

# 土構造物の耐震性診断と対策

## 6. 東海道新幹線における土構造物の耐震性診断と対策

大木 基裕 (おおき もとひろ)  
東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部

関 雅 樹 (せき まさき)  
東海旅客鉄道株式会社 専務取締役 総合技術本部長

### 6.1 はじめに

東海道新幹線の盛土のうち地震時に基底破壊（地盤を含む円弧すべり）が生じると考えられる盛土については、シートパイル締切り工を実施し、おおむね完了する段階である。一方、平成16年の新潟県中越地震における上越新幹線の脱線事故を踏まえ、東海道新幹線における脱線・逸脱防止対策の実用化について検討した結果、脱線防止ガードを主とする新たな地震対策を実施し、土構造物についても不同沈下を防止する耐震補強を行うこととした。

本章では、既設盛土の破壊形態を示し、破壊形態と変形レベルを相関させて定めた対策箇所選定基準を紹介し、東海道新幹線においてこれまで行われてきた耐震補強、および新たに実施する脱線・逸脱防止対策の目的と具体的な工法について述べる。

### 6.2 土構造物の耐震性能照査の基本

鉄道盛土の耐震性能として、被害程度に基づく表—6.1のような地震時の変形レベルが照査指標となり、その目安として盛土天端の沈下量が示された<sup>1)</sup>。

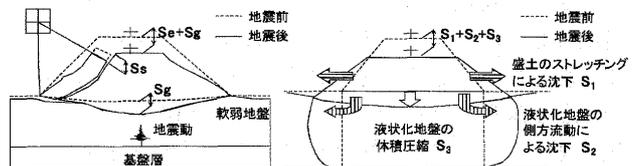
また、地震時の盛土の沈下量は図—6.1のように地盤の沈下量と盛土の変形量に大別できる。円弧すべり（図—6.1左）の場合は三つの成分<sup>2)</sup>（ $S_s$ ：盛土の滑動沈下、 $S_e$ ：盛土本体の揺すり込み沈下、 $S_g$ ：地盤の揺すり込み沈下）、液状化（図—6.1右）の場合も三つの成分<sup>3)</sup>（盛土のストレッチング、液状化地盤の側方流動、液状化地盤の体積圧縮）の和で各々表される。

一方、地震時の橋台裏の沈下成分は、図—6.2のように地盤と盛土の沈下に加え、橋台の水平移動に伴う沈下、翼壁脇からの盛土材料の流出による沈下が挙げられる。盛土や橋台裏の破壊形態の違いにより地盤と盛土の各沈下成分の割合は異なる。ここで支持地盤の変形・沈下を伴う破壊形態は盛土の破壊も生じるため、盛土のみが崩壊する破壊形態よりも相対的に沈下量は大きくなり、変形レベル4に相当すると考えられる。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。

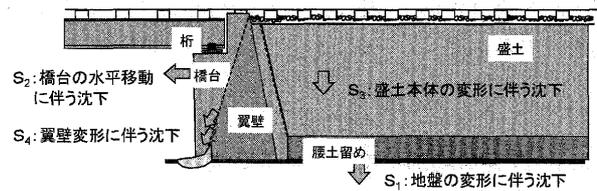
以上のように、鉄道盛土における耐震性能の照査とは、密接に関連する変形レベルと破壊形態の両者を把握することであり、耐震補強工法を検討する際の要点である。

表—6.1 盛土の変形レベルと沈下量の目安

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



図—6.1 盛土の沈下成分 左：円弧 右：液状化



図—6.2 橋台裏の沈下成分

### 6.3 盛土の耐震補強の経緯と耐震性能の照査<sup>4)</sup>

ここでは、まず体系的にまとめた盛土の破壊形態と対策工の関係とこれに関連する模型試験の結果を示し、変形レベルに応じた対策箇所選定基準について述べる。

#### 6.3.1 破壊形態の新しい5形態と対策工の関係

1970年代の研究<sup>5)</sup>では盛土の破壊が生じる要因に応じ、I～V型の破壊形態が示された。一方、関ら<sup>4)</sup>は、実験検証を中心に東海道新幹線の盛土の破壊形態と対策に関する検討を進め、盛土の破壊形態をA～E型の5形態に分類し各々に応じた補強工法を体系化した。図—6.3に盛土の破壊形態と対策工の関係を示す。図の○の数字は無補強時の変形レベルである。また、図中には破壊形態が再現された地震動、地盤条件、盛土の高さを示している。

#### 6.3.2 実験条件の設定と実験の概要

##### (1) 東海道新幹線の盛土や地盤の特徴

東海道新幹線の44%を占める盛土区間の特徴としては、盛土の標準的な高さは6mであり、これは道路と交差する桁橋の下をトラックなどが通過できる高さを基本としている。また、盛土の法面勾配は1:1.5で土の安息角程度の勾配としており、法尻には腰土留め等のも

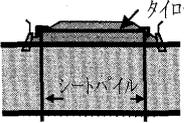
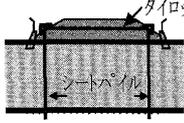
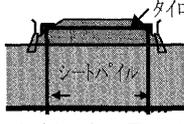
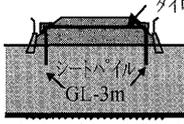
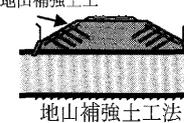
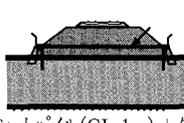
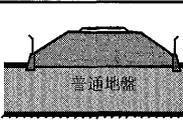
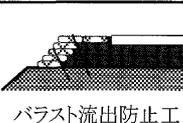
分類	対策目的	長期不通防止		走行安全性
	破壊形態	想定東海地震対策	全線追加(L2地震)対策	脱線・逸脱防止対策
A	 <p>軟弱粘性土地盤 地盤を含む円弧滑りによる沈下</p>	 <p>シートパイル(支持層)+タイロッド ・<math>N \leq 4</math></p>	 <p>シートパイル(支持層)+タイロッド ・<math>N \leq 4</math></p>	対象外
B	 <p>液状化地盤 地盤の液状化による沈下</p>	 <p>シートパイル(支持層)+タイロッド ・液状化地盤</p>	 <p>シートパイル(GL-3m)+タイロッド ・液状化地盤</p>	対象外
C	 <p>やや軟弱な砂質土地盤 盛土の円弧滑りによる沈下</p>	 <p>地山補強土工 地山補強土工法 ・<math>N \leq 15</math> かつ <math>6m \leq H</math> ・<math>9m \leq H</math> (普通地盤)</p>	対象外	 <p>地山補強土工 地山補強土工法 ・L2地震 <math>N \leq 15</math> かつ <math>6m \leq H</math> ・想定東海地震 <math>15 &lt; N \leq 20</math> かつ <math>6m \leq H</math></p>
D	 <p>やや軟弱な粘性土地盤 盛土と地盤の境界の揺り込みによる沈下</p>	 <p>シートパイル(GL-1m)+タイロッド または土留活用タイロッド ・<math>4 &lt; N \leq 5</math> かつ <math>3m \leq H</math></p>	対象外	 <p>地山補強土工 地山補強土工法 ・L2地震 <math>4 &lt; N \leq 6</math> かつ <math>3m \leq H</math> ・想定東海地震 <math>5 &lt; N \leq 6</math> かつ <math>3m \leq H</math></p>
E	 <p>普通地盤 盛土の緩い沈下</p>	対象外	対象外	 <p>バラスト流出防止工 ・対策箇所を含む全盛土区間</p>

図-6.3 盛土の破壊形態と対策工の関係 (○の数字は無補強時の変形レベルを示す)

たれ壁や重力式擁壁が用地取得条件に応じ設けられている。施工はまき出し厚 30 cm を一層とし、締固め度 90 % に管理しながら盛立てられた。特に盛土上部 3 m は締め固めやすい砂礫の材料で構築され、初期沈下防止を配慮した。なお、主要線区の盛土には過去の降雨災害の教訓に基づき 3.6 m の有孔パイプや法面工が施工されている。

一方、盛土の支持地盤は、高速鉄道の線形成の制約から軟弱地盤上にも盛土を構築した区間もあり、場所によっては構築中の盛土が崩壊する懸念があったため、緩速施工や、抑え盛土などの補助工法と併せて施工された。

耐震性能が劣ると考えられる盛土の軟弱地盤の性状を把握するため常時微動の分析<sup>6)</sup>、日常の軌道保守の状況などを踏まえ、建設当時のボーリングデータを調査した結果、図-6.4のような傾向になった。これより、模型実験の地盤条件を次の四つに分類した。

- ① 軟弱粘土地盤 ( $N$  値 = 2~4 と  $N$  値 6 程度)
- ② 液状化地盤 (砂質地盤で  $N$  値 = 10 程度)
- ③ 難液状化地盤 (砂質地盤で  $N$  値 = 15~25 程度)

また、盛土の高さは一般的な盛土高さである 6 m, 7.5 m, 9.0 m とし、地盤条件と盛土高さ、地震動をパ

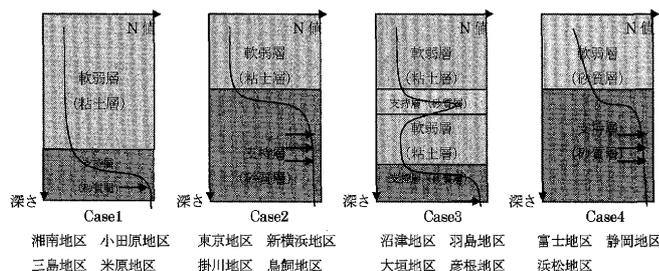


図-6.4 地盤震度と  $N$  値の関係

ラメータとした模型実験を行った。

(2) 遠心模型実験の概要<sup>7)</sup>

盛土の破壊形態や沈下量を地盤条件、盛土高さ、地震動別に分析すること、および補強効果を把握することを目的として、前述の項目をパラメータとした実験検証を行った。実験は大林組技術研究所(清瀬)の動的遠心力模型試験機を用いた。模型(縮尺 1/40)を図-6.5に示す。

動的遠心力模型実験は、相似則に従い、実物の 1/n 縮尺模型を  $nG$  場で外力を作用させ、実物の応力条件を再現し地震時の破壊形態や沈下量を評価するものである。模型作製は以下のように行った。

講座

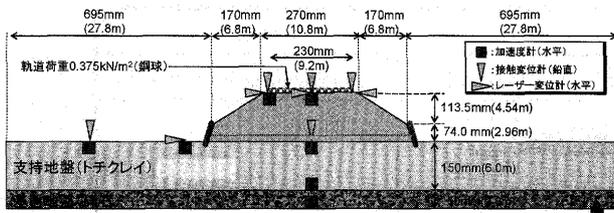


図-6.5 動的遠心模型概況 (例: 盛土 7.5 m 土留め有)

**支持地盤:** 支持地盤は、強度の異なる粘性土 3 種 ( $N$  値 = 2, 3, 6), 液状化砂質土 1 種 ( $N$  値 = 10,  $D_r = 50\%$ ) ならびに非液状化砂質土 3 種 ( $N$  値 = 15, 20, 25) を設定した。最下層に碎石層を設け、粘性土地盤は液性限界の 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った。砂質土地盤の場合は所要の相対密度になるように空中まき出しにより行った。液状化砂質土地盤の厚さは 14 m, その他の支持地盤の厚さは図-6.4 を踏まえ 6 m と共通とした。

**盛土:** 盛土の土質は土構造物標準<sup>2)</sup>の土質 3 に相当する。盛土は高さの異なる 3 種 (6 m, 7.5 m, 9 m) で、法勾配は 1 : 1.5, 締固め度は 90% にそろえた。天端はバラスト荷重相当の鋼球を敷設した。

**加振条件:** 40G 場まで遠心载荷した後、地震動 2 種 (L2SP II 地震動, 想定東海地震動<sup>7)</sup>) で加振した。

(3) 振動台実験の概要<sup>8)</sup>

振動台実験は、軟弱地盤上の盛土の破壊形態を把握することを目的として実施した。振動台実験は、1G 場における相似則に従い、実物の  $1/n$  縮尺模型に外力を作用させ、地震時の破壊形態や沈下量を評価するものである。模型を図-6.6 に示す。地震時の安全率は実物と模型で相関性を持たせた。模型作製は以下のように行った。

**支持地盤:** 支持地盤は、強度の異なる粘性土 2 種 ( $N$  値 = 1, 4) とし、 $N$  値より換算した粘着力の  $1/n$  倍に低減し設定した。換算支持地盤の厚さは 2.4 m である。

**盛土:** 盛土の土質は山砂を水洗いし、土構造物標準<sup>2)</sup>の土質 2 に相当するよう細粒分を除去し粘着力を低下させた。盛土高さは 6 m, 法勾配は 1 : 1.5, 締固め度は 90% とし、天端はバラスト荷重相当の鋼球を敷設した。

**加振条件:** 地震動 2 種 (L2SP II 地震動, 想定東海地震動) で加振した。

6.3.3 盛土の破壊形態の分類

(1) A 型破壊

**口絵写真-7** は A 型破壊と対策 (シートパイル締切り工) の概念図と、新潟県中越地震 (2004) で見られた鉄道盛土の実被害事例である。

振動台実験<sup>8)</sup>の実施ケースを表-6.2 に、破壊形態を図-6.7 に示す。天端沈下量は (a), (b) とともに 50 cm 以上 (換算値: 以下変形量は換算値) で変形レベル 4 に相当する。

図-6.7(a) は盛土法尻で伸張し、複数の縦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、法尻の伸張に堤体が追従しきれず、生じたと考えられる。

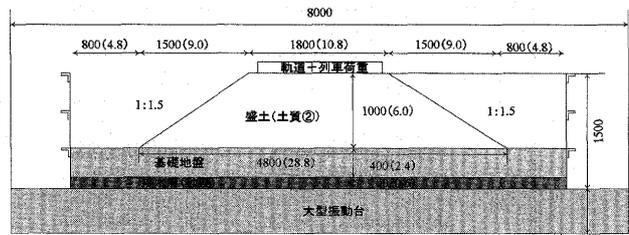


図-6.6 振動台試験模型状況 (盛土 6.0 m, 1/60)

表-6.2 粘性土地盤上の盛土の実験ケース (振動台)

	(a)	(b)
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	L2SP II	想定東海

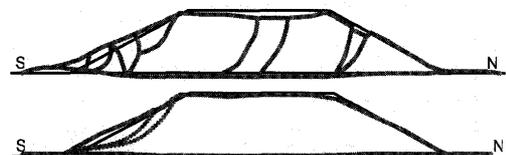


図-6.7 粘性土地盤上の盛土の破壊形態  
上: (a) 粘性土地盤 ( $N=1$ : L2SP II)  
下: (b) 粘性土地盤 ( $N=4$ : 想定東海地震)

(b) では盛土天端に段差が発生し、法面には比較的明瞭な円弧すべりの傾向が確認された。(a) は A 型破壊を、(b) は後に示す C 型を再現した。

(2) B 型破壊<sup>9)</sup>

**口絵写真-8** は B 型破壊と対策 (シートパイル締切り工 (根入れ 3 m 成層地盤の場合)) の概念図、ならびに十勝沖地震 (1968, 2003) で見られた鉄道盛土の実被害事例を示したものである。

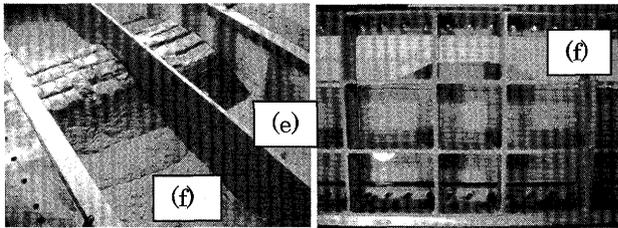
代表的な実施ケースを表-6.3 に、(e), (f) の破壊形態を図-6.8 に示す。天端沈下量はいずれも 50 cm を超え、変形レベル 4 に相当する。図-6.8 の (e), (f) の破壊形態は、珪砂の盛土である (f) の方がより側方に広がっている。これは、盛土材料の細粒分含有率に起因する (山砂は  $F_c = 23.6\%$ , 珪砂は  $F_c = 12.0\%$ )。しかし、液状化による盛土の消失には至らず、形状は残存している。また、不飽和時と飽和時の堤体内部の間隙水圧の計測結果の比較から、不飽和盛土の間隙水圧に上昇傾向はなく、液状化した基盤地盤から盛土へ間隙水が供給されていないことを把握した。

(3) C 型破壊・D 型破壊<sup>10)</sup>

**口絵写真-9** に C 型破壊と対策 (地山補強土工法) の概念図を、**口絵写真-10** に D 型破壊と対策 (シートパイル (GL-1 m) + タイロッド工法) の概念図を示す。なお、両者の実被害事例は兵庫県南部地震 (1995) で見られたものである。動的遠心模型実験の代表的な実施ケースを表-6.4 に、破壊形態を図-6.9 に示す。天端沈下量は、(g), (i) とともに 50 cm を超え変形レベル 4, (h), (j) は、ともに 50 cm を下回り変形レベル 3 に相当

表—6.3 液状化地盤上の盛土の実験ケース（動的遠心）

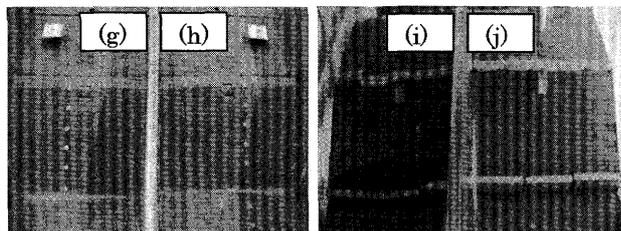
	(c)	(d)	(e)	(f)
盛土 高さ6m	土質② (山砂) 不飽和	珪砂 Dr=78% 不飽和	土質② (山砂) 飽和	珪砂 Dr=78% 飽和
地盤 厚さ14m	珪砂Dr=50% (共通)			
地震	L2SP II (G1) (共通)			



図—6.8 液状化地盤上の盛土の破壊形態（盛土飽和）  
左：(e)土質②（山砂），(f)珪砂の盛土  
右：(f)珪砂の盛土の側面図

表—6.4 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—6.9 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=3, (j)地盤 N=6

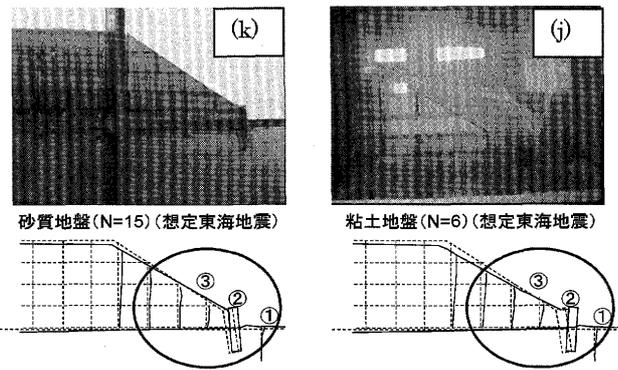
する。

図—6.9 (g), (h)は腰土留めがない条件での実験結果である。(g)は盛土法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。法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)では法肩と法尻に集中した。断面形状は(g)は法尻に水平変位が発生しB型のような縦割れはないが、堤体は伸張した。これをD型の破壊形態とした。(h)は法肩の沈下や法尻に集中してクラックが生じ、C型の破壊形態を再現した。

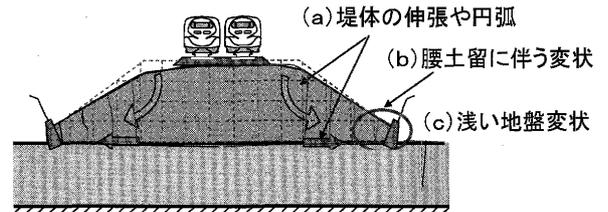
一方、図—6.9 (i), (j)は腰土留めを設けた場合の実験結果である。(g)と(i)および(h)と(j)において、天端中央付近の沈下量に差異はないが、法面のクラックは深く、法肩が崩れ、破壊形状が異なる。

(4) E型破壊<sup>10)</sup>

非液状化を想定した砂質土地盤のため、まき出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製した。



図—6.10 腰土留めの挙動の違い（動的遠心）



図—6.11 C型の盛土の破壊機構

図—6.10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—6.9(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、変形レベルは2相当である。

(5) 盛土の破壊機構と実被害事例との比較

図—6.11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。

6.3.4 変形レベルと対策箇所選定基準<sup>11)</sup>

破壊形態の考察を踏まえ、盛土天端の沈下量に着目し18ケースの遠心模型実験の結果を、図—6.12~6.15に、地震動別、地盤物性別に示す。

天端の沈下量に着目すると、変形レベル3の実験結果では、天端中央に比較し法肩の沈下量は大きい。つまり天端では不同沈下が生じている。一方、変形レベル2の実験では、法肩と盛土中央での沈下量の差は小さく、一様な沈下となっている。以上より、変形レベル3の盛土を変形レベル2へ耐震性を向上させることにより、天端の平坦性を確保できることが示唆される。

対策箇所選定に当たり、この沈下量の結果のほか、常時微動による地盤分類<sup>6)</sup>、既対策盛土箇所に隣接、または地盤や盛土の条件が類似する箇所など多面的な視点より、対策箇所選定基準を定めた（表—6.5, 6.6）。

6.4 東海道新幹線の盛土区間における耐震補強<sup>12)</sup>

6.4.1 これまでの盛土耐震補強の経緯

(1) 兵庫県南部地震以前の対策

駿河湾沖での海洋型巨大地震の発生が示唆され、国民

講座

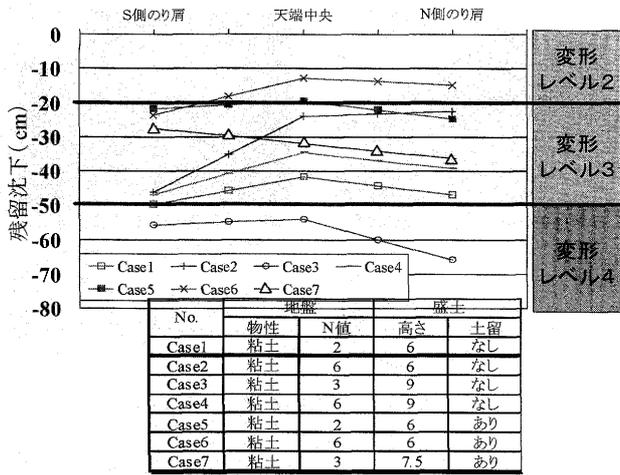


図-6.12 想定東海地震時の盛土の変形レベル(粘土地盤)

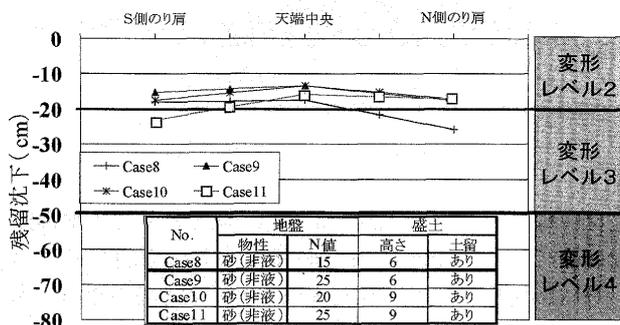


図-6.13 想定東海地震時の盛土の変形レベル(砂地盤)

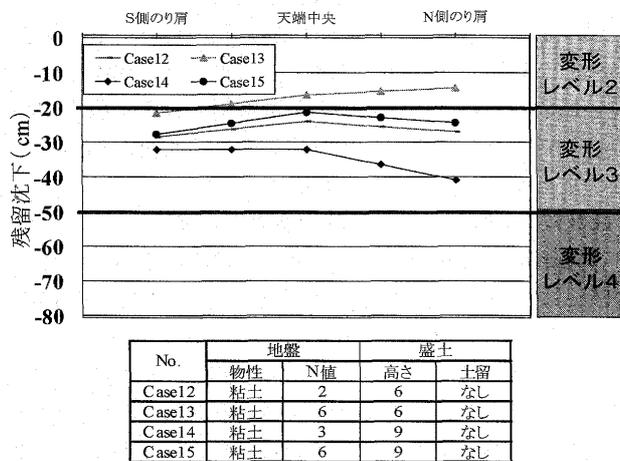


図-6.14 L2SP II地震時の盛土の変形レベル(粘土地盤)

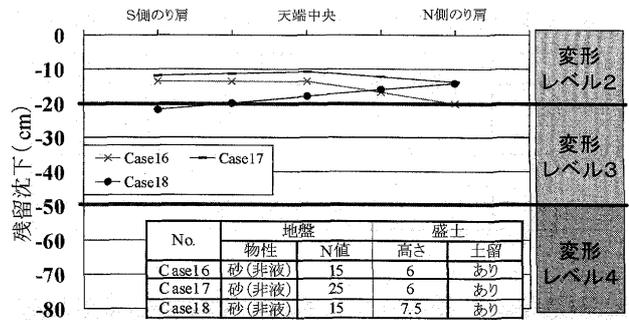


図-6.15 L2SP II地震時の盛土の変形レベル(砂地盤)

表-6.5 想定東海地震動における盛土の変形レベル  
左:粘土地盤 右:砂地盤

地盤N値	粘土地盤			地盤N値	砂地盤		
	3m≦H<6m	6m≦H<9m	9m≦H		3m≦H<6m	6m≦H<9m	9m≦H
N値≦4	レベル4	レベル4	レベル4	液状化	レベル4	レベル4	レベル4
4<N値≦5	レベル4	レベル4	レベル4	N値≦15	レベル2	レベル4	レベル4
5<N値≦6	レベル3	レベル3	レベル4	15<N値≦20	レベル2	レベル3	レベル4
非震害地盤	レベル2	レベル2	レベル4	非震害地盤	レベル2	レベル2	レベル4

表-6.6 L2SP II地震動における盛土の変形レベル  
左:粘性土地盤 右:砂質土地盤

地盤N値	粘性土地盤			地盤N値	砂質土地盤		
	3m≦H<6m	6m≦H<9m	9m≦H		3m≦H<6m	6m≦H<9m	9m≦H
N値≦4	レベル4	レベル4	レベル4	液状化	レベル4	レベル4	レベル4
4<N値≦5	レベル2	レベル3	レベル3	N値≦15	レベル2	レベル3	レベル3
5<N値≦6	レベル2	レベル3	レベル3	15<N値≦20	レベル2	レベル2	レベル2
非震害地盤	レベル2	レベル2	レベル2	非震害地盤	レベル2	レベル2	レベル2

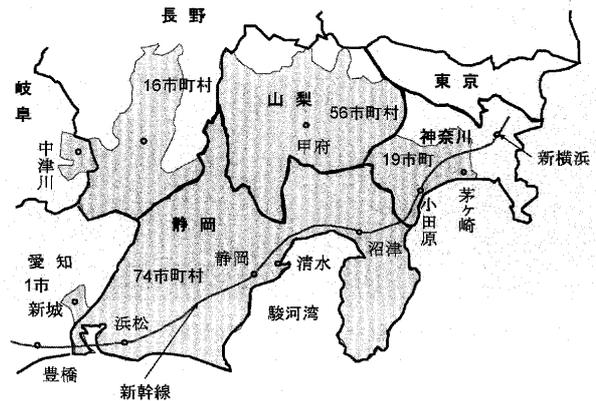


図-6.16 地震防災対策強化地域(中央防災会議, 1978)

の関心が高まる中、宮城県沖地震(1978)が発生し、同年6月に国会において「大規模地震対策特別措置法」が制定、8月には図-6.16に示す静岡県全域を含む6県167市町村が「地震防災対策強化地域」に指定された<sup>6)</sup>。

東海道新幹線は新横浜-豊橋間が対象となり翌年から17.9 kmの盛土区間に、シートパイル締切り工法を行った。橋台にはストラッドにより橋台の動きを拘束し、橋台裏の沈下を防止する対策も併せて行われた。補強対象は図-6.3に示したA型、B型の破壊形態となる盛土であり、表-6.1の変形レベル4の盛土に該当する。

(2) 兵庫県南部地震以降の対策

1999年10月に発刊された鉄道構造物等設計標準・同

解説(耐震設計)<sup>1)</sup>では、発生確率の異なるレベル1地震動、レベル2地震動が示され、重要構造物等は大規模地震に対しても致命的な破壊に至らない耐震性能を確保する設計を行うことが定められた。特にレベル2地震動は従来の海洋型の地震動に加え、兵庫県南部地震を踏まえ内陸型地震動が新設された。また、表-6.1の盛土の耐震性能の指標がこの時に示された<sup>1)</sup>。

東海道新幹線では、これまでの新横浜-豊橋間から補強対象区間を全線に拡大し、レベル2地震動に対応した補強を推進することとし、2006年以降6.5 kmの盛土区間に追加対策を行った<sup>12)</sup>。補強対象は1979年からの対策と同様に図-6.3に示したA型、B型の破壊形態となる盛土であり、表-6.1の変形レベル4の盛土に該当する。レベル2地震動に対してもシートパイル締切り工法は十分効果があることを検証し、対策の主体としている。一方、液状化層が薄い場合、あるいは正層を成し

ている場合については、盛土下の支持地盤の側方移動と法尻で生じるストレッチングを拘束する効果に着目した非液化化層まで根入れしない仕様により<sup>13)</sup>実施している。

2001年12月内閣府中央防災会議が開催され、想定東海地震動が示された。これは従来のレベル2地震動に比べ、周期が長く、地震動継続時間が長い。また震源域は図-6.17のように、従来よりもやや西側に拡大し「地震防災対策強化地域」は8都県263市町村と東京都、三重県および96市町村が追加された。したがって震源に近い東海道新幹線においては、この地震動を対象として耐震補強を見直した。

この結果、レベル2地震動でC型、D型の破壊形態となる盛土が想定東海地震動では変形レベル4となることから新たに設定された「地震防災対策強化地域」の内、地震動が特に大きな三島-豊橋間の盛土2.9km<sup>12)</sup>を抽出し2008年より対策している。

以上の変形レベル4の対策は長期間の列車不通を防止する対策といえる。代表的なシートパイル締切り工の遠心模型による効果確認（加振後の残留状況）を図-6.18に、実際の対策後の盛土の現地状況を図-6.19に示す。

#### 6.4.2 東海道新幹線の盛土区間の脱線・逸脱防止対策

##### (1) 対策の目的と具体策<sup>14)</sup>

新潟県中越地震での列車脱線の事象を踏まえ、図-6.20に示す四つの観点から東海道新幹線の対策を検討した。

一方、地震時の列車の脱線・逸脱につながる要因は、①地震時左右動と ②地震により生じる不同変位がある。東海道新幹線の盛土区間の構造的な特徴として、法面

勾配が1:1.5、バラスト軌道などが挙げられる。

このような特徴から、盛土区間における列車の脱線・逸脱につながる要因として、盛土天端の沈下(不同沈下)、バラストの流出による軌道の変位、構造物境界（橋台と橋台裏の盛土）における段差などが挙げられる。

一方、図-6.21に示す遠心模型実験により得られた盛土天端と盛土底部の応答加速度の比と地盤N値の関係より、盛土の応答は高架橋ほど大きくはない。したがって、脱線防止ガードが機能すれば脱線を防止できる。

以上より、盛土区間の脱線・逸脱防止するためには、軌道狂いの原因となる盛土の不同沈下を抑制し変形レベル3から変形レベル2へ沈下量を抑制すること、およびバラスト肩部を補強し軌道変位を抑制すること、構造物境界の段差を解消し、軌道の目違い・折れ角を生じさせないことが、対策として効果的である。

具体策として、バラスト肩部の補強（バラスト流出防止工）、橋台裏の段差防止（橋台裏注入）、盛土沈下抑制対策（地山補強土工法）が挙げられる。ここでは新たに開発したジオテキバッグを用いたバラスト流出防止工、

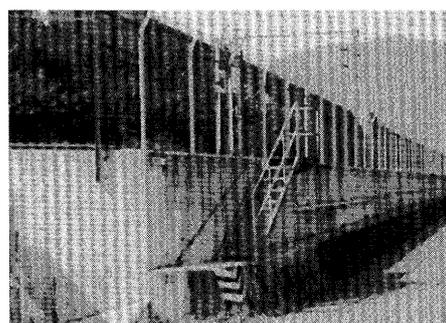


図-6.19 シートパイル締切り工の施工（完成）

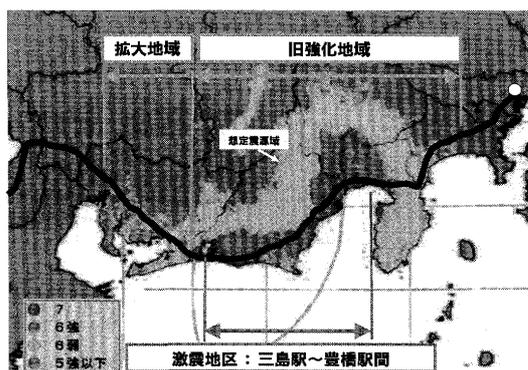


図-6.17 想定東海地震動における震度分布

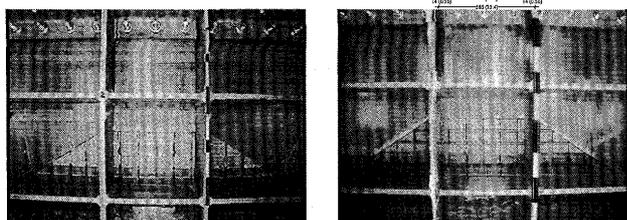


図-6.18 遠心模型実験による補強効果の確認  
左：無補強 右：シートパイル締切り工

- |      |  |
|------|--|
| I.   | 構造物及び軌道の耐震強化<br>従来進められてきた土木構造物の耐震補強・・・概ね終了※<br><b>構造物の大きな変位を抑制する対策</b> |
| II.  | 列車を早期に止める対策<br>早期地震警報システム（テラス）・・・完了※<br>非常ブレーキ性能の向上（N700系）・・・実施中※      |
| III. | 脱線そのものを防止する対策<br><b>脱線防止ガードの開発</b>                                     |
| IV.  | 脱線後の逸脱を防ぐ対策<br><b>逸脱防止ストッパの開発</b>                                      |

図-6.20 東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策の観点

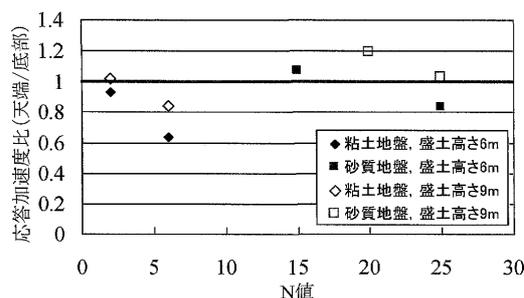


図-6.21 応答加速度比～地盤N値関係

講座

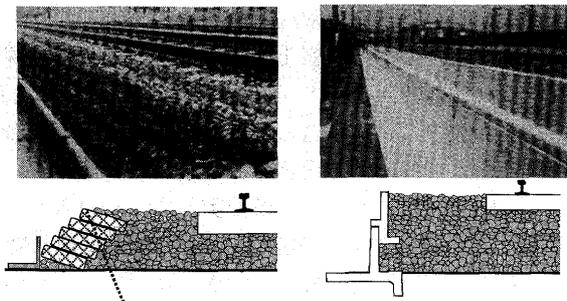


図-6.22 バラスト流出防止工  
(左: ジオテキバッグ工法 右: RC バラスト止め工)

および地山補強土工法について紹介する。

(2) バラスト流出防止工<sup>15)</sup>

地震によりバラストが流出し、軌道が蛇行・座屈する可能性があるため、図-6.22に示すバラスト流出防止工を実施する。これまで盛土区間においてはRC製のバラスト止め工により対策してきた。逆T型の擁壁構造で先端にはシェアキーがあり、転倒・滑動に抵抗するものである。しかしこの工法は、RCバラスト止め工の重量があり、施工効率あまり高くはない。そこで、より効率的な工法としてジオテキバッグ(ジオテキスタイル素材でできた網目袋)にバラストを入れ傾斜に積み、鉄筋を打ち込む、ジオテキバッグ工法を開発した。バラストを入れた袋単体の重量は25kgで人力施工が可能である。

実物大の軌道を再現した振動試験により、まくらぎ変位を30mmに抑え込む性能を検証した。

(3) 新しい地山補強土工法<sup>11)</sup>

図-6.11に示した破壊形態の場合、支持地盤を補強するシートパイル締切り工を適用するよりも、より堤体の変形を抑制する対策工法を適用する方が有効である。また、法面だけではなく法尻の耐震性も考慮し、もたれ式腰土留めなどにはアンカーによる補強も必要である。

図-6.23に対策工の断面図を示す。対策仕様は、地山補強土工法<sup>11)</sup>に受圧構造体として張りコンクリート工を行う。また、図-6.11を踏まえ土留めの形態により2種の仕様とした。

対策工の仕様を策定するため図-6.24に示す安定計算を実施した。長さ3.6mのネイリングを法面に配し、設計水平震度0.35に対し、安全率1.1を満たす。

遠心模型実験による対策工の効果の検証として遠心模型実験を実施した。図-6.25に盛土の沈下量を示す。地震動は想定東海地震動である。無対策では、法肩に段差が見られ法肩のすべりが確認された。残留沈下量は、法肩では20cmを超えた。一方、地山補強土工法を実施したことにより、天端沈下量は20cm未満となり、盛土天端の不同沈下を抑制することができた。

模型実験による対策工法の効果検証に併せ、施工方法の検証を目的とし、試験盛土において試験施工を行った。施工状況の全景、詳細、および引抜いた改良体を図-6.26に示す。

機械打撃により有孔鋼管を法面に挿入した後、人力によるセメントミルクの注入を行い地山との定着を図った。

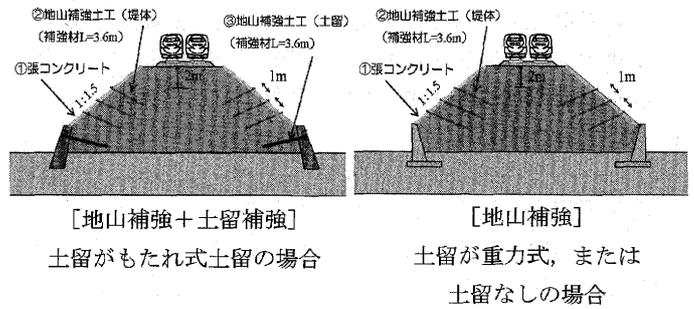


図-6.23 対策概念図

左: 法尻の腰土留め補強をする場合  
右: 法尻の腰土留め補強を行わない場合

層番号	湿潤重量 (kN/m <sup>3</sup> )	摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	水平震度
1	17	35.0	3.0	0.35
2	19	0.0	147.0	0.35

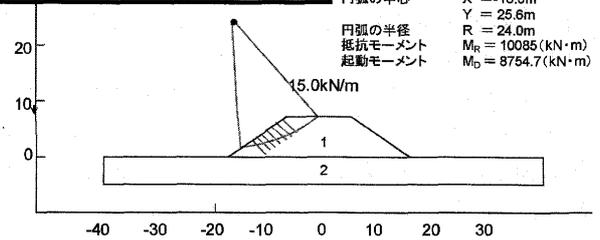


図-6.24 安定解析(設計水平震度0.35)

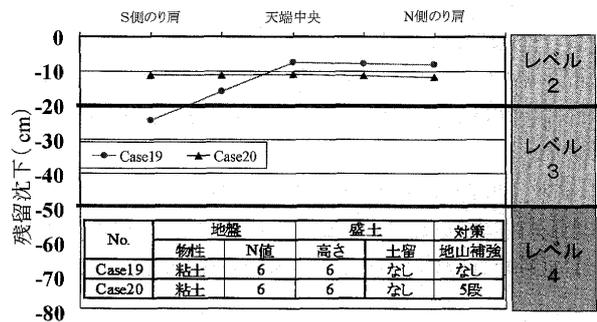


図-6.25 ネイリングの模型実験結果の比較

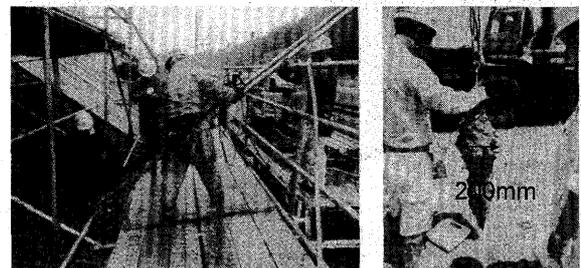


図-6.26 施工状況

(左: 打設, 右: 引抜いた改良体)

引抜いた地山補強土工の出来形はφ200mmであり、十分な改良体を造成することができた。

6.5 まとめ

東海道新幹線の盛土区間の耐震補強は、絶えず技術革新を行いながら長い年月をかけて行われてきた。

今回の脱線・逸脱防止対策は、これまでの長期不通防

止対策が土台となって実現できるものである。

盛土の新しい補強工法は従来の排水対策と法面工の要素技術を組み合わせた簡便な方法であり、降雨対策としても十分補強効果がある。実施工を踏まえ、効果・経済性・施工性に優れた対策工法となるよう改善し、鋭意安全性の向上に努めてゆく。

#### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物），丸善，2007.
- 3) 黒瀬ほか：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.
- 4) 関 雅樹・大木基裕・庄司朋宏・永尾拓洋・荒鹿忠義：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，第21回中部シンポジウム論文集，2009.
- 5) 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.
- 6) 仁杉 巖監修，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.
- 7) 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，2007.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 大木基裕・関 雅樹・荒鹿忠義・庄司朋宏・佐藤 清：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.
- 11) 大木基裕・庄司朋宏・荒鹿忠義・関 雅樹：東海道新幹線の盛土区間における脱線・逸脱防止対策，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp. 655～658，2009.
- 12) 関 雅樹：東海道新幹線の技術開発—最近の地震対策の取組—，土木技術，Vol. 65 No. 2，2010.
- 13) 永尾拓洋：鉄道盛土におけるシートパイル縮切り工法による液状化対策，基礎工，Vol. 34，No. 4，pp. 77～79，2006.
- 14) 荒鹿忠義・吉田幸司・庄司朋宏・村松浩成：軌道強化と土木構造物変位抑制工法による東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp. 553～556，2009.
- 15) 可知 隆・関 雅樹・小林幹人・永尾拓洋・古関潤一：ジオテキバッグ工法による東海道新幹線脱線・逸脱防止対策，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp. 647～650，2009.