

# 3609 ジオテキバッグ工法の性能確認試験および本線試験施工結果

正 [土] ○小林 幹人 (東海旅客鉄道) 正 [土] 渡邊 康人 (東海旅客鉄道)  
正 [土] 鑑坂 勝則 (東海旅客鉄道) 正 [土] 村松 浩成 (東海旅客鉄道)

## Performance Evaluation Tests and Construction Tests of Ballasted Track Reinforced with Geosynthetic Bags

Mikihito KOBAYASHI, Central Japan Railway Company 1545-33, Ohyama, Komaki-shi, Aichi  
Yasuhiro WATANABE, Central Japan Railway Company Katsunori YOROISAKA, Central Japan Railway Company  
Hironari MURAMATSU, Central Japan Railway Company

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 method are conducted. In triaxial test, geosynthetic bags filled with ballast revealed higher strength than ballast with no bag. In cut strength test, bags made of polyethylene and polyarylate that is one of high strength fibers revealed good performance. In ultraviolet ray resistance test, geosynthetic bags revealed less than 60% loss of pull strength at 5000h irradiation of super xenon weather meter. In construction test on commercial lines, it is confirmed that the new method has good workability.

Keywords: ballasted track, geosynthetic bags, triaxial test, cut strength test, ultraviolet ray resistance test, construction test

### 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」に当社も参画し、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<sup>1)</sup>。

本報告では、バラスト流出対策として新たに開発したジオテキバッグ工法に使用するジオテキバッグの性能確認試験結果およびジオテキバッグ工法の本線施工試験結果について述べる。

### 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の粘着力  $c$  の役割を果たし、耐荷性能が増す効果、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 1)<sup>2)</sup>。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、三軸圧縮試験を行った。試験は以下の条件で行った。

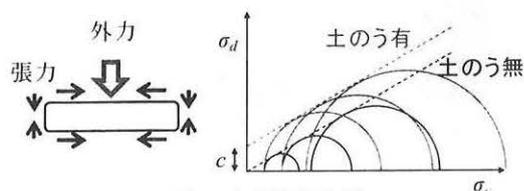
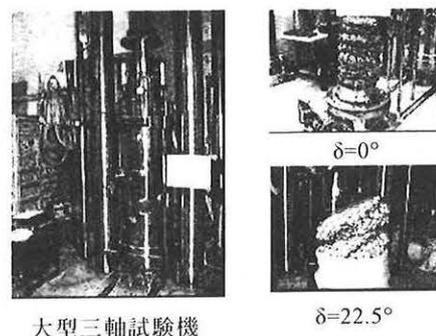


図1 土のうの効果

- ・ 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、供試体の直径の  $1/5$  以下となる  $20\sim60$ mm 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て  $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  に対して  $25\text{ kg}$  ( $\rho=1.56\text{ t/m}^3$ ) となるように調整。
- ・ 拘束圧  $40\text{ kN/m}^2$  (メンブレンを介して水圧で作用)、圧密排気条件 (CD 条件相当) で三軸試験を実施。
- ・ 変位は、圧力容器の外部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 2、試験ケースを図 3 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。



大型三軸試験機

図2 三軸圧縮試験

|              |          |           |         |
|--------------|----------|-----------|---------|
| ジオテキ<br>バッグ無 | ジオテキバッグ有 |           |         |
|              | 傾斜角 0°   | 傾斜角 22.5° | 傾斜角 45° |
|              |          |           |         |

図3 試験ケース

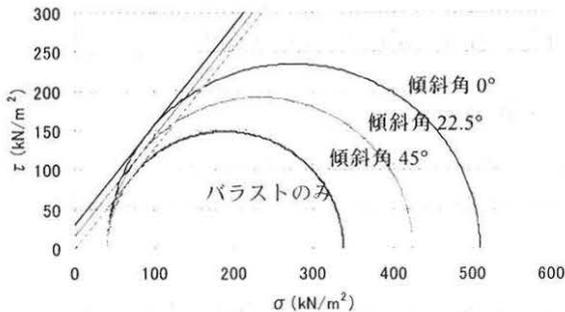


図4 三軸圧縮試験の結果（モールの応力円）

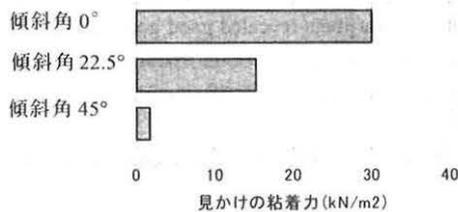


図5 ジオテキバッグによる見かけの粘着力

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

$c_0$  : 見かけの粘着力  $\phi$  : 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

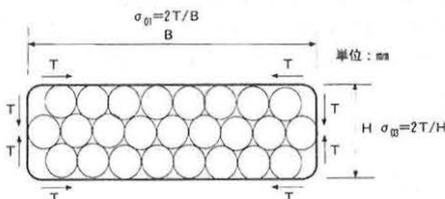


図6 見かけの粘着力と土のうの張力の関係

試験結果をモールの応力円で表示したものを図4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を図5に示す。ジオテキバッグの見かけの粘着力はラストのみのケースで  $c=0$  として求めた内部摩擦角  $\phi$  (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1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のがわかる。今回の試験結果からは傾斜角 22.5° の場合にもその効果が得ら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<sup>2)</sup>、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  $T=1.07 \text{ kN/m}$  となる。これをジオテキバッグの奥行き 1m あたりの本数 (目合 25mm のため  $1000 \text{ mm} / 25 \text{ mm} + 1 \text{ 本} = 41 \text{ 本}$ ) で換算すると  $26.1 \text{ N/本}$  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

ジオテキバッグ工法では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。数本の糸が切れる程度ならば、機能に影響はないが、中詰めしたラスト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。

#### 3.1 シート材での耐切創性試験

まず基礎的な検討として、地面に敷いたラストの上にシート状の素材を敷き、素材に張力を与えうえで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（図7）。往復回数は実施工では 3 往復だが、素材による差が表れやすいように 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。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として用いられているものである。

試験結果を図8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

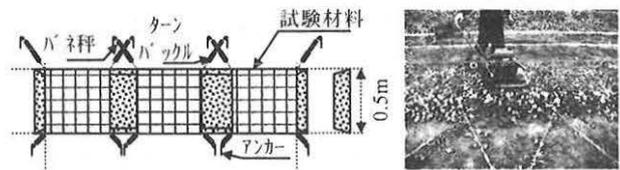


図7 シート材での耐切創性試験

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<br>厚1mm |
| ④  | ポリアリレート              | 20mm | グリッド  | 幅5mm<br>厚1mm |
| ⑤  | ポリエステル<br>(ポリエチレン被膜) | 35mm | 無結節網  | 4mm          |

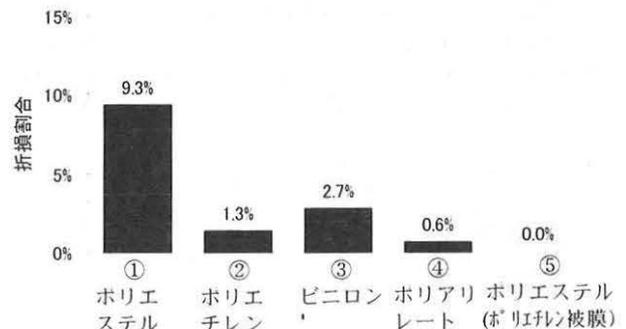


図8 シート材での耐切創性試験の結果

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）の順に折損割合が少なかった。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にした。

### 3.2 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。ここで、更なる耐切創性向上を目指し、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、防護ネットなどの使用実績がある。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では1割程度の増加に留まるが、切創強度では4倍以上の性能がある（表2）。また素材の編み方についても、耐切創性と生産性の両方を向上できる菱目形状のラッセル網を採用し、耐切創性に優れたポリアリレートが表層に表れるように編み方を改良した。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した。

試験に使用した素材を表3に示す。試験は25kg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（図9）。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10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を整理した。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採用することにした。

表2 ポリエチレンとポリアリレートの性能比較

|               | 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（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）による切創強度

表3 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 |

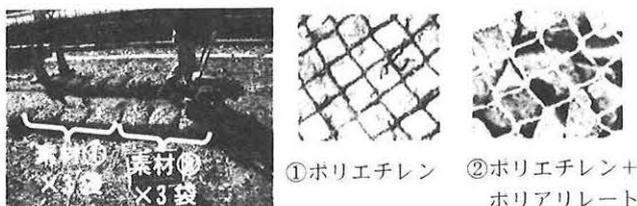


図9 袋体での耐切創性試験

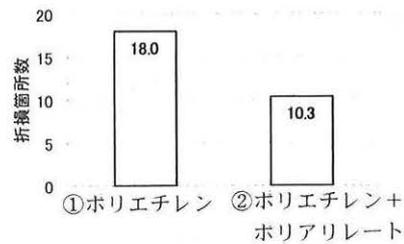


図10 袋体での耐切創性試験の結果

### 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。

#### 4.1 試験方法

試験はJIS L 1096「一般織物試験」の6.30.1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。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、耐候性試験機としてスーパーキセノンウエザーメータを使用した。試験条件を表4に、試験状況を図11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5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4 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エザーメータ                    |
| パネル温度 | 63℃±1℃                             |
| 噴霧時間  | 18分（1工程120分）                       |
| 放射照度  | 180W/m <sup>2</sup>                |
| 照射時間  | 250, 500, 1000, 2000, 3000, 5000時間 |

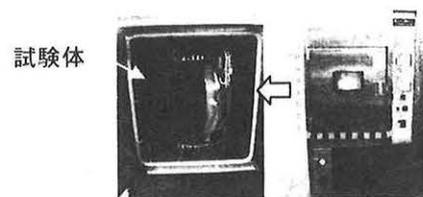


図11 耐紫外線性試験の状況

表5 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<br>紫外線吸収剤 |
| ②  | ポリエチレン                  | 緑 | 2mm | なし                 |

## 4.2 試験結果

促進曝露試験後の引張強度の結果を図12に示す。ジオテキバッグでは紫外線を照射開始後、引張強度が一旦上昇している。これは、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。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、繊維表面に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。なお、引張試験ではポリアリレートが低伸度で先に破断し、その後にポリエチレンが破断しているため、ジオテキバッグの引張強度はポリエチレンの性能が支配的であると考えられる。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（300～400 nm）のエネルギー量は約300 MJ/m<sup>2</sup>に相当するという報告<sup>3)</sup>があり、今回試験に用いたスーパーキセノンウエザーメータ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。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、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。

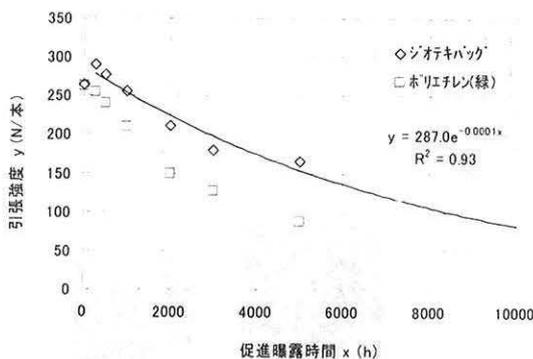


図12 耐紫外線性試験結果（引張強度）

## 5. 本線試験施工

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試験施工を行った。施工断面を図13に示す。施工箇所は曲線半径10100 m、カント40 mmの曲線内軌側で列車通過時の振動で道床が崩れやすく、保守に苦慮している箇所である。施工状況を図14に示す。傾斜積みでのプレートランマーによる転圧は問題なく行うことができ、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、鉄筋に被せる治具を製作し、角度計で鉄筋の角度を確認しながら電動ハンマで打込みを行った。鉄筋が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結した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。

本線における試験施工はここで示した箇所を含め、延長400m以上について実施し、概ね良好な作業性を確認した。また、敷設箇所ですべてに保守作業を行い、ジオテキバッグが保守作業に支障する範囲を調べた。ジオテキバッグがまくらぎに近い位置にある場合に、道床交換、まくらぎ交換、ロングレール交換の各作業に支障するが、いずれもジオテキバッグの一部を撤去・復旧することで対応できることを確認した。

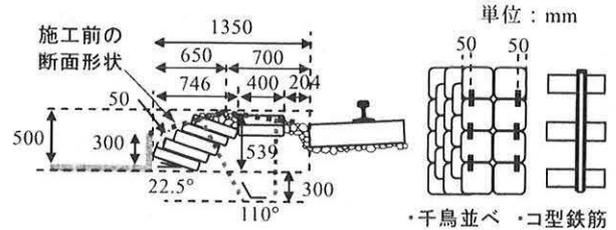


図13 本線試験施工の施工断面

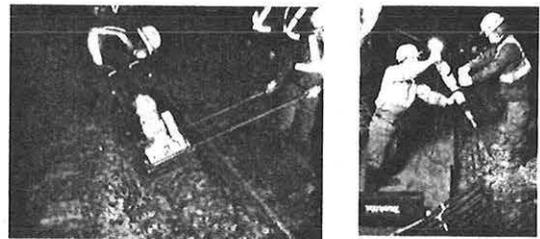


図14 施工状況（傾斜積み、コ型補強鉄筋の打込み）

## 6. まとめ

各種の性能確認試験を行い、改良や検証を重ねた結果、実用に耐えるジオテキバッグを開発することができた。また、本線における試験施工により、ジオテキバッグ工法の良好な施工性を確認することができた。今後は以下の課題に継続して取り組み、ジオテキバッグ工法のブラッシュアップを行っていく。

- ・保守作業の支障が少ない構造の検討
- ・紫外線防護による耐久性向上
- ・構造の簡素化による施工性向上
- ・効率的な施工方法の追求による更なるコストダウン
- ・実軌道における耐久性の検証

最後にジオテキバッグの開発、試験に多大な協力をいただいたクラレおよびクラレレーディング各位、試験施工に多大な協力をいただいた軌道会社各位に深く感謝いたします。

## 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) 環境因子測定表, (財)日本ウエザリングテストセンター, 2004.