

3608 ジオテキバッグ工法による東海道新幹線脱線・逸脱防止対策

正 [土] ○可知 隆 (東海旅客鉄道) フェロー [土] 関 雅樹 (東海旅客鉄道)
正 [土] 小林幹人 (東海旅客鉄道) 正 [土] 永尾拓洋 (東海旅客鉄道)
正 [土] 古関潤一 (東京大学生産技術研究所)

Measures for Preventing Derailment and Dislodgement on Tokaido Shinkansen Applied Ballasted Track Reinforced with Geosynthetic Bags

Takashi KACHI, Central Japan Railway Company, 1545-33, Ohyama, Komaki-shi, Aichi
Masaki SEKI, Central Japan Railway Company Mikihito KOBAYASHI, Central Japan Railway Company
Takuhiro NAGAO, Central Japan Railway Company Junichi KOSEKI, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

In order to reduce deformation of ballasted tracks during large earthquakes, a new method to reinforce ballasted tracks with stacked geosynthetic bags that are filled with ballast was developed. This method can be installed only by human power and more economical than the concrete blocks. In this study, based on results of shaking table model tests, it is confirmed that the reinforced ballasted tracks have a sufficient resistance against a seismic wave that is larger than the so-called Level 2 earthquake motions.

Keywords: ballasted track, geosynthetic bags, seismic resistance, shaking table model tests

1. はじめに

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震により、上越新幹線の浦佐～長岡間を走行中のとき325号が、ロッキング脱線により脱線するという事象が発生した。この事故を受け、平成16年10月25日に国土交通省鉄道局が設置した「新幹線脱線対策協議会」に東海旅客鉄道も参画し、施設面、車両面で当面とり得る対策の可能性等について検討を進めてきた。具体的には実験、解析及び試験敷設を実施し、その結果に基づき、地震時の脱線・逸脱防止に有効であり、保守上においても支障のない対策を確立した¹⁾。

脱線防止ガードを有効に機能させるため、バラスト軌道では、バラスト軌道の外側に壁を設けることで、地震時にバラストが崩れて流出するのを抑制する必要がある。東海道新幹線では、従来から、鉄筋コンクリート製のバラスト止め(以下、RCバラスト止め)を用いた工法を進めてきたが、これに加え、コスト低減を目的に新たな工法を開発した。本報告では、新工法(ジオテキバッグ工法)の概要と、振動台試験により耐震性能を確認した結果について述べる。

2. ジオテキバッグ工法の概要

従来からバラスト流出対策に用いられてきたRCバラスト止めを図1に示す。RCバラスト止めは盛土に建て込んだ前面の爪で十分な水平支持力を確保して滑動を防ぎ、壁面背後の底面で転倒に対して抵抗する形状となっている。しかし、RCバラスト止めは幅50cmで約150～200kgの重量があるため、施工に重機が不可欠であり、施工性と経済性に課題があった。

施工性と経済性に優れた新たなバラスト止めを検討するにあたり「土のう」の効果に着目した。土のうの効果

として、粒状体を袋に包むことで外力によって発生する袋の張力が見かけの粘着力 c の役割を果たし、耐荷性能が増すことが知られている²⁾。そこで、まずバラストを土のうに入れて道床肩に沿って積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重量を調節できるため、分割して積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。

一方、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た場合、土のうの境界面でバラスト相互の噛み合せが阻害され、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網目袋(以下「ジオテキバッグ」と記す)を開発し、ジオテキバッグの積層体にせん断抵

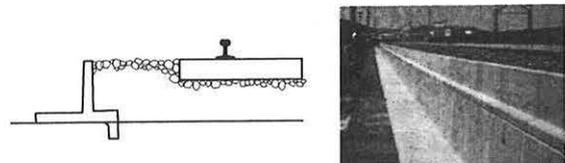


図1 RCバラスト止め

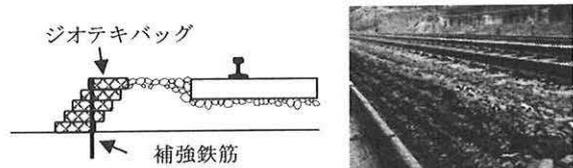


図2 ジオテキバッグ工法

抗を強化するための補強鉄筋を打込む構造(以下、「ジオテキバッグ工法」と記す)(図2)を考案した。

ジオテキバッグ工法はRCバラスト止めが抗土圧構造といえるのに対し、本来土圧として作用するバラストをジオテキバッグで補強することで自立性をもたせた補強土工法の一つと考えられる。また、変形に対する追従性があるため、橋台裏対策や20cm未満の盛土沈下抑制対策としても効果があり、道床肩幅の増加による道床横抵抗力増加などの副次効果も期待できる。なお、本工法については特許出願中である。

3. 基本構造による振動台試験

3.1 試験方法

試験モデルを図3に示す。試験モデルは複線断面の半断面を模擬した実物大軌道とし、土槽を中央で仕切り2種類の試験構造を製作した。盛土材料は鉄道設計標準³⁾の土質区分②に相当する山砂を使用し、締固め後の湿潤単位体積重量が 17kN/m^3 になるよう調整した。軌道材料は東海道新幹線仕様である。ジオテキバッグ(幅約 $400\text{mm} \times$ 奥行約 400mm 、厚さ約 100mm 、網目 25mm)は質量 25kg のバラストを詰め、一定の高さになるよう一層ずつプレートコンパクターで転圧した。補強鉄筋は $\phi 12\text{mm}$ の丸鋼棒をバッグ1袋あたり2本打込み、根入れ長は 200mm とした。入力地震波はL2地震動および想定東海地震波¹⁾とした。耐震性能の目標は、変位制限標準⁴⁾および実台車を用いた加振試験⁵⁾で脱線防止ガードが作用したときのまくらぎ変位の最大値から、まくらぎ変位 30mm 以下とした。

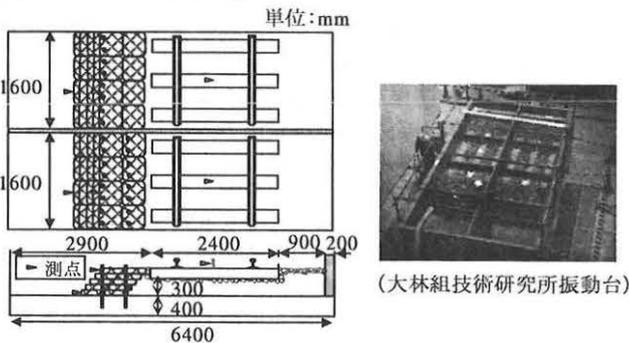


図3 試験モデル(基本構造による振動台試験)

3.2 試験結果

想定東海地震波の加振中に計測したまくらぎとバラスト止めの変位波形および最大変位を図4に示す。

(a) RCバラスト止め

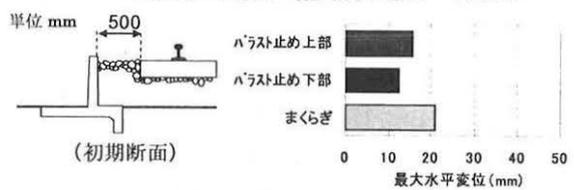
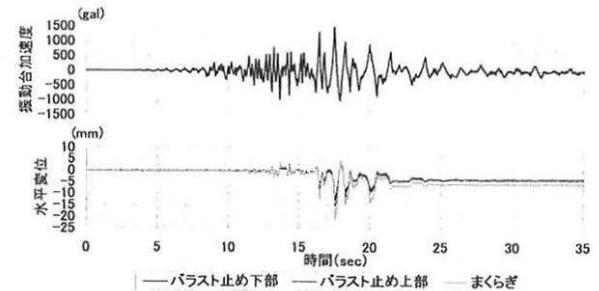
バラスト止め上部で 16mm 、まくらぎで 21mm の最大変位が発生しており、目標とする耐震性能を満足した。バラスト止めの変形は、バラスト止め上部と下部の変位が同程度であり、滑動モードが卓越している。滑動による変位を起こさないためには、爪部と盛土になるべく隙間を作らないように施工することが重要である。

(b) ジオテキバッグ工法(基本構造:1列)

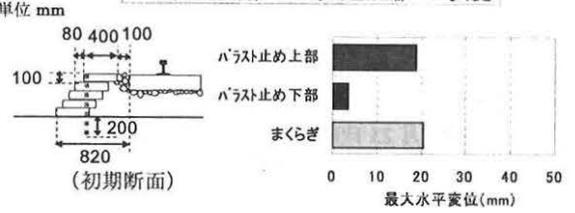
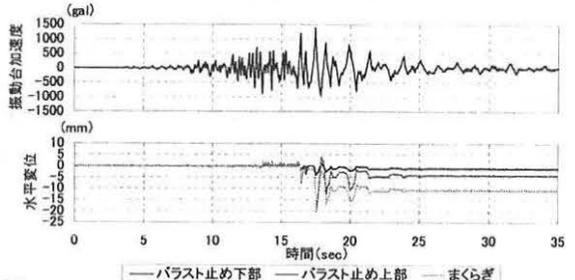
バラスト止め上部で 19mm 、まくらぎで 21mm の最大変位が発生し、目標とする耐震性能を満足した。バラスト止めの変形モードは、バラスト止め下部に対し上部の変位が大きくなっており、転倒モードが卓越している。

(c) ジオテキバッグ工法(基本構造:2列)

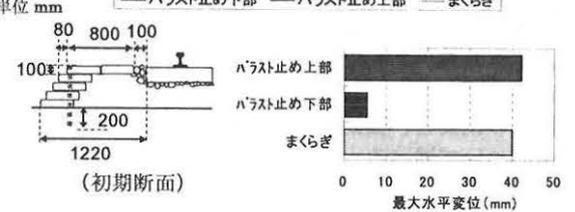
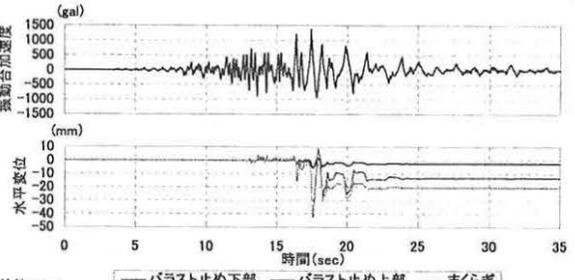
道床肩幅が広い断面を想定してジオテキバッグをまくらぎ端から離し、2列配置した構造で試験を行った。結



(a) RCバラスト止め



(b) ジオテキバッグ工法(基本構造:1列)



(c) ジオテキバッグ工法(基本構造:2列)

図4 振動台試験結果(基本構造)

果はバラスト止め上部で 42mm 、まくらぎ変位で 40mm の最大変位が発生し、目標とした耐震性能を満たさなかった。これは道床断面が大きくなったことで、ジオテキバッグに作用する動土圧が大きくなり、上乗荷重が少なく水平抵抗力の小さいバラスト止め上部で変位が大きくなったと考えられる。

4. 改良構造による水平支持力試験

振動台試験の結果、まくらぎ近傍に配置したジオテキバッグ工法で目標とした耐震性能を有することが確認できた。しかし、道床肩幅の広い箇所にジオテキバッグ工法を適用する場合には、道床断面を広く掘削しなければならない、施工性に課題が残る。そこで、水平支持力を強化するため、ジオテキバッグ工法の構造改良を検討し、水平支持力試験で効果を確認した。

4.1 試験方法

水平支持力試験は図5に示すように、試験構造に対して油圧ジャッキで水平载荷を行い、ロードセルとレーザー変位計で荷重と変位量を計測する方法で行った。载荷位置はバラスト止め背面のバラストが水平で静水圧的な土圧分布を仮定した場合の土圧合力の作用位置（下から1/3の高さ）とし、試験は各構造につき3回行った。

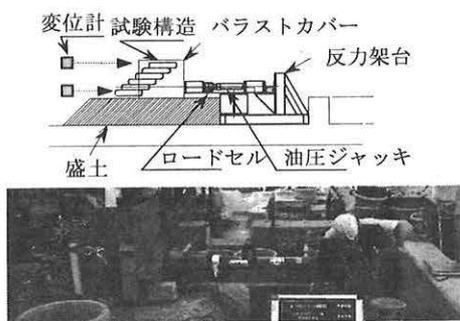


図5 水平支持力試験

4.2 試験結果

試験結果（バラスト止め上部の水平変位）を図6に示す。(a)基本構造（水平積み，鉄筋90°，根入れ長200mm）による最大水平支持力は3回の平均で3.6kNであった。これに対し、(b)RCバラスト止めの最大水平支持力は3回の平均で4.5kN（奥行400mmでの換算値）であった。水平支持力を増すために、まず路盤に打込んだ補強鉄筋の受働抵抗を増すことを考え、根入れ長を200mmから300mmに増やした構造で試験を行った(c)。2, 3回目の平均で支持力は3.8kNに改善し、やや効果がみられた。

次に既往の研究⁶⁾より、土のう積層体に積層角を設けることでせん断抵抗が増すことが示されていたため、傾斜積みにして試験を行った(d)。傾斜角は既往の研究で効果がみられた積層角より大きい範囲で施工性を考慮し22.5°（45°の1/2）とした。試験の結果、3回の平均で支持力は5.0kNまで向上し、傾斜積みの効果が確認できた。

傾斜積みの試験で载荷時の挙動を観察したところ、荷重の増加に伴い積層体が起き上がり、上部の変位が増加するが、鉄筋の打込角度がバッグの積層軸と角度を持ち、斜めになっていたときに、荷重の増加とともに鉄筋が曲がってバッグを上から押さえ、積層体が起き上がるのを抑える様子が見られた。そこで、鉄筋を傾斜して打込む構造を試したところ、110度の傾斜角で鉄筋を打込んだときに最も大きい支持力6.0kN（3回の平均）が得られた(e)。

最後に、鉄筋を傾斜して打込むとバッグの連結が上部3段にとどまるため、下部3段を連結する鉄筋を追加して試験した結果(f)、1, 3回目の平均で6.9kNまで水平支持力が向上した。

各構造の試験結果をバラスト止め上部および下部がそれぞれ10mm, 20mm, 30mmまで変位したときの水平支

図中の寸法の単位は全て mm

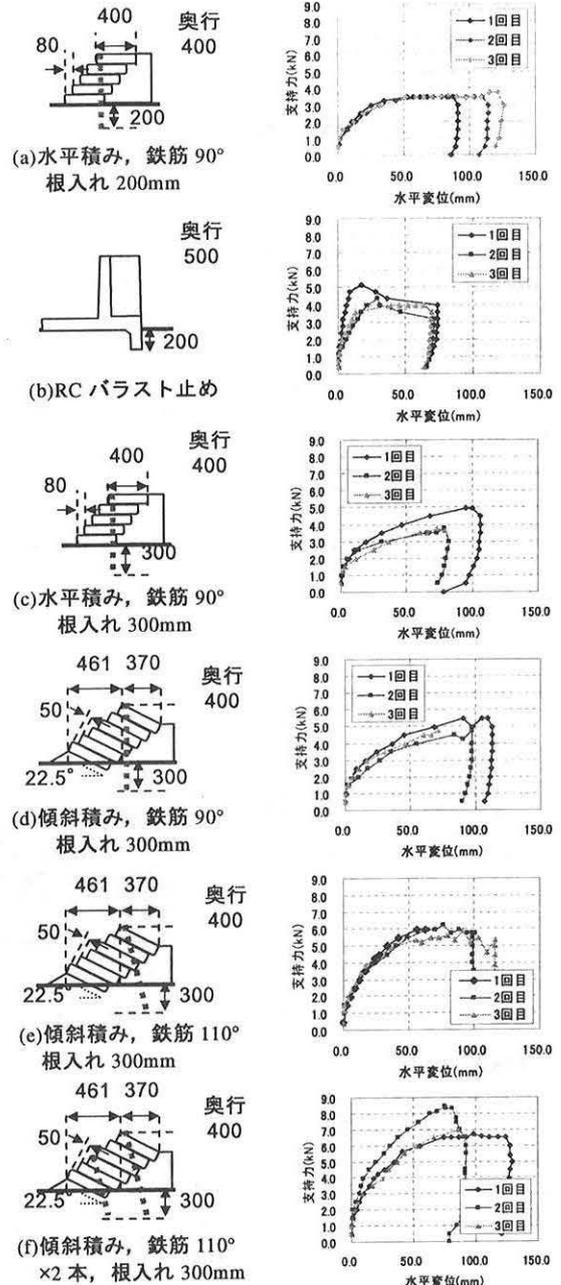


図6 改良構造による水平支持力試験結果

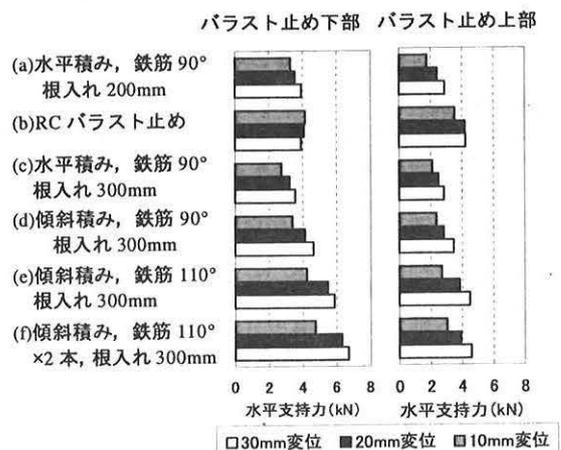


図7 改良構造の各変位量における水平支持力

持力で比較した結果を図7に示す。バラスト止め上部が30mm変位するまでに、RCバラスト止めを上回る水平支持力を発揮したのは、(e)、(f)の構造（傾斜積み、補強鉄筋の傾斜打込み）であった。

5. 改良構造による振動台試験

5.1 試験方法

道床断面が広い箇所を模擬した条件で、改良構造による振動台試験を行った。試験モデルを図8に示す。使用した振動台の加振能力から、前回のモデルの奥行きを1/2にした土槽に1種類の試験構造を製作して試験を行った。入力地震動は想定東海地震波とした。

構造を更に強化するため、水平支持力試験で効果を確認した構造に以下の補強を施した。

- ・補強鉄筋はバラストとの摩擦抵抗を増すようにD13mmの異形棒鋼を使用した。
- ・隣接する補強鉄筋の上部を連結してコ型の形状とし、水平力を受けて鉄筋に引張力が生じたときに、連結部の鉄筋が最上段のバッグに上載圧として作用する効果と長手方向にジオテキバッグを一体化する効果を狙った（ただし、計測上の制約から補強鉄筋の連結は変位を測定する列のみ）
- ・2列目のジオテキバッグは2段配置し、まくらぎ側の端部から50mmの位置に補強鉄筋を垂直に打込んだ。

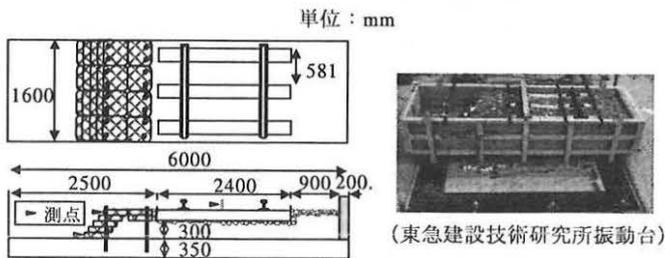


図8 試験モデル（改良構造による振動台試験）

5.2 試験結果

試験結果を図9に示す。傾斜積みの1列目に2本の鉄筋を打込んだ構造(a)では、最大変位がバラスト止め上部で9mm、まくらぎで6mmとなり、目標を大きく上回る性能となった。引き続き1列目のジオテキバッグ中段の補強鉄筋を抜いて2回目の加振試験を行ったところ(b), 最大変位はバラスト止め上部で14mm、まくらぎで7mmとなり、こちらも目標を大きく上回る性能が確認できた。

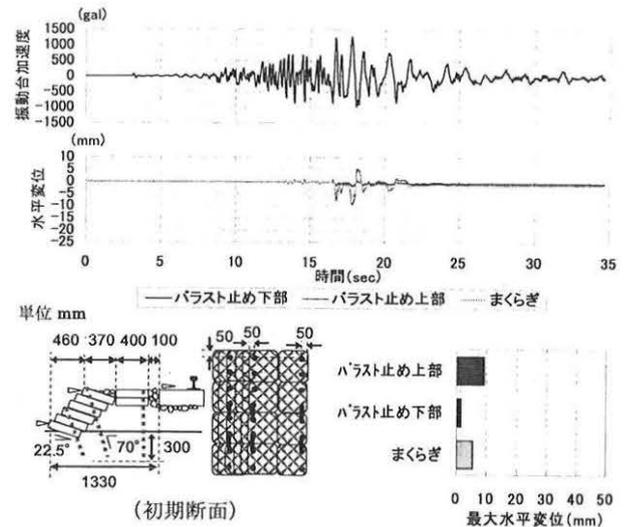
以上の結果と本線試験施工により施工性、保守性を確認した結果から総合的に判断し、想定東海地震に対するジオテキバッグ工法の仕様を図10のように決定した。

6. まとめ

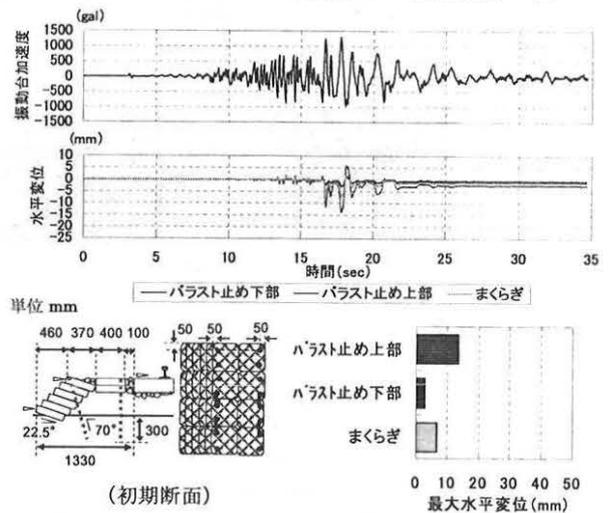
新たに開発したジオテキバッグ工法の耐震性能を振動台試験等により確認した結果、以下の知見が得られた。

- (1) ジオテキバッグ工法は地震時の軌道変位抑制対策としてRCバラスト止めと同様、十分な性能を有することを確認した。
- (2) 傾斜積みや補強鉄筋の傾斜打込みなどのジオテキバッグ工法の構造改良により、水平支持力が向上した。
- (3) ジオテキバッグ工法の改良構造は、道床肩幅の広い断面においても耐震性能を有することを確認した。

今後は、ジオテキバッグ工法の更なるブラッシュアップに取り組み、バラスト軌道の耐震性能を高めることで、地震に強い線路を実現していきたい。



(a) ジオテキバッグ工法（改良構造：補強鉄筋3本）



(b) ジオテキバッグ工法（改良構造：補強鉄筋2本）

図9 振動台試験結果（改良構造）

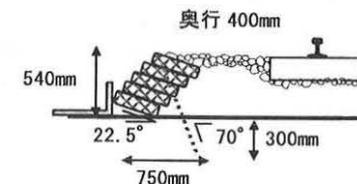


図10 ジオテキバッグ工法の仕様（想定東海地震）

参考文献

- 1) 森村勉，関雅樹：新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について，J-RAIL2009（投稿中）
- 2) 松岡元：地盤工学の新しいアプローチ-構成式・試験法・補強法，京都大学学術出版会，2003
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006.
- 5) 村松浩成ほか，実台車を用いた加振試験による脱線防止ガードの設計仕様の検討，J-RAIL2009（投稿中）
- 6) 松島健一ほか：水平および傾斜積層した土壌のせん断特性，ジオシンセティクス論文集，第21巻，pp.145-152，2006.12