

論文の内容の要旨

論文題目 移動荷重の影響を考慮した鉄道路盤の変形特性に関する研究
氏名 桃谷 尚嗣

鉄道のバラスト軌道に広く採用されている強化路盤（図 1）は粒度調整碎石とアスファルトコンクリートにより構成され、高い剛性によって軌道を支持する構造である。強化路盤を用いることにより、道床バラストの変形に起因する保守作業を軽減する効果が期待されることに加え、雨水の路床への浸入を防止して降雨時の列車走行安定性を高めるとともに、噴泥の発生を防ぐ効果がある。さらに、強化路盤は列車荷重を分散して路床へ伝達するため、路床の変形を抑制する効果がある。

従来の強化路盤の設計では弾性変形による路盤表面のたわみ量が 2.5mm 以内となるように路盤の厚さが決められていた。しかしながら、この設計方法では路盤の厚さは路床の条件により一義的に決定されることになるため、耐用年数、列車荷重、列車本数等に応じた柔軟な設計を行うことができない。経済的で安全な構造物を建設するために、構造物の設計は性能規定による方法に移行されつつあり、鉄道路盤の設計も性能規定による方法を取り入れることが求められている。そこで、本研究では道路のアスファルト舗装の設計と同様に、アスファルトコンクリートの疲労寿命から路盤の厚さを決定する方法を検討することとした。アスファルトコンクリートの疲労寿命はアスファルトコンクリートに発生するひずみによって規定されるため、そのひずみを精度よく推定する必要がある。しかしながら、鉄道ではレールとまくらぎを介して列車荷重が路盤に伝達されるため、ア

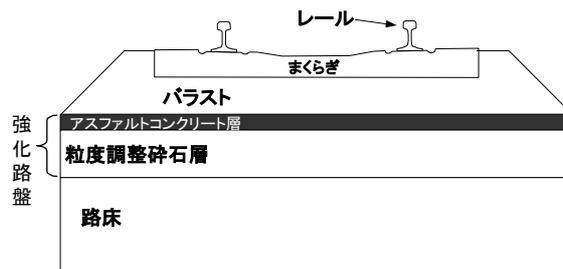


図 1 強化路盤の構造

スファルトコンクリートに直接タイヤで荷重される道路の場合と比較すると変形のメカニズムが複雑である。道路のアスファルト舗装の設計では多層弾性解析により、アスファルトコンクリートのひずみが求められるが、多層弾性解析では複雑な形状の軌道を支持するアスファルトコンクリートのひずみを求めることは困難である。そこで、本研究では有限要素法（FEM）によりアスファルトコンクリートのひずみを求める方法を検討することとした。従来の強化路盤の設計でも路盤のたわみ量を求めるために FEM が導入されているが、アスファルトコンクリートのひずみを求めるためには、軌道の形状を詳細にモデル化することにより、精度の高い解析を行う必要がある。

本研究では、鉄道路盤におけるアスファルトコンクリートのひずみを FEM により求めることの妥当性を検証するために模型実験を行い、FEM 解析と模型実験の結果と比較することとした。荷重試験を行う際に、従来行われていたような定点で繰返し荷重を与える方法では荷重点直下に変形が相対的に大きくなり、支持条件が繰返し荷重とともに変化してしまうため、弾性挙動を適切に評価できない可能性があった。そこで列車の走行を模擬し、荷重輪を移動させることにより荷重を行う移動荷重試験を行うこととした（図 2）。移動荷重試験を行うことにより、各まくらぎが順次同じように荷重されるため、定点荷重で生じるような支持条件の変化を回避することができる。すなわち、移動荷重試験を行うことで繰返し荷重を行った場合でも路盤の弾性挙動を適切に評価することが可能になると考えられる。

一方、実物大のアスファルト路盤の弾性挙動を検討するために、ここではアスファルトコンクリート路盤に直接まくらぎを設置するアスファルト路盤直結軌道を対象とした試験を行った。この軌道方式ではアスファルトコンクリート路盤を用いるため、その設計においては強化路盤と同様に、アスファルトコンクリートのひずみを評価することが重要となる。本研究ではアスファルト路盤直結軌道の変形特性を詳細に計測し、FEM との整合性を評価することとした。

従来の強化路盤の設計ではレールやまくらぎより構成される軌道の変形については解析を行わず、バラスト内における圧力の分布と路盤に作用する圧力をあらかじめ仮定することによって解析を行っていた。しかしながら、アスファルトコンクリートのひずみを精度良く推定するためには、バラストに作用する応力や路盤表面に作用する応力をより現実に即した方法で求める必要がある。本研究では、バラスト上に設置した実物大まくらぎの下面に分割ロードセルを設置してまくらぎ下面に作用している圧力を測定するとともに、路盤表面に作用している応力を測定した。その結果を FEM と比較することで圧力の分散に関して仮定することをせずに、バラストを含めてモデル化した解析方法の妥当性を検証した。

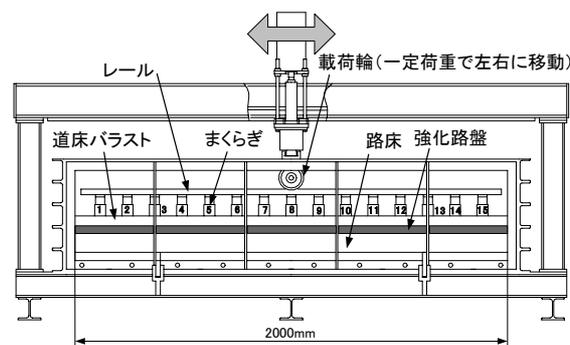


図 2 小型移動荷重試験装置

小型軌道模型による移動荷重載荷試験によって得られたまくらぎ荷重分担率，路盤表面変位，土槽底面応力について FEM によりシミュレートした結果，地盤の解析パラメータを要素試験の結果から適切に設定することで，実験結果と整合性の高い結果を得ることが確認できた。また，実物大のアスファルト路盤直結軌道の載荷試験によりアスファルトコンクリートのひずみに関する詳細な計測を行った結果，複数の層に分けて転圧するアスファルト路盤では層間のすべりを解析上考慮する必要があることが分かった。ただし，強化路盤のアスファルトコンクリート層は薄いため，1層で転圧されるのでアスファルト層間のすべりを考慮する必要はない。

バラスト上に設置したまくらぎの載荷試験を行った結果，バラスト軌道におけるまくらぎの荷重－変位曲線にはまくらぎ下面とバラスト粒子間のベッディングエラーの影響が強く含まれ，非線形性が強くなることが分かった。しかしながら，FEM によるシミュレーションを行う際には，バラスト層の変形係数として荷重レベルの大きい部分のバネ係数に相当するヤング率を用いることで，荷重レベルの小さい領域に含まれる非線形性の強い部分影響を取り除いて路盤圧力の評価を行うことができることが分かった。

以上の検討結果により，地盤のパラメータを適切に設定することで，弾性解析による3次元 FEM 解析で列車荷重下における路盤の変形挙動を適切に評価できることが確認できた。そこで，実物大の強化路盤を対象とした FEM 解析（図 3）を行い，求められたアスファルトコンクリートのひずみからアスファルトコンクリートの破壊基準を用いることで耐用年数の試算を行った。解析の結果，アスファルトコンクリートのひずみは路盤のたわみ形状ではなく，離散的に配置されたまくらぎの位置の影響を強く受けることが明らかとなった。すなわち，まくらぎ直下では引張りひずみが生じるが，まくらぎ中間部ではひずみが小さく，路盤や路床の条件によっては圧縮ひずみが生じることが分かった。この傾向は模型実験の結果でも同様であった。また，引張りひずみの卓越する方向は，路盤の厚さや路床の剛性によって変化するため，引張りひずみを評価する際には最大主ひずみを用いるのが適切であること判断した。この方法によって，現行の設計標準における強化路盤の寿命を推定したところ，妥当な厚さであることが確認されたが，列車本数の少ない区間では現在よりも路盤を薄くできることが分かった。

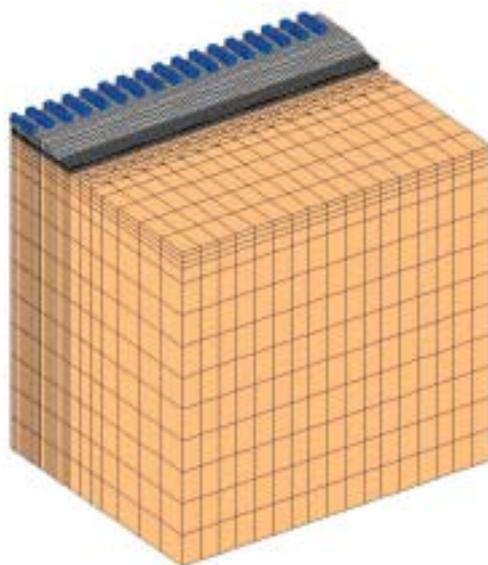


図 3 強化路盤の FEM 解析モデル

一方、繰返し载荷による残留沈下については、移動荷重载荷を行うと地盤内の主応力の方向が変化することにより、沈下量が大きくなるのが従来から指摘されていた。本研究では、小型軌道模型を用いた試験により、移動荷重载荷と定点载荷の違いによる、繰返し载荷における残留沈下について検討を行った。その結果、移動荷重载荷では定点载荷の3~6倍程度残留沈下量が大きくなるのが分かった。この原因として、主応力方向の回転の影響に加え、軌道の構造的な要因が大きく影響していることが分かった。定点载荷では载荷点直下の地盤の変形が相対的に大きくなるため、レール剛性による荷重の分散効果によって载荷点直下に作用する応力が繰返し载荷とともに減少し、それが残留沈下量に大きな影響を与えていると考えられる。まくらぎ受ける荷重の大きさが残留沈下量に与えるの影響については、まくらぎ1本の模型に対して载荷荷重を段階的に変化させた繰返し载荷試験を行うことにより検討を行った。その結果、载荷荷重を5%程度減少させただけで残留沈下量が半分程度に減少することが分かった。つまり、荷重履歴を受けている地盤では、それより小さい荷重を受けても残留沈下はあまり生じないため、载荷中に荷重分担率が刻々と変化する定点载荷では残留沈下量が小さくなると考えられる。一方、地盤内の主応力の回転量をFEMにより求めた結果、まくらぎ直下の応力が高い位置では主応力の回転がほとんど生じないことが分かった。すなわち、鉄道では不連続に配置されたまくらぎを介して地盤に荷重が伝達されるため、道路を走行する車輪の場合のように、まくらぎ直下では連続した主応力の回転は生じない。ただし、深い位置では複数のまくらぎによる応力が重なり合って主応力は回転しているため、主応力の回転の影響は無視できないが、鉄道の場合には主応力の回転の影響に加え、軌道の構造的な要因が大きいことが分かった。

以上のように、本研究では鉄道路盤の変形メカニズムを詳細に検討した上で、新しい強化路盤の設計方法を提案した。また、移動荷重载荷試験と定点载荷試験の結果から、载荷方式による路盤の変形特性の違いを明らかにした。本研究によって、鉄道路盤の弾性挙動については定量的な評価を行うことができることが分かった。一方、繰返し载荷による塑性変形については変形のメカニズムが明らかになり、定性的にはその挙動について評価することが可能となった。今後の課題として、繰返し载荷による軌道および路盤の残留変形を定量的に求める方法を検討することが必要である。