

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

粘り強い鉄道盛土構造で大地震と長時間の津波越流に耐える

2011年の東北地方太平洋沖地震では、鉄道盛土が津波により大きな被害を受け、長期に渡る運休を余儀なくされました。1995年の兵庫県南部地震以降、鉄道盛土の「耐震性」に関しては多くの検討がなされてきましたが、「耐津波性」については十分な検討がなされてきませんでした。そこで、大規模地震および津波による長時間の越流現象を同時に再現可能な実験装置を開発し、模型実験を実施しました。この実験結果を踏まえ、地震および津波に対して粘り強いジオテキスタイル補強土構造を開発しましたので紹介します。



渡辺 健治
Kenji Watanabe
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
主任研究員
[専門分野] 地盤工学



中島 進
Susumu Nakajima
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
副主任研究員
[専門分野] 地盤工学



藤井 公博
Kimihiro Fujii
元 構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
(現 ジェイアール西日本
コンサルタンツ(株) 主任)
[専門分野] 地盤工学



工藤 敦弘
Atsuhiko Kudo
元 構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
(現 ジェイアール東日本
コンサルタンツ(株) 主任)
[専門分野] 地盤工学



松浦 光佑
Kosuke Matsuura
元 構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
(現 (株)大林組)
[専門分野] 地盤工学

鉄道盛土の耐震性とジオテキスタイル補強土工法

鉄道盛土の「耐震性」に関しては、兵庫県南部地震（1995年）での被害を教訓に多くの検討がなされました。その結果、高い耐震性を有する盛土として、鉄道総研が開発した「RRR工法」を始めとするジオテキスタイル補強土工法（以下、補強土工法）が広く適用されています（☞参照）。

しかしながら、これまで鉄道盛土の「耐津波性」については十分な検討がなされておらず、津波により被災した鉄道盛土の最適な復旧方法を提案する必要がありました。

また、一般的に海岸沿岸地域に鉄道盛土を構築する場合、防潮堤の内側において構築される場合が多くなります。そのため、巨大な津波が防潮堤を超えて襲来した場合、鉄道や道路などの盛土構造が2番目の堤防（2線堤）として

沿岸地域の被害を軽減する役割が期待される場合もあります。これを「多重防護」といいます。

津波による鉄道盛土の被災要因

現地調査や波浪模型実験により、鉄道盛土は津波により主として以下のメカニズムで破壊に至ったと分析しました（図2）。

被災要因①

津波が襲来する前に生じる大地震により、鉄道盛土の本体（堤体）やのり面工に損傷が生じる。支持地盤が液状化する場合には、それにより盛土に変形・損傷が生じる。

被災要因②

この状態で津波が襲来し、津波が鉄道盛土を越えて長時間流れること（越流）により、盛土堤体が侵食される。さらに、盛土を越えた水（越流水）が山側（内陸側）の盛土のり面下部（のり尻）付近の支持地盤を侵食（局所洗掘）し、それによって盛土がさらに不安定化する。

これらを踏まえ、津波に対して粘り強い鉄道盛土構造について詳細な検討を行いました。

☞ ジオテキスタイル補強土工法

ジオテキスタイルと呼ばれる格子状の高分子材料（図1）を盛土内に水平方向に配置することにより安定性を増加させる工法

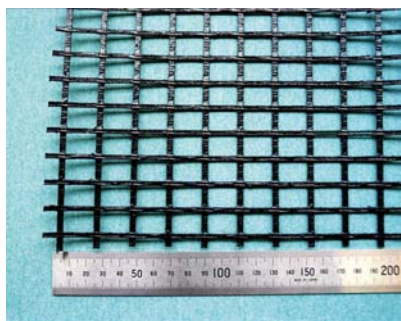


図1 ジオテキスタイルの概観

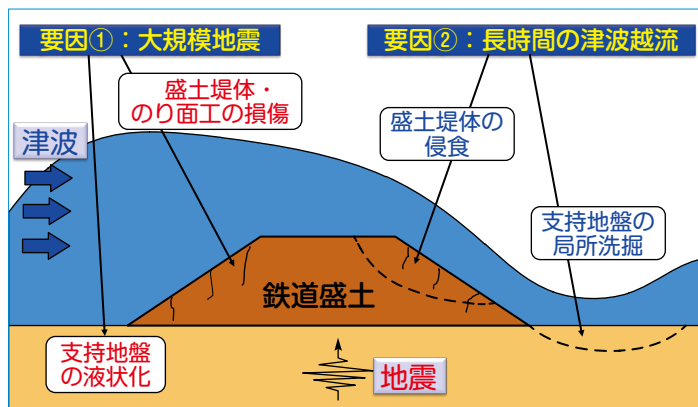


図2 津波による鉄道盛土の被災要因

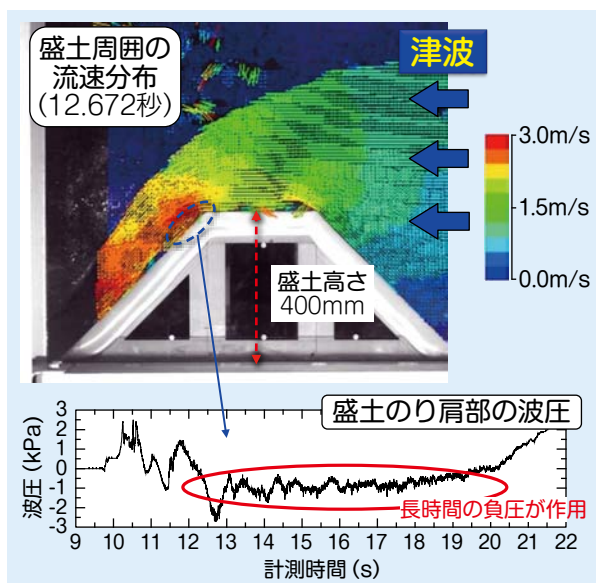


図3 津波越流時の盛土周囲の流速分布および山側のり肩部における負圧の測定事例¹⁾

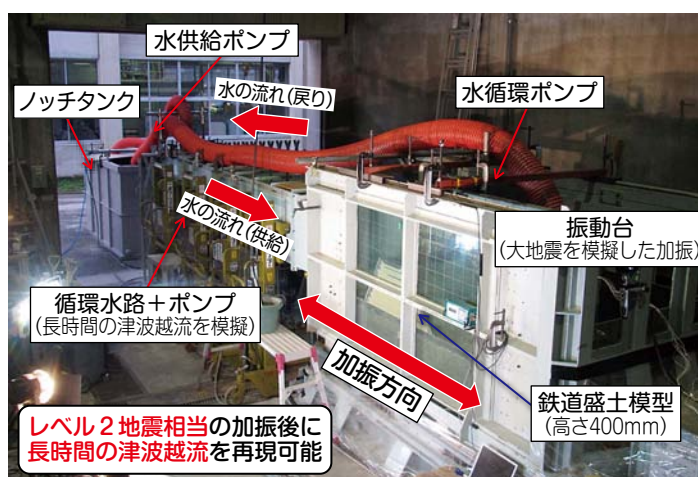


図4 大地震・長時間の津波越流の再現装置

過去の研究事例

過去の研究では、大型造波装置によって津波が防潮堤などに衝突することによって生じる圧力（以下、衝撃波圧）に着目した研究事例は多いのですが、津波による長時間の越流によって生じる現象、さらには津波が来る前の大地震の影響に着目した事例はほとんどありませんでした。

別途行った大型造波水路装置における津波実験¹⁾では、防潮堤よりも内側に構築される鉄道盛土の場合、衝撃波圧の影響は小さいことが分かりました。むしろ、その後の長時間の越流によって盛土堤体が侵食されることや、のり面工を持ち上げようとする力（負圧）

が作用することの影響が大きいことが分かりました（図3）。そのため、本研究では大地震および津波による長時間の越流現象に着目し、これらを連続して再現可能な新しい実験装置を開発しました（図4）。

新しい津波実験装置の開発

実験装置は、鉄道総研が所有する中型振動台の土槽（長さ2.06m、高さ1.30m、奥行0.60m）に長さ5mの水路を取り付け、ノッチタンクを経由して水を毎分2m³程度で半永久的に循環する構造になっています。また、土槽内には厚さ400mmの支持地盤模型を構築できる構造となっているため、

盛土堤体だけでなく支持地盤の侵食の影響を検証することができます。

本装置では、津波による動的な波（衝撃波）は再現できませんが、海側の水位を静的に増加させ、その後、定常的な越流状態を長時間継続することができます。土槽内に高さ400mmの盛土模型を設置した場合、越流水深は最大で約130mm、流速は最大で毎秒1.0m程度になります。

これにより、津波襲来前の大地震およびその後の長時間の越流現象を連続して再現することが可能となりました。

従来形式の鉄道盛土

この実験装置を用い、従来型盛土模

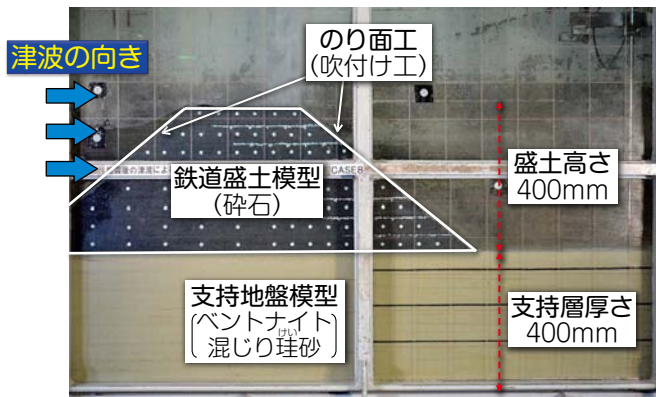


図5 構築直後の従来型の鉄道盛土模型

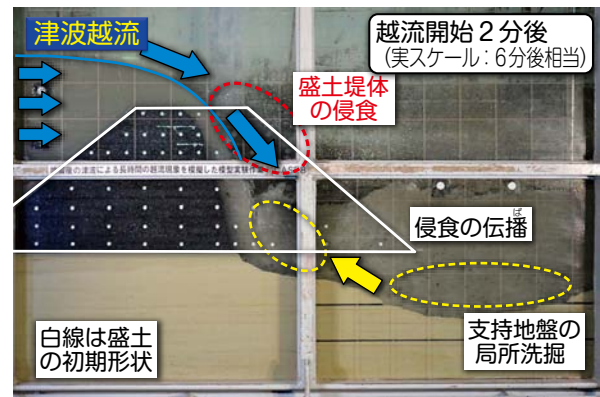


図6 越流に伴う盛土形状の変化

型(高さ400mm, 10分の1スケール)の津波越流実験を実施しました(図5)。ここで、従来型盛土とは、在来線において従来工法によって新しく建設する盛土を想定しており、L2地震動のような大地震に対する耐震設計がなされた鉄道盛土です。そのため、模型作成においても、鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾に準拠した盛土材料(碎石)、締固め管理、層厚管理材の敷設を行っています。実験では、厚さ400mmの支持地盤模型(ベントナイト混じり珪砂)の上に鉄道盛土模型を構築しました。

まず、大地震を再現した加振実験を実施しました。これによる残留変位は水平・鉛直ともに0.2~0.3mm程度であり、十分な耐震性を有していることが確認されました。

この模型に対して、引き続いて津波越流実験を行ったところ、図6に示すように盛土堤体が山側(内陸側)から侵食され、さらに支持地盤の侵食(局所洗掘)が盛土堤体に伝播し、越流開始2分後には盛土堤体の半分程度が侵食されました。

ここで、この模型スケールにおける2分間は、実スケールにおいて6分程度の越流に相当します。この結果から、従来型の鉄道盛土で、大地震に対して十分な「耐震性」を有する盛土であっても、「耐津波性」が十分ではない場合があることが分かりました。

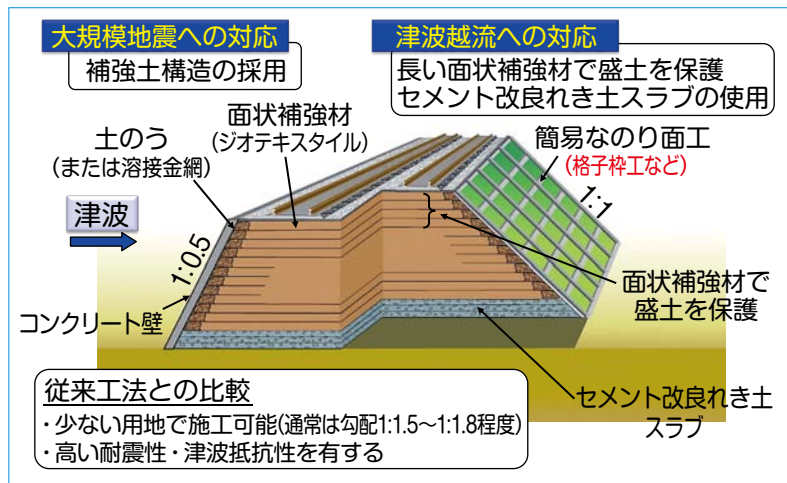


図7 開発した補強盛土構造

ジオテキスタイルの効果確認(予備試験)

この実験結果を踏まえ、小型の補強盛土模型(高さ100mm)を用いた予備実験を行い、耐津波性に関する基本特性を確認しました。この予備実験ではジオテキスタイルの設置位置・長さを変化させましたが、その結果、

- ①ジオテキスタイルを盛土内に配置することにより、盛土の侵食抵抗性が飛躍的に向上される
- ②ジオテキスタイルを全層敷きとし、盛土端部の土のうに折り返すことにより耐津波性能が飛躍的に高まる
- ③盛土堤体が安定していても、支持地盤が侵食されると堤体が不安定化する可能性があることが確認されました。

新しい補強土構造の提案

これらの実験結果を踏まえ、大規模地震に対する耐震性と、長時間の津波越流に対する耐津波性を有する補強盛土構造(図7)を提案しました。

本構造は、補強土工法の採用により大地震に対する高い耐震性を確保しています。さらに、津波によって盛土が侵食されにくくする対策として、のり面工と補強材を定着させ、盛土上層部の補強材を全層敷きとしています。また、支持地盤の侵食に伴う盛土の不安定化に対しては盛土最下層にセメント改良れき土スラブを構築することとしました。

ここでセメント改良れき土スラブとは、セメント改良れき土(参照)とジオテキスタイルを併用した曲げ剛性を有するスラブのことです。あくまで

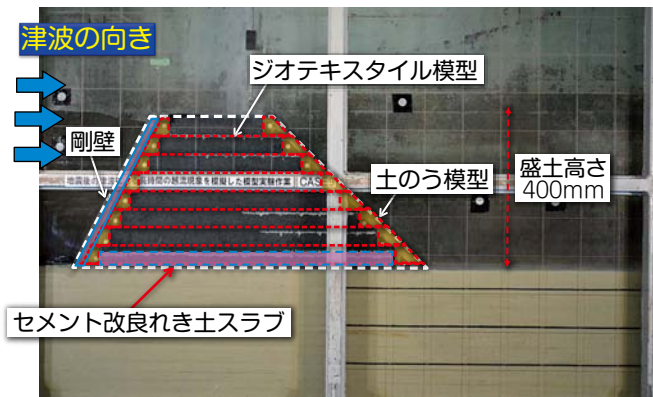


図8 構築直後の補強盛土模型

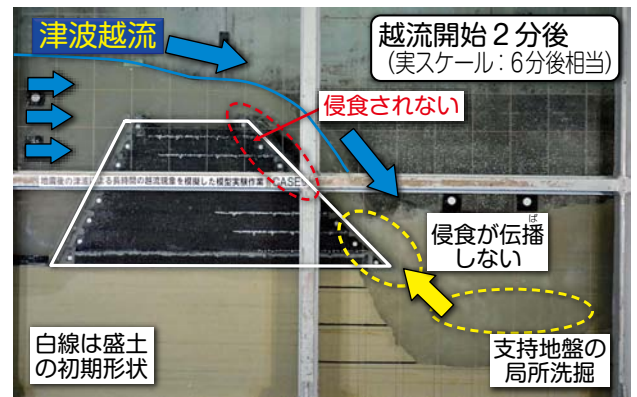


図9 提案構造の耐津波性能

土工事の範囲内でスラブの構築が可能なることから軟弱地盤や液状化地盤上での鉄道盛土構築に採用された実績のある対策工です³⁾。

通常、盛土のり尻部より外側は鉄道用地外であるため、この部分の対策をすることは難しいのが現状です。この結果を踏まえ、鉄道用地内(盛土直下の部分のみ)で実施可能な対策工として、このセメント改良れき土スラブを提案しました。

提案構造の耐震性・耐津波性

補強盛土模型にはジオテキスタイル模型を高さ方向に50mm間隔で計8段配置し、端部においては土のうに巻き込む形でジオテキスタイル模型を折り返しました(図8)。また、のり面勾配については、海側で5分勾配(鉛直:水平=1:0.5)、陸側で1割勾配(=1:1)とし、従来型盛土模型よりも急勾配にしました。

まず、従来型盛土と同じ振動実験を行ったところ、残留変位は微小でした。この結果は、補強土工法を適用した盛土はのり面が急勾配であっても従来型盛土と同程度以上の高い耐震性を有することを示しています。

次に、長時間の越流実験を行ったところ、従来型盛土と比較して長時間盛土形状を維持し、高い抵抗性が確認されました(図9)。これは、ジオテキタ

イルのような格子状(グリッド状)の面状補強材(図1)を盛土内に配置することで、高速で流れる水による掃流力(土を削り取る力)に対する土の抵抗性が高まったためだと考えられます。

当然ながら、盛土のり尻部の外側(鉄道用地外)の支持地盤は何も対策をしていないので侵食してしまいます。しかしながら、セメント改良れき土スラブの効果により、支持地盤の侵食が盛土の下面に及んだ越流開始2分後も、盛土材の流出や堤体の変形などの流出は見られません。これらの効果によって本提案構造は長時間の津波越流に対して粘り強い挙動を示しました。

まとめ

本研究では、津波に対し粘り強く抵抗する鉄道盛土の開発を目的として、新しい実験装置を開発し、模型実験を行いました。その結果、補強土構造の採用、盛土最下層へのセメント改良れき土スラブの適用により、大地震に対して十分な耐震性を有し、さらに長時間の津波越流に対する粘り強さを有する盛土構造を開発しました。

セメント改良れき土

粒度を調整した砕石に少量のセメント(一般に50~80kg/m³程度)を混ぜ、よく締め固めた材料。高い強度・剛性を有する盛土材料である。

本提案構造については設計手法を既に確立し、現在は設計計算例の発刊に向けて準備をしています。

なお、長時間の越流に対する土構造物の抵抗性能は、津波襲来時だけでなく近年増加している豪雨時にも求められます。本研究で示したように、ジオテキスタイル補強土工法は、豪雨に対する盛土の耐侵食性も向上できると考えられます。

本研究は、平成24年~25年度の共同研究「津波に対して壊れない粘り強い盛土構造物の構築技術の開発」を通じ、東京理科大学、農村工学研究所、(株)複合技術研究所から技術的な助言・指導を頂きました。ここに深謝の意を表します。RRR

文献

- 1) 渡辺健治, 藤井公博, 松浦光佑, 野中隆博, 工藤敦弘, 飯島正敏, 山口晋平, 青柳悠大, 古川大祐, 川邊翔平, 菊池喜昭: 長時間の津波越流に対する補強土構造物の抵抗性に関する実験的研究, 地盤工学会特別シンポジウム発表論文集, 2014
- 2) 国土交通省監修, 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, 丸善出版, 2013
- 3) 渡辺健治: セメント改良礫土を用いた軟弱地盤上への盛土構築方法, 土木施工, Vol.50, No.7, pp.17-21, 2009