

## 学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	パイルスラブ式盛土におけるジオテキスタイル土のうの水平抵抗特性と振動伝達抑制効果に関する研究
氏名(Name)	藤井 公博

新幹線の軌道構造は、軌道をコンクリート路盤で直接支持する省力化軌道が用いられている。省力化軌道は、軌道面での変形量が少なく維持管理上の利点を有するが、これを支持する新幹線盛土は沈下に関して高い性能が要求される。この要求性能を満足するため、盛土材には良質な材料が求められるが、本来は適用外となる建設発生土を高規格盛土に適用できれば、環境面・経済面において有効である。このため、盛土材によらない高規格な盛土構造としてジオテキスタイルを敷設した良質でない盛土材を用いた補強盛土内に地盤改良杭を打設し、杭頭部に設置したジオテキスタイル土のうと併せてコンクリート路盤を支持する盛土工法（パイルスラブ式盛土）が提案され、主として 1/10 スケールの振動台実験によりパイルスラブ式盛土の耐震性が確認されている。パイルスラブ式盛土におけるジオテキスタイル土のうは、 $\phi 1.0\text{m}$  の地盤改良杭頭部上の碎石をジオテキスタイルで包み込んだ縦  $1.2\text{m} \times$  横  $1.2\text{m}$ 、高さ  $0.15\text{m}$  の座布団形状であり、L2 地震時における杭頭部上の碎石層の拔出しに伴うコンクリート路盤の沈下抑制を目的に設置されている。ジオテキスタイル土のうに対しては、列車走行安全性に関して動的鉛直振動試験を行い有効性が確認されているが、L2 地震のような大きな水平力が作用した際の変形特性は確認されていない。

本研究は、パイルスラブ式盛土におけるジオテキスタイル土のうの L2 地震時における水平抵抗特性を明らかにし、実物大のパイルスラブ式盛土の動的挙動の検証を踏まえ、パイルスラブ式盛土の適用範囲を確立することを目的とした。

まず、実材料を用いて構築した実大規模のジオテキスタイル土のう模型に対し、ジオテキスタイル土のう自体の特性を把握することを目的に土のう下面を固定した条件、実際のパイルスラブ式盛土と同じ構造である土のう下面を非固定とした条件で正負交番水平載荷試験を行い、ジオテキスタイル土のうの静的な水平せん断特性について確認を行った。

土のう下面を固定状態とした試験結果では、L2 地震相当 ( $kh=0.9$ ) の水平荷重に対してジオテキスタイル土のうの変形は  $1.3\text{mm}$  ( $\gamma=0.009$ ) と微小であった。また、ジオテキスタイル土のう下面を非固定とした場合は、杭頭上でジオテキスタイル土のうの滑動が確認されるものの L2 地震相当水平での変位は  $51.0\text{mm}$  ( $\gamma=0.34$ ) であり、鉄道の復旧性を考慮したパイルスラブ式盛土におけるコンクリート路盤許容水平変位量  $100\text{mm}$  未満であった。加えて、載荷後もジオテキスタイルの破断、碎石の抜け出しはなく、土のう変形を保持することを確認した。

また、ジオテキスタイル土のうは鉄道盛土の碎石層に用いられる粒度調整碎石 M30 に対する拘束圧  $\sigma_v=50\text{kPa}$  とした繰返し三軸試験結果の  $G/G_0-\gamma$  と同様の傾向を示し、せん断ひずみ  $\gamma=0.002\sim 0.01$  においては大きな履歴減衰を示すことを確認した。

次に、ジオテキスタイル土のう自体の動的特性を確認するため、実応力状態を再現した土のう下面を固定した状態のジオテキスタイル土のう模型に対して振動台実験を実施した。900gal 加振後のジオテキスタイル土のうの残留水平変位は  $1.4\text{mm}$  ( $\gamma_r=0.009$ )、最大残留鉛直変位は  $2.0\text{mm}$  (土のう高  $150\text{mm}$  の  $1.3\%$ ) と、L2 地震相当の大きな加振に対しても変位は微小であり、土のう形状を保持することを確認した。また、ジオテキスタイル土のうのせん断特性は、動的試験、静的試験で同様の傾向を示すことを確認した。さらに、せん断剛性比が  $0.1$  以下となる 600gal 以降の加振では振動台よりジオテキスタイル土のうを介して伝達するコンクリート路盤の応答加速度は加速度応答比で  $0.8$  程度まで低減し、ジオテキスタイル土のうの振動伝達抑制効果を確認した。

様式7号（第12条，第31条関係）

（様式7号）（Format No.7）日本語版

実物大のパイルスラブ式盛土の動的挙動は、FLIPによる2次元動的FEM解析により実施した。まず、試験結果を反映したジオテキスタイル土のうの解析モデルについて妥当性の検証を行った。この結果、ジオテキスタイル土のうの解析モデルは模型振動台実験結果と同等の振動伝達抑制効果を再現できることを確認した。これを踏まえ、実物大パイルスラブ式盛土モデルに対し2次元動的FEM解析を行い、新幹線を支持する鉄道盛土として軌道を支持するコンクリート路盤の残留沈下量、残留水平変位量について確認を行い、高さ6mの標準盛土モデル、表層2mが軟弱粘性土地盤である軟弱地盤モデル及び高さ9mの高盛土モデルの全てのケースで、復旧性を考慮したコンクリート路盤の許容残留沈下量、水平変位量である100mmを満足することを確認し、パイルスラブ式盛土が適用可能であることを確認した。

また、これまでの実験結果から得られたパイルスラブ式盛土の挙動と設計手法における課題を整理し、鉄道盛土としての要求性能を満足するための設計フローを提案した。

## 学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目  
(Dissertation Title)Property of shear and earthquake resistance of a geotextile gabion  
between the head part of improvement pile slab embankment

氏 名(Name)

FUJII Kimihiro

Shinkansen embankments supporting the low maintenance track requires high performance with respect to settlement. High-quality embankment materials are required as fill materials for Shinkansen embankments, and it would be effective from both environmental and economic perspectives if construction generated soil, which is normally not applicable, could be applied to high-standard embankments.

A pile slab embankment has been proposed in which soil improvement piles are driven into a reinforced embankment using poor-quality embankment material with geotextile laid down, and the concrete roadbed is supported in conjunction with geotextile gabions installed at the top of the piles.

For pile slab embankments, the seismic resistance of pile slab embankments has been confirmed mainly by 1/10-scale shaking table tests. The geotextile gabions are 1.2 m long by 1.2 m wide and 0.15 m high. They are designed to suppress the settlement of the concrete roadbed due to the extraction of the crushed stone layer above the pile head during a level 2 earthquake. Dynamic vertical vibration tests have been conducted on geotextile gabions to confirm their effectiveness for train running safety. But their deformation characteristics when subjected to large horizontal forces, such as a Level 2 earthquake, have not been confirmed. The purpose of this study is to clarify the horizontal resistance characteristics of geotextile gabions in the pile slab embankment during a Level 2 earthquake, and to establish the scope of application of pile slab embankments based on the verification of the dynamic behavior of full-scale pile slab embankments.

First, cyclic horizontal load tests were conducted on a full-scale a geotextile gabion model constructed using real materials. The test conditions were as follows: fixed and unfixed bottom surface of the gabion using a geotextile. The test results with the bottom of the geotextile gabion fixed showed that the deformation of the geotextile gabion was as small as 1.3 mm for a horizontal load equivalent to a Level 2 earthquake ( $k_h = 0.9$ ). The test results with the bottom of the geotextile gabion unfastened showed that the geotextile gabion slid on the pile head, but the displacement was 51.0 mm ( $\gamma=0.34$ ) at the horizontal equivalent of the L2 earthquake. This result was less than 100 mm of allowable horizontal displacement. No rupture of the geotextile or dislodging of crushed stone was observed after the test, confirming that the gabion deformation was retained. The geotextile gabions showed similar trends to the  $G/G_0$ - $\gamma$  results from a cyclic triaxial compression test with a confining pressure of  $\sigma_r = 50$  kPa on M30, a grain-size-adjusted crushed stone used in the crushed stone layer of railroad embankments and showed large historical damping at shear strains  $\gamma = 0.002$  to  $0.01$ .

Next, to confirm the dynamic characteristics of the geotextile gabion itself, shaking table tests were conducted on a model of a geotextile gabion with the bottom surface of the gabion fixed. The residual horizontal displacement and maximum residual vertical displacement of the geotextile gabion after 900-gal excitation were as small as 1.4 mm and 2.0 mm, respectively, confirming that the geotextile gabion retained its shape. The shear properties of the

geotextile gabion showed similar trends in the dynamic and static tests. Furthermore, the response acceleration of the concrete roadbed transmitted from the shaking table through the geotextile gabion was reduced to about 0.8 in the acceleration response ratio when the shear stiffness ratio was less than 0.1 after 600 gal of excitation, confirming the effectiveness of the geotextile gabion in damping effect.

The dynamic behavior of the full-scale pile slab embankment was analyzed by a two-dimensional dynamic FEM analysis using FLIP. First, the analytical model of the geotextile gabion, which reflects the test results, was validated. As a result, it was confirmed that the analytical model of the geotextile gabion could reproduce the same damping effect as that of the model shaking table test results. Next, a two-dimensional dynamic FEM analysis was performed on a full-scale pile slab embankment model. From the analysis results, the residual settlement and residual horizontal displacement of the concrete roadbed supporting the track as railroad embankment supporting the Shinkansen were confirmed. The results confirmed that the allowable residual settlement and allowable horizontal displacement were less than 100 mm in all cases of the 6-meter-high embankment model, the soft ground model where the surface layer 2 m is a soft clay soil bed, and the 9-meter-high high embankment model, and that the pile slab type embankment was applicable.

The behavior of pile slab embankments and issues in the design method obtained from the experimental results are summarized, and a design flow is proposed to satisfy the required performance as a railroad embankment.

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	藤井 公博
審査委員	主 査：鈴木 素之
	副 査：麻生 稔彦
	副 査：中田 幸男
	副 査：吉本 憲正
	副 査：森 啓年
論文題目	<p>パイルスラブ式盛土におけるジオテキスタイル土のうの水平抵抗特性と振動伝達抑制効果に関する研究</p> <p>(Property of shear and earthquake resistance of a geotextile gabion between the head part of improvement pile slab embankment)</p>
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>新幹線は省力化軌道というレールとコンクリート路盤が直結した軌道構造が適用されているが、この省力化軌道を支持する盛土には沈下等で高い性能が要求される。この高い要求性能を満足するために、新幹線盛土の盛土材は良質なものであることが求められている。一方で、環境面、経済面を鑑みると建設発生土を盛土材として用いることが望ましいが、建設発生土が高規格盛土に適用できる盛土材料ばかりとは限らない。そこで、本来は高規格盛土に適用できない、良質でない盛土材を用いた補強盛土内に地盤改良杭を打設し、杭頭部に設置したジオテキスタイル土のうと併せてコンクリート路盤を支持する盛土構造が提案されている。本研究は、このパイルスラブ式盛土に用いられるジオテキスタイル土のうに着目し、その水平抵抗特性と振動伝達抑制効果を明らかにするとともに、パイルスラブ式盛土の適用範囲を明確にすることを目的としたものである。本学位論文では、研究の成果を全 6 章にまとめている。</p> <p>第 1 章では、研究の背景と目的について述べ、本論文の構成を示した。</p> <p>第 2 章では、パイルスラブ式盛土の構造概要及び既往の研究、またパイルスラブ式盛土以外での土のうの活用方法及び土のうに関する既往の研究について調査し、パイルスラブ式盛土に用いるジオテキスタイル土のうを活用するに際し、L2 地震動相当の大きな水平力が作用した際におけるジオテキスタイル土のうの水平抵抗特性について明らかにすることが課題であることを示した。</p> <p>第 3 章では、実物大のジオテキスタイル土のう模型に対して L2 地震動相当の水平力を作用させる正負交番水平載荷試験を行い、ジオテキスタイル土のうは盛土天端に用いられる粒度調整砕石 M30 相当のせん断特性を示すこと、また大きなひずみレベルにおいてはジオテ</p>	

(様式 9 号)

キスタイル土のうの方が高い減衰性能を示すことを明らかにした。

第 4 章では、実応力状態を再現したジオテキスタイル土のう模型に対して模型振動台実験を行い、L2 地震動相当の加振を受けたジオテキスタイル土のうの動的せん断特性に対する検討を行い、強振時においてジオテキスタイル土のうが振動伝達抑制効果を有していることを明らかにした。また、加振後のテキスタイル土のう変位量は、鉛直・水平ともにパイルスラブ式盛土の復旧性を考慮した許容変位量を満足する微小な変位量に留まることを示した。

第 5 章では、実物大のパイルスラブ式盛土モデルに対し、試験結果を基にした解析モデルを構築し、実物大パイルスラブ式盛土の動的挙動について検討を行うことでパイルスラブ式盛土の適用範囲を明らかにした。

第 6 章では、各章の結論を要約し、論文全体を統括した。さらに、これまでの実験結果から得られたパイルスラブ式盛土の挙動と設計手法における課題を整理し、鉄道盛土としての要求性能を満足するための設計フローを提案した。

公聴会は対面及びハイブリッドの併用開催とし、学内外から計 60 名の参加があった。公聴会における主な質問は 1) パイルスラブ式盛土の施工予定に関する事、2) 盛土内に敷設するジオテキスタイルの耐久性に関するもの、3) パイルスラブ式盛土の支持地盤適用範囲に関する事、4) FEM 解析モデルの設定に関する事等であった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 3 編、参考論文 計 0 編）。

- 1) 藤井公博，小島謙一，高野裕輔，陶山雄介，青木一二二，野中隆博：コンクリート路盤を改良杭で支持する補強盛土工法における設計手法，ジオシンセティックス論文集，Vol.29，pp.49-56，2014.
- 2) 藤井公博，鈴木素之，近藤政弘，小島謙一：パイルスラブ式盛土におけるジオテキスタイル土のう模型に対する振動台実験，地盤と建設，Vol.40，No.1，pp.35-42，2023.
- 3) 藤井公博，小島謙一，野中隆博，高野裕輔，青木一二三：地盤改良杭でコンクリート路盤を支持する補強盛土の設計手法に関する研究—パイルスラブ式盛土の適用範囲に関する検討—，地盤工学ジャーナル，Vol.18，No.4，pp.349-363，2023.