

論文の内容の要旨

論文題目 東海道新幹線有道床軌道の耐震性能向上に関する研究

氏 名 可知 隆

本研究は、大規模地震においても軌道状態を保持することが可能なように、有道床軌道構造を強化して耐震性能を向上させることを目的としており、2004年10月の新潟県中越地震で発生した走行中の新幹線車両では初めてとなる脱線事故が契機となっている。過去の大規模地震時に有道床軌道では、道床バラストの流動化や道床抵抗力の低下による軌きょうの座屈現象や著しい軌道狂いが発生し、列車の走行安定性に支障を与えた事例も報告されている。一方で、近年における重要土木構造物の設計では、発生確率は低いながらも極めて大きな強度を持つレベル2地震動が考慮されるようになってきている。しかしながら、東海道新幹線の軌道構造は橋梁等の無道床区間を除くほぼ全ての区間が有道床軌道であるため、レベル2地震動を超えるような大規模な地震動を受けた場合、軌道形状の保持が困難となり、列車の安全運行に影響を与えることが懸念されている。

本研究では、走行する列車の脱線そのものを防止することを目的に開発された脱線防止ガードの機能を発揮させるため、有道床軌道の道床肩を強化し、まくらぎの道床横抵抗力を保持することにより、大規模地震発生時においても軌道の変位を脱線防止に必要とされるレベルまで低減する合理的で経済的なバラスト流出防止工法を提案した。この分野での既往の研究としては、鉄筋コンクリート製ブロックによるバラスト止め（以下「RCバラスト止め」と記す）が

あり、その耐震性能も確認されている。しかし、RCバラスト止めは、幅 50cm で約 150～200kg の質量があるため、重機械施工および線路閉鎖手続きが必要であり、さらには施工中に突起部の裏込めが十分でないと軟弱地盤の盛土区間で肩部に変状が発生し、地震時に盛土肩が弱点となる等の施工性および経済性の課題がある。

一方で、鉄道盛土の耐震性能を高めるために、RRR工法に代表されるジオテキスタイルを用いた補強工法が積極的に採用されている。有道床軌道は一般に高さ数十cmであり、しかもバラストは盛土材料として最適であるため、高さ数mの盛土の耐震補強が可能であるならば、有道床軌道の耐震補強も可能であると考えた。次に、土構造物の補強工法の一つとして土のう工法がある。新しいバラスト流出防止工法を検討するにあたり、土のうの効果にも着目した。そこで、バラストを土のうに入れて道床肩に沿って積み上げる構造のバラスト止めを検討した。土のう袋は安価で入手しやすい材料であり、現地のバラストの使用が可能のため、経済性で有利になる。更に、土のうは袋の大きさにより質量を調節できるため、分割して積み上げることで人力施工が可能になり、施工性でも有利となる。

バラストは粒径が大きく稜角に富んでおり、相互の噛み合わせにより大きな摩擦抵抗を発揮することで、列車振動に対して安定した形状を保持している。そのため、バラストを通常の土のうに入れて積み重ねた場合、土のうの境界面でバラスト相互の噛み合わせが阻害され、滑動が生じる恐れがあった。そこで、バラスト本来の噛み合わせを活かしながら土のうの効果を発揮する方法として、耐久性に優れたジオテキスタイル素材の大きな目合いを持つバッグ（以下「ジオテキバッグ」と記す）を採用した。また、せん断抵抗を強化するため、補強鉄筋をジオテキバッグの積層体を貫通して路盤部に打込む構造（以下「ジオテキバッグ工法」と記す）とした。

従来の研究では、土構造物の耐震性能を定性的に評価することに留まっていたが、本研究では実物大振動台試験における2つの数値目標値と比較することで、ジオテキバッグ工法の耐震性能の向上を定量的に評価した。本研究では、振動台試験における1つ目の数値目標値として、実台車を用いた想定東海地震波を入力波とした実台車振動台試験における脱線防止ガードの機能が確認されたまくらぎ動的変位の最大値に基づき、まくらぎの動的変位 25mm 以下を設定した（以下「数値目標値①」と記す）。また、2つ目の数値目標値として、地震直後も座屈を発生させないことが必要なことから、まくらぎ 3mm 移動時の道床横抵抗力 1 本あたり 10.8kN 以上を設定した（以下「数値目標値②」と記す）。

まず、ジオテキバッグ工法の基本仕様を設定するために水平支持力試験を実施した。その結果、補強鉄筋を打込んだジオテキバッグ積層体は、補強鉄筋が支持杭となり、水平荷重に抵抗することでRCバラスト止めとほぼ同等の水平支持力を有するとともに、RCバラスト止めと同程度変位を抑制することが可能であることを確認した。以上のことから、ジオテキバッグに

質量 25 kg のバラストを詰め、1 層ずつプレートランマーで転圧し、補強鉄筋は丸鋼棒を線路方向に 1 バッグあたり 2 本打込み、路盤へ打込む根入れ長さ（以下「根入れ」と記す）を 200mm とした構造をジオテキバッグ工法の基本構造として設定した。

次にジオテキバッグ工法の基本構造の耐震性能を確認するため、実物大軌道を使用し、想定東海地震波を入力波とした振動台試験を実施した。東海道新幹線の有道床軌道の現場実断面を考慮し、道床肩幅が広い断面を模擬してバッグを 2 列配置した構造で加振した結果、40mm のまくらぎ動的最大変位が発生し、数値目標値①を満足しなかった。この理由として、2 列目のバッグに補強鉄筋が無かったため、拘束力が弱く比較的動きやすいバラスト部分が増えたところに道床断面が大きくなったことで大きな慣性力が作用したことが考えられる。

上述した課題に対処し、ジオテキバッグ工法の基本構造を改良するため、再度水平支持力試験を実施した。ジオテキバッグの積み上げ角度、補強鉄筋の有無、打込み本数、打込み角度、鉄筋の直径、根入れなど各種条件を変えて 18 ケースの構造について試験した結果、バッグを傾斜積みとして補強鉄筋も傾斜させて 2 本打込み、根入れも増加させる改良を実施したケースにおいて最大の水平支持力を有し、変位も最小に抑制できることを確認した。以上の結果に基づいて、1 列目のジオテキバッグを 22.5° の傾斜積みとし、2 列目のジオテキバッグをまくらぎ端から 100mm の位置に設置した上で、棒状の鉄筋に代わり、機能性及び施工性に優れるコ型形状の補強鉄筋（直径 13mm 以上の異型鋼棒）の根入れが 300mm となるように 1 列目は 70° の角度で 1 本、2 列目は 90° の角度で 1 本打込んだ軌道構造を対象に、想定東海地震波を入力波とし、道床肩幅が広い断面を模擬した条件での振動台試験を再度実施した。結果としてまくらぎ動的最大変位は 7mm に低減、加振後の道床横抵抗力は 10.8kN/本以上となることを確認した。よって、ジオテキバッグ工法は数値目標値①②をともに満足することから、十分な耐震性能を有することを確認し、上述した軌道構造をジオテキバッグ工法の標準構造として設定した。また、振動台試験の結果から標準構造において、まくらぎ変位を増大させ、あるいは残留変位に影響を及ぼすのは 1000gal 以上の主要動であり、小さい加速度で繰返し加振しても変位量はほぼ復元することを確認した。さらに、系統的に実施した振動台試験の結果より、対象とする地震の大きさ、地域、線路の重要度、線路構造等の違いに対して、ジオテキバッグ工法に用いる補強鉄筋の本数、長さ、路盤部への打込み深さ等のパラメータの組み合わせで耐震性能を合理的に評価、最適な軌道構造を設定できる可能性があることを確認した。

以上のように耐震性能を検証したジオテキバッグ工法を実用化するにあたり、耐久性の観点からジオテキバッグに使用する素材に関する検討を実施した。まず、実施におけるプレートコンパクターを使用した転圧を考慮し、素材の耐切創性（切れにくさ）に関する試験を実施した。その結果、ポリエチレンのみの場合に比べて約 4 割損傷数が少なくなることから、ポリエ

チレンに高強度繊維のポリアリレートを配合したものをジオテキバッグの素材として使用することにした。次に、ジオテキバッグに使用するポリエチレンやポリアリレートは一般的な高分子材料と同様に紫外線による劣化が生じるため、これらの素材の耐紫外線性に対する確認試験を実施した。その結果、試験結果から推定されたバラストの更換周期である 20 年分に相当する紫外線量で促進曝露させた素材の引張強度はバッグによるバラストの補強効果を発揮するための必要強度以上の値であったことから、ジオテキバッグが長期間紫外線に曝露された敷設状況下であっても、機能を維持できることを確認した。

最後に、ジオテキバッグ工法の施工性を確認するため、東海道新幹線の本線において標準構造に対する試験施工を実施した。その結果、東海道新幹線における 1 夜あたりの作業時間帯である約 4 時間において、RC バラスト止めの一般的な施工延長と同程度の 10m の施工が人力だけで可能なことを確認した。

本研究では、新たに提案した「ジオテキバッグ工法」が必要な耐震性能、耐久性および良好な施工性を有することを実証した。本工法は、耐震性能が向上するだけでなく、変形に対する追従性もあるため、橋台裏対策や 20cm 未満の盛土沈下および路盤陥没抑制対策としても効果があり、道床横抵抗力の増加による夏季のロングレールの張出し防止対策、列車走行に伴う軌道狂いの抑制効果等の副次効果及び在来線軌道での活用も期待できる。

本工法は、東海道新幹線での試験施工実績も踏まえて既に延長約 5km で実用化され、平成 24 年度末までに延長 25km の施工計画がある。