荷回数 N ・収束計算回数 n の場合の累積軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\max}$ である。なお、繰返し塑性変形挙動が顕著でない道床以外の部材は、繰返し載荷により損傷しないと考え、変形係数不変としてFEM解析を行う。

以上のように、本研究で提案する累積変形解析の基本的な考え方は、繰返し塑性を呈する粒状路盤材料に対して、解析前に仮定した剛性分布と、FEM解析結果（応力分布）を式(5)、式(6)に代入して得られる剛性分布を比較し、両者が一致するように応力の再配分とそれに伴う割線変形係数の再設定を繰り返しながら、解析モデルの剛

性分布を現実の分布に近いものに収束させることで、繰返し載荷による塑性流動後の変形性状を再現するものである。したがって、その適用に際しては、FEM解析後に軟化変形係数分布を算定するために、解析から得られる各要素の応力状態から、初期軸差応力 σ_s 、繰返し応力振幅 σ_d 、平均主応力 σ_m を決定しなければならない。この場合、 σ_s 、 σ_d 、 σ_m が多重リングせん断試験の応力状態で式(2)のように表されることを考慮すると、粒状路盤構造に自重のみが載荷された場合の応力状態と自重と載荷荷重が載荷された場合の応力状態で、式(7)のように表すことができる。なお、当該近似方法における σ_s 、 σ_d と各載荷状態の最大・最小主応力 σ_1 、 σ_3 との関係を図-12に示す。

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \sigma_1^s - \sigma_3^s \\ \sigma_d &= (\sigma_1^{sp} - \sigma_3^{sp}) - \sigma_s \\ \sigma_m &= (\sigma_1^s + \sigma_3^s) / 2 \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 σ_1^{sp} ：自重と荷重負荷時の最大主応力、 σ_3^{sp} ：自重と荷重負荷時の最小主応力、 σ_1^s ：自重負荷時の最大主応力、 σ_3^s ：自重負荷時の最小主応力である。ただし、この場合、損傷の発生方向が問題になる。例えば、三軸圧縮試験では、軸圧の載荷方向と最大主応力 σ_1 の方向は一致しているが、地盤内では自重や載荷荷重の方向と最大主応力 σ_1 の方向は必ずしも一致しない。このため、地盤内では、累積損傷度理論を用いる場合でも損傷の発生方向を考慮する必要がある。しかし、本研究では、計算の

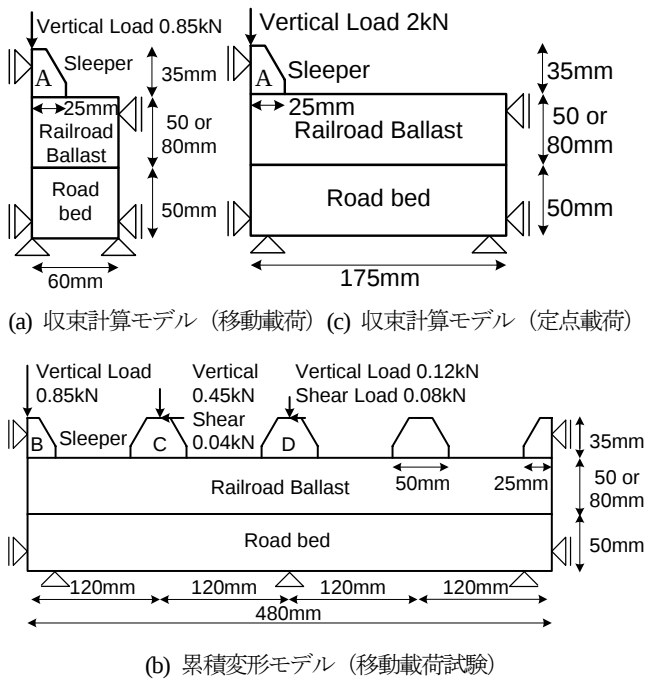


図-13 FEM 解析モデルの概略

簡略化のため材料特性については等方性を仮定することとし、損傷発生の方向性についてはその影響を無視し、損傷は要素内で一様に発生するものと扱うことにする。

4. 移動輪荷重繰返し作用下のバラスト軌道解析例

本章では、1/5 縮尺模型バラスト軌道に対して実施された、定点荷重方式と移動荷重方式の繰返し荷重試験結果⁹⁾と解析結果を比較し、前章で提案した累積変形解析方法の適用性について検討する。

(1) 解析方法

a) 解析モデル

1/5 縮尺模型バラスト軌道の繰返し荷重試験は、線路縦断方向を同一断面と仮定した 2 次元平面ひずみ状態でやっていることから、解析モデルも模型試験を模擬した 2 次元平面ひずみ FEM 解析モデルとした (図-13)。図に示すように、本研究では、収束計算用と累積変形用の 2 種類の解析モデルを用いる。具体的には、繰返し移動荷重試験の解析を行う場合、図-13(a)に示す収束計算モデルは、軟化変形係数の収束計算 (図-11 の手順 3, 4) に、図-13(b)に示す累積変形モデルは、 $E_M(n)$ の収束後に得られた軟化変形係数の分布を用いて行う累積変形解析 (図-11 の手順 5) に、それぞれ用いた。このうち、収束計算モデルは、模型バラスト軌道の移動荷重試験において、まくらぎ A 上に荷重輪があると仮定した場合のまくらぎ 1 本分の領域を模擬した解析モデルである。これに対し、累積変形モデルは、まくらぎ B 上に荷重輪があると仮定した場合のまくらぎ 5 本分の領域を模擬した解析モデルである。一

表-1 FEM 解析に用いたパラメーター

部 材	まくらぎ	道床	路盤	境界要素
密 度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	2.70	1.45	0.20	0.001
変形係数 $E(\text{GPa})$	70.0	0.07*	0.49	0.10
ポアソン比 ν	0.30	0.14*	0.30	0.10

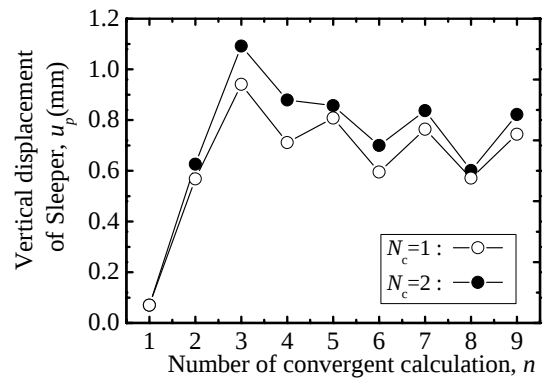
*損傷前の値

方、繰返し定点荷重試験の解析を行う場合には、図-13(c)に示す収束計算モデルのみを用いた。また、各解析モデルとも、まくらぎ、道床、路盤から構成されているが、本研究では模型バラスト軌道の道床と異なり、まくらぎ下面以下の道床のみをモデル化し、道床厚さは 50mm、80mm の 2 パターンとした。解析モデルの境界条件は、路盤完全固定・2 側辺スライド拘束とし、道床とまくらぎの間および道床と路盤の間にそれぞれ剛性が低く薄い要素 (以下「境界要素」と称す) を挿入して道床と両者との不連続性を考慮した。なお、各解析モデルともそれぞれ模型まくらぎ中心線を対称軸とした 1/2 対称モデルである。

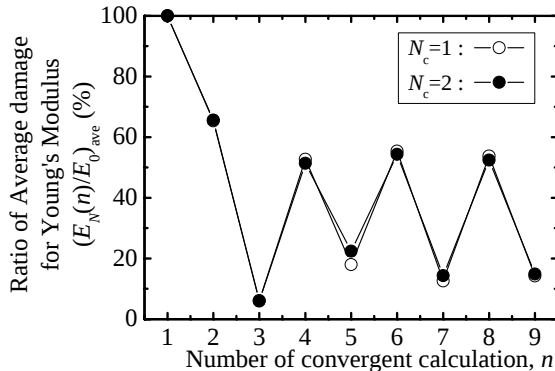
b) 解析条件

静的線形弾性 FEM 解析で用いる解析パラメーターを表-1 に示す。このうち、まくらぎおよび路盤の材料定数 (密度、変形係数、ポアソン比) は、模型試験と同じアルミ製まくらぎと鉄製路盤を想定し、一般的な値を採用した。また、境界要素の材料定数は、模型試験で得られた繰返し荷重 1 回目の弾性鉛直変位量とまくらぎ直下近傍の路盤圧力分布が FEM 解析結果と模型試験結果とでほぼ一致するように設定した。一方、道床の密度とポアソン比、および初期安定解析・初期応力解析で用いる荷重荷重前の未損傷の変形係数 (初期変形係数 E_0)、繰返し応力解析・累積変形解析で用いる軟化変形係数 $E_M(n)$ については、模型試験の試験条件と模型試験の道床バラストの応力状態を想定した多重リングせん断試験結果をもとに設定した。この際、前述のように多重リングせん断試験結果には供試体高さの影響が認められることから、多重リングせん断試験を要素試験と考えるのではなく、模型バラスト軌道の荷重試験における道床の変形挙動を模擬する試験であると考え、本研究では、道床厚さに合わせて供試体高さの異なる多重リングせん断試験結果を適用することとした。ただし、多重リングせん断試験機の仕様上、供試体高さの設定には制限があるため、本研究では、模型試験の道床厚さ 50mm と 80mm より若干大きめではあるが、供試体高さ 60mm と 100mm の多重リングせん断試験結果をそれぞれ用いた。供試体高さの違いによる解析結果への影響あるいは道床厚と供試体高さの関係を考慮した多重リングせん断試験結果の適用方法については、今後の検討課題である。

累積損傷度理論を適用する過程では、初期安定解析、初期応力解析、繰返し応力解析、累積変形解析が行われ



(a) 弾塑性鉛直変位量 u_p



(b) 平均損傷度 $(E_N(n)/E_0)_{ave}$

図-14 繰返し応力解析における収束傾向

るが、初期安定解析では重力 $1G(9.8m/s^2)$ のみを考慮し、初期応力解析、繰返し応力解析、累積変形解析では荷重と重力を載荷した。この際、荷重条件は、模型試験との整合性をとるため、移動載荷試験の解析を行う場合には、模型試験において各まくらぎで測定された荷重と同等の鉛直荷重とせん断荷重を載荷した (図-13(b))。ただし、移動載荷試験の解析に用いる収束計算モデル (図-13(a)) に対しては、同数の繰返し載荷による道床の損傷が輪荷重の移動によりまくらぎ位置に関わらず模型まくらぎ中心線を対称軸とした対称形に生じると仮定し、累積ひずみの計算において道床が最も損傷する、まくらぎ上に載荷輪がある場合の解析を実施することとした。荷重条件の一例として、移動輪荷重 $P=2.0kN$ 、道床厚さ $50mm$ の場合の鉛直荷重とせん断荷重を、図-13(a)、図-13(b)に示す。一方、定点載荷試験の解析を行う場合には、模型試験と同じ $2.0kN$ 相当の鉛直荷重を対称軸 (まくらぎ中心線) に沿って載荷した (図-13(c))。なお、鉛直荷重強度の設定にあたっては、道床の荷重支持状態 (まくらぎの側面と底面の応力分担率の比が $1:3$ 程度になること¹⁸⁾) を考慮した。

(2) 解析結果と考察

本節では、繰返し応力解析の計算過程で得られた軟化変形係数の分布と収束傾向、収束後の累積変形解析より得られたまくらぎ上面 (図-13に示すまくらぎAおよびB)

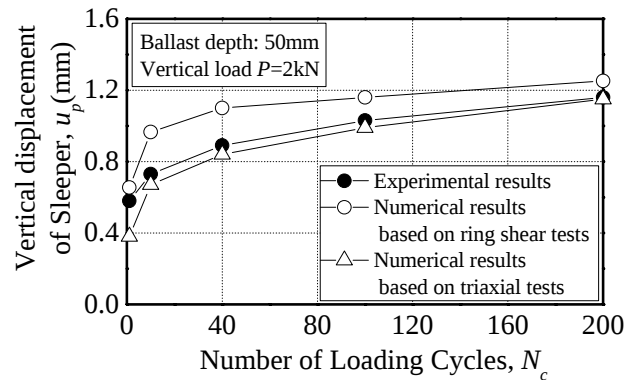


図-15 解析結果と試験結果の比較 (定点載荷試験)

での弾塑性鉛直変位量 u_p の繰返し載荷に伴う推移をもとに、累積損傷度理論を応用したFEM解析の適用性について検討する。

a) 繰返し応力解析の収束傾向

図-14は、定点載荷試験の累積変形解析において、載荷点であるまくらぎ上面の弾塑性鉛直変位量 u_p と、式(8)で定義される平均損傷度 $(E_N(n)/E_0)_{ave}$ が繰返し応力解析の収束計算の進行に伴って推移する様子を示したものである。

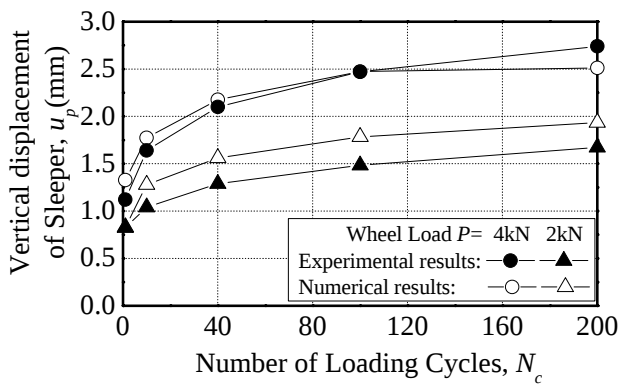
$$(E_N(n)/E_0)_{ave} = \frac{100}{m} \sum_{k=1}^m E_{N,k}(n)/E_0 \quad (8)$$

ここに、 E_0 : 道床の初期変形係数、 m : 道床のFEM要素数、 $E_{N,k}(n)$: 繰返し載荷回数 N 回目・収束計算 n 回目の道床要素 k の軟化変形係数である。図から、 $E_N(n)$ および u_p はそれぞれある値を中心とした振動状態にあるものの、収束計算 6、7 回以降では振動振幅はほぼ一定となること、および $E_N(n)$ や u_p の収束値を収束計算 6、7 回以降の奇数回と偶数回の値の平均値と考えた場合、繰返し載荷回数の増加に伴い $E_N(n)$ の収束値は低下し u_p の収束値は大きくなることから、これらのことから、提案する累積変形解析方法の数値計算の収束性や繰返し効果の再現性については、問題のない結果が得られると推定される。

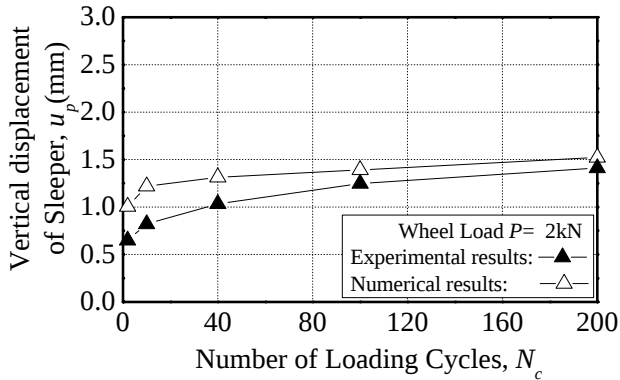
以上のような傾向を考慮して、収束判定は、平均損傷度について、 n 回目の値が $n-1$ 回目の値と比較して、その変化率が $\pm 5\%$ 以下となった場合、あるいは充分収束せずにある値を中心とした振動状態にある時には、平均損傷度の変化率が収束計算の奇数回の前後かつ偶数回の前後で両者の変化率が $\pm 2\%$ 以下となった場合に収束したものと判定した。この場合、弾塑性変位量の収束値は、収束計算の最後の回とその前の回の軟化変形係数の分布を用いて累積変形解析を行い、それらの平均値とした。

b) 解析結果と試験結果の比較

まず、定点載荷方式の繰返し載荷試験結果に対する累積損傷度理論を応用した累積変形解析方法の適用性について検討する。図-15は、まくらぎ上面での弾塑性変位量 u_p (収束値) と繰返し載荷回数 N_c の関係を、同一条件の試験結果と解析結果で比較したものである。ただし、解



(a) 道床厚さ 50mm



(b) 道床厚さ 80mm

図-16 解析結果と試験結果の比較（移動載荷試験）

析結果は、本研究で提案した多重リングせん断試験結果に基づく予測結果（図中○印）に加え、文献 4)で提案した三軸圧縮試験結果に基づく予測結果（図中△印）を併せて示した。図から、本研究の推定方法による u_p は、試験結果に比べて若干大きく、文献 4)で提案した解析結果の方が試験結果に近いものの、試験結果の繰返し載荷に伴う弾塑性変位量の増加傾向を充分捉えていることがわかる。次に、移動載荷方式の繰返し載荷試験結果に対する適用性について図-16をもとに検討する。ただし、同図中の解析結果はすべて、本研究で提案した多重リングせん断試験結果に基づく予測結果である。図を見ると、解析結果のまくらぎ上面での弾塑性変位量 u_p （収束値）は、試験結果に比べ若干大きいものの、試験結果の繰返し載荷に伴う弾塑性変位量の増加傾向と各試験条件ともある程度一致しており、本研究で提案した推定方法が、載荷条件や道床厚によらず移動輪荷重作用下においても有効であることがわかる。なお、図-17は、移動輪荷重 $P=4.0\text{kN}$ を200回繰返し載荷した場合の累積変形解析から得られた変位ベクトル図である。同図は、初期安定解析時の有限要素節点が累積変形解析時に移動した点をベクトルで結び、ベクトルの大きさだけを図面に合わせて適度に拡大したものである。図から、まくらぎ中央下では鉛直方向への移動が卓越しているものの、まくらぎ端部下では主に斜め下方へ、またまくらぎ間では水平あるいは上方へ動くなど、繰返し載荷により道床が塑性流動する傾向

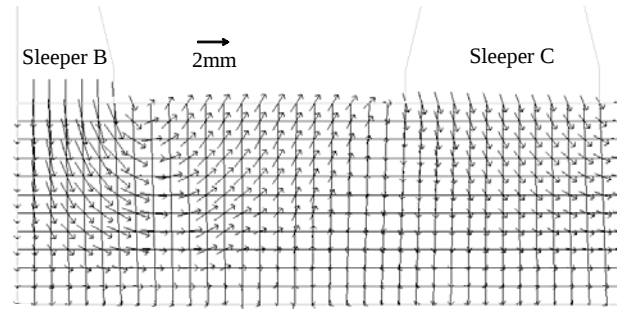


図-17 累積変形解析後の変位ベクトル図

が認められる。

以上のことから、実現象に即した試験条件で精度の高い要素試験を行い、粒状路盤材料の累積ひずみ特性を把握し、それに基づいて累積変形解析を実施した場合、簡易な線形弾性FEM解析でも、移動輪荷重作用下の粒状路盤構造の繰返し塑性変形量を比較的精度良く推定できることがわかった。また、このような解析結果が得られたことは、模型試験における道床の繰返し塑性変形挙動を道床バラストの室内要素試験結果を通して推定する手法の妥当性を示すものであると考えられる。ただし、解析精度の向上については今後さらに検討を要する。

5. まとめ

本研究では、移動輪荷重繰返し作用下の粒状路盤構造の繰返し塑性変形量の簡易推定方法を提案するため、異なる2種類の載荷方式（定点載荷・移動載荷）を採用したバラスト軌道の模型試験で生じる道床の繰返し塑性変形挙動の解析方法について検討した。その結果、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路盤構造の変形挙動に及ぼす影響を検討可能な、累積損傷度理論を応用したFEMによる累積変形解析を提案することができた。また、主応力軸回転条件で実施した粒状路盤材料の多重リングせん断試験結果を用いて提案した累積変形解析を行った場合、移動輪荷重作用下の粒状路盤構造の繰返し塑性変形量を簡易な線形弾性解析で比較的精度良く推定できることを、模型試験結果との比較検討により示した。しかし、実務レベルに提案した解析手法を利用するには、現象のモデル化方法や要素試験の実施方法等に関してまだ検討すべき多くの課題がある。今後、解析手法の適用性や解析精度の向上に関する研究を、実測データを用いたケーススタディにより深度化させる予定である。

謝辞: 本研究の遂行にあたっては、北海道大学大学院 森正樹氏に解析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18年度～平成19年度科学研究費補

助金（基盤研究(C)，課題番号：18560479，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

- 1) 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.
- 2) 関根悦夫，木幡行宏，蔭関魯，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) 木幡行宏，三浦宏介：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，平成15年度土木学会北海道支部論文報告集，第60号，pp.494-497，2004.
- 4) 関根悦夫，石川達也：繰返し荷重を受ける粒状材料の累積損傷度理論による塑性変形解析，土木学会舗装工学論文集，Vol.10，pp.53-60，2005.
- 5) Gerald, P., and Richard, J.B.: Performance of large-scale model single tie-ballast systems, *Transportation Research Record*, 1134, pp.7-14, 1987.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 石川達也，関根悦夫，杉山圭夫，三浦清一：多重リングせん断試験機による単粒度碎石の繰返し変形挙動の検討，地盤工学会北海道支部技術報告集，第45号，pp.105-114，2005.
- 13) 石川達也，関根悦夫，三浦清一：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，土木学会舗装工学論文集，Vol.11，pp.23-31，2006.
- 14) 西澤辰男，竹内康，小梁川雅：コンクリート舗装の粒状路盤における塑性変形の解析法，土木学会舗装工学論文集，Vol.7，pp.17-1-17-7，2002.
- 15) 竹内康：舗装用材料の弾塑性解析モデルに関する基礎的研究，土木学会舗装工学論文集，Vol.7，pp.24-1-24-9，2002.
- 16) 竹内康，西澤辰男，小梁川雅，遠藤桂：繰返し載荷によるコンクリート舗装粒状路盤の塑性変形解析法，土木学会舗装工学論文集，Vol.10，pp.161-168，2005.
- 17) 福津圭基，石川達也，三浦清一，関根悦夫：礫の繰返し変形特性に及ぼす粒径及び主応力回転の影響，地盤工学会北海道支部技術報告集，第47号，pp.155-160，2007.
- 18) 石川達也，大西有三，堀池高広：不連続変形法（DDA）による道床バラスト部繰返し塑性変形機構の検討，土木学会論文集，No.645/III-50，pp.15-28，2000.

PLASTIC DEFORMATION ANALYSIS OF COARSE GRANULAR MATERIAL UNDER CYCLIC MOVING WHEEL LOADS BY CUMULATIVE DAMAGE MODEL

Etsuo SEKINE, Tatsuya ISHIKAWA and Seiichi MIURA

This paper presents a simple method to estimate cyclic plastic deformation of ballasted track subjected to repeated train passages in terms of the strength and deformation characteristics of coarse granular materials. A new analytical procedure with linear elastic FE analysis considering the cumulative strain derived from multi-ring shear test results of poorly-graded crushed stone, namely ballast, was proposed, and it was revealed that the analytical procedure could roughly estimate the residual settlement of railroad ballast under cyclic moving wheel loads, by comparing test results of small scale model tests of ballasted track with the analytical results.