

# 地震動および長時間の津波越流に強い盛土構造の開発

構造物技術研究部 基礎・土構造研究室  
 副主任研究員 中島 進

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震以降、津波に対して粘り強く抵抗する土構造物の構築が求められている。鉄道総研では、津波に対して粘り強く抵抗する土構造物の開発を目的として、盛土への津波作用力や、長時間の越流現象による盛土の抵抗特性の評価を行っている。本発表では、地震およびその後の津波による盛土の破壊メカニズムと、その結果を受けて開発した大地震および津波越流に粘り強く抵抗する盛土構造の概要および設計法について述べる。

## 2. 大地震後の津波に越流による盛土の被害メカニズム

### (1) 実験装置の概要

津波に対する土構造物の抵抗力を向上するためには、津波到達時の波力に対する抵抗性能だけでなく、津波襲来前の大地震に対する耐震性と津波の越流によって生じる堤体や支持地盤の侵食に対する抵抗性能を向上することが重要である。しかし、津波襲来前の大地震および長時間越流に対する土構造物の抵抗特性について、同時に着目した研究事例は少ない。

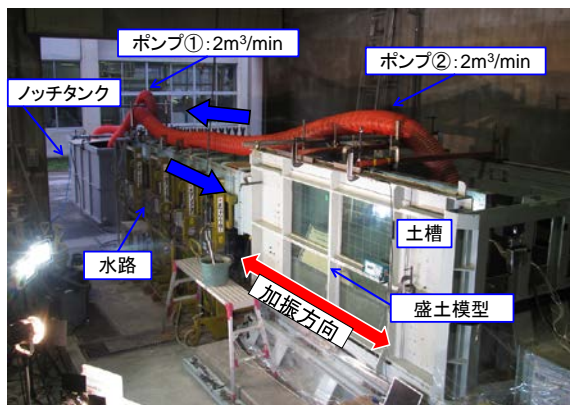


図1 越流実験に用いた中型振動台

表1 実験条件一覧（盛土材料：M10）

ケース	盛土構造	のり面勾配	支持地盤	対策工の有無
Case1	補強盛土	海側：5分 陸側：1割	ベントナイト	なし
Case2	従来型盛土	海側：1割2分 陸側：1割	混じり珪砂	
Case3	補強盛土	海側：5分 陸側：1割	珪砂	あり

そこで、鉄道総研所有の中型振動台を地震後の津波により生じる長時間の越流現象を模擬できる仕様に改造した。実験に用いた装置を図1に示す。本装置は、鉄道総研所有の中型振動台に水路(長さ5m, 高さ0.7m, 奥行0.6m)を取り付け、ノッチタンク(容量8m³)を経由して水を2m³程度で循環する構造である。

### (2) 実験結果

表1に本発表で対象とする実験ケースを、図2にCase1を例にした模型の断面図を示す。Case3はCase1, 2で盛土の破壊メカニズムを確認した上で提案した構造であり、その詳細は後述する。いずれのケースにおいても盛土模型は、ベントナイト混じり珪砂 ( $w_{opt}=15.8\%$ ,  $D_c=97\%$ 相当の  $\rho_d=1.537g/cm^3$ ) で構築した厚さ400mmの支持地盤上に構築した。Case1は補強盛土、Case2は従来型盛土である。模型構築後、まずL2地震動相当の加振実験を行った後に、津波

を模擬した長時間の越流実験を実施した。

振動実験の結果、900gal加振終了時の盛土天端における残留水平変位量は-0.1~0.3mm程度、残留沈下量は0.1mm程度であり、Case1, 2ともに地震による損傷は軽微であった。

図3に越流経過に伴う支持地盤を含めた盛土の侵食状況を示す。従来型盛土(Case2)は、振動実験における損傷は軽微であったものの、越流開始に伴い盛土陸側のり肩から侵食が進行した。また、これと同時に

陸側のり先の支持地盤の侵食も進行した。越流開始2分後には、陸側のり肩からの侵食、陸側のり先の支持地盤の侵食が盛土に伝播することで、盛土堤体の半分程度が侵食される結果となった(図3(a))。この結果から、従来型盛土は、L2地震動に対し十分な耐震性を有している場合でも、津波越流により大きく侵食されることが確認された。

一方、補強盛土(Case1)の場合、越流開始に伴う陸側のり肩の侵食は見られず、従来型盛土と比較し高い越流抵抗性が確認された。しかし、従来型盛土と同様に、越流開始直後から陸側のり

先の支持地盤の侵食が進行し、この侵食が盛土側に広がった結果、陸側のり先から盛土へ侵食が伝播する傾向が見られた(図3(b))。この結果、盛土堤体の越流抵抗性が高い補強盛土でも、支持地盤の侵食により、盛土が不安定化する可能性があることが確認された。

### 3. 大地震および津波越流に粘り強く抵抗する盛土構造

#### (1) 地震後の津波による盛土の被災要因と提案する盛土構造の概要

文献調査と破壊メカニズムの確認実験から、津波による鉄道盛土の被災要因は、①津波襲来前の地震による盛土堤体・のり面工の損傷、②津波越流による盛土堤体の侵食、③越流水が支持地盤を侵食する場合の盛土堤体の不安定化であることが確認された(図4)。

これらを踏まえ、図5に今回開発した盛土構造を示す。本構造は、補強土構造の採用により大

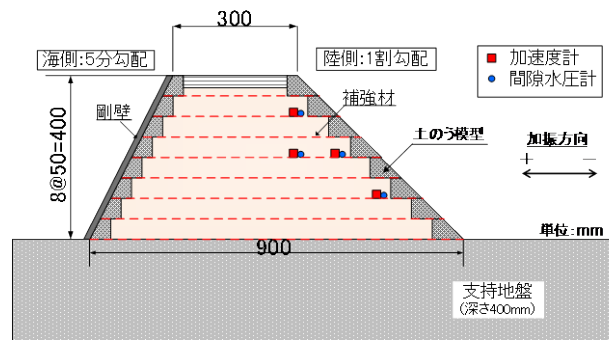


図2 補強盛土模型の概要 (Case1の場合)

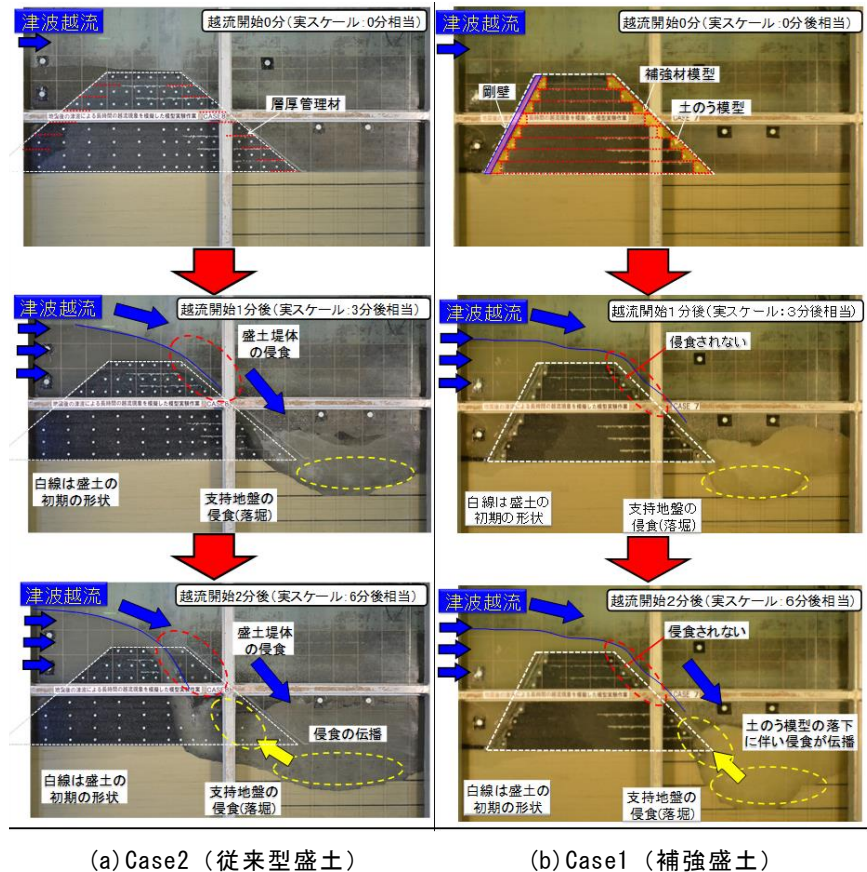


図3 堤体の侵食と支持地盤の侵食状況

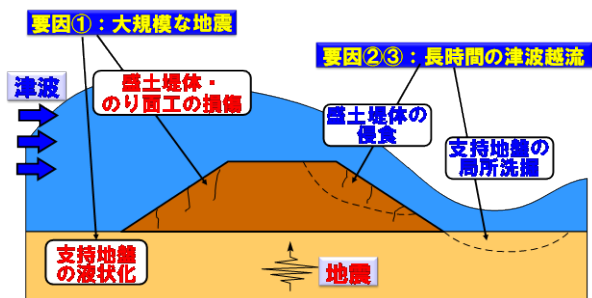


図4 津波による鉄道盛土の被災要因

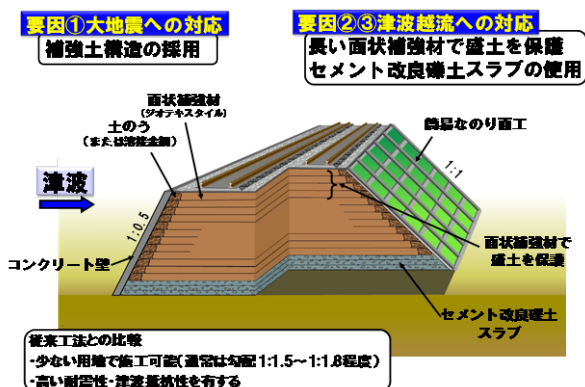


図5 大地震後の津波に粘り強く抵抗する盛土構造

地震に対する高い耐震性を確保した。また、津波による直接的な盛土堤体の侵食対策として、のり面工と補強材内部に敷設した補強材との定着を図ることで津波越流時の堤体の侵食を防護し、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礫土スラブを構築することで、不安定化を防止する構造とした。

### (2) 補強効果の確認

提案構造の補強効果を把握するために、補強効果の確認実験を実施した(表1中、Case3)。Case3では、Case1に対して、盛土底面にセメント改良礫土スラブ層を構築した。地震による盛土の残留沈下は、Case1、Case2と同様に0.1mm程度であった。Case3の越流に伴う侵食状況を図6に示す。Case3では、Case1と同様、越流に伴う盛土のり肩からの侵食は見られなかった。また、陸側のり先の支持地盤の侵食は見られるものの、支持地盤の侵食が盛土下面に及んだ越流開始2分後も盛土最下層のセメント改良礫土スラブが盛土下面から越流水を防ぐことで盛土材の流出は見られなかった。また、土のう模型を高さ方向に一体化させたことで陸側のり先の土のう模型は落下せず、盛土堤体の安定性が保たれることを確認した。以上のことから、提案構造が大規模地震および長時間の津波越流に対して粘り強く抵抗する事を確認できた。

### (3) 設計法の概要

開発した盛土の設計フローを図7に示す。設計は、通常的设计(地震時以外、地震時)に加えて、津波外力を考慮した設計を行うものとしている。盛土に作用する津波外力およびそれに対する照査項目は、①津波襲来時の衝撃波圧に対する盛土の滑動安定の照査、②津波越流時の揚圧力

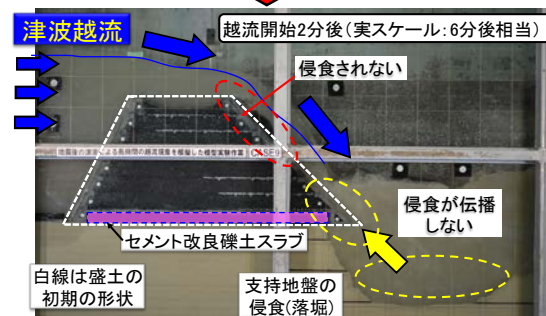
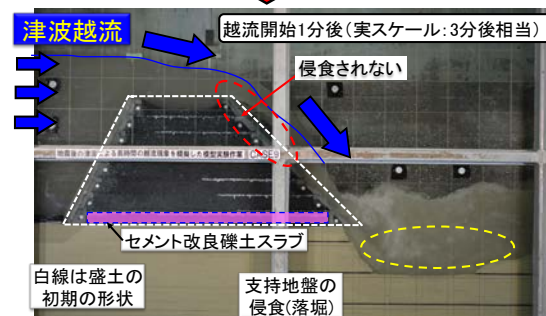
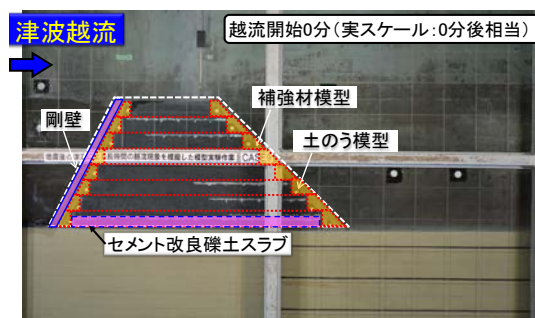


図6 堤体の侵食と支持地盤の侵食状況

に対する補強材の引抜け・破断の照査，③支持地盤の侵食が想定される場合の盛土の不安定化対策として，セメント改良礫土スラブの設計を行うものとした。

以降に，各項目に対する設計法の概要を示す。

#### a) 衝撃波圧に対する盛土の滑動安定

津波が到達した際の盛土への影響として，衝撃波圧に対する盛土の滑動が考えられる。このため，衝撃波圧に対する盛土の滑動安定の照査を行うものとした。本盛土構造は補強土構造であり，加えて海側のり面は RC 壁体であることから波圧が作用した際に盛土体が一体となって抵抗すると考え，簡便的な手法として盛土重量と衝撃波圧を比較することで盛土体の滑動安定の照査を行うものとした。

#### b) 津波越流時の揚圧力に対する補強材の引抜け・破断

津波越流時の盛土のり面に作用する揚圧力に対してはのり面工の引き剥がれに対する照査が考えられる。しかし，本盛土構造は補強土構造であること，鉄道で一般的に用いられている補強材のコンクリートとの定着強度は，補強材の破断強度よりも高いことから，本設計では，揚圧力と補強材の破断強度を比較することで揚圧力に対する照査に変えるものとした。

#### c) セメント改良礫土スラブの設計

セメント改良礫土スラブについては，支持地盤の侵食が盛土下面まである程度進行した場合でも，セメント改良礫土スラブが片持ち梁として盛土荷重を支持することを照査するものとした。具体的には，セメント改良礫土スラブ下面での支持地盤の侵食が進行した位置をヒンジと仮定し，ヒンジを中心とした盛土荷重によるモーメントに対する補強材の破断の照査を行うものとした。

## 4. まとめ

大規模地震と津波に対して粘り強く抵抗する盛土構造を提案するための鉄道総研の取り組みについて紹介した。破壊メカニズムの確認実験により，地震後の津波による盛土の破壊メカニズムとして，①地震による盛土，のり面工の損傷，②越流水による盛土堤体の侵食，③越流水が支持地盤を侵食することによる盛土の不安定化があることを確認した。

以上の不安定化要因に対し，地震による盛土およびのり面工の損傷と，盛土堤体の侵食に対しては補強土構造の採用で対応し，さらに盛土底面へのセメント改良礫土スラブの採用により，支持地盤の侵食を原因とする盛土の不安定化を防止する盛土構造を開発し，その設計法を提案した。

### 参考文献

- 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，古川大裕，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，2014.5.

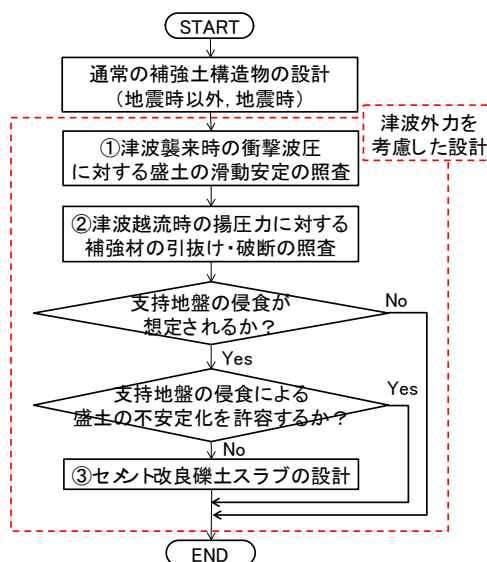


図7 開発した盛土の設計フロー