

地震時における盛土の破壊と対策の有効性に関する実験的検証

東海旅客鉄道(株) 国際会員 関 雅樹
 東海旅客鉄道(株) 正会員 大木 基裕
 東海旅客鉄道(株) 正会員 庄司 朋宏
 東海旅客鉄道(株) 正会員 永尾 拓洋
 東海旅客鉄道(株) 荒鹿 忠義

1. はじめに

盛土は、経済性、材料の安定性(劣化しない)、復旧性に優れた構造物である。しかし、優れた復旧性ゆえに既設盛土には耐震設計等をなされずに施工されたものが多い。一方、線状に構造物が連なる鉄道は、局所的な大規模被害による長期間の列車の不通や、中越地震で見られた列車の脱線の事象に鑑み、線区全体の耐震性能の均一な向上が求められる。したがって、耐震性能の低い軟弱地盤上の既設盛土の強化は重要な課題である。本稿では、既往の知見や新たな実験結果を踏まえ、変形レベルと破壊形態から盛土の耐震性能を整理し、対策効果をまとめる。

2. 既往の研究と鉄道盛土の耐震性能の関係

新設鉄道盛土の耐震性能として表-1 のような地震時の変形レベル(沈下量)が照査指標となった¹⁾。これは被災後の復旧性の観点から定められたものであり、盛土天端の沈下量とその定量的な目安として示されている。

表-1 被害程度と沈下量の目安

| 変形レベル | 被害程度 | 沈下量の目安 |
|-------|---------------|------------------|
| 1 | 無被害 | 無被害 |
| 2 | 軽微な被害 | 沈下量20cm未満 |
| 3 | 応急処置で復旧が可能な被害 | 沈下量20cm以上～50cm未満 |
| 4 | 復旧に長時間を有する被害 | 沈下量50cm以上 |

一方、過去の研究では 1/4 スケールの振動台試験による破壊の原因と形態の関係を図-1 のように整理している²⁾。図中では安全性・復旧性の優劣の点から特に留意すべき盛土の破壊形態を示しており、破壊形態と変形レベルに一定の相関性があることを示していると解釈できる。

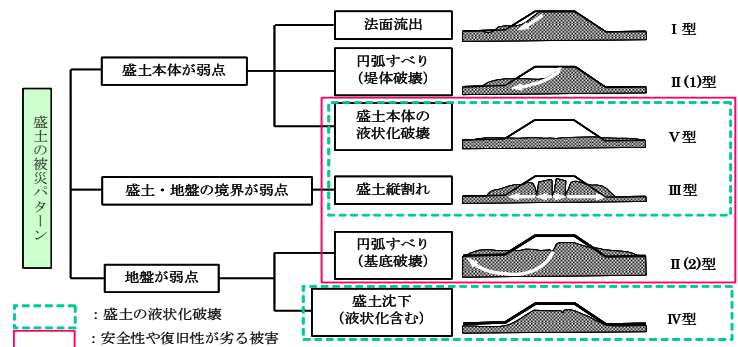


図-1 破壊要因と破壊形態の関係(著者一部加筆)

また、変形レベルの一つの目安となる地震時の盛土の沈下量はいくつかの成分に分類できる。

図-2 に円弧すべり³⁾、及び液状化⁴⁾による盛土の破壊形態と沈下成分の構成を示す。

II型のような円弧すべりの場合は主に3つの現象による沈下量(S_s :盛土の滑動沈下, S_e :盛土本体の揺すり込み沈下, S_g :地盤の揺すり込み沈下)の合計として表される。一方、III型のような液状化の場合も

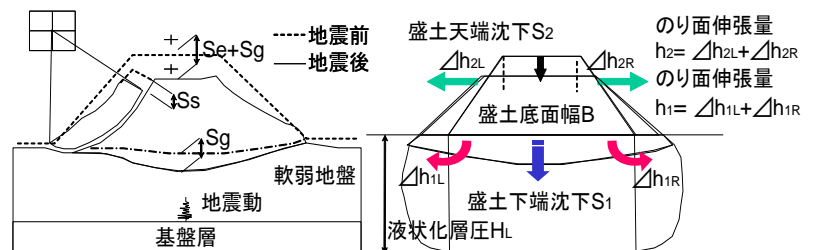


図-2 盛土の沈下成分(左:円弧 右:液状化)

主に3つの現象(盛土のストレッチング、液状化地盤の側方流動、液状化地盤の体積圧縮)により表される。

このように、盛土天端の沈下量は地盤・堤体の各沈下量に大分され、それらの和で表される。破壊形態ごとに各沈下量の割合は異なるが、特に支持地盤の沈下が伴うものは、盛土天端の沈下量も大きく、変形レベル4に相当すると整理できる。これは、支持地盤破壊時には、復旧に長期を要することからも妥当である。

Experimental study on the failure of the embankment and the effect of countermeasures on earthquake / Central Japan Railway Company : Masaki Seki, Motohiro Ohki, Tomohiro Shoji, Takuhiro Nagao, Tadayoshi Arashika.

3. これまでの対策の経緯と現状の課題

(1) これまでの対策の経緯

これまでの対策の概要を表-2に示す。

東海地震対策では、1978年6月に制定された大規模地震対策特別措置法に従い、静岡を中心とした旧「地震防災強化地域」内の軟弱地盤上の盛土を対象に、安全率 $F_s < 1.2$ または、支持地盤の沈下量が15cmを超える盛土に対し、支持層までシートパイルを打設し頭部をタイロッドで結ぶシートパイル締切り工法²⁾を実施している。対象とする破壊形態は、II(2)型、III型破壊に対し地盤の変形を防ぐ効果と、堤体の形状保持の効果を有する。

2006年から実施しているL2地震動に対する全線を対象とした補強(追加対策)では、図-3に示す破壊形態ごとに沈下量推定方法を定め、地震時沈下量50cm以上(レベル4)の盛土の補強を行っている。対象盛土の破壊形態はII(2)型、III型破壊で、基本仕様は東海地震対策と同様である。

ただし、液状化層が薄い場合や正層の場合に限り、盛土下の支持地盤の側方移動とのり尻で生じるストレッチングを拘束する効果に着目し、根入れの浅い仕様^{5) 6)}により、対策している。

ただし、液状化層が薄い場合や正層の場合に限り、盛土下の支持地盤の側方移動とのり尻で生じるストレッチングを拘束する効果に着目し、根入れの浅い仕様^{5) 6)}により、対策している。

(2) 現状の課題

これまででは地震時に比較的大きな沈下が予測される極軟弱地盤上の盛土の検討が中心であった。しかし、平成15年5月の中央防災会議資料よりL2地震動より長周期で振動時間の長い想定東海地震動が示され、対象地震動を見直す必要があった。一方、中越地震では大きな損傷がない箇所でも新幹線が脱線するなど、従来の復旧性能だけでなく、列車の走行脊安定性の観点から変形レベルが小さな盛土の対策を検討することが必要になった。これより、先の新設盛土の変形レベルを既設構造物の性能向上の目安として適用し、変形レベル4を長期不通防止、変形レベル3を走行安全性の向上を、各々の対策の目的とした。

また、対策工を検討する際には盛土の破壊形態に即した補強が最も効果的であるため、考慮する変形レベルと破壊形態を相関させることが重要である。したがって、盛土や地盤、地震動をパラメータとし系統立てて変化させ、沈下量と破壊形態を検証し、これに即した、有効な対策工を開発することが課題である。

4. 実験概要

(1) 動的遠心模型実験

実験の目的は支持地盤土質・強度と盛土高さを系統立てて変化させ破壊形態を把握することおよび、対策の効果を検証することの2つである。

支持地盤：1/40縮尺模型を図-4に示す。支持地盤は粘土または砂質土(液状化・非液状化)である。最下層に碎石層を設け、粘性土地盤の場合、液性限界の1.5倍の含水比のスラリーを投入後、設定したN値になるよう圧密を行い厚さ6mに整えた。砂質土地盤の場合は所要の相対密度になるよう空中撒き出しにより行

表-2 これまでの盛土の耐震補強の概要

| 地震対策 | 東海地震対策 | 長期不通追加対策 |
|-----------|-----------------|------------------------------------|
| 契機 | 東海地震強化地域指定 | 兵庫県南部地震 |
| 変形レベル※1 | レベル4 | レベル4 |
| 設計地震動 | 水平震度 $K_h=0.25$ | L2地震 |
| 地盤条件(粘性土) | $N \leq 4$ | $N \leq 6$ |
| 地盤条件(砂質土) | $N \leq 15$ | $N \leq 20$ |
| 延長 | 17.9km | 6.5km |
| 破壊形態 | 基底円弧すべり・液状化 | 基底円弧すべり 液状化の破壊 |
| 対策 | SP(支持層)+タイロッド | SP(支持層)+タイロッド SP(GL-3m)+タイロッド※2 |

※1 変形レベルは現行設計標準との整合性に鑑み設定
 ※2 成層液状化地盤層に限る(傾斜地盤は支持層までSP)
 ※3 高盛土の地盤条件は普通地盤を含む

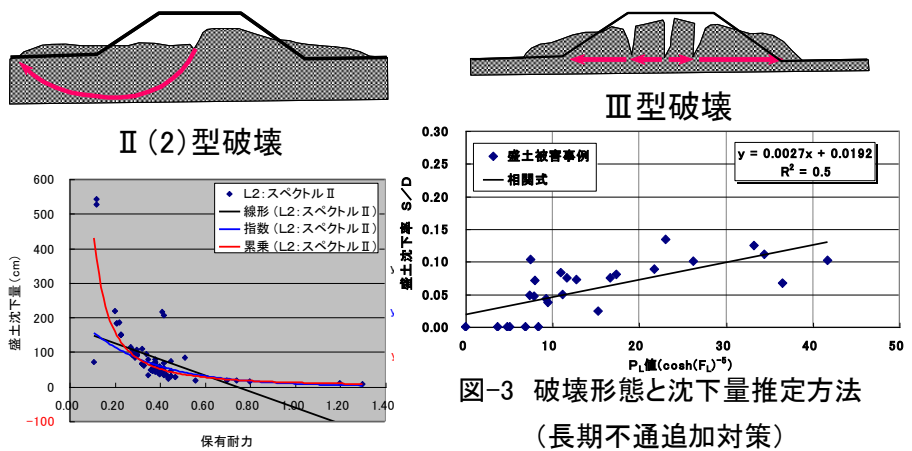


図-3 破壊形態と沈下量推定方法 (長期不通追加対策)

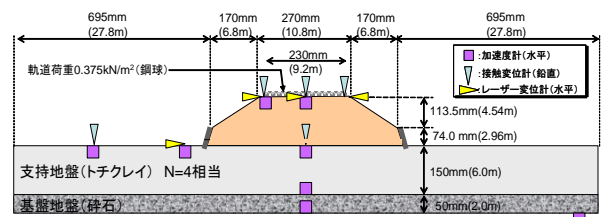


図-4 動的遠心模型概況(盛土7.5m土留有)

い、液状化を想定した実験では CO2 で気層を還元した後、下部よりゆるやかに注水した。

盛土：盛土の土質は耐震標準¹⁾の土質2に相当する。盛土高さは6m, 7.5mおよび、9m, のり勾配は1:1.5, 締め固め度は90%とした。天端はバラスト荷重相当の鋼球を敷設した。対策工の寸法あるいは曲げ剛性 EI は相似則に従った。
加振条件：バケットを遠心載荷装置に設置し、40G まで載荷した後 L2SP II または、想定東海地震 (G1 地盤) で加振した。図-5 に盛土底部中央で計測された加速度波形を示す。
計測項目：表-3 に計測項目を示す。盛土天端、のり肩、のり尻の鉛直・水平変位、及びシートパイル、タイロッド、ネイリングのひずみを計測した。

表-3 遠心模型の計測項目

| | 計測項目 | 使用機器 |
|-----|--------|----------------|
| 変位 | 水平方向 | レーザー変位計 |
| | 鉛直方向 | 接触式変位計 レーザー変位計 |
| ひずみ | シートパイル | ひずみゲージ |
| | タイロッド | ひずみゲージ |
| | ネイリング | ひずみゲージ |

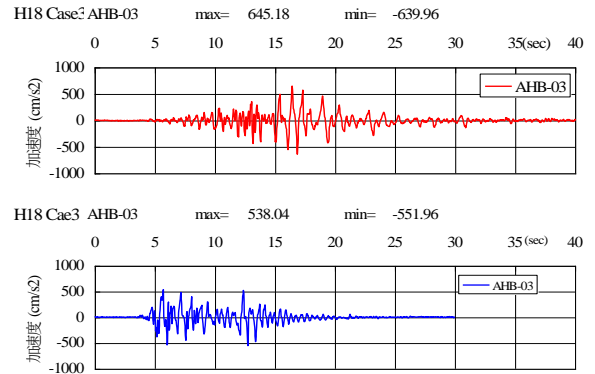


図-5 加速度波形(盛土底部中央)
 上: 想定東海地震 下: L2SP II

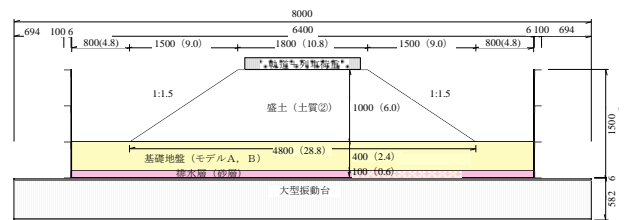


図-6 大型振動台試験概況(盛土高 6m、土留無)

(2) 振動台実験

大型振動台実験の概況を図-6 に示す。

支持地盤：スラリー状に練った粘土 (トククレイ) を、所定の荷重により段階的に圧密し目標強度となるように仕上げた。基礎地盤の軟弱層厚 2.4m (換算値) である。

盛土：千葉県産山砂 (水洗い) を使用し、力学特性を鉄道的设计標準¹⁾の土質②となるように調整した。盛土高 6m, 盛土天端幅 10.8m (換算値), 盛土天端には、実物換算 19kN/m² 相当のバラストを敷設した。

加振条件：入力地震動は図-8 と共通である。1g 場模型試験の相似則⁷⁾を適用した時間短縮波および、元波を使用した。
計測項目：表-3 と共通である。

5. 地震時の盛土の破壊形態と変形レベル

(1) 液状化地盤上の盛土

図-1 に示した、V型破壊、III型破壊の再現を遠心模型実験により試みた⁸⁾。代表的な実施ケースを表-4 に(c), (d)の破壊形態を図-7 に示す。天端沈下量はいずれも 50cm (換算値: 以下変形量の表記はすべて換算値) を超え、変形レベル4に相当する。

図-7 の(c)(d)の破壊形態は、珪砂の盛土である(d)の方がより側方に広がっている。これは、盛土土質の細粒分含有率に起因する。しかし、V型の液状化による盛土の消失には至らず、形状は残存した。

また、不飽和時と飽和時の堤体内部の間隙水圧の計測結果の比較から、不飽和盛土の間隙水圧に上昇傾向はなく、液状化した基礎地盤から盛土へ間隙水が供給されている傾向がないことを把握した。

一方、主要線区の鉄道盛土では、降雨対策として

のり面工、排水パイプの打設などが実施されており、このような盛土が降雨により実験のような極めて飽和度が高い状態に陥る可能性は低いため、液状化地盤上の盛土の実際の破壊形態はIII型が中心であると言える。

表-4 液状化地盤上の盛土の実験ケース(動的遠心)

| | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 盛土 高さ6m | 土質② (山砂) 不飽和 | 珪砂 Dr=78% 不飽和 | 土質② (山砂) 飽和 | 珪砂 Dr=78% 飽和 |
| 地盤 厚さ14m | 珪砂Dr=50% (共通) | | | |
| 地震 | L2SP II (G1) (共通) | | | |

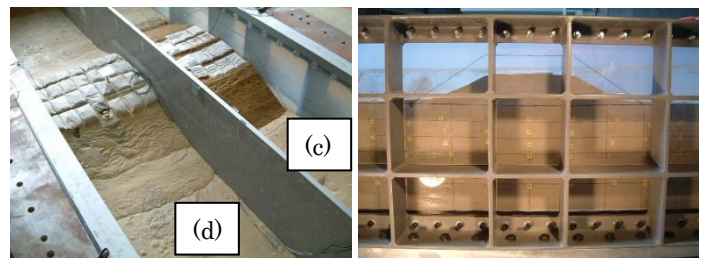


図-7 液状化地盤上の盛土の破壊形態(盛土飽和)

左:(c)土質②(山砂)、(d)珪砂の盛土
 右:(d)珪砂の盛土の側面図

(2) 粘性土地盤上の盛土

図-1のⅡ(1)型破壊、Ⅱ(2)型破壊の再現を遠心模型実験により試みた。振動台実験⁹⁾の実施ケースを表-5に、破壊形態を図-8に示す。天端沈下量は(e)(f)は50cm以上で変形レベル4に相当する。

表-5 粘性土地盤上の盛土の実験ケース(振動台)

| | | |
|--------------|-----------------|------|
| | (e) | (f) |
| 盛土 高さ6m | 土質②(山砂) (共通) | |
| 地盤 厚さ2.4m | 粘性土(トチクレイ) | |
| | N=1 | N=4 |
| 地震 | L2SPⅡ | 想定東海 |

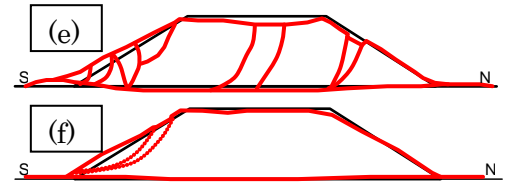


図-8 粘性土地盤上の盛土の破壊形態
上:粘性土地盤(N=1:L2SPⅡ)
下:粘性土地盤(N=4:想定東海地震)

図-8(e)は盛土のり尻で伸張し、複数のたて割れクラックが生じている。縦割れは円弧すべりの傾向と併せて、のり尻の伸張に堤体が追従できず生じたと考えられる。(f)では盛土天端に段差が発生し、のり面には比較的明瞭な円弧すべりの傾向が確認された。(e)はⅡ(2)型を、(f)はⅡ(1)型を再現した。

動的遠心模型実験¹⁰⁾の代表的な実施ケースを表-6に、破壊形態を図-9に示す。天端沈下量は(g),(i)は50cmを超え変形レベル4、(h),(j)は50cmを下回り変形レベル3に相当する。

図-9(g)(h)は腰土留めがない条件での実験結果である。(g)は盛土のり尻で伸張している一方、(h)では盛土天端に若干段差が発生した。のり面には平行クラックが見られ、(g)は全体的に発生したが、(h)ではのり肩とのり尻にやや集中している。

断面形状から(g)はのり尻に水平変位が発生しⅢ型のようなたて割れは天端に見られないが、堤体が伸張した。(h)はのり肩の沈下やのり尻に集中したクラックなどから、Ⅱ(1)型破壊の傾向がある。

一方、図-9(i)(j)は腰土留めを設けた場合の実験結果である。(g)と(i)および(h)と(j)において、天端沈下量に差異はないがのり面の破壊形状が大きく異なる。

表-6 粘性土地盤上の盛土の実験ケース(動的遠心)

| | | | | |
|------------|--------------------|------|------|------|
| | (g) | (h) | (i) | (j) |
| 盛土 高さ6m | 土質②(珪砂+トチクレイ) (共通) | | | |
| | 腰土留無 | 腰土留無 | 腰土留有 | 腰土留有 |
| 地盤 厚さ6m | 粘性土(トチクレイ) | | | |
| | N=2 | N=6 | N=3 | N=6 |
| 地震 | 想定東海地震(共通) | | | |

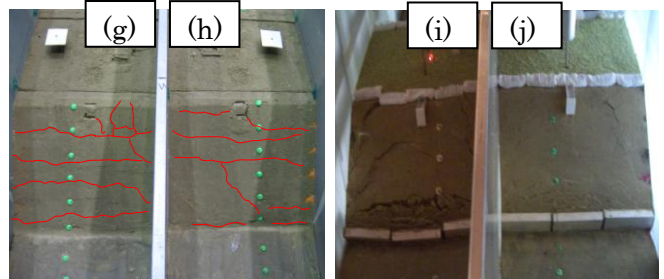


図-9 粘性土地盤上の盛土の破壊形態
左:腰土留なし(g)地盤 N=2, (h) 地盤 N=6
右:腰土留あり(i)地盤 N=2, (j) 地盤 N=6

(3) 砂質土地盤(非液状化)上の盛土

図-1のⅣ型破壊の再現を動的遠心模型実験¹¹⁾により試みた。非液状化を想定した砂質土地盤のため、巻きだし法による密度調整を行い、N=15~20程度となるように支持地盤を作成した。

図-10は、(k)N値=15盛土高さ6mの破壊形態を示している。比較のため図-9(j)の側面図も示す。

(j)に比較し(k)は、腰土留めの挙動が滑動の傾向にある。メッシュの乱れも小さく、Ⅳ型を再現することができた。変形レベルは2相当である。

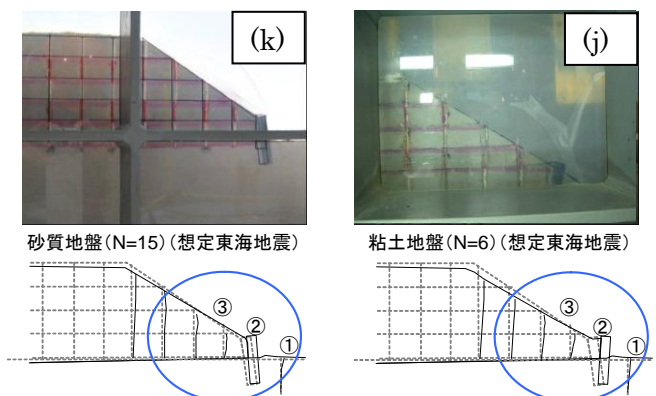


図-10 腰土留めの挙動の違い(動的遠心)

(4) 盛土の破壊機構と実被害事例との比較

図-11に変形レベル3程度の腰土留めがある場合(実験では(i)(j))の破壊機構を示す。支持地盤強度の違いによる、盛土そのものの破壊形態のほか、腰

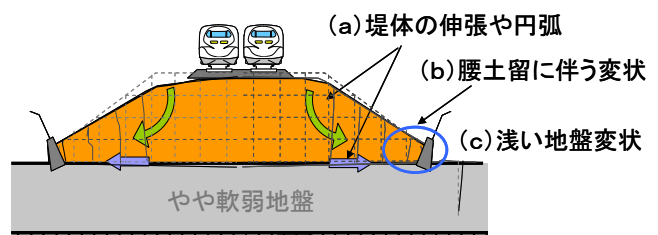
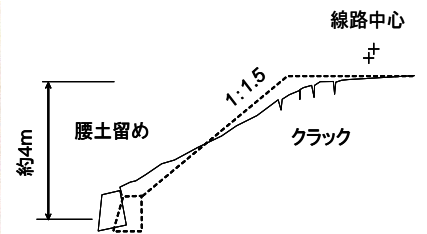


図-11 腰土留めがある場合の盛土の破壊機構

土留めの挙動により背面盛土の落ち込みによる影響が加わり、堤体変形がより顕著に現れたと考えられる。

また、図-12 は、兵庫県南部地震で見られた鉄道盛土の変形レベル3程度の被害事例であるが、図-11 と同様の形状を示し、実現象が再現されたといえる。



やや軟弱な地盤上の盛土の被災事例 (1997年兵庫県南部地震)

図-12 鉄道盛土の被害事例

(5) 破壊形態と変形レベルの関係

表-7にこれまで実施した模型実験の実験条件および破壊形態と変形レベルを相関させた一覧を示す。図-1にある5つの破壊形態に、粘性土地盤上の盛土の実験結果で再現した堤体伸張 (D型)を加え6つの破壊形態に整理した。

6つの分類の内、実現象として生じる可能性が低い旧V型、変形レベル2であるE型を除くと、次のような観点から大分できる。

- 破壊形態の観点から円弧すべり型 (A型, C型) と堤体伸張型 (B型, D型) とに分類できる。

- 地盤物性の観点から砂質地盤 (B型, C型) と粘土地盤 (A型, D型) に概ね分類できる。

また、変形レベルと破壊形態は

- 変形レベルの観点からレベル4 (A型, B型, D型) とレベル3 (C型, D型) に概ね分類できる。

A型, B型は支持地盤の変形を伴う破壊である一方, C型, D型は堤体が中心に変形・沈下する形態であり, 既往の知見とも整合している。

この結果を元に、地震動や、盛土高さ、支持地盤強度から対策箇所を選定基準を定めた。表-8に想定東海地震動激震地区における、対策箇所選定基準を示す。ただし、この基準のほか現地の特異性 (傾斜地盤など)¹²⁾、サイズミックマイクロゾーニングによる判定¹³⁾、既対策箇所の類似箇所など複数の判断材料より箇所選定を行っている。

表-7 破壊形態と実施条件の一覧

| 地震時の破壊形態 | | | 実験条件 | | | | | |
|----------|--|-------------------------------|--------|----------------|-----|------------|---------------|-----|
| | | | 粘土地盤 | 盛土 | 地震動 | 砂質地盤 | 盛土 | 地震動 |
| 旧V型 | | 盛土の液状化による著しい沈下 | - | - | - | N値≦4 (液状化) | 珪砂 (飽和) 6m | L2 |
| B型 | | 地盤の液状化による緩割れを伴う盛土の著しい沈下 | - | - | - | N値≦4 (液状化) | 土質② (飽和) 6m | L2 |
| A型 | | 地盤を含む円弧すべりによる著しい沈下 | N値≦1 | 土質② (湿潤) 6m | L2 | - | - | - |
| B型 | | 地盤の液状化による沈下による緩割れを伴う盛土の沈下 | - | - | - | N値≦4 (液状化) | 土質② (湿潤) 6m | L2 |
| D型 | | 盛土と地盤の境界の揺すり込み、または地盤の液状化による沈下 | 1<N値≦4 | 土質② (湿潤) 6, 9m | L2 | - | - | - |
| D型 | | 盛土と地盤の境界の揺すり込み、または地盤の液状化による沈下 | 1<N値≦4 | 土質② (湿潤) 6, 9m | L3 | - | - | - |
| C型 | | 盛土本体の円弧すべりによる沈下 | 4<N値≦6 | 土質② (湿潤) 6m | L3 | - | - | - |
| D型 | | 盛土と地盤の境界の揺すり込み、または地盤の液状化による沈下 | 4<N値≦6 | 土質② (湿潤) 9m | L3 | - | - | - |
| D型 | | 盛土と地盤の境界の揺すり込み、または地盤の液状化による沈下 | 4<N値≦6 | 土質② (湿潤) 9m | L2 | - | - | - |
| E型 | | 盛土の緩い沈下 | 4<N値≦6 | 土質② (湿潤) 6m | L2 | - | - | - |
| C型 | | 腰土留めの挙動に伴う盛土本体の円弧すべりによる沈下 | - | - | - | N値≦15 | 土質② (湿潤) 6m | L3 |
| E型 | | 盛土の緩い沈下 | - | - | - | N値≦20 | 土質② (湿潤) 9m | L3 |
| E型 | | 盛土の緩い沈下 | - | - | - | N値≦25 | 土質② (湿潤) 7.5m | L3 |
| E型 | | 盛土の緩い沈下 | - | - | - | N値≦25 | 土質② (湿潤) 9m | L3 |
| E型 | | 盛土の緩い沈下 | - | - | - | N値≦15 | 土質② (湿潤) 6m | L2 |
| E型 | | 盛土の緩い沈下 | - | - | - | N値≦25 | 土質② (湿潤) 9m | L2 |

表-8 対策箇所選定基準 (地盤強度と盛土高さの条件)

| N値/高さ | H<3m | | | 3m≦H<9m | | | 9m≦H | | |
|--------|------|------|------|---------|------|------|------|------|------|
| | レベル | レベル | レベル | レベル | レベル | レベル | レベル | レベル | レベル |
| N値≦4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 |
| 4<N値≦6 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 |
| 4<N値≦5 | レベル2 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 | レベル4 |
| 5<N値≦6 | レベル2 | レベル3 | レベル4 | レベル3 | レベル3 | レベル4 | レベル3 | レベル3 | レベル4 |
| 非軟弱地盤 | レベル2 | レベル2 | レベル4 | レベル2 | レベル2 | レベル4 | レベル2 | レベル2 | レベル4 |

6. 盛土の走行性向上対策の考え方

(1) 地震時における盛土の要求性能

これまでの対策は、長期間の不通を招く大きな損傷（変形レベル4）を防止する対策であったが、中越地震では構造物や軌道に直接脱線に結びつく大きな損傷がない状況で列車が脱線した。脱線の要因として、地震時の左右動（線路直角方向）および、地震時の構造物・軌道の変位が挙げられる。

図-13 は動的遠心模型実験で計測された盛土天端と盛土底部の最大応答加速度の比を支持地盤のN値の関係を示している。盛土の場合、マスが大きく安定性のある形状をしていることから、高架橋のような揺れの増幅はないと考えてよい。

したがって、盛土の場合は軌道面の不陸を抑え、平面性を確保することが主眼となる。一方、前章の破壊形態の検証では、変形レベル2であれば、破壊形態はE型であり、盛土天端の平面性は確保されていることから、従来と同様、盛土の天端沈下量を抑制することが走行性向上対策の目的となる。

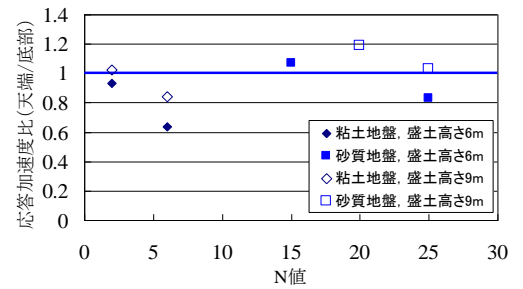


図-13 盛土天端と底部における最大応答加速度の比(盛土高さ9mの場合)

(2) 堤体伸張を抑制する対策工

1) タイロッド張力の考え方

東海地震対策や長期不通追加対策で実施されているシートパイル締め切り工法のタイロッド張力の考え方は、盛土半分の重量に対し、設計水平震度 α を乗じて必要タイロッド引張り力を算出している(図-14)¹⁴⁾。

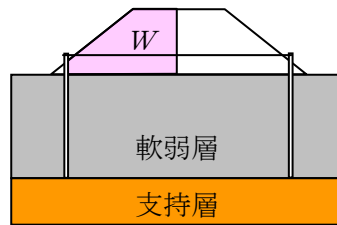


図-14 従来のシートパイル締め切り工法のタイロッド張力の考え方

この際、シートパイル根入れ部の受働土圧を見込み、大規模地震に対しては $\alpha=0.22$ としている。

一方、図-11の破壊形態のように、変形レベル3の盛土の破壊形態は、盛土底部(支持地盤表層)に支持地盤の変形は集中している。

ここでは、堤体伸張を抑制することを目的とした図-15に示す、シートパイル長1mと短い対策工(1mSP)および、左右の既設腰土留め壁を直接タイブルで結ぶ対策工(土留ロッド)について¹⁵⁾動的遠心模型実験や解析より対策効果とタイロッド張力についてまとめる。

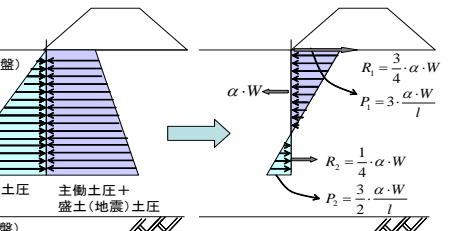


図-15 対策工の概念図

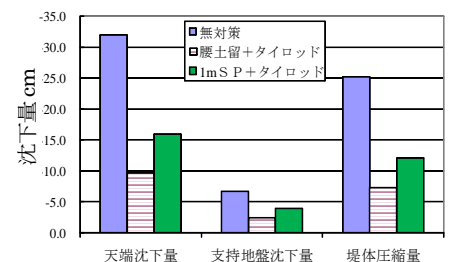


図-16 沈下量の比較(想定東海)

| | タイブル1本当たり | | 単位線路延長当たり | |
|------|------------------------------|------|---------------------|--------|
| | 物理量 | 単位 | 物理量 | 単位 |
| 盛土重量 | $\gamma \times A/2 \times @$ | (kN) | $\gamma \times A/2$ | (kN/m) |
| 張力 | T | (kN) | T/@ | (kN/m) |

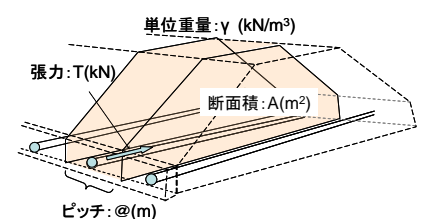


図-17 タイロッド張力の考え方

2) 対策効果

図-16に想定東海地震動加振後の天端沈下量および、支持地盤の沈下量と堤体圧縮量を示す。対策により堤体圧縮量が大幅に抑制されている。また盛土底部での伸張がタイロッドにより抑制された効果で、支持地盤のせん断変形がなくなり、支持地盤の沈下量も減少している。

3) 遠心模型実験と解析の比較

図-17にタイロッドの評価方法の考え方を示す。タイロッドの打設間隔が大きければ、1本に要する張力は大きくなる。間隔の違いを正規化するため、単位線路延長当たりの張力で評価する。

図-18上に入力地震動の盛土底部中央の応答加速度を、中に盛土高さ7.5mに実施した土留タイロッドの遠心模型実験および、解析のタイロッド張力の時刻暦(地震時)を示す。時刻暦全般を通じ、模型実験の方が張力は小さい。特に加振初期5~7secの200Gal程度の地震動において、

模型実験ではほとんど張力を生じていない。これは、図-18 下に示すように、遠心重力 (40G) 載荷時においてタイロッドに張力が生じ、擬似的にプレテンションが導入されたと考えられる。

3) αs の算定

図-19 に盛土高さが異なる場合の単位線路延長当たりのタイロッド張力の時刻歴解析結果を示す、図中、上段は腰土留め+タイロッド、下段は根入れ 1m シートパイル+タイロッドの結果を示す。どちらの対策工も盛土高さが高くなるにつれて張力は増加する傾向にある。地震動が継続している間、タイロッド張力は漸増し、概ね残留状態がタイロッド張力の最大値となっている。一方、土留タイロッドの張力は短尺シートパイルよりも大きい。これは、実際に盛土を拘束する部材 (腰土留めおよびシートパイル) に対するタイロッドの定着位置の違いや、わずかでも根入れしている 1mSP では、支持地盤の受働抵抗が発揮されたことによると推察される。

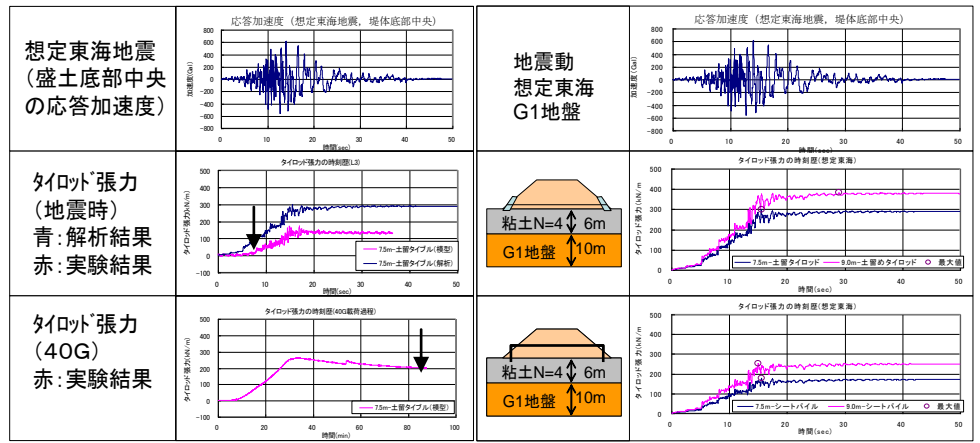


図-18 土留ロッドのタイロッド張力

図-19 タイロッド張力の時刻歴解析結果

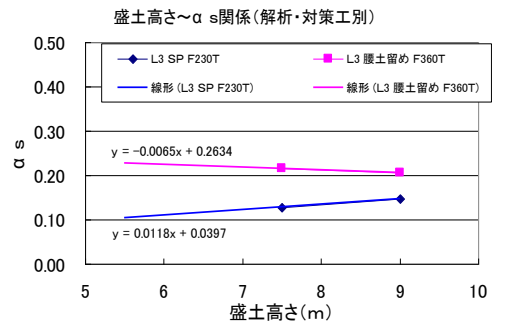


図-20 設計水平震度 α の算定

図-20 は、図-19 タイロッド張力の最大値を、単位線路延長当たりの盛土重量の 1/2 で除した値、つまり設計水平震度 αs の算出結果である。盛土が高くなるとタイロッド張力は増加する一方、盛土重量も大きくなるため、求めた αs は盛土高さに依存しないほぼ一定値に収束し、設計に反映できると考える。

(3) 堤体変形を抑制する対策工

表-7 の C 型破壊の場合、のり面の補強による対策の適用が考えられる。ここでは、図-21 に示す、地山補強土工法¹⁶⁾をのり面補強に適用した結果についてまとめる^{10,17)}。

地山補強土工法には、造成する改良径の太さに対応複数の工法があるが、今回は改良径が細いネイリングの適用性について検討した。ネイリングは 100mm 程度の改良体に鉄筋を挿入したもので、鉄筋の引張抵抗力で、円弧すべりを抑制する。

実験に先立ち、対策工の仕様を求めるため安定計算を実施した。長さ 4m のネイリングを 1 本/4m² の仕様により設計水平震度 0.35 に対し、安全率 1.1 を満たす。

図-22 に想定東海地震後の沈下量と盛土の形状を示す。無対策では、のり肩み段差が見られのり肩のすべりが確認されたが、対策により盛土天端の平坦性を確保し、天端沈下量は 20cm 未満であった。

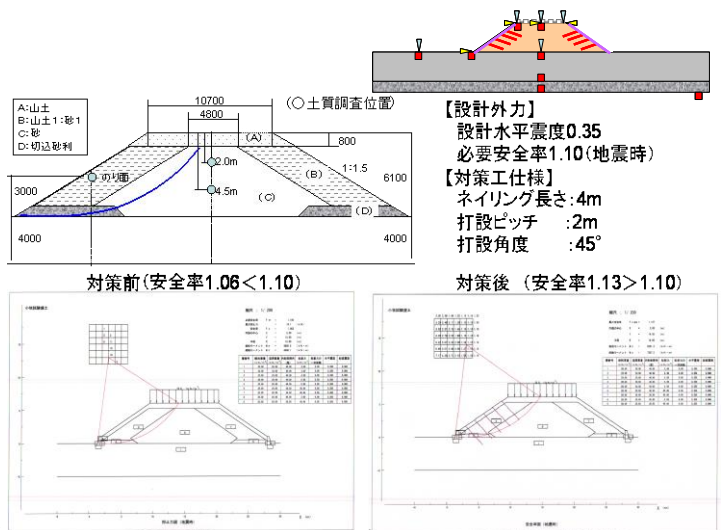


図-21 地山補強土工法(ネイリング)の安定計算

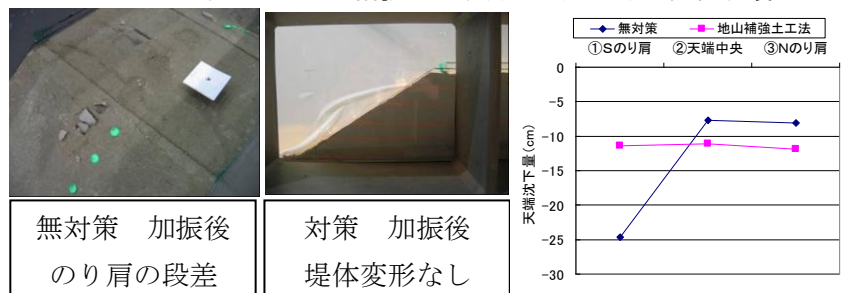


図-22 ネイリングの模型実験結果の比較

7. おわりに

表-9 対策目的と想定する破壊形態および、主な対策工法

地盤の条件や盛土の高さを系統立てて変化させた、各種の模型実験により、従来の盛土の破壊形態に、軟弱粘性土地盤上の盛土の動的遠心模型実験で見られた堤体伸張型（D型）を加え、新たにA型～E型に再分類した。また、新たな破壊形態と変形レベルを相関させ、対策箇所選定基準を定めた。

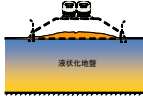

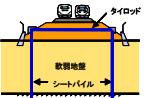
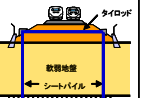
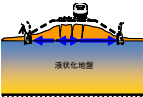
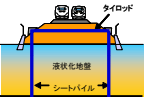
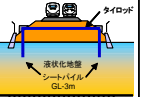
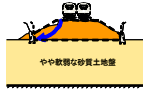
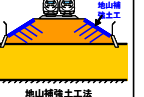

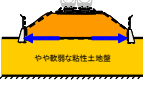
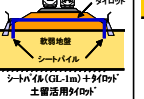
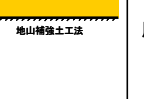


一方、主に変形レベル3の盛土に対する耐震補強工法について、従来のシートパイル締切り工法よりコストダウンし、かつ、破壊形態に即した対策工法（1mシートパイル+タイロッド工法、腰土留め活用タイロッド工法、地山補強土工法）の適用について検討した。

天端沈下量の多くは堤体変形量であることから、堤体を主とする補強により天端沈下量の抑制効果があることを検証した。表-9に、対策目的と想定する破壊形態、主体となる対策工法の関係をまとめる。バラスト軌道の区間については、地震時の左右動に対しバラストが流れる恐れがあるため、盛土の破壊形態や天端沈下量を問わず盛土区間全線においてバラスト流出防止工を設置する。

以上の検討を踏まえ、鉄道盛土の更なる耐震性の向上に努め、安全安定輸送に貢献する。

【参考文献】

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），鉄道総合技術研究所，1999
- 2) 野沢太三：新幹線盛土構造物の耐震強化に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1304，1986
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物），鉄道総合技術研究所，2007
- 4) 黒瀬浩公・田村敬一・佐々木哲也：液状化地盤上の盛土の変形特性に関する動的遠心模型実験，第38回地盤工学研究発表会，2003
- 5) 永尾拓洋：鉄道盛土におけるシートパイル締切り工法による液状化対策，基礎工，Vol.34,No.4,pp77～79，2006
- 6) 永尾拓洋・関雅樹・佐藤清：合理的な盛土の液状化対策工法に関する研究，土木学会第60回年次学術講演会，2005。
- 7) 井合進・松永康男・亀岡知弘：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル，港湾技術研究所報告，第29巻，第4号，pp27-56，1990。
- 8) 永尾拓洋・関雅樹・佐藤清：液状化による盛土の堤体破壊に関する検討，第40回地盤工学研究発表会，2005
- 9) 永尾拓洋・関雅樹・佐藤清：軟弱粘性土地盤上における盛土の地震時破壊形態に関する検討，第42回地盤工学研究発表会，2007。
- 10) 大木基裕・永尾拓洋・関雅樹・佐藤清：地震時における盛土の破壊形態と対策工の実験的検証，土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム論文集，2007。
- 11) 大木基裕・庄司朋宏・荒鹿忠義・関雅樹：鉄道盛土の耐震補強工法（その1），第43回地盤工学研究発表会，2008。
- 12) 那須誠：地震時の盛土の変形と地盤条件の関係ー傾斜地盤の影響ー，地盤と構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム論文集，pp.181-188，（社）土質工学会，1989。
- 13) 関雅樹：東海地震と土木構造物の具体的な耐震補強，鉄道を巨大地震から守る，山海堂，pp.184-226，2001。
- 14) 盛土補強工法の手引き（案），日本国有鉄道，1980
- 15) 大木基裕・関雅樹・荒鹿忠義・庄司朋宏・佐藤清：堤体伸張を抑制する耐震補強の設計，土木学会第63回年次学術講演会，2008。
- 16) 新しい補強土擁壁のすべてー盛土から地山までー，総合土木研究所，pp.127-140，2005
- 17) 大木基裕・永尾拓洋・関雅樹・山本哲也・浜井邦彦・山田宏：既設盛土耐震補強工法，土木学会第62回年次学術講演会，2007

| 【対策目的】 【破壊形態】 | 長期不通防止 | | | 走行性安定性確保 | 走行性安定性確保 | |
|---|---|--|---|---|-----------------|------|
| | 【東海地震対策】 | 【追加対策】 | 【想定東海激震対策】 | 【走行性向上対策】 | 旧分類 | 新分類 |
|  | 発生しない | 発生しない | 発生しない | 発生しない | V | (旧V) |
|  |  |  | 完了 | 完了 | II (2) | A |
|  |  |  | 完了 | 完了 | III | B |
|  | 対象外 | 対象外 |  |  | II (1) | C |
|  | 対象外 | 対象外 |  |  | 属する 形態 なし | D |
|  | (RC)バラスト止め工 | - | - |  | I、IV | E |