

有道床軌道の繰返し変形特性と評価法に関する研究

学位論文内容の要旨

鉄道における軌道構造は、道床バラストと呼ばれる単粒度碎石を用いた「有道床軌道」になっている場合が多い。有道床軌道材料としての道床バラストは、稜角に富み適度な剛性を保持している。しかし、多いところでは年間数百万回にも達する列車走行による繰返し荷重を受けることによって、道床バラストの摩耗や破砕による細粒化が生じ、さらには側方への移動などにより、軌道に不同沈下をもたらす。これを、軌道狂いと呼んでいる。軌道狂いが進行すると、車両の走行安定性は損なわれ、車体動揺が増加して乗客の乗り心地は悪化する。また、軌道狂いがある限度を超えると、車体の動揺に伴う慣性力の増大により列車脱線の危険性も生じることになる。このため、従来から軌道狂いの管理・修復基準等が考案され、定期的なモニタリングによって軌道狂いが一定の値を超えていることが明らかになった場合には、その修復が行われてきた。

このような状況の中で、1997 年 1 月より、現用線路の大部分(JR全線の約 90%)を占める有道床軌道に対しては軌道部材個々の部分的な改良や保守方法の改善により軌道の破壊・劣化の進行を抑制化しうる有道床軌道の設計標準が試行されている。この設計標準では、車両走行特性(走行安全性および乗り心地)や軌道整正周期等の条件設定に基づく軌道狂い進みの許容値と、軌道構造と車両・運転条件から得られる軌道狂い進みの推定値とを比較検討することにより、想定した軌道構造の妥当性を判断する方法を採用することとしており、これが本設計標準の一つの特徴となっている。

有道床軌道の設計標準の策定にあたっては、JR 在来線の直線部で標準的に使用されている PC まくらぎについて、実物大軌道による道床バラストの繰返し変形特性に関する系統的な試験として、最大荷重に着目して行われた。このため、本設計標準では、この試験結果に基づき定められた道床部沈下量の予測式の適用範囲は、厳密には本試験条件と類似した荷重条件・軌道構造に限定されることになる。従って、荷重条件・軌道構造が多様化し、よりフレキシブルな軌道構造のパフォーマンスが望まれる現状において合理的な軌道構造設計を行うには、種々の設計条件に対して道床部の沈下量を精度よく推定する手法の確立が必要不可欠となる。

このような背景から、本研究では、まず種々の設計条件のうち走行荷重列およびまくらぎ形状に着目して上下方向の繰返し載荷試験を行い、道床バラストの繰返し変形特性を詳しく調べている。さらに、まくらぎと道床間の接触条件の相違が道床バラストの繰返し変形特性に及ぼす影響を明確にしている。

本研究は、全7章から構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、鉄道線路の現状と研究の背景について述べ、本研究が地盤工学や鉄道工学に果

たす役割と意義について論じている。そして、研究の目的とその内容・構成について概説している。

第2章では、軌道破壊理論、道床バラストの石質基準および軌道構造設計手法に関する従来の研究動向を紹介している。

第3章では、実軌道における列車通過時の荷重—変位関係からもとめられた走行荷重列下の繰返し載荷試験を行い、道床バラストの繰返し変形特性を調べている。その結果、①実際の2軸台車毎の荷重列を想定した場合、前軸除荷・後軸載荷による荷重・変位振幅は荷重列間隔が短い場合のみとなる、②荷重は前後軸間で完全には除荷されないことから、まくらぎ／道床間に隙間が生じにくい場合、これによる道床沈下量の増分は極めて小さい、③道床沈下量の大半は台車単位の載荷によるものであり、まくらぎ／道床間の一部に微小な隙間が生じた状態から顕著になる、等の事実が明らかにされている。ここで、少ない荷重繰返し数の載荷試験結果に近似式を適用して道床沈下量をもとめる場合、従来用いられてきた算定式では所定の予測精度が得られない可能性があり、べき乗則にもとづく算定式の方が合理的であることを指摘している。さらに、荷重列間隔が短い場合に想定される最小荷重が大きい場合についても、荷重振幅および荷重繰返し数の関数として道床沈下量を式示するとともに、その有用性を明らかにしている。

第4章では、実物大模型軌道のまくらぎ下面に2方向ロードセルを配置して、一連の繰返し載荷試験を実施し、まくらぎ下面応力と繰返し変形特性の関係を調べている。その結果、現行まくらぎ軌道の沈下機構は、拘束圧の低いまくらぎ端部に大きな下面直応力とまくらぎ端部方向への下面せん断応力が作用するため、まくらぎ端部下の道床部が局所的に降伏することによるものとして説明を試みている。また除荷時には、まくらぎ／道床間に隙間が生じるようになることと、道床部の剛性低下も生じるため繰返し荷重による沈下が進行することになるとしている。このことはさらに、試作した下面の摩擦係数を増加させたまくらぎについて繰返し載荷試験を行い、道床バラストの繰返し変形特性に及ぼす影響を明示することにより検討している。その結果、微小ひずみレベルの繰返し変形特性に及ぼすまくらぎ下面の粗滑の影響は極めて小さいことが実証されている。

第5章では、数値解析を進め、道床バラスト内の応力分布に及ぼすまくらぎの形状の影響を考察している。その結果、たわみ性まくらぎの場合、まくらぎ長さを長くしても道床内最大せん断応力は常にレール直下に生じるため、道床内最大せん断応力を減少させる効果はほとんどないことを見出している。しかし、まくらぎにある程度の剛性が確保されている場合には、道床内最大せん断応力はまくらぎ端部下に生じるため、まくらぎ長さを長くすることにより道床内最大せん断応力を減少させることができることを明示している。

第6章では、第5章の解析結果にもとづき数種類の試験用まくらぎを製作し、道床バラストの繰返し変形特性を調べている。その結果、現行まくらぎ(長さ2.0m)と比較した場合、長さを2.6mとすることにより、平均沈下量が46%に、不同沈下量が9%に減少しており、大きな沈下抑制効果が得られることを明らかにしている。さらに道床突固め範囲を最適化することにより、長さ2.3mのまくらぎでも、同等の沈下抑制効果が得られることを示している。

第7章では、各章で得られた知見を総括し、今後の課題と展望を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浦 清 一

副 査 教 授 石 島 洋 二

副 査 教 授 三 田 地 利 之

学 位 論 文 題 名

有道床軌道の繰返し変形特性と評価法に関する研究

鉄道では、一般に単粒度碎石を主体とした道床バラスト上に軌道を設けるいわゆる「有道床軌道」構造を採用することが多い。たとえばJR関係では、保有施設の約90%を占めている。このような有道床軌道材料としての道床バラストには、稜角に富み適切な剛性を保持していることが求められている。しかし、多いところでは年間数百万回にも達する列車走行による繰返し荷重は、道床バラストの摩耗や破砕による細粒化を生じせしめ、さらには側方への移動などにより、軌道に不同沈下をもたらす。これは、「軌道狂い」と呼ばれている。この現象が進行すると、車両の走行安定性は損なわれ、車体動揺の増加により乗り心地は悪化し、さらに軌道狂いがある値を超えると、車体の動揺に伴う慣性力の増大により列車脱線の危険性も生じることになる。このため、従来から有道床軌道の管理・修復基準等が考案され、定期的なモニタリングによって軌道狂いに対応してきているが、具体的な標準値の設定など検討すべき事項は少なくない。

このような背景から、本研究では、まず種々の設計条件のうち走行荷重列およびまくらぎ形状を変化させて一連の繰返し載荷試験を行い、道床バラストの変形特性とその評価法を詳しく調べている。さらに、まくらぎと道床間の接触条件の相違が道床バラストの繰返し力学特性に及ぼす影響を明確にすることを目指した。

本論文は7章から構成され、各章の概要と主たる結論は以下のとおりである。

第1章では、本研究の目的とその工学的な背景とともにその内容・構成について概説している。特に、鉄道線路の現状と研究の背景について詳述し、本研究が地盤工学や鉄道工学に果たす役割と意義を論じている。

第2章では、軌道破壊理論、道床バラストの石質基準および軌道構造設計手法に関する従来の研究動向を紹介している。

第3章では、実軌道における列車通過時の荷重－変位関係からもとめた走行荷重列下の繰返し載荷試験を実施し、道床バラストの沈下挙動を調べている。その結果、①前軸除荷・後軸載荷による荷重・変位振幅は荷重列間隔が短いため僅かなものとなる、②荷重は前後軸間で完全には除去されないため、道床沈下量の増分は極めて小さい、③道床沈下量の大半は台車単位の載荷によるものであり、まくらぎ／道床間の一部に微小な隙間が生じた状態から顕著になる、等の事実が明らかにされている。ここで、列車荷重の繰返し数が少ない場合において道床の沈下量が問題になるようなケースでは、従来用いられてきた算定式は所定の予測精度を保持できない可能性があることを指摘している。これらの事実に基づ

いて、新たにべき乗則による算定式を提示し、予測精度の向上を図っている。荷重振幅および荷重繰返し数の関数として式示された道床沈下予測式は、荷重列間隔が短い場合に想定される最小荷重が大きい場合についても、実挙動を良く説明することができることを明らかにしている。

第4章では、実物レベルの模型軌道において、一連の繰返し載荷試験を実施し、まくらぎ下面応力と繰返し変形特性の関係を調べている。その結果、現行まくらぎ軌道の沈下機構は、拘束圧の低いまくらぎ端部に大きな下面直応力とまくらぎ端部方向への下面せん断応力が卓越するため、まくらぎ端部の道床部が局所的に降伏することによるものとして説明できるとしている。また除荷時には、道床部の剛性低下も生じるため、繰返し荷重による沈下が進行することになることを見出している。さらに、試作した下面の摩擦係数を増加させたまくらぎについての繰返し載荷試験から、道床バラストの繰返し変形特性に及ぼす影響を明示することに成功している。その結果、微小ひずみレベルの繰返し変形特性に及ぼすまくらぎ下面の粗滑の影響は極めて小さくなることを明確にしている。

第5章では、道床バラスト内の応力分布に及ぼすまくらぎ形状の影響について、数値解析を展開している。その結果、たわみ性まくらぎの場合、まくらぎ長を大きくしても道床内の最大せん断応力は常にレール直下に生じることになるため、その最大せん断応力を減少させる効果はほとんどないことを見出している。一方、まくらぎにある程度の剛性が確保されると、まくらぎ長を長くすることにより道床内最大せん断応力を減少させることができることを示している。

第6章では、第5章の解析結果にもとづいて数種類の試験用まくらぎを製作し、まくらぎの形状差による道床バラストの繰返し変形特性の変化を調べている。その結果、まくらぎ長の適切な選択と道床突固め範囲の最適化により、顕著な沈下抑制効果が得られることを実証するとともに、前章の解析結果の妥当性を示している。

第7章では、各章で得られた知見を総括し、今後の課題と展望を述べている。

これを要するに、著者は、これまで未解明であった列車走行による道床バラストの繰返し変形特性を一連の実験と解析によって明らかにするとともに、実用的な道床の沈下予測式の提案を行い、さらにはまくらぎと道床間の接触条件の相違が道床バラストの変形特性に及ぼす影響について貴重な知見を得ており、地盤工学および鉄道工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。