

地盤改良杭でコンクリート路盤を支持する盛土構造の耐震性

藤井 公博* 小島 謙一** 高野 裕輔***
陶山 雄介*** 野中 隆博#

Seismic Performance of A Reinforced Soil Embankment Which Supports The Roadbed by Chemical Piles

Kimihiro FUJII Kenichi KOJIMA Yusuke TAKANO
Yusuke SUYAMA Takahiro NONAKA

The material which is of not good quality cannot be used in the embankment for the slab track of Shinkansen. We have developed the pile slab track embankment using the material of not good quality which supported the concrete roadbed by soil improvement piles. We confirmed the effect of this method by shaking table tests. Moreover, we confirmed, based on its test result, the properties of the gabion using a geotextile on the head part of the improvement pile which was devised so as to prevent the macadam from slipping out. This paper describes the seismic performance of the embankment realized by this method, which has been confirmed by the results of these tests.

キーワード：盛土，地盤改良杭，ジオテキスタイル土のう，コンクリート路盤

1. はじめに

建設発生土を盛土材として有効利用することは、環境面・経済面において非常に有効である。しかしながら、新幹線盛土のような高性能盛土の盛土材には、土質区分において土質1に分類されるような良質な材料を用いることが必要である。一方で、トンネル掘削時等に発生する土は、土質1に分類されるような良質な材料ばかりとは限らない。したがって現時点では、建設発生土の利用には限りがある。そこで、筆者らは、ジオテキスタイルを用いた補強盛土に地盤改良杭を施工し、この杭によりコンクリート路盤を支持することで、多様な材料を盛土材として利用可能となる盛土構造（パイルスラブ式盛土）の開発を行った（図1）。

本論文では、パイルスラブ式盛土の模型振動実験、実物大載荷試験を実施し、本盛土構造の耐震性について評価した結果を述べる。

2. パイルスラブ式盛土の概要と地震時挙動

2.1 概要

盛土材の性質が十分でない材料を用いた盛土では、大規模地震時に円弧すべりや揺すり込み沈下により盛土が沈下し、コンクリート路盤にも大きな変状が生じる可能性がある。そのため構造物の再構築等の大掛かりな補修が必要となる。

パイルスラブ式盛土は、盛土内に施工した地盤改良杭によりコンクリート路盤を支持している。これにより、地震時において路盤下の盛土が沈下した場合でもコンクリート路盤自体は沈下せず、軌道の変形を抑える構造である。

2.2 地震時挙動

筆者らは、これまでパイルスラブ式盛土の1/10スケールの模型振動実験により耐震性能の検討を行い、その有効性を確認している。

以下に実験結果の概要を示す。なお、実験の詳細は参考文献^{1) 2) 3)}を参照されたい。

実験では、不規則波（土構造物用暫定波（G2地盤）⁴⁾）を入力波として、ピーク加速度を100Gal毎に上昇させる段階加振を行った。図2は各加振終了時のパイルス

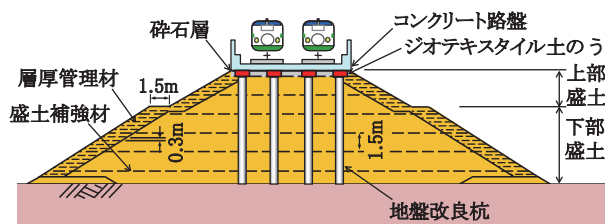


図1 パイルスラブ式盛土の概要

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
** 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
*** 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構
東急建設株式会社

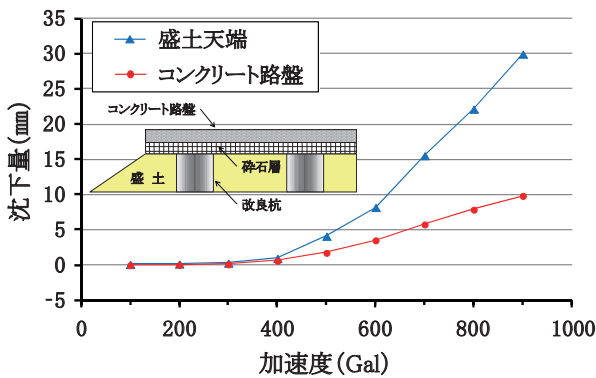


図2 各加振終了時における沈下量

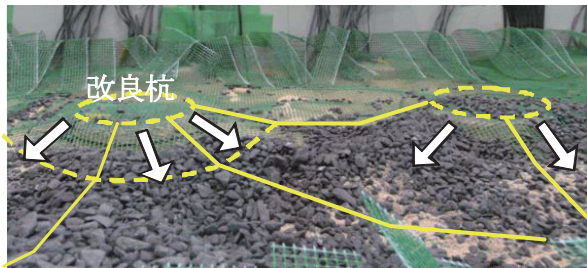


図3 コンクリート路盤撤去後の杭頭部上部周辺

ラブ式盛土のコンクリート路盤と盛土天端の沈下量である。杭頭天端とコンクリート路盤は、通常の盛土と同様に、盛土および杭頭天端に砕石を敷設し、砕石上にコンクリート路盤を施工した状態となっている。

900Galでの実験終了後、コンクリート路盤では10mm、盛土天端では30mmの沈下が認められた。コンクリート路盤の沈下は盛土と比較し1/3程度であり、パイルスラブ式盛土の有効性は確認されたが、コンクリート路盤の沈下量は想定よりもやや大きな値であった。実験後に杭頭部を確認したところ、コンクリート路盤と杭体間にあった砕石が盛土の沈下に伴い杭頭部から抜け出し、これによりコンクリート路盤が沈下していることが確認された^{5) 6)} (図3)。

また、上記接合方法の他に杭頭部とコンクリート路盤を剛結する工法も検討しており、この工法では沈下は生じないことが確認された。しかし、コンクリート路盤の加速度は入力波に対し高い値を示した。そのため、剛結した場合には杭頭部に大きな応力が発生することや地震時列車走行安定性が課題となった。

これらの知見から、本構造における杭頭部とコンクリート路盤の接合構造として、杭頭部砕石層が抜け出さず、コンクリート路盤の応答が増幅しない、地盤改良杭の応力発生を抑える方法の開発が必要である。

3. ジオテキスタイル土のうによる杭頭部構造

3.1 概要

本盛土構造における杭頭部の対策として、ジオテキス

スタイルを用いた大型土のうによる構造を考案した。

ジオテキスタイル土のうによる杭頭部構造は、杭の断面積と同等の大きさのジオテキスタイルの土のうをコンクリート路盤と杭頭部に設置した構造である。本構造では、杭頭部からの砕石の抜け出しを防止することに加え、砕石を拘束することによる支持性能の向上が期待できる。また、路盤と杭頭部を剛結していないため、応答を直接伝えず杭への負担や路盤への応答を減らすことができる。ジオテキスタイル土のうは砕石層と同じ材料のため、強度・変形特性も砕石と同じであり、特殊な工法や材料を用いる必要がなく施工性・経済性に優れている。図4にジオテキスタイル土のうを用いた杭頭部の概要図を示す。

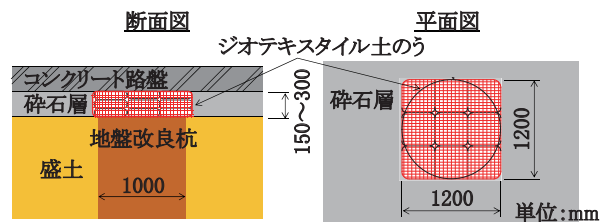


図4 杭頭部概要図

3.2 ジオテキスタイル土のうの载荷試験

3.2.1 試験概要

杭頭部の構造にジオテキスタイル土のうを適用するにあたり、新幹線盛土という高性能盛土への適用や、コンクリート路盤直下に配置されることから、地震時荷重や列車による繰返し荷重に対するジオテキスタイル土のう自体の抵抗特性、およびその挙動を把握することが重要である。そこで、杭頭部に設置したジオテキスタイル土のうのL2地震動相当の水平荷重に対する抵抗特性、挙動を確認するために水平载荷試験と列車による繰返し荷重に対するジオテキスタイル土のうの抵抗特性、挙動を確認するための動的鉛直载荷試験⁷⁾を実施した。ここでは水平载荷試験について詳細を示す。なお、繰返し動的鉛直载荷による路盤沈下は小さいことを確認している。詳細は、参考文献⁷⁾を参照されたい。

3.2.2 供試体の作製

試験には実施工を想定し、ジオテキスタイル土のう下面と杭頭部の接合条件を非固定状態とした実物大供試体を用いた。

本供試体は、基礎コンクリート上に改良杭頭部を模擬したφ1.0mの円径の突起(擬似杭頭)を2本設け、その上部にあらかじめ所定の大きさ(1.0m×1.9m)に裁断したジオテキスタイル(製品保証値81kN/m)を2枚直交方向に敷設後、小型の中詰め土のう(0.33m×0.33m程度)を2段設置し、粒度調整砕石(M40)を締固め度95%程度で締固めたものである。ジオテキスタイルを折り返すことで杭頭部の粒度調整砕石を包み、ジオテキスタイル土のう(1.0m×1.0m×0.15m)を作製した。

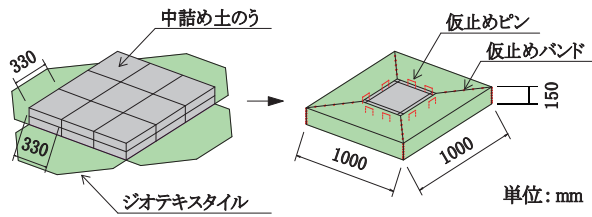


図5 ジオテキスタイル土のう製作イメージ

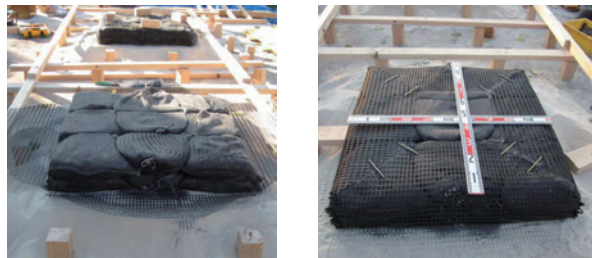


図6 ジオテキスタイル土のう製作状況

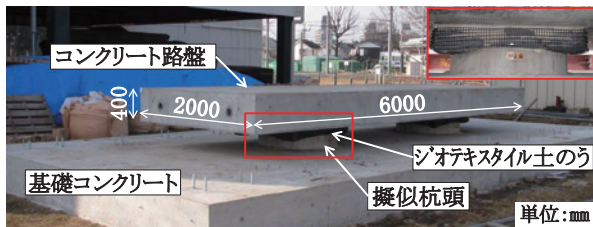


図7 供試体全景

図5にジオテキスタイル土のうの製作イメージ、図6に製作状況を示す。

コンクリート路盤は、ジオテキスタイル土のう上面にコンクリートを直接打設することにより、土のうとコンクリート路盤の一体化を図っている。図7に供試体の写真を示す。

3.2.3 試験条件

本試験は、地震により杭周辺の盛土が沈下し、杭体のみで上載荷重を支持する場合を想定している。載荷試験は、杭1本に作用する上載荷重120kN/本(=死荷重15kN/m²×杭1本当たり面積7.8m²)の2本分である240kNを死荷重として与えている。水平荷重は死荷重の1.0G相当を最大荷重とし、荷重制御で80kN、160kN、240kNの80kN間隔の段階載荷とし、各荷重3回の繰返し載荷とした。また、最大変位は、模型振動試験結果を基に水平変位量160mm(900Gal載荷後)を最大変位に設定した。この際、載荷制御はコンクリート路盤の水平変位量3mmまでを荷重制御とし、その後は変位制御とした。実験における載荷サイクルを図8に示す。

計測は、コンクリート路盤の沈下量、水平変位量について実施した。計測点位置を図9に示す。沈下は、杭の前後2箇所計4測点(沈下①～④)で、水平変位はコンクリート路盤の端部2箇所ずつ計4測点(水平①～④)で計測した。

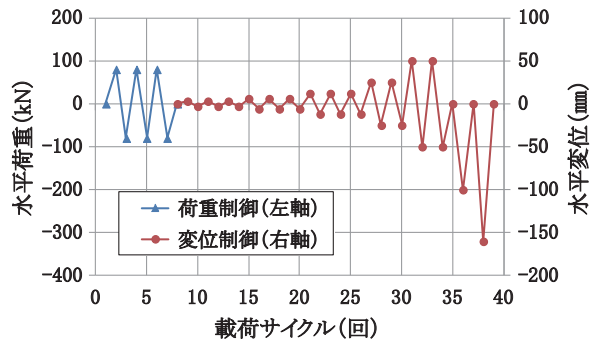


図8 載荷サイクル図

(-) 載荷方向 (+)

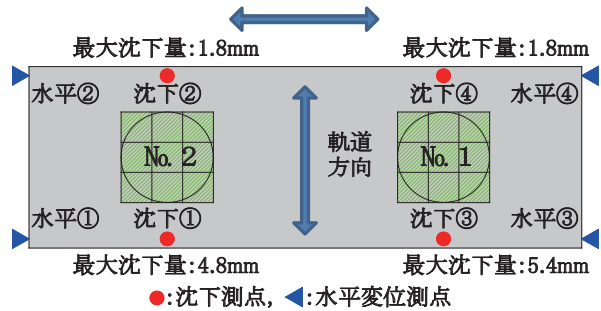


図9 計測点位置図

3.2.4 試験結果

載荷重と水平変位量(平均値)の関係を図10、11に示す。水平変位は±15mm程度までは接触式変位計で、接触式変位計の計測範囲を超える変位については巻取り式変位計で計測を行った。

±80kNを3回繰返した後、100kN付近で水平変位量が大きく増加する傾向を示したため変位制御に切替えた。水平変位量±50mm(±190kN)までは変位に伴う荷重増加が確認されたが、それ以降は、変位は増加するが荷重は増加せず一定値となった。また、ジオテキスタイル土のうは減衰の大きい履歴ループを示すことが確認された。

図12に試験前後のジオテキスタイル土のうの状況を示す。試験前後で杭頭部と土のうのずれは確認されるが、土のうの形状は保持されており、ジオテキスタイルの損傷による碎石の抜け出しは確認されなかった。

最大水平変位16cm(載荷重200kN)時の最大沈下量を図9に示す。4測点中の最大沈下量は沈下③で5.4mmであり、また載荷方向の2測点の相対変位は最大でも0.6mmであった。軌道方向(沈下①-②間、沈下③-④間)の鉛直方向相対変位量は、それぞれ3.0mm、3.6mmとなっている。これは、今回の試験では2つの杭頭部による2点支持としたため、軌道方向のコンクリート路盤の支持構造が載荷方向と比較し不安定な支持構造となっており、載荷過程で変形が一方向に偏って表れたものと考えられる。実際は、軌道方向に多点支持となるためこのような現象は生じない。

図13にせん断ひずみ 1×10^{-6} 時のせん断剛性を G_0

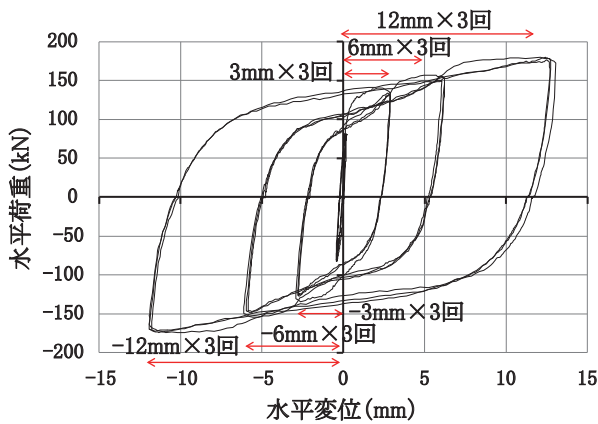


図10 荷重-水平変位グラフ（接触式変位計）

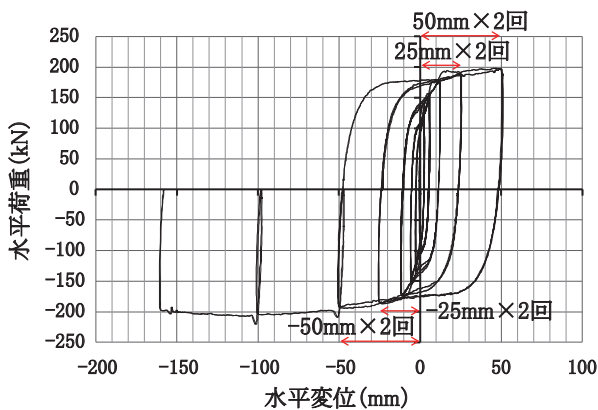


図11 荷重-水平変位グラフ（巻取り式変位計）

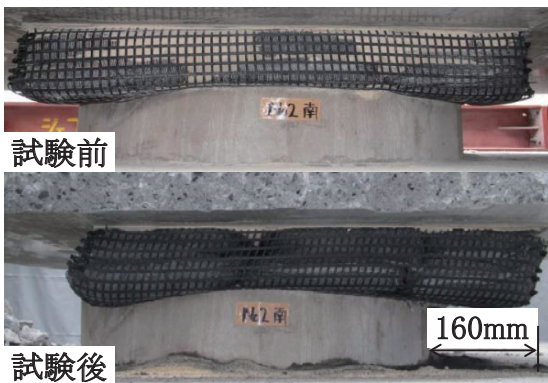


図12 試験前後のジオテキスタイル土のう

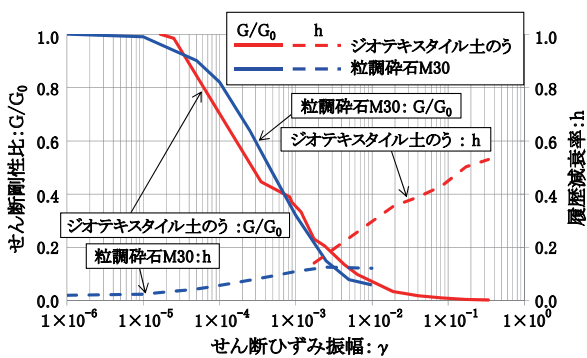


図13 ジオテキスタイル土のうの G/G_0 - γ , h - γ

とするジオテキスタイル土のうのせん断剛性比 G/G_0 および履歴減衰率 h とせん断ひずみ振幅 γ の関係である G/G_0 - γ , h - γ を赤線で示す。また、参考としてジオテキスタイル土のうの中詰め材に用いた粒度調整砕石 (M40) とほぼ同等の粒度調整砕石 (M30) における G/G_0 - γ , h - γ ⁸⁾ を青線で示す。

図13より、ジオテキスタイル土のうは、粒度調整砕石で支持する従来の支持構造とほぼ同等のせん断剛性比を示すことが確認された。

4. 地盤改良杭頭部にジオテキスタイル土のうを用いたパイルスラブ式盛土の模型振動実験

2章に示したように、パイルスラブ式盛土構造については、振動実験を通して盛土・コンクリート路盤・地盤改良杭の応答・変位、地盤改良杭の損傷等を観測し、地震時における性能を確認し、その有効性について確認した。また、3章では、杭頭部に設置するジオテキスタイル土のうの効果・特性について確認を行い、本杭頭部構造が高性能盛土と同等の十分な性能を有していることを示した。

これらにより個別要素の性能を確認したことから、ここでは、杭頭部にジオテキスタイル土のうを用いたパイルスラブ式盛土の全体挙動を1/10スケール模型振動実験により評価することとした。

4.1 模型概要

実験に用いた振動台、パイルスラブ式盛土模型の基本構造（盛土寸法、盛土材料、地盤改良杭強度・配置等）、計測機器、計測機器配置は2章に示すこれまでの振動実験^{1) 2) 3)}と同様である。実験における入力波は、正弦波20波、5Hzとし、入力加速度は100～800Galまで100Galピッチで段階加振を行った。

図14に、模型盛土の断面図、平面図を示す。今回の実験では、ジオテキスタイル土のうの模型を地盤改良杭天端に設置した模型となっている。ジオテキスタイル土のうの模型は、コンクリート路盤下の砕石層と同様の10mm未満に粒度調整した砕石および建築資材の養生用のメッシュシートを用いて作製した（図15）。模型に用いたメッシュシートの引張強度は、実物大模型の水平載荷試験に用いたジオテキスタイル（製品保証引張強度 $T_a=81\text{kN/m}$ ）の1/5程度である。本メッシュシートの引張強度は、相似則では実物大模型の2倍程度の強度となっているが、ジオテキスタイル土のうのせん断特性は拘束された砕石層としての特性が主体であると考えられるため、盛土全体の定性的な挙動を把握する上では問題ないと考え本材料を使用した。

ジオテキスタイル土のうとコンクリート路盤は、ジオテキスタイル土のう上面に直接コンクリートを打設する

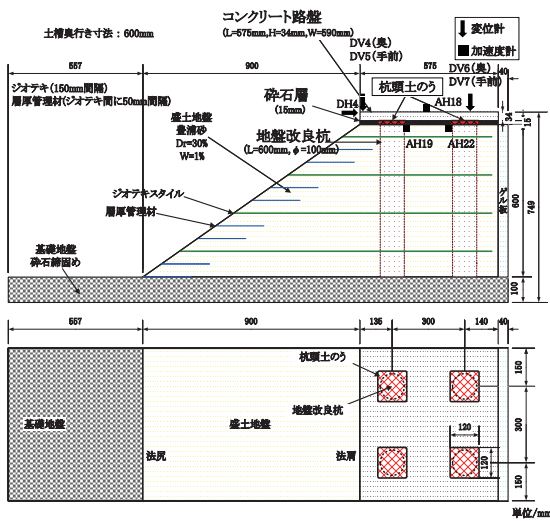


図 14 模型振動実験の概要図

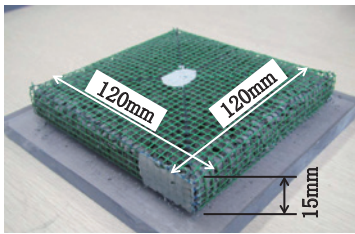


図 15 ジオテキスタイル土のう模型

ことから、模型においてもコンクリート路盤を模擬したスラブ板とジオテキスタイル土のう上面を接着剤により結合している。

4.2 実験結果

4.2.1 コンクリート路盤の鉛直変位

図 16 にコンクリート路盤の加振後の累積した残留鉛直変位 (DV4, DV5 の平均値) を示す。参考のため、無対策 (地盤改良杭の無い通常のジオテキスタイル補強盛土) と杭頭部にジオテキスタイル土のうを設置していないパイルスラブ式盛土の結果も示す。また、図 17 は、各振動実験時のコンクリート路盤の変位状況である。

無対策 (地盤改良杭なし) の場合、500Gal 付近から盛土の沈下に追従しコンクリート路盤が沈下し、700Gal 加振後では 35mm の沈下、800Gal 加振後は図 17 (c) からも明らかなように、計測範囲 ± 60mm の変位計で計測不能になるほどの沈下が発生している。杭頭部にジオテキスタイル土のうを設置していないパイルスラブ式盛土構造の場合、無対策同様 500Gal 付近から杭頭部の碎石層の抜け出しによるものと考えられる沈下が発生するが、コンクリート路盤が改良杭により支持されており盛土の変状に追従しないことから、800Gal 加振後で 22mm 程度の小さな沈下量となっている。これより、パイルスラブ式盛土構造の沈下抑制効果が確認される。

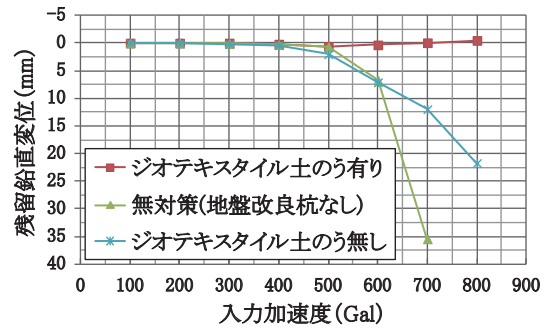
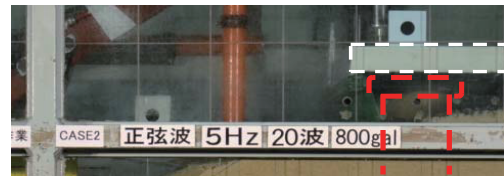
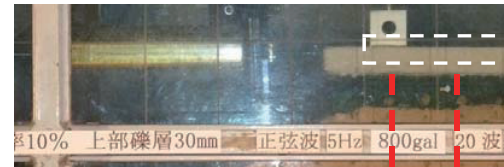


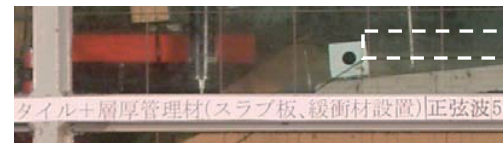
図 16 コンクリート路盤の残留鉛直変位



(a) ジオテキスタイル土のう有り



(b) ジオテキスタイル土のう無し



(c) 無対策 (地盤改良杭無し)

図 17 コンクリート路盤の変位状況 (800Gal 加振後)

ジオテキスタイル土のうを設置した場合、コンクリート路盤の沈下がほとんど発生しないことが確認され、杭頭部碎石層の抜け出し防止によるコンクリート路盤の沈下に対する効果が確認された。

4.2.2 コンクリート路盤の水平変位

図 18 に残留水平変位 (DH4 の計測値) を示す。なお、図 18 についても図 16 と同様、無対策と杭頭部にジオテキスタイル土のうを設置していないパイルスラブ式盛土の結果を併せて示す。

無対策では、700Gal 加振後に 16mm 程度の水平変位が発生し、800Gal 以降については、コンクリート路盤が盛土の変状に追従して大きく沈下したため水平変位計で計測不能な状態となった。ジオテキスタイル土のうがないパイルスラブ式盛土構造については 700Gal までは無対策と同等の水平変位であり、800Gal では 56mm の水平変位であった。

ジオテキスタイル土のうを設置した盛土構造では、杭頭部とジオテキスタイル土のうを非固定としていることから、杭頭部ではジオテキスタイル土のうが滑動していると考えられる。なお、+側の変位も生じていることが

特集：地震防災・耐震技術

ら、杭の変形に伴う挙動と杭頭部での土のうの滑動変位が複合した挙動となっているものと考えられる。最終的な残留水平変位量は2mm程度であり、無対策、土のうがない場合のパイルスラブ式盛土と比較し抑制された。

これらの結果から、水平変位についてもジオテキスタイル土のうを用いた構造形式が、無対策盛土やジオテキスタイル土のうがない場合のパイルスラブ式盛土構造と比較して変位量が小さいことが確認された。

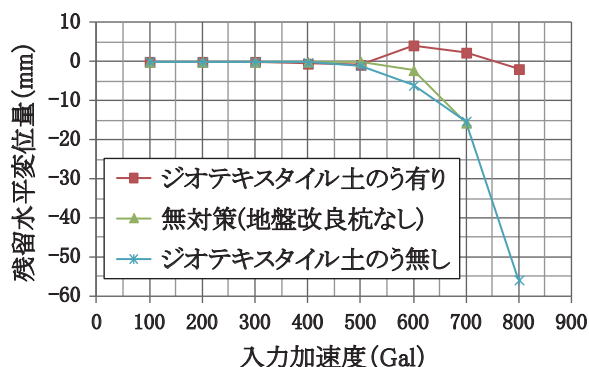


図 18 コンクリート路盤の残留水平変位

4.2.3 杭体とコンクリート路盤の応答加速度

ジオテキスタイル土のうを設置したパイルスラブ式盛土のコンクリート路盤と改良杭天端の加速度応答値を図 19 に示す。図 19 より、400Gal 加振後までコンクリート路盤と杭頭部の加速度応答値は、ほぼ同じ値を示していることから一体となって挙動しているものと考えられる。

その後、コンクリート路盤の応答値は改良杭の応答値の約半分程度となっている。これは、ジオテキスタイル土のうのせん断変形により、改良杭からコンクリート路盤への振動がより減衰されたものと考えられる。なお、加振実験終了後に確認したジオテキスタイル土のうにおいては、大きなせん断変形は確認されなかった。

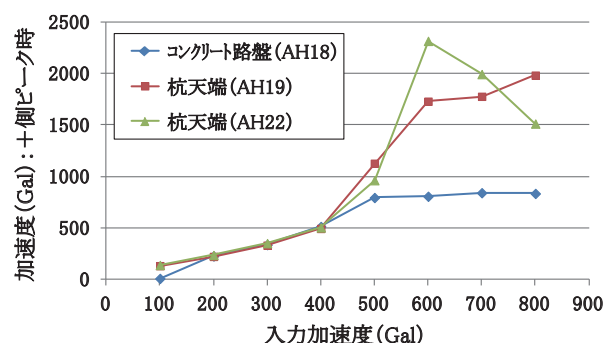


図 19 コンクリート路盤、杭天端の加速度応答値 (ジオテキスタイル土のう有り)

5. まとめ

良質でない建設発生土の有効利用を目的としたパイル

スラブ式盛土に対し、杭頭部にジオテキスタイル土のうを用いた構造を提案し、ジオテキスタイル土のうの特性を把握するために実物大模型を用いた載荷試験を実施した。さらに、ジオテキスタイル土のうを含むパイルスラブ式盛土の 1/10 スケール模型振動実験を実施し、本盛土構造の地震時挙動や構造特性について評価を行った。

以下に、実験により得られた知見について述べる。

(1) ジオテキスタイル土のうを杭頭部に設置することにより、無対策盛土、ジオテキスタイル土のうを用いていないパイルスラブ式盛土と比較し、地震時の振動等による杭頭上部砕石層の抜け出しを防止することで、コンクリート路盤の沈下が抑制されることが確認された。また、水平変位についても抑制効果があることが確認された。

(2) ジオテキスタイル土のうによる改良杭からコンクリート路盤へ伝達する振動の減衰効果が確認された。

これらの結果から、パイルスラブ式盛土は、L2 地震動相当の水平力に対してコンクリート路盤の性能を保持できる支持構造形式であると考えられる。

文献

- 1) 米澤豊司, 丸山修, 森野達也, 武田栄広, 小島謙一, 坂本寛章: パイルスラブ式盛土の模型振動台実験-地盤改良杭の効果-, 第 65 回年次学術講演会, 土木学会, 2010
- 2) 森野達也, 丸山修, 米澤豊司, 武田栄広, 青木一二三, 小島謙一, 坂本寛章: パイルスラブ式盛土の模型振動台実験-粘性土盛土-, 第 46 回地盤工学会研究発表会, 地盤工学会, 2011
- 3) 坂本寛章, 渡辺健治, 丸山修, 米澤豊司, 森野達也, 清田三四郎, 青木一二三: パイルスラブ式盛土の模型振動台実験-杭頭部の構造比較-, 第 46 回地盤工学会研究発表会, 地盤工学会, 2011
- 4) 鉄道総合技術研究所編 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 2007
- 5) 坂本寛章, 小島謙一, 森野達也, 米澤豊司, 丸山修, 青木一二三: 地盤改良杭で軌道面を支持する補強盛土構造の地震時挙動, 第 26 回ジオシンセティックスシンポジウム, 国際ジオシンセティックス学会日本支部, 2011
- 6) 小島謙一, 野中隆博, 米澤豊司, 森野達也, 丸山修, 鈴木喜弥, 青木一二三, 太田剛弘: 路盤を杭で支持する補強盛土における頭部構造の評価, 第 47 回地盤工学会研究発表会, 地盤工学会, 2012
- 7) 森野達也, 丸山修, 米澤豊司, 佐藤貴史, 青木一二三, 小島謙一, 野中隆博: 路盤を杭で支持する補強盛土における土のうを用いた杭頭部の動的鉛直載荷試験, 第 47 回地盤工学会研究発表会, 地盤工学会, 2012
- 8) 鉄道総合技術研究所編 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012