

ジオテキスタイル材料で補強した有道床軌道の耐震性能確認試験

東海旅客鉄道 正会員 可知隆、関雅樹、小林幹人、渡邊康人

東京大学生産技術研究所 正会員 古関潤一

1. はじめに

東海道新幹線に使用されている有道床軌道は大規模地震が発生した場合にバラストが流出し軌道が大きく変状する可能性があり、それを防止するために鉄筋コンクリート製ブロックによるバラスト流出防止工（以下「RCバラスト止め」と記す）が導入され、その効果が確認されている¹⁾。しかし、RCバラスト止めは約150~200kgの重量があり、施工には重機が不可欠であるため、施工面に課題があった。そこで、人力施工が可能でかつ経済性に優れた新しいバラスト流出防止工として、ジオテキスタイル材料を用いたバラスト流出防止工を開発した。

2. ジオテキバッグによるバラスト流出防止工

現在東海道新幹線に導入されている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するとともに、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。

施工性と経済性を両立したバラスト流出防止工を検討するにあたり、まず土木構造物等の応急復旧で使われることの多い「土のう」の効果に着目した。既往の研究²⁾より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上の粘着力 c の役割を果たし、耐荷性能が増すことが知られており（図-2）、土のう積層体を擁壁に用いる施工法も開発されている²⁾。そこで、バラストを土のうに入れて道床肩に沿って積上げた積層体のバラスト止めを考案した。土のう袋は経済性で有利であり、更に土のうは袋の大きさにより重量を自由に調節できるため、分割して積上げることで人力施工が可能になる。一方、バラストは粒径が大きく稜角に富んでおり、バラスト相互の噛み合わせにより大きな摩擦抵抗を發揮することで、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袋に入れると、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、滑動が生じることが懸念された。そこで、バラスト本来の噛み合わせによる摩擦力を活かしながら土のうの効果を發揮するため、耐久性に富んだジオテキスタイル

素材のネット状の袋（以下、「ジオテキバッグ」と記す）を用い、更にせん断抵抗を強化するため、ジオテキバッグの積層体を連結しつつ支持杭の役割も果たす補強鉄筋をジオテキバッグ積層体に打込む構造とした（図-3）。以下では主にこのジオテキバッグを用いたバラスト流出防止工の耐震性能確認試験の結果について述べる。

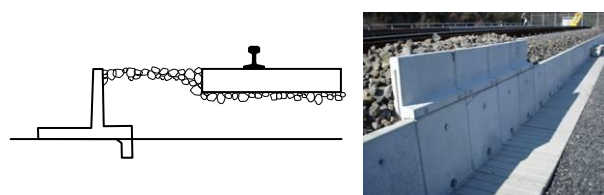


図-1 鉄筋コンクリートブロック製バラスト流出防止工

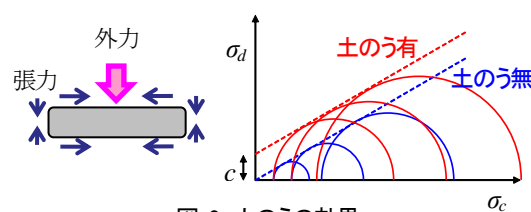


図-2 土のうの効果

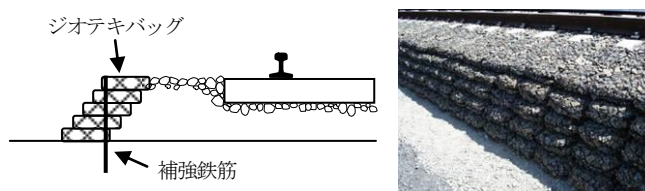


図-3 ジオテキバッグによるバラスト流出防止工

3. 基本構造による耐震性能確認試験

(1) 試験方法

耐震性能の検証は実物大模型、実地震波を用いた振動台試験により行った。試験モデルを図-4に示す（図中の寸法の単位はmm、以下同じ）。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。模型と土槽の境界面のうち、加振方向と平行な面はテフロンシートを貼り摩擦を低減し、加振方向と直角な面は硬さの異なる2種類のウレタン材を設置し、模型のせん断変形を妨げないよ

う配慮した。盛土材料は鉄道の設計標準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で一般的に使用されているものとした。ジオテキバッグ（ポリエステル製、網目 25mm 、転圧時の寸法約 $400\text{mm}\times 400\text{mm}\times 100\text{mm}$ ）には質量 25kg のバラストを詰め、

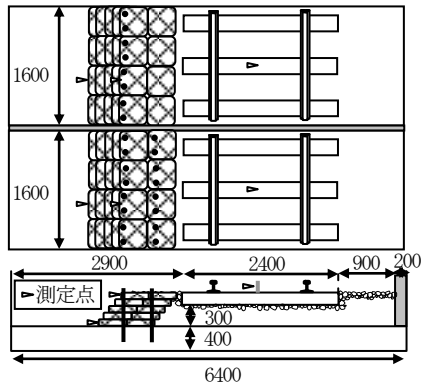


図-4 試験モデル(基本構造)

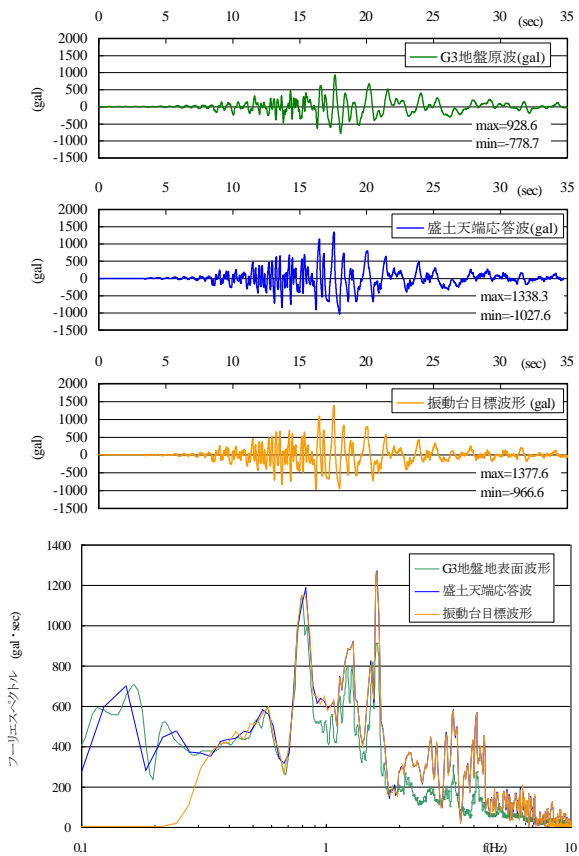


図-5 入力地震波

一定の高さになるよう一層ずつプレートコンパクタで転圧した。補強鉄筋は 12mm の丸鋼棒をバッグ1箇所あたり2本の割合で打込み、根入れ長は 200mm とした。

入力地震波とそのフーリエスペクトルを図-5に示す。入力地震波にはL2地震動を超え、盛土にとって一般的に不利な条件となる加振時間が長くかつ長周期が卓越する特徴を持ったL3地震動(仮称)を原波とし、そのG3地盤³⁾における地表面波をFEM動的応答解析により、盛土天端の応答波として算出したものを用いた。ただし、入力地震波の主要動でない長周期成分については結果に影響を与えないと判断し、振動台目標波では変位量の制約から周期3秒でテーパをかけ4秒以上の成分をカットした。これらの試験条件や入力地震波は過去に行われたRCバラスト止めの振動台試験¹⁾に合わせて設定した。

(2) 試験結果

まず、現在主に対策工として採用されているRCバラスト止めについて、加振中に発生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-6に示す。バラスト止め上部の変位波形をみると、15秒までの 1000gal 以下の加振で $2\text{--}3\text{mm}$ の変位を生じた後、最初に 1000gal を超える加速度が発生する16秒付近で 10mm 程度変位し、最大加速度が発生する18秒付近で 15mm 程度の最大変位に達している。

次にジオテキバッグによるバラスト止めの試験結果を図-7に示す。バラスト止め上部の変位波形をみると、15秒までの 1000gal 以下の加振ではほとんど変位せず、最初に 1000gal を超える16秒付近で 7mm 程度変位し、最大加速度が発生する18秒付近で 18mm 程度の最大変位に達している。この結果から、両者とも 1000gal 程度を超える加速度で水平支持力が不足し、変位を生ずる様子が伺える。加振中に発生した最大変位を比較すると、ジオテキバッグによるバラスト止めは、バラスト止め上部変位、まくらぎ変位ともRCバラスト止めと同程度であった。加振後の残留変位については両者とも通常の軌道狂い管理値の範囲内に留まった。なお、ジオテキバッグによるバラスト止めはバラスト止め下部の変位が非常に小さく、袋をネット状にしたことで底面の摩擦抵抗が十分に得られていることがわかる。また、バラスト止め下部に対し上部の変位が大きいことから、ジオテキバッグによるバラスト止めでは転倒モードが卓越していることがわかる。これに対し、RCバラスト止め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。

次に道床肩幅が広い断面を想定し、ジオテキバッグをまくらぎ端から離し、内側にもジオテキバッグを配置した構造について試験を行った。試験結果を図-8に示す。

この構造では図-7の結果に比べ各部の変位が大きくなった。これは道床断面が大きくなったことで、ジオテキ

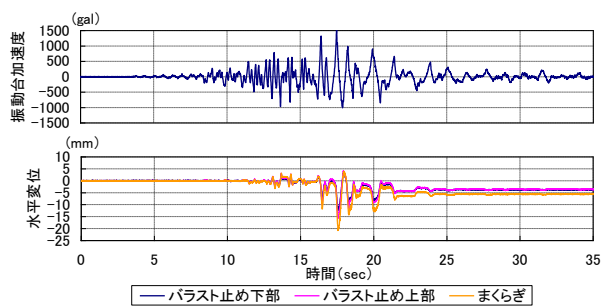


図-6 RCバラスト止めの試験結果

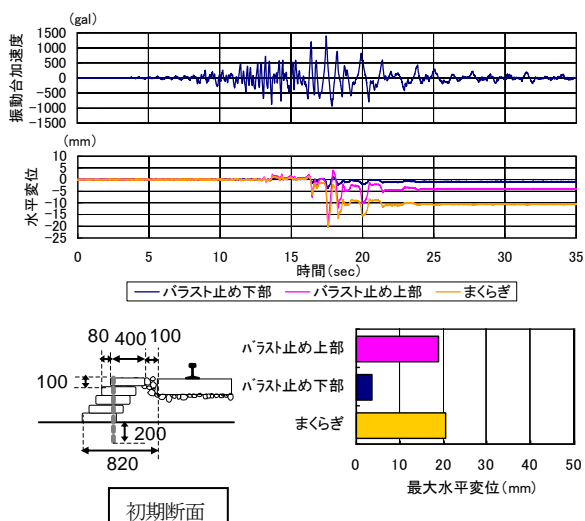


図-7 ジオテキバッグによるバラスト止め(1列)の試験結果

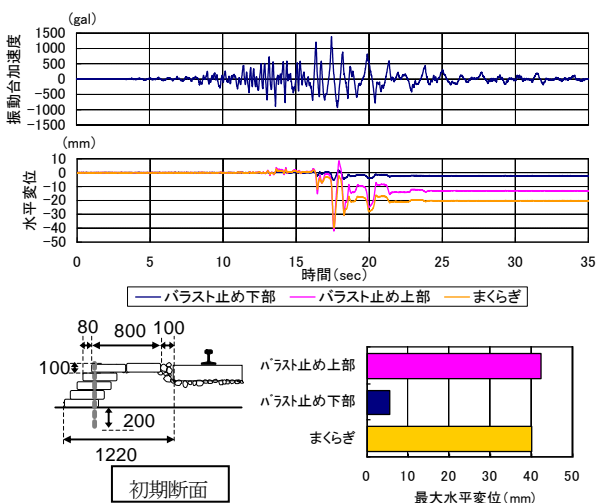


図-8 ジオテキバッグによるバラスト止め(2列)の試験結果

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特に変位が大きくなったためと考えられる。

以上の結果から、ジオテキバッグによるバラスト止めをまくらぎ近傍に配置したケースでは、RCバラスト止めと同等の耐震性能が得られることが確認できた。なお、加振後に行った道床横抵抗力の測定値も軌道の座屈に対して余裕のある結果であった。しかし、道床肩幅が広い断面を想定したケースでは大きな変位には至らなかったものの、他のケースに比べると道床横抵抗力も低い結果となった。

4. 改良構造による水平支持力試験

振動台試験の結果、ジオテキバッグによるバラスト止めをまくらぎ近傍に配置した場合にRCバラスト止めと同等の耐震性能があることが確認できたが、道床肩幅の広い箇所では道床断面を掘削する面積が広くなり、施工性に課題が残る。そこで、水平支持力を強化するため、ジオテキバッグによるバラスト止めの構造を改良し、水平支持力試験でその効果を確認することとした。

水平支持力試験は図-9に示すように、試験構造に対して油圧ジャッキで水平載荷を行い、ロードセルとレーザー変位計で荷重と変位量を読み取る方法で行った。試験は各構造につき3回づつ行った。载荷位置はバラスト止めの背面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)とした。

試験結果を図-10に示す。図中の水平変位はバラスト止め上部の水平変位を示す。まず基本構造(a)水平積み、鉄筋90°、根入れ長200mm)による最大水平支持力は3回の試験の平均値で3.6kNであった。これに対し、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(b)。

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回目、3回目の結果で評価すると、支持力は3.8kNに改善し、やや効果がみられた。

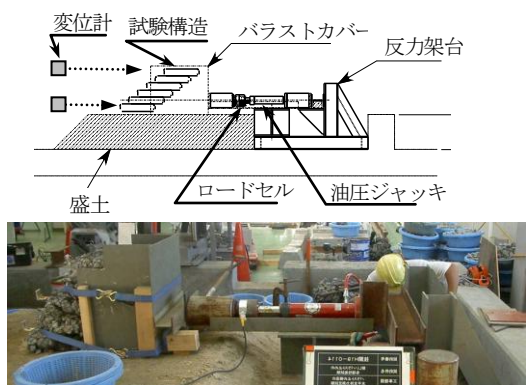


図-9 水平支持力試験

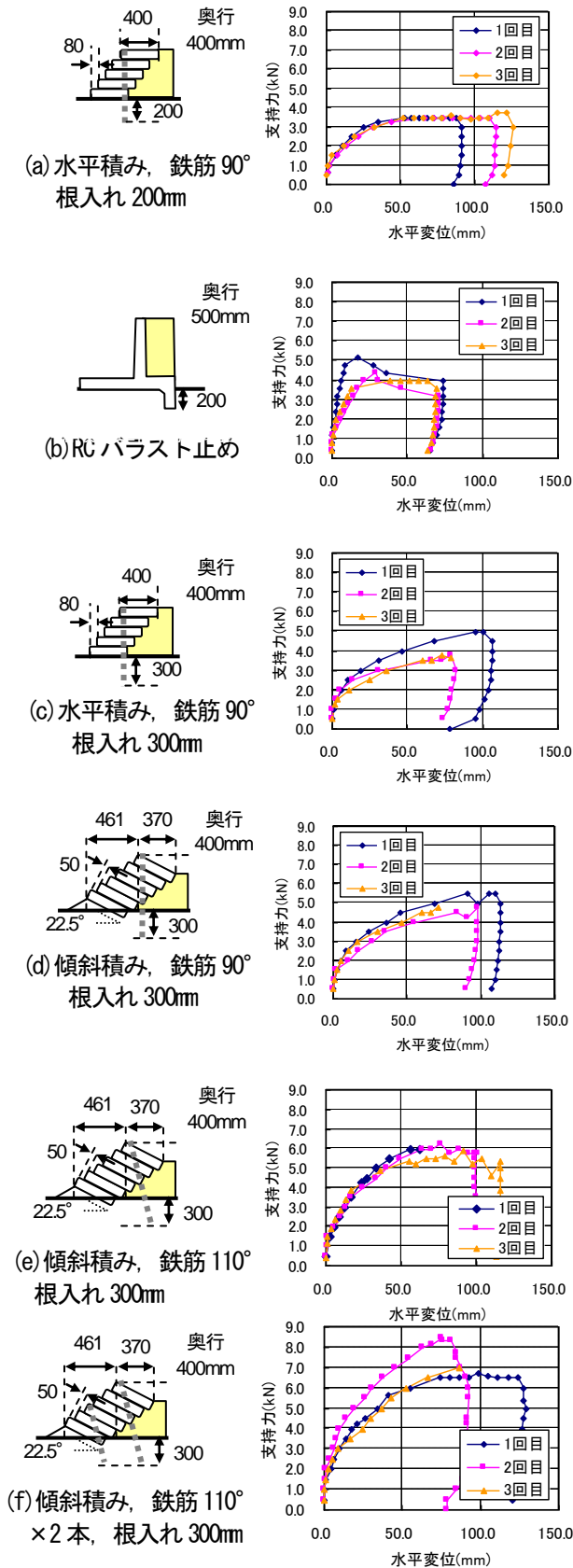


図-10 改良構造による水平支持力試験結果

次に既往の研究⁴⁾より、土のう積層体に積層角を設け

るとせん断抵抗力が増加するという知見が示されていたため、水平積みを変更して試験を行った(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、45°の半分の22.5°とした。なお、最下段のバッグは半分盛土に埋め、その際に掘り出した土をバッグ外方に盛り上げて傾斜を与えた。また傾斜積みをする事で積上高さが低くなるため、バッグを1段増やし6段積みとした。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。

傾斜積みの試験で載荷時のバッグの変形挙動を観察していたところ、荷重の増加に伴い積層体が徐々に起き上がる動きを示すが、鉄筋の打込み角度がバッグの積層軸と角度を持つかたちで斜めになっていたときに、鉄筋がバッグを上から押さえるように曲がり、積層体が起き上がるのを抑える様子が見られた。そこで、鉄筋を傾斜させて打込む構造を試してみた。その結果、110度の傾斜で鉄筋を打ち込んだときに最も大きい支持力6.0kN(3回の平均値)が得られた(e)。鉄筋を傾斜打ちすることにより、鉄筋とバラストの摩擦による引張り抵抗力の作用方向が積層体の回転軸に対して有効に作用しやすい方向になるために転倒モードが抑えられ、その結果として支持力が大きくなったと考えられる。

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た構造を試験したところ(f)、1回目と3回目の結果から6.9kNまで水平支持力が向上した。

各構造の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持力で比較した結果を図-11に示す。バラスト止め下部で30mm変位するまでにRCバラスト止めの水平支持力を上回るのは(d)、(e)、(f)の構造であり、バラスト止め上部で30mm変位するまでにRCバラスト止めの水平支持力を上回るのは(e)、(f)の構造となる。このことから、比較的小さい変位でRCバラスト止めと同等の性能を発揮するには、(e)または(f)の構造が適していることになる。

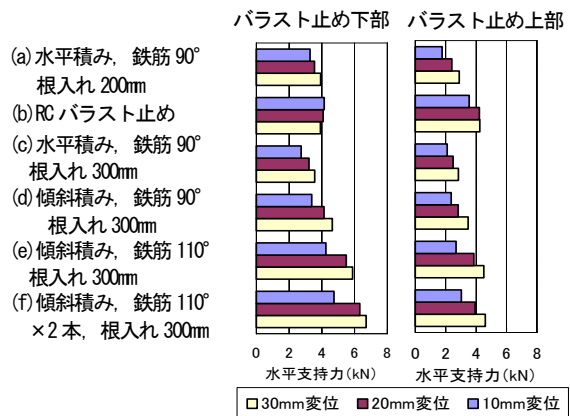


図-11 改良構造の各変位量における水平支持力

5. ジオテキバッグの三軸圧縮試験

ここで、ジオテキバッグが持つ土のうの効果とジオテキバッグの傾斜積みの効果を検証することを目的に、三軸圧縮試験を行った。試験は以下の条件で行った。

- ・供試体 $d=300\text{mm}$, $h=600\text{mm}$ の大型三軸試験機を使用。
- ・バラストの粒度分布は供試体の大きさを考慮し、 $20\text{mm}\sim 60\text{mm}$ の範囲となるように調整。
- ・ジオテキバッグに詰めるバラストの密度は、施工条件に合わせ $400\text{mm}\times 400\text{mm}\times 100\text{mm}$ に対して 25kg ($\rho=1.56\text{t/m}^3$) とする。
- ・実際の敷設条件（積上高さ 500mm 程度）を考慮し、可能な限り低い拘束圧 (40kN/m^2) で、三軸圧縮試験（CD条件）を行う。

次に傾斜角について、地震時にジオテキバッグに作用する任意の深度 z での応力傾角 δ は図-12 に示す①鉛直応力、②水平応力、③ジオテキバッグの慣性力、④バラストの自重による地震時主働土圧、⑤列車荷重による地震時主働土圧を考慮し、式(1)で得られると仮定する。

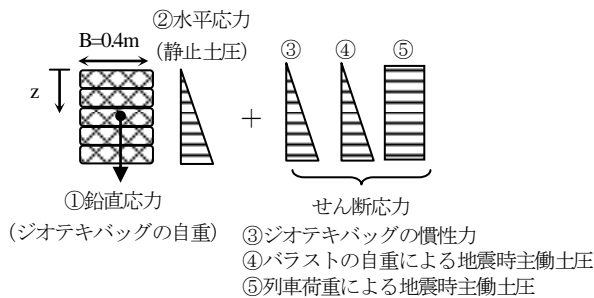


図-12 地震時にジオテキバッグに作用する応力

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \gamma_t \times z \quad \dots \textcircled{1} \\ \sigma_h &= K_0 \times \gamma_t \times z \quad \dots \textcircled{2} \\ \tau &= K_h \times \sigma_v + \int_0^z K_{EA} \cos \delta_E \times \gamma_t \times z dz / B + \int_0^z K_{EA} \cos \delta_E \times q dz / B \\ &\quad \dots \textcircled{3} \quad \dots \textcircled{4} \quad \dots \textcircled{5} \\ &= K_h \times \gamma_t \times z + \frac{1}{2} \times K_{EA} \cos \delta_E \times \gamma_t \times z^2 / B + K_{EA} \cos \delta_E \times q \times z / B \\ \tan 2\delta &= \frac{\tau}{\frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)} \\ &= \frac{K_h + \frac{1}{2} \times K_{EA} \cos \delta_E \times z / B + \frac{q}{\gamma_t} \times K_{EA} \cos \delta_E / B}{\frac{1}{2}(1 - K_0)} \\ &= \frac{K_h + (0.22 + 0.81 \times K_h) \cos \delta_E \times \left(\frac{1}{2} \times z + \frac{q}{\gamma_t} \right) / B}{0.25} \\ &= 4K_h + (0.44 + 1.62 \times K_h) \cos \delta_E \times \left(z + \frac{2q}{\gamma_t} \right) / B \quad \dots \textcircled{1} \end{aligned}$$

σ_v : 鉛直応力 σ_h : 水平応力 τ : せん断応力
 γ_t : 単位体積重量 ($=1.56\text{t/m}^3$ のバラストを仮定)
 K_0 : 静止土圧係数 ($=0.5$)
 K_h : 水平震度

K_{EA} : 地震時土圧係数 ($=0.22 + 0.81 \times K_h$, 道路橋示方書⁵⁾)
 δ_E : 壁面摩擦角 ($=1/2\varphi$, $\varphi=45^\circ$)
 q : 列車荷重 (軸重による等分布荷重が水平方向に作用すると仮定, $33\text{kN/m} / 2.4\text{m} = 13.8\text{kN/m}^2$, 枕木幅: 2.4m)
 B : ジオテキバッグ幅 ($=0.4\text{m}$)
 δ : 応力傾角 (主応力軸との傾角)

そこに振動台試験に用いた入力地震波による水平震度を適用すると、 $z=0\sim 0.5\text{m}$ の範囲での最大応力傾角は約 45° となる。そこで三軸圧縮試験におけるジオテキバッグの傾斜角 δ を図-13 に示す $\delta=0^\circ$ (地震時の安定性が最大となる傾斜積みを模擬したケース, 積層角 45° に相当), $\delta=22.5^\circ$ (実際の傾斜積みを模擬したケース, 積層角 22.5° に相当), $\delta=45^\circ$ (実際の水平積みを模擬したケース, 積層角 0° に相当) の3ケースについて行った。また、比較のため、ジオテキバッグを使用しないバラストのみのケースについても試験を実施した。試験状況を図-14 に示す。

各ケースの試験結果をモールの応力円で表示したものを図-15 に、試験結果より得られたジオテキバッグの見かけの粘着力を図-16 に示す。ジオテキバッグの見かけの粘着力は、バラストのみのケースで $C=0$ として求めた内部摩擦角 ϕ (51.9°) を共通とし、破壊包絡線より求

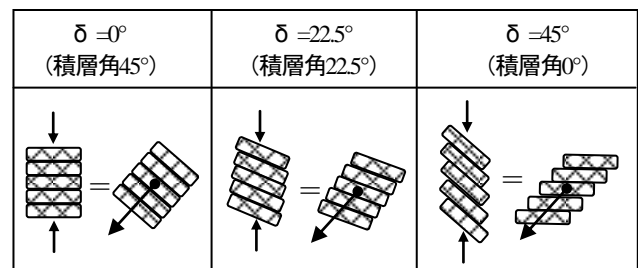
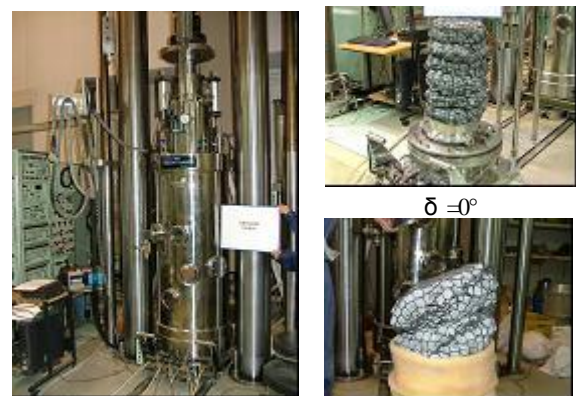


図-13 試験ケース(傾斜角 δ と積層角の関係)



大型三軸試験機

$\delta = 22.5^\circ$

図-14 ジオテキバッグの三軸圧縮試験

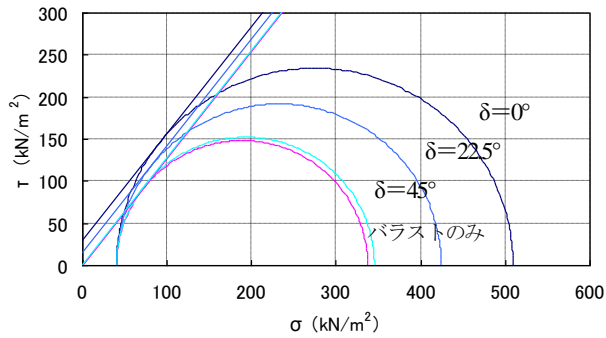


図-15 三軸圧縮試験の結果

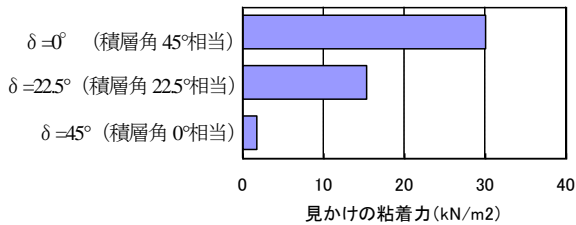


図-16 三軸圧縮試験で得られた見かけの粘着力

めた。試験結果より、ジオテキバッグでは図-2 で示した見かけの粘着力の発生による強度の増加がみられ、 δ の増加とともに（積層角が小さくなるとともに）見かけの粘着力が小さくなるのがわかる。この結果から、ジオテキバッグを用いることで見かけの粘着力の発生による強度の増加が得られ、積層角 22.5° ($\delta=22.5^\circ$) の場合には、その効果が発揮されていることが確認できた。なお、最大圧縮強度を発揮した $\delta=0^\circ$ のときの見かけの粘着力と土のうに発生する張力の関係は式(2)で表され²⁾、三軸圧縮試験で得られた見かけの粘着力からジオテキバッグに発生している張力を求めると $T=1.07\text{kN/m}$ となる。これをジオテキバッグの単位奥行あたりの本数（ $1000\text{m}/25\text{mm}+1$ 本=41 本）で換算すると 26.1N /本が得られる。これはジオテキバッグが土のうの効果を発揮する場合の最大張力であり、ジオテキバッグの素材はこの引張強度以上を持つことが必要と考えられる。

$$C_0 \cos \phi = \left(\frac{T}{H} + \frac{T}{B} \right) \sin \phi + \left(\frac{T}{H} - \frac{T}{B} \right) \dots (2)$$

C_0 : 見かけの粘着力 ϕ : 内部摩擦角

T : 土のうに発生する張力

B : 土のうの長辺 H : 土のうの短辺

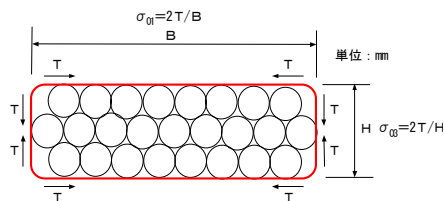


図-17 見かけの粘着力と土のうの張力の関係

6. 改良構造による耐震性能確認試験

水平支持力試験の結果を受け、改良構造によるジオテキバッグを用いたバラスト止めの振動台試験を行った。試験モデルを図-18 に示す。改良構造による振動台試験は使用した振動台の加振能力の制約から前回の試験モデルの奥行きを $1/2$ にした土槽に 1 種類の試験構造を製作して試験を実施した。補強鉄筋はバラストとの摩擦抵抗を増すために 13mm の異形棒鋼を使用し、更に隣接する補強鉄筋の上部を溶接して連結しコ型の形状とした。これは水平力を受けて鉄筋に引張力が生じたときに、連結した部分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ものである。ただし、鉄筋のひずみを測定する箇所では溶接が行えないため、連結は水平変位を測定する列

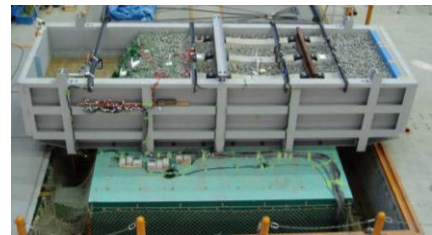
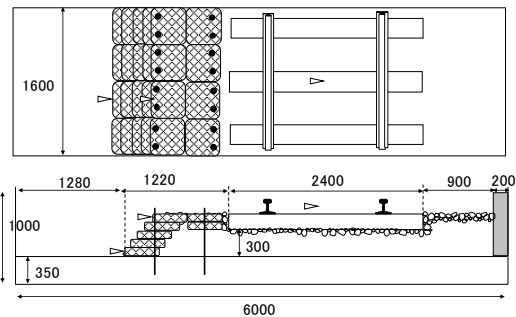


図-18 試験モデル(改良構造による振動台試験)

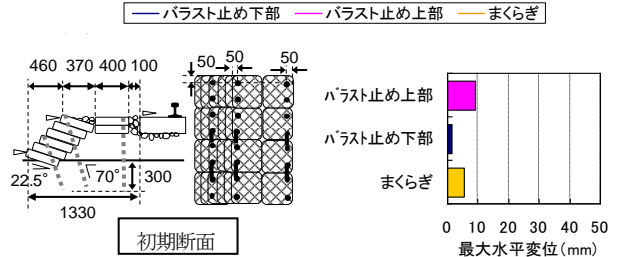
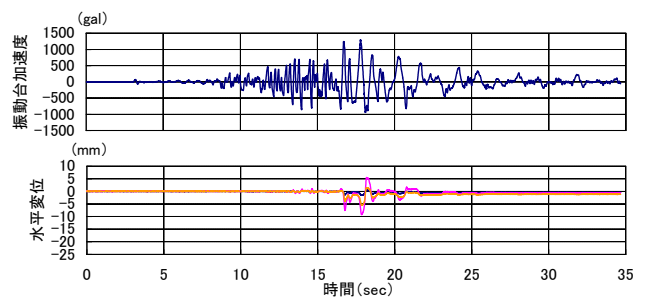


図-19 改良構造による振動台試験結果(補強鉄筋×3本)

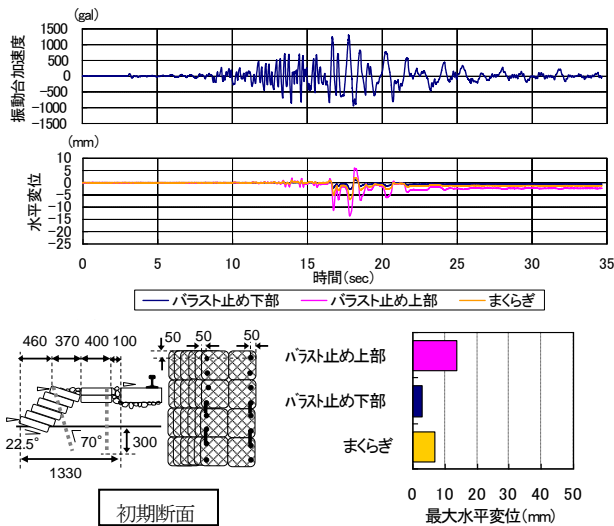


図-20 改良構造による振動台試験結果(補強鉄筋×2本)

のみで行った。また、道床断面が広い箇所を模擬し、まくらぎに近い位置に2列目のジオテキバッグを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。補強鉄筋の路盤への根入れは300mmとした。入力地震動は前回の試験と同じL3地震動(仮称)を使用した。

改良構造の試験結果を図-19,20に示す。まず、傾斜積みの1列目に2本の鉄筋を打込んだ構造で試験を行った結果、RCハラスト止めの振動台試験結果に比べてハラスト止め、まくらぎの変位が小さくなり、同等以上の性能であることが確認できた。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、ハラスト止め上部の変位がやや大きくなったものの、やはりRCハラスト止めよりも変位が小さく抑えられる結果となり、こちらも同等以上の性能が確認できた。これらの結果から、改良構造によるジオテキバッグを用いたハラスト止めは、道床断面の広い箇所でも地震時の軌道形状の維持に高い効果があり、RCハラスト止めと同等以上の性能を持つことが確認できた。

7. 施工性試験

構造改良することにより耐震性能は向上したが、傾斜積みや傾斜鉄筋にしたことにより施工性に与える影響が懸念された。そこで、実際の線路で施工性を確認するための試験敷設を行った。敷設断面を図-21に示す。試験敷設は曲線半径10100m、カント40mmの曲線内軌側で行った。当該箇所は列車通過時の振動で道床肩が崩れ、保守に苦慮している箇所でもある。

施工状況を図-22に示す。施工にあたっては、まず基本構造(水平積み、鉄筋90°)で一連の作業手順を理解し、その後改良構造を施工した。施工上課題となるのが傾斜積みと補強鉄筋の傾斜打込みであるが、傾斜敷設に

ついては水平積みに比べると若干作業性が悪くなるものの慣れるに従ってプレートランマーによる転圧も問題なく行うことができ、水平積みと傾斜積みで作業性が大きく損なわれないことが確認できた。コ型の補強鉄筋は、あらかじめ鉄筋に被せる治具を製作し、角度計や治具で鉄筋の角度を確認しながら電動ブレーカーで打込みを行った。鉄筋が径の大きいハラストに当たって進まない場合や、路盤が細粒化したハラストで固結している箇所では打込みに時間を要したが、打込み自体は可能であった。

試験敷設はここで示した箇所を含め、これまでに400m以上の延長について実施した。鉄筋の打込方法についても改良を重ねており、打込時間の短縮、作業の安全性向上を図るための検討を継続している。

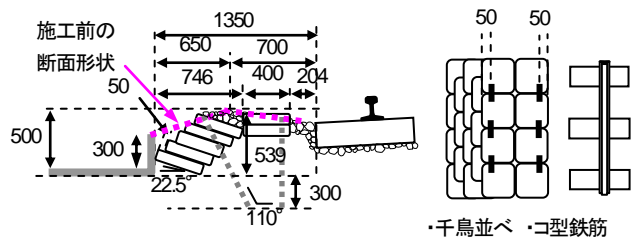


図-21 施工性試験の敷設断面



図-22 施工性試験状況(傾斜積み、コ型補強鉄筋の打込み)

8. まとめ

経済性・施工性に優れた新しいハラスト流出防止工として、ジオテキバッグによるハラスト流出防止工を開発し、振動台試験等による性能確認を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 実物大模型、実地震波による振動台試験を行った結果、ジオテキバッグによるハラスト流出防止工は地震時の軌道変位抑制対策として十分な効果を有することが確認できた。
- (2) 傾斜積みや補強鉄筋を傾斜して打込むなど、ジオテキバッグによるハラスト流出防止工の構造を改良することで、水平支持力が向上することが確認できた。
- (3) ジオテキバッグの三軸圧縮試験の結果から、ジオテキバッグを用いることで見かけの粘着力の発生により強度が増し、積層角22.5°の場合にもその効果があるこ

とが確認できた。

- (4) 振動台試験の結果、構造を改良したジオテキバッグによるバラスト流出防止工は、道床肩幅の広い断面においても十分な耐震性能があることが確認できた。
- (5) 本線で施工性試験を行い、構造を改良したジオテキバッグによる流出防止工は、作業性を大きく損なわない範囲で施工できることを確認した。

今後は、ジオテキバッグによるバラスト流出防止工について、道床更換等の保守作業時の支障を極力少なくする構造など、更なる改良をすすめるとともに、様々な線路状況に応じた施工法や設計法を検討し、バラスト軌道の耐震性向上を実現していきたい。

【参考文献】

- 1) 永尾拓洋，関雅樹，佐藤清：鉄道盛土の軌道変状対策を目的とした耐震補強工法の検討、第41回地盤工学研究発表会，No. 645/pp. 1289-1290, 2006, 7.
- 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) 松島健一，Aquil.Umair，毛利栄征，龍岡文夫，山崎真司：水平および傾斜積層した土嚢のせん断特性，ジオシンセティックス論文集，第21巻，pp. 145-152, 2006. 12
- 5) 社団法人日本道路協会（2002）：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，pp. 65-68.
- 6) 可知隆，関雅樹，小林幹人，大木基裕，永尾拓洋，古関潤一：ジオテキスタイル材料で補強したバラスト軌道構造の性能確認試験，ジオシンセティックス論文集，第22巻，pp. 259-266, 2007. 11
- 7) 小林幹人，関雅樹，渡邊康人，可知隆，古関潤一：ジオテキスタイル材料で補強したバラスト軌道構造の振動台試験，ジオシンセティックス論文集，第23巻，pp. 215-222, 2008. 12
- 8) 小林幹人，関雅樹，渡邊康人，可知隆，古関潤一：ジオテキスタイル材料を用いたバラスト流出防止工の性能確認試験，鉄道力学シンポジウム論文集、投稿中