鉄道バラスト用ジオテキスタイル製 網目袋の性能確認試験

小林幹人¹・関雅樹²・渡邊康人³・可知隆⁴・古関潤一⁵・高橋大⁶

地震時のバラスト流出による軌道変位を抑制するため、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）にバラストを詰め、それを道床肩部に沿って積上げ積層体としたバラスト流出防止工が提案されている。本研究では、ジオテキバッグの基本性能を確認するための各種試験を行った。三軸圧縮試験では、ジオテキバッグに詰めたバラストは通常のバラストに比べ、バッグの張力に起因するみかけの粘着力が付加されることで強度が増し、主応力方向に対して一定の傾斜角までその効果があることを確認した。実施工を模擬した耐切創性試験では、高強度繊維を配合することでバラストを詰めてプレートコンパクターで転圧した際の袋の折損を抑えられることを確認した。耐紫外線性についてスーパーキセノンウェザーメータによる促進曝露試験を行った結果、長期間の紫外線照射を受けても必要強度に対して十分な耐久性があることが確認できた。

キーワード：バラスト、ジオテキスタイル、三軸試験、耐切創性、耐紫外線性

1. はじめに

バラスト軌道は大規模な地震が発生した時にバラストが流出し、大きな軌道変位が発生する恐れがあるが、それを防ぐため、従来より鉄筋コンクリートブロックによるバラスト流出防止工（図－１）が導入されている。しかし、鉄筋コンクリートブロックによるバラスト止めは約 150～200 kg の重量があるため、施工に重機が不可欠であり、施工性に課題があった。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、ジオテキスタイル素材の網目袋（以下、ジオテキバッグと記す）にバラストを詰め、それを道床肩部に沿って積上げ積層体としたバラスト流出防止工（図－２）が開発され、従来工法と同等の高い耐震性能を有することが振動台試験により確認されている^{1) 2)}。本論文では、ジオテキバッグによるバラストの補強効果を確認するために行った三軸圧縮試験と実使用における耐久性を確認するために行った各種試験結果について報告する。

2. 三軸圧縮試験

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

図－１ 鉄筋コンクリートブロックによるバラスト流出防止工

図－２ ジオテキバッグによるバラスト流出防止工

¹地盤工学会会員，東海旅客鉄道株式会社，総合技術本部技術開発部（〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33）

²地盤工学会国際会員，東海旅客鉄道株式会社，総合技術本部技術開発部長（〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33）

³非会員，東海旅客鉄道株式会社，総合技術本部技術開発部（〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33）

⁴地盤工学会会員，シーエヌ建設株式会社，軌道部（〒453-0013 愛知県名古屋市中村区亀島一丁目4番12号）

⁵正会員，東京大学生産技術研究所，教授（〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1）

⁶非会員，クラレトレーディング株式会社，産業資材部（〒530-8611 大阪市北区梅田1-12-39）

図-3 土のうの効果

増す効果, いわゆる「土のう」の効果が既往の研究より知られている (図-3) ³⁾. そこで, バラストとジオテキバッグの場合にも同様の効果が得られることを確認するため, 以下の条件で三軸圧縮試験を行った.

- ・供試体の直径 $d=300$ mm, 高さ $h=600$ mm の大型三軸試験機を使用.
- ・バラストの粒度分布は, 材料特性が変わらないことと測定精度を考慮し, 供試体の直径の 1/5 以下となる 20 ~ 60mm の範囲で調整.
- ・ジオテキバッグに詰めるバラストの密度は, 実際の使用状況に合わせ $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ に対して 25 kg ($\rho=1.56\text{ t/m}^3$) となるように調整.
- ・拘束圧 40 kN/m^2 はメンブレンを介して水圧で作用させ, 圧密排気条件 (CD 条件相当) で試験を実施.
- ・変位は圧力容器の外壁に取り付けられたひずみゲージ式変位計により測定.
- ・応力は供試体毎の直径の違いや圧密時の変形を考慮のうえ算出.

試験状況を図-4, 試験ケースを図-5に示す. 今回はジオテキバッグの有無による効果の違いに加え, バッグの積み上げ角度による効果の違いを確認するため, 主応力軸に対して傾斜角を持たせたケースについても試験を行った. 傾斜角のあるケースでは上下に調整用のジオテキバッグを配置し, 間詰めを行った.

大型三軸試験機

$\delta=22.5^\circ$

図-4 三軸圧縮試験

ジオテキバッグ有	ジオテキバッグ有		
	傾斜角 0°	傾斜角 22.5°	傾斜角 45°
↓	↓	↓	↓
↑	↑	↑	↑

図-5 試験ケース

図-6 三軸圧縮試験の結果 (応力-ひずみ関係)

図-7 三軸圧縮試験の結果 (モールの応力円)

図-8 見かけの粘着力と傾斜角の関係

$$c_0 \cos \phi = \left(\frac{T}{H} + \frac{T}{B} \right) \sin \phi + \left(\frac{T}{H} - \frac{T}{B} \right) \dots (1)$$

c_0 : 見かけの粘着力 ϕ : 内部摩擦角
 T : 土のうに発生する単位奥行きあたりの張力
 B : 土のうの幅 H : 土のうの高さ

図-9 見かけの粘着力と土のうの張力の関係³⁾

各ケースの試験で得られた軸差応力-軸ひずみの例を図-6に示す. 図より, ジオテキバッグ有の場合に, 高いピーク強度が得られていることがわかる. また, ジオテキバッグ有のピーク強度は, 大きな軸ひずみで発生しており, 地震時など大きな変形が加わったときに強度を発揮すると考えられる. なお, ピーク強度に達したと

きの軸ひずみは 9～14%の大ひずみ領域であり、ベディンゲラーの影響は無視できる範囲と考える。

試験結果をモールの応力円で表示したものを図-7に、そこで得られたジオテキバッグによる見かけの粘着力と傾斜角の関係を図-8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、破壊包絡線より求めている。試験結果より、ジオテキバッグでは図-3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、傾斜角の増加に伴いそれが小さくなることがわかる。今回の試験結果からは、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、傾斜角 22.5° の場合にも、その効果が発揮されることが確認できた。なお、最大圧縮強度を発揮した傾斜角 0°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(1)で表され³⁾、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た張力を求めると $T=1.07$ kN/m となる。これをジオテキバッグの奥行 1m あたりの本数(目合 25mm のため $1000\text{ mm}/25\text{ mm}+1$ 本=41本)で換算すると 26.1 N/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が維持されていれば十分に機能を発揮すると考えられる。

3. 耐切創性試験

ジオテキバッグによるバラスト流出防止工はバラストを詰めたジオテキバッグをプレートコンパクターで転圧しながら積み上げていくが、施工の際にバラストとプレートコンパクターに挟まれたバッグの糸が切れることがある。数本の糸が切れるだけならば、機能に影響はないが、中詰めした碎石がこぼれ落ちるような大きな損傷は避けなければならない。そこで、ジオテキバッグに使用する素材を選択するにあたり、耐切創性(切れにくさ)に関する試験を行った。

(1) シート材での耐切創性試験

試験方法を図-10に示す。まず基礎的な検討として、地面に敷いたバラスト(粒径 20～60mm)の上にシート状の素材を敷き、素材に張力を与えたいアンカーにより固定し、その上を実施工と同じようにプレートコンパクター(重量 45kg)で往復して折損した糸の割合を比較する方法で試験を行った。素材に与える張力はバネ秤で測定し、袋詰めしたときの状況に近くなるよう、アンカー1箇所あたり 68.6N で調整し、プレートコンパクターの転圧速度は概ね一定(約 0.3m/s)となるよう配慮した。往復回数は、実際の施工では3往復であるが、素材による差が表れやすいように、それよりも多い 10 往復とした。試験に使用した素材を表-1に示す。これらの素材は経済性を考慮し、市場にある製品から鉄道用バラストの粒径に適した目合いとして 20～30mm 程度のものを集めた。このうち、①②⑤はネットとして用いられているもの、③④は補強土工法の面状補強材に用いられているものである。

試験結果を図-11に示す。結果は試験体 3 枚の平均値であり、目合いによって試験体の糸の数が異なるためここでは折損割合で整理した。結果は①ポリエステル>③ビニロン>②ポリエチレン>④ポリアリレート>⑤ポリエステル(ポリエチレン被膜)の順で折損割合が少ない結果となった。この結果から、経済性と袋体への加工の容易さを考慮し、ポリエチレンをジオテキバッグの主な素材として採用することとした。

図-10 シート材での耐切創性試験

表-1 シート材での耐切創性試験に使用した素材

No	素材	目合い	編み方	太さ
①	ポリエステル	25mm	ラッセル網	2mm
②	ポリエチレン	25mm	無結節網	2mm
③	ビニロン	20mm	グリッド	幅5mm 厚1mm
④	ポリアリレート	20mm	グリッド	幅5mm 厚1mm
⑤	ポリエステル (ポリエチレン被膜)	35mm	無結節網	4mm

図-11 シート材での耐切創性試験の結果

(2) 袋体での耐切創性試験

次に素材を実際に袋状にして、耐切創性試験を行った。試験体を製作するにあたり、耐切創性の更なる向上を目指し、先の試験でポリエチレンよりも高い性能を示した高強度繊維のポリアリレートを経済性を大きく損なわない範囲で配合することを検討した。

ポリアリレートは耐切創性に優れた繊維で、防刃グローブや漁網、防護ネットなどで使用実績がある素材である。ポリエチレンとポリアリレートの性能を比較すると引張強度は 1 割程度の増加に留まるが、切創強度は 4 倍以上の性能となっている(表-2)。なお、表-2の引張強度は JIS L 1013 法に基づく引張試験により、切創強度は刃角度 10° に設定したカッターの刃に素材を当て、素材が完全に切断するまでの引張強度を測定する方

法（以下、この試験方法をクラレ法と記す）により求めたものである。引張試験の条件を表－3、試験状況を図－12、切創性試験の条件を表－4、試験状況を図－13に示す。

表－2 ポリエチレンとポリアリレートとの性能比較

	ポリエチレン	ポリアリレート
引張強度（N/本）*1	205	225
切創強度（N/本）*2	7	32

*1：JIS L 1013法に基づく引張試験による引張強度

*2：クラレ法による切創強度

表－3 引張試験の条件

項 目	内 容
試験装置	インスロン 4301 型 4Cチャック
引張速度	5cm/分
チャック間距離	10cm

図－12 引張試験の試験状況

表－4 切創性試験の条件

項 目	内 容
試験装置	インスロン 4301 型 平チャック
引張速度	5cm/分
刃	NT カッター替刃 (BL-300)
刃角度	10度

図－13 切創性試験の試験状況

また素材の編み方についても改良を施し、耐切創性と生産性の向上を両立できる菱目形状のラッセル網にするとともに、耐切創性に優れたポリアリレートが表層に表れる編み方とした。また、糸が切れた場合に開口量が大きくなる交点は重合長を長くして補強することにした。

試験に使用した素材を表－5に、試験方法を図－14に示す。試験は 25 kg のバラストを詰めたバッグ（幅約 400mm×奥行約 400mm×厚さ約 100mm）を各素材につき 3 袋、合計 6 袋並べ、その上をプレートコンパクター

（重量 45kg）で往復し折損数を調べる方法で行った。往復回数は差が表れやすいように 50 往復まで行った。

試験結果を図－15 に示す。結果は 3 袋の試験体の平均値であり、ここでは折損箇所数で整理した。ポリエチレン+ポリアリレートがポリエチレンのみの場合に比べて約 4 割折損数が少なくなり、ポリアリレートを配合した効果が確認できる結果となった。なお、実際の施工ではプレートコンパクターによる転圧は 3 往復のため、折損数は 1～2 箇所にとどまると考えられる。

以上の結果から、ジオテキバッグの素材にはポリエチレンにポリアリレートを配合したものを使用することにした。

表－5 袋体での耐切創性試験に使用した素材

No	素材	目合い	編み方	太さ
①	ポリエチレン	25mm	無結節網	2mm
②	ポリエチレン+ポリアリレート	25mm	ラッセル網	2mm

図－14 袋体での耐切創性試験

図－15 袋体での耐切創性試験の結果

4. 耐紫外線性試験

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、紫外線による劣化が生じるため、素材にカーボンブラックや紫外線吸収剤を混ぜて耐紫外線対策を施している。また、バラスト流出防止工として使用する場合には、できるだけバラストで表面を覆い、紫外線が直接当たらない敷設形態となるようにするが、現場状況によりバラストによる被覆が困難な場合もある。そこで、ジオテキバッグの耐紫外線性について確認試験を行った。

(1) 試験方法

試験は JIS L 1096「一般織物試験」の 630.1 に準じ、耐候性試験機を用いた促進曝露試験により行った。耐候性試験機としては、一般的にサンシャインウェザーメーター、キセノン/スーパーキセノンウェザーメーター

があるが、今回はキセノンランプから発せられる波長の形状が太陽光線に近いこと、および高エネルギー化による期間短縮が図れることから、スーパーキセノンウェザーメーターを使用した。試験条件を表-6に、試験状況を図-16に示す。一定期間促進曝露した試験体はJIS L 1013法に基づく引張試験で引張強度を、クラレ法に基づく切創性試験で切創強度を求め、紫外線照射による影響を調べた。

試験に使用した素材を表-7に示す。ここでは、ジオテキバッグ（ポリエチレン+ポリアリレート）との比較のため、ポリエチレン（緑）についても試験を行った。促進曝露後の引張試験、切創性試験は5本のサンプルについてデータを取得し、その平均値で結果を整理した。

表-6 耐紫外線性試験条件

項目	内容
試験装置	スーパーキセノンウェザーメーター
パネル温度	63℃±1℃
噴霧時間	18分(1工程120分)
放射照度	180W/m ²
照射時間	250, 500, 1000, 2000, 3000, 5000時間

図-16 耐紫外線性試験の状況

表-7 耐紫外線性試験に使用した素材

No	素材	色	太さ	耐紫外線対策
①	ジオテキバッグ (ポリエチレン+ ポリアリレート)	黒	2mm	カーボンブラック 紫外線吸収剤
②	ポリエチレン	緑	2mm	なし

(2) 引張試験結果

促進曝露試験後の引張強度の結果を図-17に示す。ジオテキバッグでは引張強度は紫外線を照射開始した後、一旦上昇している。この理由は、ポリエチレンの結晶化度の上昇や紫外線による架橋が分子鎖切断に比して多かったことが原因と考えられる⁴⁾。その後は照射時間とともに強度低下が進行するが、これは紫外線による分子鎖切断が進んだためと考えられる。また、紫外線による劣化メカニズムとして照射時間の増加とともに、繊維表面の酸化膜が形成されることでポリエチレン内部に到達する紫外線が減少し、その結果として紫外線による劣化が緩和されることが一般的に考えられている。今回の試験結果でもその傾向が表れており、3000時間以降のデータで強度低下の進み方が緩やかに変化している。また、

ジオテキバッグの引張試験における引張強度と伸度の関係をみると(図-18)、ポリアリレートが低伸度で破断し、その後ポリエチレンが破断している。従って、引張強度についてはポリエチレンの性能が支配的と考えられる。一方、ポリエチレン（緑）では、紫外線照射後から強度低下が進み、ジオテキバッグに比べてやや強度低下の進行が早くなっている。この違いはカーボンブラックや紫外線吸収剤などの影響によるものと考えられる。

ここで、耐候性試験機による照射時間と実際の日照時間との対応について調べると、平均的な太陽光1年分の紫外線(300~400nm)のエネルギー量は約300MJ/m²に相当するという報告⁵⁾があり、今回試験に用いたスーパーキセノンウェザーメーターでこれに相当する照射時間を求めると、500時間が太陽光1年分に相当することになる。従って、これまでに得られた試験結果からは、5000時間の照射を行った時点、つまり10年分に相当する紫外線量でも約60%の引張強度が維持されているという結果になる。また、促進曝露時間250時間以降のデータから指数関数による近似式を求めると図中の実線が得られる。これによれば10000時間を経過した時点の引張強度は50N/本を下回らない結果となり、第2章の三軸圧縮試験で得られた土のうの効果を発揮するための引張強度26.1N/本と比べるとまだ余裕がある。以上のことから、ジオテキバッグが紫外線に曝露された敷設状況であっても、相当の期間は機能を発揮する状態を維持できると考えられる。ちなみに、ポリエチレンを使用した製品について、過去に行われた耐候性試験の結果でも、著しい劣化はみられていない⁶⁾。今後は、促進曝露試験の継続評価と、実使用環境下における劣化度調査を行い、耐久性の見極めを行っていく。

図-17 引張試験結果(耐紫外線性試験)

図-18 ジオテキバッグの引張強度と伸度の関係

(3) 切創性試験結果

促進曝露試験後の切創性強度の結果を図-19に示す。試験結果より、ジオテキバッグの切創性はポリエチレン（緑）に比べて高い強度を示すが、1000時間以降は照射時間の増加に伴い、強度が低下していることがわかる。一方、比較したポリエチレン（緑）の切創性は促進曝露時間に関わらずほとんど低下していない。これはポリアリレートの耐紫外線性がポリエチレンに比べて低いため、ポリアリレートの劣化により耐切創性が低下したものと考えられる。なお、図中に示した実線はジオテキバッグの促進曝露時間500時間以降のデータから指数関数で近似式を求めたものである。ジオテキバッグでは、施工時のプレートコンパクターによる転圧作業に耐えるため、耐切創性の高いポリアリレートを使用している。敷設後はポリアリレートの劣化により耐切創性が低下するが、最終的にはポリエチレンの耐切創性が維持されることになると考えられる。

図-19 切創性試験結果（耐紫外線性試験）

5. まとめ

ジオテキバッグの基本性能および素材に関する各種試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) バラストを中詰め材としたジオテキバッグでは、バラスト単体の場合に比べ見かけの粘着力の発生による強度の増加が得られ、22.5°の傾斜角でもその効果が発揮されていることがわかった。
- (2) 実施工を模擬した耐切創性試験の結果と、経済性、袋体への加工の容易さを考慮すると、ジオテキバッグの素材にはポリエチレンが適していると考えられる。また、ポリアリレートを配合することで耐切創性を更に改善できることがわかった。
- (3) ジオテキバッグの耐紫外線性についてスーパーキセノンウェザーメータによる促進曝露試験を行った結果、10年相当の紫外線量で約60%の引張強度が維持されていた。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 例えば, 高分子の寿命予測と長寿命化技術, エヌ・ティー・エヌ, 2002
- 5) 環境因子測定表, (財) 日本ウェザリングテストセンター, 2004.
- 6) 例えば, 原田真, 加藤八郎: 繊維ロープの耐候性評価, 愛知県産業技術研究所研究報告, 2004

PERFORMANCE TESTS OF GEOSYNTHETIC BAGS FOR RAILROAD BALLAST

Mikihito KOBAYASHI, Masaki SEKI, Yasuhito WATANABE, Takashi KACHI,
Junichi KOSEKI and Masaru TAKAHASHI

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 proposed. In this study, some performance tests of geosynthetic bags for railroad ballast are conducted. In triaxial test, geosynthetic bags filled with ballast revealed higher strength than ballast with no bag. In cut strength test that simulate real construction process, bags made of polyethylene revealed good performance. Its combination with polyarylate that is one of high strength fibers improved the performance further. In ultraviolet ray resistance test, geosynthetic bags made of polyethylene and polyarylate revealed less than 60% loss of pull strength at 5000h irradiation of super xenon weather meter that was equivalent to 10 year irradiation of sunlight, and the residual strength was high enough to satisfy the required value.