

東海道新幹線有道床軌道の耐震性能向上に関する研究

東海旅客鉄道 正会員 可知隆、関雅樹、小林幹人、村松浩成

東京大学生産技術研究所 正会員 古関潤一

1. はじめに

東海道新幹線の大規模地震対策としては、従来の長期不通防止対策に加えて、脱線そのものを防止する対策、万が一脱線しても車両が逸走しないための対策を実施することが検討されている。しかしながら東海道新幹線の一般的な軌道構造である有道床軌道では大規模な地震が発生した場合、道床抵抗力の低下による軌きょうの座屈現象や著大通り狂いが発生し、列車の走行安定性に支障を与える事象が発生することも想定される。そこで、道床肩を強化し、マクラギ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形を可能な限り小さくすることにより「地震時の走行性能の向上」を目指す合理的な対策工法を提案するとともに基本性能の確認を実施した。

2. ジオテキバッグによるバラスト止めの概要

道床バラストの軌道変状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止め（以下「RCバラスト止め」と記す）が開発されており、振動台試験等でその効果が確認されている¹⁾。現在導入されている従来のRCバラスト止めを図-1および図-2に示す。RCバラスト止めは盛土に建て込んだ前面の爪部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が施工性、経済性の点で課題を有している。

合理的な対策工法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いる（図-3）。

これらの例を参考に、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考案した。土のう袋は安価で入手しやすい材料のため、まず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り、施工性の面でも有利となる。一方、有道床軌道に用いられるバラストは、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た場合、土のう袋によりバラスト相互の噛み合わせが阻害され、土のうの境界面で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方法として、通常の土のう袋を

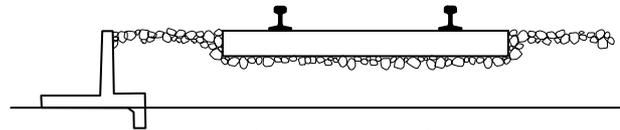


図-1 従来のバラスト止め(RCバラスト止め)



図-2 RCバラスト止めの施工例

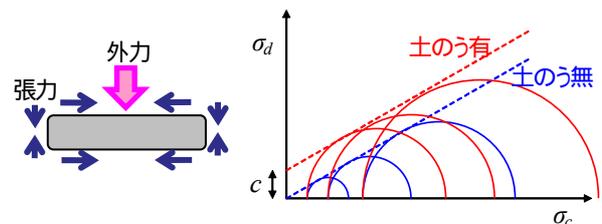


図-3 土に土のうを活用した例

ネット状にすることとし、ジオテキスタイル素材のネット状の袋にバラストを詰めた土のう形状のバッグ（以下「ジオテキバッグ」と記す）によるバラスト止め構造（図-4および図-5）を考案した。以後の検討では、このジオテキバッグによるバラスト止め構造（以下「ジオテキバッグ軌道構造」と記す）について素材の基礎的な試験を行うとともにその道床横抵抗力の増強効果といった副次効果についても検討を実施した。また振動台試験により耐震性能について確認するとともに、施工性確認試験を含めて、実用性についての検討を実施した。

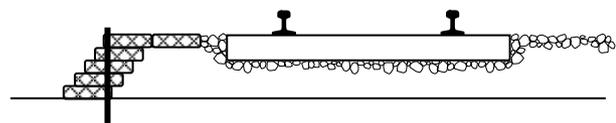


図-4 ジオテキバッグ軌道構造



図-5 ジオテキバッグ軌道構造の施工例

3. 摩擦抵抗力試験

通常の土のう袋に替わり、ジオテキバッグを使用した効果を確認するため、網目の寸法を変えた各種バッグについて摩擦抵抗力試験を行った。

(1) 試験方法

摩擦抵抗力試験においては、以下の3種類のバッグを使用した。中詰めバラストの最大粒径は64mmである。

- ポリエチレン製バッグ（網目なし）...図 - 6 (a)
- ポリエステル製バッグ（網目15mm）...図 - 6 (b)
- ポリエステル製バッグ（網目25mm）...図 - 6 (c)

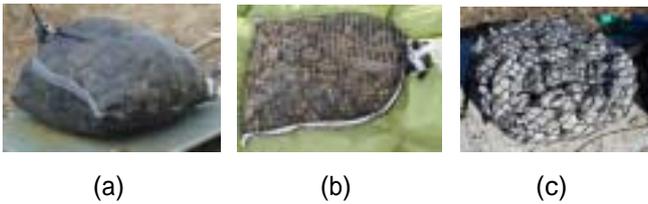


図 - 6 摩擦抵抗力試験に用いたバッグ

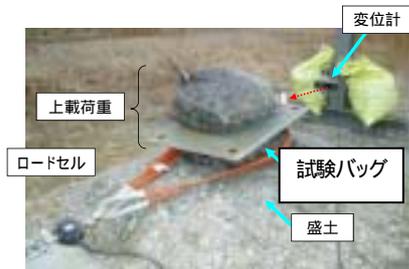


図 - 7 摩擦抵抗力試験の試験状況

試験状況を図 - 7 に示す。過去に行われた摩擦抵抗力試験²⁾を参考に計測車を反力にしてチェーンブロックでバッグを引張り、そのときの荷重と変位の関係を測定チャートから読み取ることによって摩擦抵抗力を求めた。また、試験に用いた盛土は試験場所において土をかき寄せ、プレートランマー等で十分に締固めることにより構築し、試験毎に再度締固めを行い、毎回ほぼ同じ盛土硬さを確保した。また、毎回なるべく同じ締固め状態となるようバッグは総質量25kgのバラストを中詰して盛土上に設置した後、鋼板（10mm厚、質量19kg）にて5回の叩き締めを行った。いずれのバッグも概ね400×400×100mm程度の寸法である。

(2) 試験結果

(a) 盛土 - バッグ間の摩擦抵抗力

図 - 8 (a)の条件で試験を行い、盛土 - バッグ間の摩擦抵抗力を測定した。試験結果を図 - 9 に示す。この結果からはバッグの網目なしよりも網目があったほうが、また、網目が25mmのものが、3タイプの中では摩擦抵抗力が大きいことを確認した。

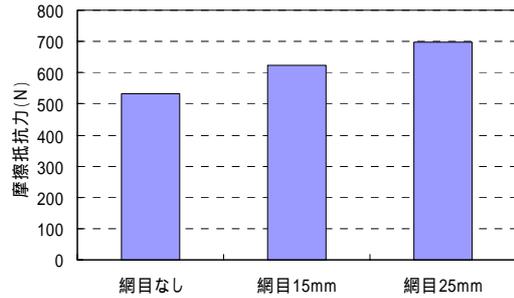


図 - 9 摩擦抵抗力試験の結果(盛土 - バッグ間)

(b) バッグ相互間の摩擦抵抗力

次に図 - 8 (b)の条件で試験を行い、バッグ相互間の摩擦抵抗力を測定した。また、上下2段の試験バッグを荷造り用テープで一体化したケースについても試験を実施した。摩擦抵抗力の評価では、上下バッグの境界で上バッグが滑る前抵抗値を指標とする必要がある。そこで、地震時のマクラギ道床横抵抗力による残留変位性能を想定して、上バッグが5mm変位したときの引張力を摩擦抵抗力として評価を行った。試験結果を図 - 10 に示す。バッグの網目の寸法による抵抗力の差は見られなかったが、網目の有無によって差が認められ、ネット状のバッグを使用することでバラスト相互の噛み合わせによる摩擦抵抗力が期待できることを確認した。また、上下2段の試験バッグを一体化した場合の摩擦抵抗力については、荷造り用テープ程度の簡易な方法であるにもかかわらず、図 - 11 に示すように14%程度摩擦力が向上し、バッグを一体化することによる効果を確認した。

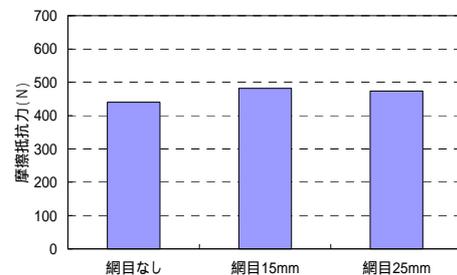


図 - 10 摩擦抵抗力試験の結果(バッグ相互間)

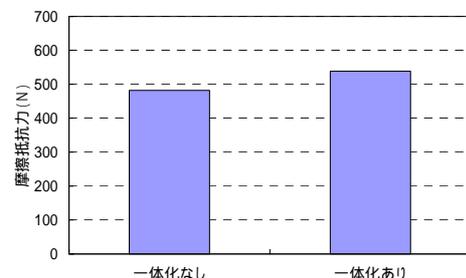


図 - 11 摩擦抵抗力試験の結果(バッグ一体化の効果)



図 - 8 摩擦抵抗力試験方法

4. 水平支持力試験

次に、ジオテキバッグ軌道構造の抗土圧構造物としての性能を確認するため、水平支持力試験を行った。

(1) 試験方法

試験方法を図 - 12、試験状況を図 - 13に示す。試験は反力架台を設置した土槽内で実施し、各試験構造をジャッキで水平に押したときの荷重と水平変位の関係を測定した。なお、ここでは図 - 14に示す単純な形状の軌道構造3ケースを想定し、バラスト止めの背面が水平な場合に静止土圧を受ける位置(下から1/3)に载荷を行った。試験は各構造につき3回ずつ行い、下端の変位が40mmとなるまで载荷し、その後除荷した。载荷速度はなるべく一定速度となるように配慮した。

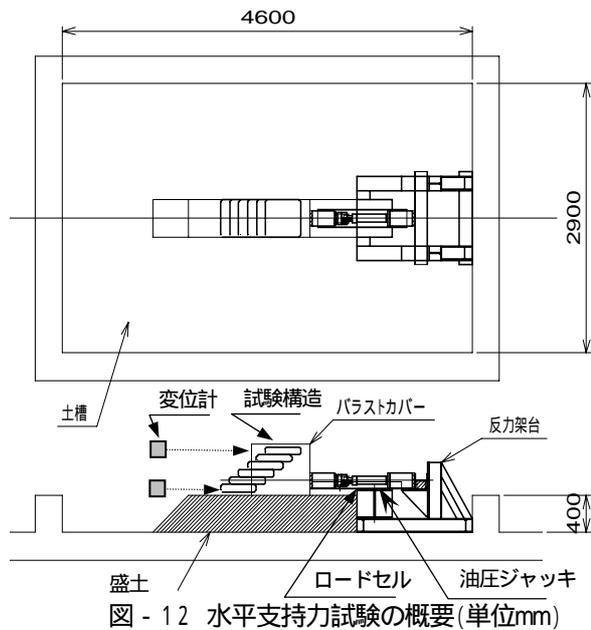


図 - 12 水平支持力試験の概要(単位mm)



図 - 13 水平支持力試験の試験状況

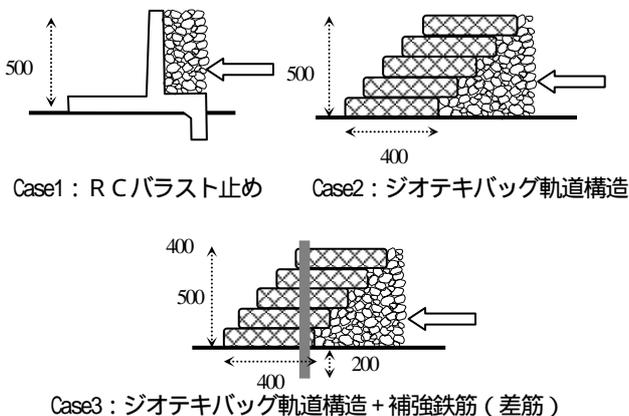
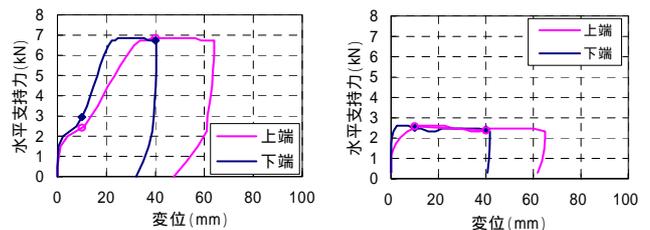


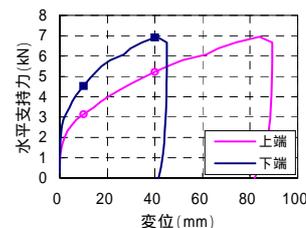
図 - 14 水平支持力試験のケース(単位mm)

(2) 試験結果

図 - 14に示す3ケースの試験を実施し、バラスト止め下端でそれぞれ 10mm、20mm 変位したときの荷重と最大荷重(いずれも3回の試験の平均値)で整理した結果を図 - 15に示す。図より、Case1: R C バラスト止めは 20mm 変位や最大荷重では大きな支持力となるものの、10mm 変位では Case2: ジオテキバッグ軌道構造と大差がない、もしくはジオテキバッグ軌道構造の方が大きな支持力となっている場合があることがわかる。これは、R C バラスト止めは盛土に建て込んだ爪部で大きな支持力を発揮する構造のため、施工状態により爪部の裏に隙間があり盛土に密着していない場合は、初期変位での支持力が十分に得られないためである。従って、爪部を建て込む際の施工管理が十分でない場合には、R C バラスト止めでも予想外に変位を生ずることが考えられる。一方、Case3: ジオテキバッグ軌道構造 + 補強鉄筋(差筋)の場合は、盛土に鉄筋を打込む方法のため、そのような施工管理を必要としない。ジオテキバッグによるバラスト止めの優位性はこの観点からも照査された。以上の結果から、ジオテキバッグ軌道構造に補強鉄筋(差筋)を加える構造とすることにより、現行のR C バラスト止めと同等の静的耐荷性能を実現することが可能であることが確認された。



Case1: R C バラスト止め Case2: ジオテキバッグ軌道構造



Case3: ジオテキバッグ軌道構造 + 補強鉄筋(差筋)

図 - 15 水平支持力試験の試験結果

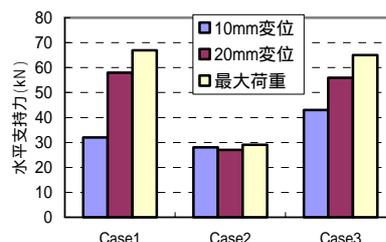


図 - 16 水平支持力試験結果

5. バラスト止めの道床横抵抗力試験

ここでは、ジオテキバッグ軌道構造の副次効果として、道床横抵抗力に与える効果について、静的載荷試験を行った。

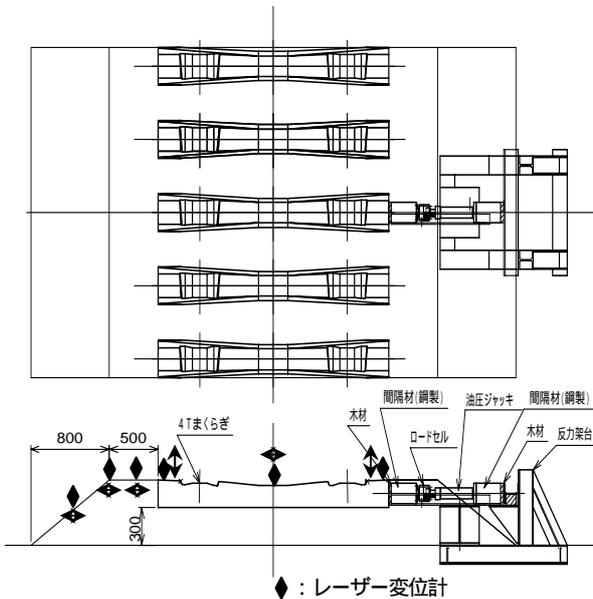


図 - 17 道床横抵抗力試験(静的載荷試験)



図 - 18 道床横抵抗力試験状況

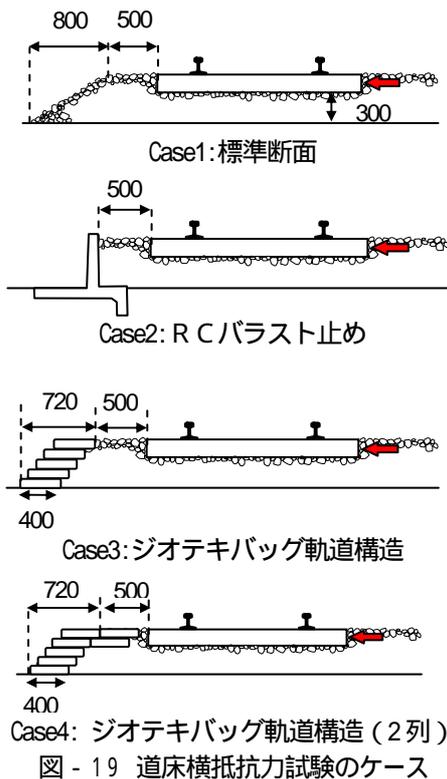


図 - 19 道床横抵抗力試験のケース

(1) 試験方法

試験方法を図 - 17、試験状況を図 - 18に示す。試験では各バラスト止め構造に対してマクラギ重心位置でジャッキにより水平荷重を与え、そのときの荷重と水平変位の関係を測定した。載荷はマクラギ水平変位が 50mm に達するまで行い、その後除荷した。載荷速度はなるべく一定速度となるよう配慮した。試験は各構造につき 3 回実施し、1 回の試験が終了する都度、マクラギの位置を戻すとともにタイタンパーによる突き固め、プレートランマーによる締め固めによる軌道整備を行った。また、ジオテキバッグ軌道構造では、変形の大きい上層部の整形も併せて行った。道床横抵抗力に与える影響が大きいと思われるマクラギ端部の締め固めについては一定の締め固め量となるようにプレートランマーで 5 往復の締め固めとした。

(2) 試験結果

試験を実施したケースの中から主たる 4 ケースを図 - 19 に、試験結果の一例として、図 - 19 の Case3 の試験結果を図 - 20 に示す。また各ケースの最大値および変位 10mm のときの抵抗力で整理した試験結果を図 - 21 に示す。最大値では Case2: RC バラスト止め、Case3 および Case4: ジオテキバッグ軌道構造とも全て Case1: 標準断面より良い結果となった。なかでも Case4: ジオテキバッグ軌道構造 (2 列) の場合は RC バラストと同程度の道床横抵抗力が確保できることが確認された。変位 10mm のときの抵抗力でも同様に、RC バラスト止め、ジオテキバッグ軌道構造 (2 列) では、標準断面よりも大きい値が得られた。なお、Case3 および Case4 で鉄筋の有無において、抵抗力には大きな差は見られなかった。これは、鉄筋の打込み深さが抵抗値に関係すると示唆される。基盤への打ち込み深さ別の実験結果を、別稿にて報告したい。

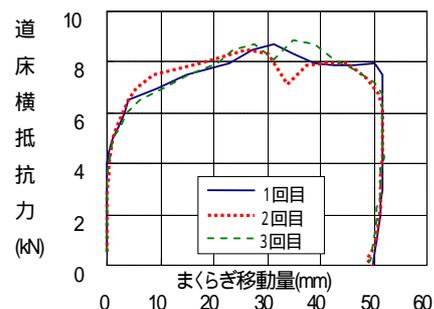


図 - 20 道床横抵抗力試験の一例

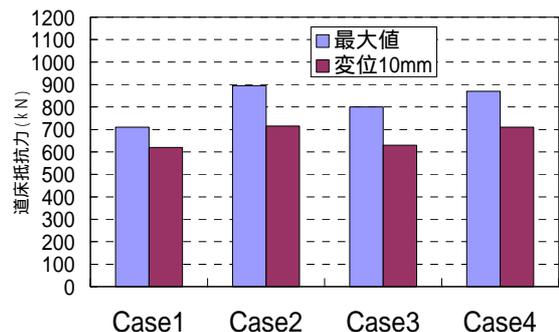


図 - 21 道床横抵抗力試験結果

6. 振動台試験

耐震性能を確認するために大型振動台試験を実施した³⁾。試験モデルは図 - 22 および図 - 23 に示すように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。盛土は鉄道的设计標準⁴⁾の土質区分 に相当する山砂を用いた。なお、諸元は以下のとおりである。

- ・土粒子密度 s 2.619g/cm³
- ・最大粒径 D_{max} 5.00mm ・50%粒径 D_{50} 0.52mm
- ・均等係数 U_c 146 ・細粒分含有率 F_c 24.7%
- ・締固め後の湿潤単位体積重量17kN/m³

また、 c 、については、土質区分 相当は、 $c=3$ kN/m²、 $\phi=35^\circ$ であったが、試験後に土槽からサンプリングして3軸試験を行った結果では $c=21.2$ kN/m²、 $\phi=34.3^\circ$ となり、はほぼ同じで、 c が高い状態であった。ジオテキバッグには質量25kgのバラストを詰め、一定の高さになるよう一層ずつ転圧した。補強鉄筋は異形鉄筋(D13)をバッグ1箇所あたり2本の割合とした。入力地震動は鉄道的设计標準⁴⁾のL2地震動を超え、加振時間が長く、長周期が卓越する特徴を持つL3地震動(仮称)¹⁾を使用した。入力地震波を図 - 24 に示す。なお、入力地震波には想定東海波を原波とし、それらのG3地盤地表面波をFEM動的応答解析により盛土天端の応答波形として算出したものを用いた。

各試験構造で加振中に発生したバラスト止め各部とマクラギの最大変位を図 - 25 に示す。過去の実験⁴⁾で耐震性能が確認されたコンクリートブロック製のバラスト止め (RCバラスト止め: CASE-1) とジオテキバッグをマクラギ端100mmの位置に近づけて設置したジオテキバッグ軌道構造 (CASE-2) およびジオテキバッグを2列に配置したジオテキバッグ軌道構造 (CASE-4) の結果を比較すると、各部の最大変位は概ね同等レベルであり、ジオテキバッグ軌道構造がRCバラスト止めと同等の耐震性能を有することが確認できた。バラスト止めの変位量を見るとRCバラスト止めが上部と下部で比較的近い値になっているのに対し、ジオテキバッグ軌道構造では下部に対して上部の値が大きくなっている。これはRCバラスト止めが滑動(スウェー)に近い動きをしているのに対し、ジオテキバッグ軌道構造は転倒

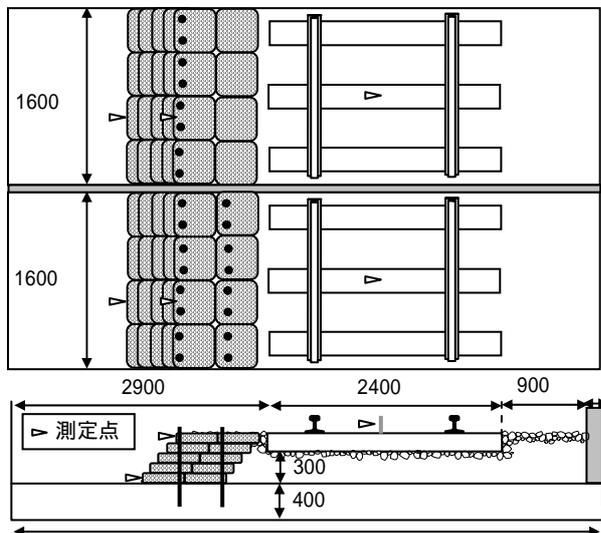


図 - 22 試験モデル(単位mm)

(ロッキング)の動きをしているためである。また、加振後に道床横抵抗力の測定を行ったが、ジオテキバッグ軌道構造の測定結果は軌道の座屈に対して余裕のある結果であった。しかし、道床肩幅が広い箇所を想定したCASE-3では大きな変位には至らなかったものの、ジオテキバッグに作用する加振時の慣性力が増加したことが影響し、他のケースに比べるとやや変位が大きい結果となった。



図 - 23 振動台と試験モデル

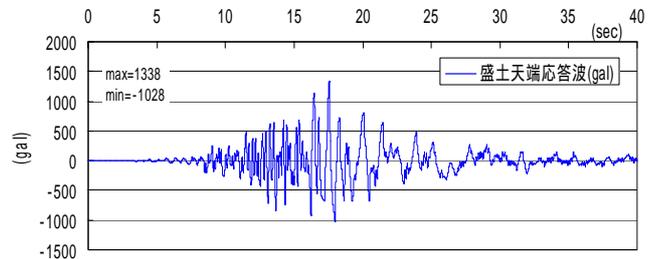


図 - 24 入力地震波(L3)

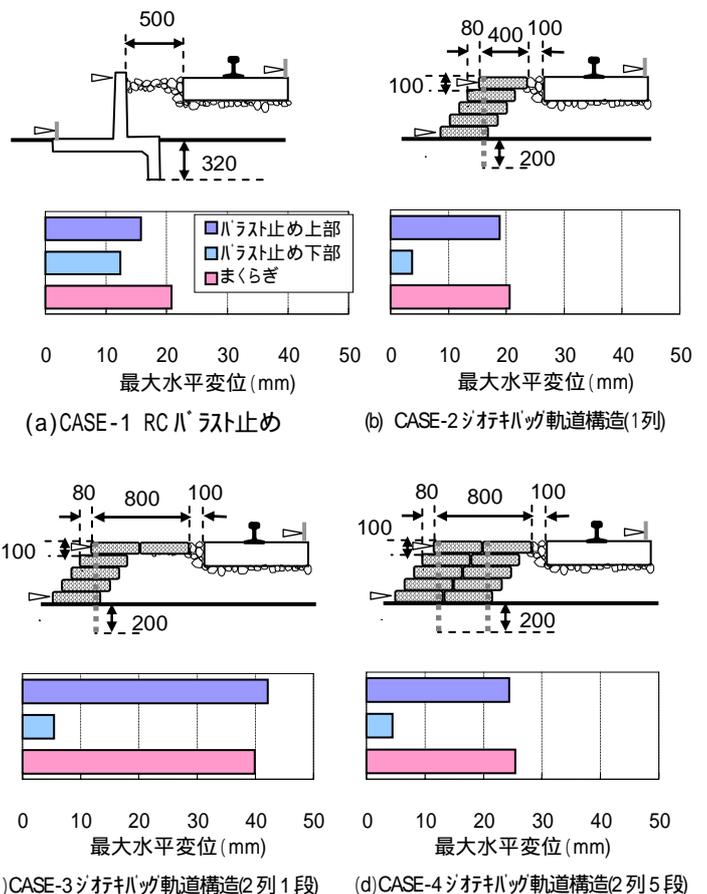


図 - 25 振動台試験結果(その1)

7. 改良構造による水平支持力試験

ジオテキバッグをマクラギ近傍に配置すれば RC パ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、道床幅の広い箇所では掘削量が多くなり、施工性に課題が残ることになる。そこで、ジオテキバッグ軌道構造の構造改良を検討することとした⁵⁾。構造改良の検討にあたり、その効果を水平支持力試験で確認することとした。図 - 12 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に対する変位量を読み取った。なお、载荷位置はパラスト止めの背面が水平な場合に静止土圧を受ける位置（下から 1/3 の高さ）とした。なお、試験は各構造につき 3 回づつ行った。その試験結果を図 - 26、図 - 27 に示す。

これまでの基本構造（(a)水平積み、鉄筋角度 90°）での最大水平支持力の平均値は 3.6kN となり、改良前の実験結果（4 章）の 7.0kN に比べて約半分の支持力となった。なお、コンクリートブロック製のパラスト止め((b)RC パラスト止め)も改良前の 6.8kN に対し 4.5kN となり減少したが、減少割合はジオテキバッグ軌道構造の方が大きい。これは盛土材として昨年度の試験では粘土質の土を使用したが、今回の試験では鉄道の設計標準⁴⁾の土質区分に相当する山砂を使用したため粘着力が下がり、支持力も下がったためと考えられる。従って、ジオテキバッグ軌道構造では補

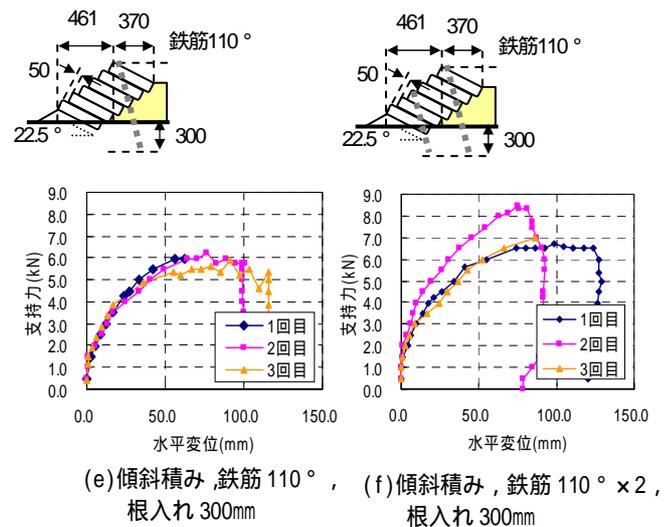


図 - 27 改良構造による水平支持力試験結果(その2)

強鉄筋根入れ部での支持力の確保が重要と考えられるため、鉄筋の根入れ長を 200mm から 300mm にして試験を行った (c)。その結果、支持力は 4.1kN まで改善した。次に既往の研究⁶⁾より、土嚢積層体の水平せん断試験において、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、傾斜積みでの試験を行った(d)。傾斜角は施工性等を考慮して 22.5° とした。その結果、支持力は 5.0kN まで向上し、効果が確認できた。次に、载荷試験時にバッグの変形挙動を観察したところ、鉄筋の打込み角度がバッグの積層軸と角度を持つように傾斜したときに、通常は水平力の増加に伴い積層体が徐々に起き上がるが、補強鉄筋がバッグを上から押さえるかたちで曲がることで起き上がる動きを抑える様子が見られた。そこで、補強鉄筋を傾斜させて打込むことを試行した(e)。いくつかの角度を試した結果、110 度に傾斜した場合に最も大きい支持力 (6.0kN) が得られた。更に補強鉄筋を傾斜して打ち込んだ場合にはバッグの連結が上部 3 段にとどまるため、下部 3 段を連結する補強鉄筋を追加した構造を試し(f)、最終的に 7.4kN まで支持力を向上させることができた。

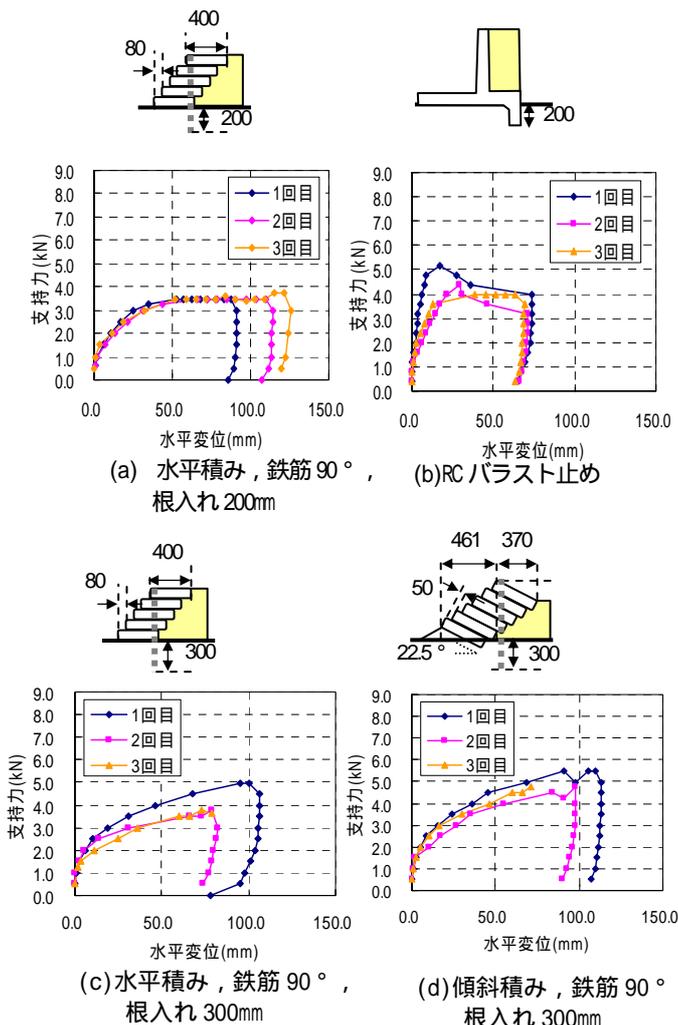
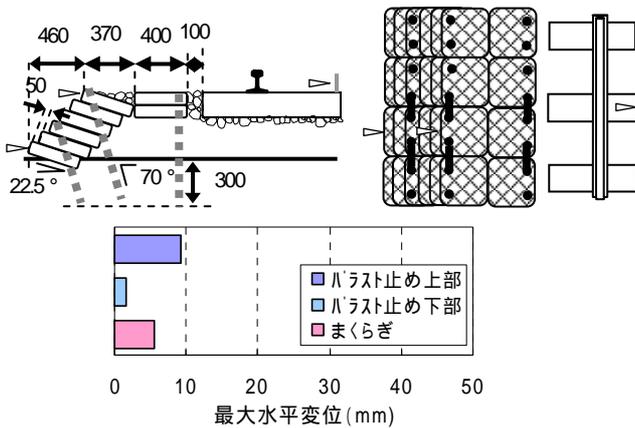


図 - 26 改良構造による水平支持力試験結果(その1)

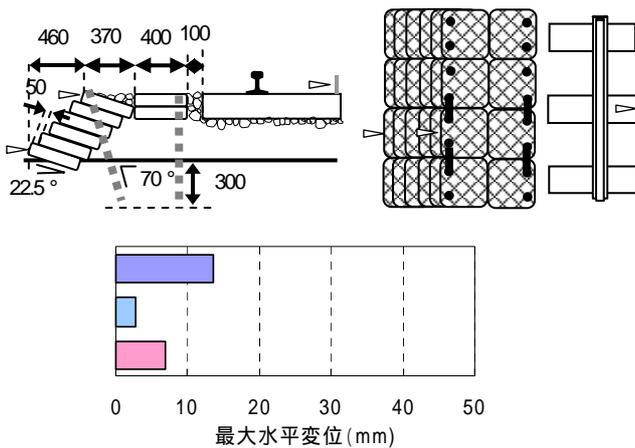
8. 改良構造による振動台試験

前章の水平支持力試験を踏まえた改良構造について再び振動台試験を行った。改良構造の主な特徴は以下のとおりである。ジオテキバッグを傾斜積みとし、積層面での滑動抵抗力を増した。補強鉄筋を斜めに打込み、上部のバッグを一体化させるとともに、水平力を受けたときの鉄筋の引張抵抗がバッグの転倒を抑制する方向に作用するようにした。補強鉄筋の根入れ長を 300mm に増やし支持力を増加させた。補強鉄筋を上部で連結したコ型とし、水平力を受けて鉄筋に引張力が生じたときに、最上段のバッグに上載圧として作用するようにした（ただし、測定上の理由で計測対象の列のみ）。2 列目を 2 段積みとし補強鉄筋を加えた。改良構造での振動台試験は振動台の加振能力の制約から奥行きを 1/2 にした土槽に 1 種類の試験構造を

製作して実施した。入力地震動は鉄道的设计標準 4) の L2 地震動を超え、加振時間が長く、長周期が卓越する特徴を持つ L3 地震動(仮称¹⁾)を使用した(図 - 24)。試験結果を図 - 28 に、加振後の状況を図 - 29 に示す。改良構造では 1 回目の試験に対して変位量、道床横抵抗力とも改善されており、また加振によりジオテキ以外の周辺バラストが散らばっているが、見た目にもジオテキバッグの残留変位歯見られないことから道床肩幅の広い断面の場合にも十分な耐震性能が得られることが確認できた。



(a) CASE-5 ジオテキバッグ軌道構造(改良構造、補強鉄筋×3)



(b) CASE-6 ジオテキバッグ軌道構造(改良構造、補強鉄筋×2)

図 - 28 試験台試験結果(その2)



図 - 29 加振後の状況

9. 施工性確認試験

施工性に関しては実際の線路で確認することとし、試験敷設を行った。敷設断面を図 - 30 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。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敷設とコ型補強鉄筋の傾斜打込みである。傾斜敷設については、当初、水平積みと比べると幾分作業性が悪くなるものと予測されたが、慣れるに従ってプレートランマー(重量約 85kg)による転圧も問題なく行うことができ、水平と傾斜で大差はないことを確認できた(図 - 30)。コ型補強鉄筋の打込みでは、あらかじめ鉄筋に被せる治具を製作しておき、角度計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(図 - 31)。鉄筋が径の大きいバラストに当たって進まない場合や、路盤が細粒化したバラストで固化している箇所では打込みに時間を要した。なお今回の試験敷設で総延長 88m(水平積み 26m、傾斜積み 62m)の施工を実施した(図 - 32)。今後は更なる施工性の改善を目指し、より強力な鉄筋打込み機の使用や、より簡便に角度が決められる治具などを検討する。

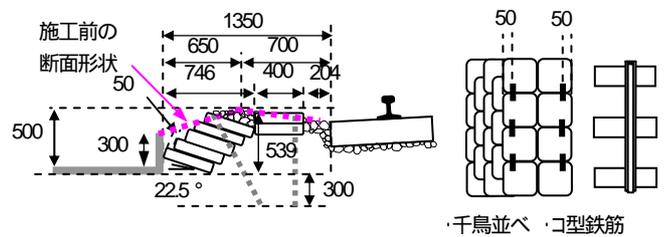


図 - 30 施工性試験の敷設断面(単位 mm)



図 - 31 施工性試験(転圧状況、補強鉄筋打ち込み)



図 - 32 敷設状況(鉄筋打ち込み前・後)

10. まとめ

今回の一連の検討より以下の知見を得た。

- (1) バラストを 25mm 程度の網目のジオテキスタイル製のバッグに詰め、転圧し、また上下バッグをバンド等で一体化することでバラスト粒子のかみ合せによる本来の摩擦力にバッグの張力による見かけ上の粘着力を付加させ

ることが可能になる。

- (2) ジオテキスタイル製のバッグ積層体に補強鉄筋を加えることにより、従来のRCバラスト止めと同程度の静的耐荷性能が得られることを確認した。
- (3) バッグをマクラギ端部付近まで敷設することによりジオテキバッグ軌道構造においても従来のRCバラスト止めと同程度の道床横抵抗力を確保できることを確認した。
- (4) ジオテキバッグ軌道構造は地震時の軌道変形対策として十分な効果を有することを振動台試験により確認した。
- (5) ジオテキバッグ軌道構造は傾斜積みとし、補強鉄筋を傾斜して打ち込むことで道床肩幅の広い断面においても支持力の向上及び耐震性能の向上が可能となることを確認した。
- (6) ジオテキバッグ軌道構造は傾斜積みとした場合においても重機使用の制約がない機動性の高い施工が可能となえ、現場の状況に合わせた柔軟な施工も可能なため、早期に実施できるバラスト軌道の耐震補強工法として有用である。

今後、ジオテキバッグ軌道構造について更なるブラッシュアップ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) 永尾拓洋他：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) 小林幹人他：ジオテキスタイル材料によるバラスト止めの振動台試験、第63回土木学会年次学術講演会,2008.9
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.
- 5) 渡邊康人他：ジオテキスタイル材料によるバラスト止めの構造改良と施工性試験、第63回土木学会年次学術講演会,2008.9
- 6) 松島他：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,2006.12