# 東北地方太平洋沖地震の鉄道盛土再現解析 による被害要因の考察

藤原 寅士良1・中村 貴志1・谷口 善則2・高崎 秀明2・金田 淳2

<sup>1</sup>正会員 JR東日本 構造義技術センター (〒151-0578 東京都渋谷区代々木二丁目2-2) E-mail:t-fujiwara@jreast.co.jp, taka-nakamura@jreast.co.jp

<sup>2</sup>正会員 JR東日本 フロンティアサービス研究所 (〒160-0004 埼玉県さいたま市日進13-5) E-mail:yoshi-taniguchi@jreast.co.jp, h-takasaki@jreast.co.jp, j-kaneda@jreast.co.jp

東北地方太平洋沖地震では、広範囲に渡り土構造物の被害が確認された.その中で、円弧すべりモード で被災したと想定される10箇所の盛土とその近傍で被害を受けなかった盛土を対象に、鉄道土構造物の新 設時における地震時変形評価手法であるニューマーク法により再現解析を行った.

再現解析結果や既往研究からの被害要因を考慮した検討を行った結果,被災盛土は降伏震度が概して 0.3以下であった点,また降伏震度が0.3以上であっても,支持地盤に有機質土が堆積していたり,地下水 位が高く,支持地盤表層や下部盛土材料の細粒分が35%以下の場合,被害が発生していた点が確認された.

Key Words : seismic embankment damages, reproduction stability analysis, seismic damage factor

## 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では、土構造物の被害が広範囲 に確認され、主な鉄道盛土の被害報告が文献<sup>1,2,3</sup>に示さ れている.

盛土の被害条件は,盛土堤体自体の強度,支持地盤条件,地震動の強さ,地形上の環境等,様々な要因が複雑 に関係していることが知られている.

これまでの研究で述べられている被害要因の研究に関 しては、支持地盤条件、地形上の環境、地震動の強さと の関係等の要因に関する研究<sup>例えば4)~7</sup>については数多く 為されているが、盛土堤体自体の材料物性を調査し、安 定計算等の解析的アプローチから検討がなされている例 <sup>例えば899</sup>は少ない.

また,鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物(平 成19年10月)<sup>10</sup>では,一般的な線区の有道床軌道を支持 する土構造物として性能ランクⅢを定義しており,L1 地震動(設計水平震度0.2)にて安定を満足する点が照 査項目として挙げられており,L2地震時の残留変形量 照査は一般的には不要としている.L1地震動にて安定 を満足する盛土が,実際にどの程度の耐震性能を有する かを検証した事例も少ない.

このような状況を踏まえ、本研究では、東北地方太平 洋沖地震で発生した比較的大規模な盛土被害を対象に、 被災した盛土と近傍にある被災しなかった盛土に対して、 横断測量,標準貫入試験,サウンディング等を実施し, 円弧すべり安定計算を用いた再現解析を行うこととした. また,再現解析に際しては,観測された地震波を等価線 形法により基盤波に引き戻し,盛土の支持地盤条件を考 慮して地上波換算した地震波を用いて,ニューマーク法 による変形量算定も実施することとした.被災した盛土 と被災しなかった盛土で,どのような差があるかを検証 することにより,盛土の地震時被害の要因について考察 を行った.また,再現解析と既往の研究で述べられてい る被害要因と組み合わせた検討を行うことにより,鉄道 盛土の地震被害リスクについて考察を行ったので,その 結果を報告する.

## 2. 検討対象とした盛土

調査箇所を図-1に示す.調査箇所は,復旧に2週間程 度以上を要する被害を受けており,円弧すべりモードに て破壊していると想定される箇所とした.なお,東北地 方太平洋沖地震にて被災した盛土(以下,被災盛土と称 す)が調査対象であるが,その近傍にて被災しなかった 盛土(以下,未被災盛土と称す)も併せて調査し,左右 にのり面を有する盛土の場合は,極力,両方の調査,再 現解析を行うこととした.**表**-1に検討対象とした盛土 一覧を示す.なお,図-1の数字番号は**表**-1の調査箇所 No.である.また盛土名称で,末尾にDと記載してある



盛土は被災盛土を,Nと記載してある盛土は未被災盛土 を示している.

## 3. 盛土の調査項目・調査方法, および結果

## (1) 被害盛土の調査項目・調査方法

盛土の調査項目は,基本的には文献<sup>III</sup>に準ずることと しており(図-2参照),室内土質試験は表-2に示す項 目を実施することとした.

また,被災箇所は既に復旧された盛土となっているため,可能な限り,被災盛土と未被災盛土の境界部におい て調査を行うこととした.なお,三軸圧縮試験は,CU 試験を採用した.これは,地下水位以浅,以深の条件に より再現解析時の粘着力や内部摩擦角のパラメータを全 応力下,有効応力下として設定が可能なように行ったも のである.地下水位は,調査用に掘削したボーリング孔 を利用して計測を行った.

#### (2) 調査結果

調査結果一覧として、上部盛土および下部盛土の湿潤 密度、粘着力、内部摩擦角、飽和度、細粒分含有率を表 -3に示す.なお、支持地盤の調査結果は、4章で後述す る再現解析において、円弧すべり面が支持地盤に大きく 入ることはなかったので、表記を省略する.盛土材料の 物性値については、被災盛土と未被災盛土とも、ばらつ きがあり、被災盛土の盛土材料の方が粘着力や内部摩擦 角等のパラメータが未被災盛土のそれと比較して、顕著 に小さいような傾向は把握できない.

## 4. 再現解析手法と解析結果と実現象の比較

表-1 調查箇所一覧

_							
	調査 箇所 No.	線名	駅間	キロ程**	盛土 左右	被災 有無	盛土 名称
		東北	豊原-	176k970m	右	有	1-1D
	1	本線	白坂	177k360m	右	無	1-2N
					左	無	2-1N
		東北	豊原-	178k070m	右	有	2-2D
	2	本線	白坂		左	無	2-3N
				178k280m	右	無	2-4N
					左	有	3-1D
		東北	泉崎-	200k440m	右	有	3-2D
	3	本線	矢吹		左	無	3-3N
				200k505m	右	無	3-4N
		東北	鏡石-	210k650m	右	有	4-1D
	4	本線	須賀川	211k300m	右	無	4-2N
	-	東北	梅ヶ沢-	412k427m	左	有	5-1D
	5	本線	新田	412k540m	左	無	5-2N
		東北	新田-	420k820m	右	有	6-1D
	6	本線	石越	420k980m	右	無	6-2N
		Mr. en.	11	101.000	左	無	7-1N
	7	吊磐	佐貞-	48k620m	右	無	7-2N
		形	十八	-八 48k995m		有	7-3D
	0	常磐	東海-	134k900m	左	無	8-1N
	8	線	大甕	134k940m	左	有	8-2D
	0	仙山	作並-	30k200m	左	無	9-1N
	9	線	八ツ森	30k295m	左	有	9-2D



土質区分	調査項目・試験
共通	土粒子の密度試験 土の含水比試験 土の粒度試験 土の三軸圧縮試験
砂質土	—
粘性土	土の液性限界・塑性限界試験 土の湿潤密度試験

#### (1) 再現解析手法

再現解析手法は,鉄道構造物の地震時変形量を簡易に評価できるニューマーク法<sup>10</sup>を用いた.なお,再現解析上,考慮した作用係数は,**表**-4の通りであり安全率は考慮していない.また,計算上の円弧すべり抵抗係数は1.0とした.

本論では、ボーリング調査結果および室内土質試験結 果を参考として、再現解析に用いる土質定数の設定を行

被災	盛土 名称	湿潤密度ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )		粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )			内部摩擦角 φ (°)			飽和度 S <sub>r</sub> (%)		細粒分含有率 F <sub>c</sub> (%)			
		上部	下部	上部	盛土	下部	盛土	上部	盛土 下部盛士		盛土	上部	下部	上部	下部
		盛土	盛土	с	c'	с	c'	φ	φ'	φ	φ'	盛土	盛土	盛土	盛土
	1-1D	1.417	1.418	12.5	2.8	37.7	8.9	15.7	33.9	14.2	33.0	91.6	92.6	80.6	90.0
	2-2D	1.468	1.473	9.3	11.4	6.6	7.4	17.5	26.7	19.9	29.4	82.6	97.3	81.4	90.6
	3-1D	1.672	-	14.3	9.5	—	—	16.2	30.6	—	—	97.2	-	68.1	—
	3-2D	1.654	-	7.9	2.7	—	—	17.3	34.4	—	—	96.8	-	58.7	—
÷	4-1D	1.680	-	16.7	12.1	—	—	20.3	31.9	—	—	89.3	-	81.0	—
伯	5-1D	1.724	1.762	51.1	16.0	31.6	73	11.1	26.7	20.0	34.1	57.0	84.0	37.6	26.1
	6-1D	1.620	-	19.9	3.5	—	—	10.7	27.3	—	—	79.7	-	39.5	—
	7-3D	1.644	1.445	10.0	9.8	17.0	13.7	18.3	32.2	14.4	26.4	67.2	94.8	30.3	68.1
	8-2D	1.620	1.768	53.6	16.2	15.8	4.7	11.4	34.9	17.3	32.0	86.9	94.5	53.0	27.3
	9-2D	1.729	-	13.9	13.7	—	—	11.5	19.1	—	—	98.2	-	57.3	—
	1-2N	1.452	1.437	26.9	5.9	19.2	7.1	12.8	30.0	17.1	33.5	95.4	95.7	82.5	89.0
	2-1N	1.377	1.573	58.7	8.7	21.9	6.8	15.8	37.6	20.5	36.0	89.1	87.7	92.0	73.7
	2-3N	1.375	1.598	22.2	11.0	12.0	7.2	16.5	31.2	17.3	30.1	80.8	94.2	83.1	88.6
	2-4N	1.686	1.535	23.2	19.4	_	_	13.5	20.0	_	_	98.7	98.8	54.3	78.0
	3-3N	1.640	-	20.6	13.8	-	-	16.4	29.6	-	-	88.1	-	62.3	-
	3-4N	1.633	-	26.5	12.2	-	-	15.9	29.4	-	-	96.4	-	61.9	-
無	4-2N	1.826	-	8.1	8.1	-	-	23.7	32.4	-	-	99.4	-	60.0	-
	5-2N	1.742	1.787	62.0	13.5	45.5	0	7.6	13.5	19.7	37.1	90.0	93.2	27.5	39.0
	6-2N	1.633	1.643	0	0	0	0	19.5	31.7	20.5	32.8	82.3	96.7	43.2	91.3
	7-1N	_	-	—	-	_	-	-	-	_	-	_	-	-	-
	7-2N	1.643	1.462	27.5	3.0	9.1	5.3	13.6	29.8	21.2	33.3	82.1	91.6	32.3	68.3
	8-1N	1.620	1.673	6.2	4.8	45.7	18.9	25.9	35.8	10.8	28.4	79.3	82.2	54.2	37.5
	9-1N	1.797	1.710	14.9	3.2	10.7	0	15.6	26.6	16.5	22.2	93.7	95.9	29.3	52.5

表-3 上部盛土·下部盛土 地盤物性值一覧

\*c, ø は全応力下, c', ø 'は有効応力化を示す.

\*\* "-"は、データ未取得を示す.

った. 土質定数の設定にあたり,地下水位以浅を全応力下,地下水位以深を有効応力下の内部摩擦角および粘着力とした. 今回, 三軸試験結果をもとにピーク後の応力低下が見られるものについては, *c<sub>nev</sub>、 φ<sub>nev</sub>*(残留強度)を設定した. しかし,試験結果から以下のものについては,残留強度とピーク強度を同一とした.

① ピークが確認されない場合

② 残留強度がピーク強度より大きくなる場合

③ 試験結果に誤差を多く含んでいると考えられる場合 また、盛土内で深度が異なる複数の試験結果が得られ ている場合は、盛土材料の設定パラメータは、平均値と せず、図-4に示すように深さ方向の中間で盛土材料を 区分して設定した。

なお,試験結果が得られなかった土層の密度,内部摩 擦角および粘着力は,文献<sup>19</sup>に準じN値に基づいて設定 した.

地震波は、当該盛土から最も近い(独)防災科学研究 所が運営するK-NETの地震計で観測された地震波を用い て、等価線形法により工学的基盤面まで地震波を引き戻 し、現地調査により得られた支持地盤構成に基づき地震 波の地表面波を算定を行い補正した.

等価線形法の解析手法は、一次元地震応答解析 (SHAKE)を用いた.地盤解析方法の設定は表-5に示

#### 表-4 再現解析に用いた荷重の作用係数

荷重種別	作用係数
軌道荷重	1.0
土荷重	1.0
平水位・低水位	1.0
地震荷重	1.0

表-5 地盤解析における手法設定

項目	手法
飽和地盤の取扱い	全応力解析
解析領域	1次元
数值解析手法	周波数領域
非線形性	等価線形



図-4 盛土材料パラメータの区分

す通りとした.初期せん断弾性係数 $G_0$ は各土層の単位体 積重量 $\gamma_i$ と,せん断弾性速度 $V_s$ を用い,(1)式のように設 定した.なお、 $V_s$ は文献<sup>12</sup>に準じN値に基づいて算定し ている.単位体積重量は、試験値がある場合は試験値を 用い, 無い場合はN値換算により設定している.

動的変形特性は修正ROモデルを参照として,(2)式の ように設定した. α, β等のパラメータは鉄道総研から 提案されている各種土質毎のフィッティングパラメータ

(表-6)を参照し設定した. なお,本検討では地盤調 査において確認された地盤材料のみでパラメータ(α, β)を定めた.

 $h - \gamma$ の関係式は文献<sup>13</sup>を参照し(3)式のように設定した.この場合,(2)式で $G/G_0$ が算出されることから、せん断ひずみ $\gamma$ に応じた履歴減衰定数hが算出されることとなる.計算に用いたポアソン比は、文献<sup>13</sup>を参考に表-7のように定めて計算した.

$$G_0 = \gamma_t / 9.8 \cdot V_s^2 \tag{1}$$

$$G/G_0 = 1/(1 + \alpha \cdot \gamma^{\beta})$$
<sup>(2)</sup>

$$h = 2/\pi \cdot (\gamma - 1)/(\gamma + 1) \cdot (1 - G/G_0)$$
 (3)

ここに,

- G<sub>0</sub> : 初期せん断弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>)
- $\gamma_t$ : 単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)
- V<sub>s</sub> : せん断弾性波速度(m/s)
- G : せん断弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>)
- α :係数
- β :係数
- γ : せん断ひずみ
- h :履歴減衰定数

なお、観測地震波の中に基軸線がずれたデータがあっ たため、それを取り除くために、全ての観測地震波に 0.5Hzのハイパスフィルターをかけて補正処理をした.

また,観測波形はNS, EW の方向で観測されている ため,線路直角方向の波形となるよう,観測されたNS 成分とEW 成分を基に(4)式により,対象箇所の線路直角 方向の波形となるよう合成した(図-5参照).

 $(NS成分) \times \cos \alpha + (EW成分) \times \sin \alpha$  (4)

## (2) ニューマーク法による変形量解析結果と実被害の 比較

被災盛土の実際の観測変位量と再現解析から算出され た滑動変位量を表-8に示す.表-8中の「観測最大地震 動」とは調査箇所に最も近いK-NET地震計で観測された 地表面最大加速度を指す.また,「補正最大地震動」と は,前述の等価線形法により補正を行った地表面最大加 速度を指す.なお,表-8中の降伏震度が0.1以下となっ ている2-2D, 2-3N, 6-2N, 9-1Nは,安全率が最小となる 円弧すべり線を計算機に自由探索させているため,のり 面表層部に円弧すべり線が現れる結果となった.本解析

表-6 各種土質毎のフィッティングパラメータの値と 拘束圧,各物性値の範囲(鉄道総研式)

地盤材料	α	β	$G_{\rm max}(MN/m^2)$	$\sigma'_{c}(kPa)$	Ip or e	
沖 ## #ト ルト -L	195 007	0.004	2 22 - 10 02	$29.4 \sim$	Ip:1.5	
(中 作具 作白 11主 工)	155.997	0.804	5.52/~16.08	235.4	$\sim 110$	
半 建 キャ 朴 十	270.022	0 894	_	$52.0 \sim$	Ip:13.7	
供預柏江上	270.033	0.024	_	468.8	$\sim \! 49$	
シルト質士	997 410	0.817	$10.29\sim$	$13.7 \sim$	e:1.11	
✓ /V F 頁上	327.410	0.017	53.12	101.0	$\sim 1.62$	
油積砂質土	602.052	0.954	$33.71\sim$	$32.4 \sim$	e:0.673	
们们的人工	003.055	0.004	36.06	98.1	$\sim 1.416$	
<u> </u>	663 902	0.949	53.12	$68.6 \sim$	e:0.422	
厌慎吵員工	003.902	0.342	$\sim 297.72$	646.3	$\sim \! 1.045$	
磁厅十	970 765	0.738	$52.92\sim$	$49.0 \sim$	e:0.211	
味貝工	213.105	0.150	882.0	588.4	$\sim 0.266$	
北海道産火	478 314	0.832	$58.8 \sim 156.8$	98.1	e:0.773	
山灰土	470.014	0.002	50.0 150.0	50.1	$\sim$ 3.435	
関重ローム	145 839	0 752	_	$36.0\sim$	Ip:51.95	
因本 - 5	140.000	0.102		78.2	$\sim \! 67.6$	
〒 十	233 613	0.656	$35.47 \sim$	_	Ip:16.16	
<u>лт</u>	200.010	0.000	45.00		$\sim 24$	
しらす	755 197	0 010	$100.99 \sim$	_	_	
0.57	100.121	0.319	108.59		_	

※今回は地盤材料のみからα, βを設定

表-7 再現解析に用いたポアソン比

地盤の種類	ν
沖積・洪積地盤で地下水位以深	0.50
沖積・洪積地盤で地下水位以浅	0.45
軟岩	0.4
硬岩	0.3



結果は、実現象を反映している結果とは言えないため、 以下に述べる検討対象から除外することとする. なお、 実被害から想定されるすべり線と再現解析における円弧 すべり線をフィッティングさせる方法はあるが、本論で は、①解析者による差が生ずる点、②被害が発生してい ない段階での検討を目的とする点(フィッティングが目 的ではない点)から、自由探索により安全率が最小とな る円弧すべり線設定による検討を行うこととした. また、 被災盛土の実際の観測変位量は、被災直後にポールやス

<del>5175</del> 555	盛土	観測最大	補正最大	降伏	滑動変位量【解析】	変位量【観測】	盛土高さ	支持地盤が	被災歴
<b></b>	名称	地震動(gal)	地震動(gal)	震度	(mm)	(mm)	(m)	軟弱	有
	1-1D	1191	927	0.145	910	100(亀裂)	19.8	0	×
	2-2D	1086	443	0.03	3132	500(亀裂)	11.2	×	0
	3-1D	412	307	0.288	1	2000	5.3	0	0
	3-2D	412	307	0.101	343	2000	6.1	0	0
专	4-1D	548	327	0.585	0	800	2.8	0	×
伯	5-1D	2475	3028	0.686	211	1500	5.4	0	0
	6-1D	1690	2419	0.34	685	1500	5.0	0	0
	7-3D	524	205	0.255	0	1000	6.1	0	0
	8-2D	613	51	0.595	0	軽微	5.0	0	×
	9-2D	510	938	0.102	1797	大崩壊	6.5	$\times$	×
	1-2N	1247	421	0.111	330		20.4	×	×
	2-1N	1086	901	0.515	32		1.8	×	×
	2-3N	1086	962	0.026	4362		13.0	×	×
	2-4N	1086	931	0.137	417		16.4	×	×
	3-3N	412	65	0.381	0		5.6	0	×
	3-4N	412	65	0.338	0		6.1	0	×
無	4-2N	548	525	0.244	164	—	5.4	×	×
	5-2N	2475	2799	0.852	131		7.0	×	×
	6-2N	2402	1029	0.01	25631		5.8	0	×
	7-1N	524	142	0.451	0		29	0	×
	7-2N	524	142	0.442	0		3.8	0	×
	8-1N	613	141	0.452	0		4.2	0	×
	9-1N	510	1151	0.01	25296		9.0	×	×

表-8 再現解析結果および支持地盤条件・被災歴一覧

タッフ等を沿えて撮影した写真等により値を読み取って いるため、概略値であることに注意されたい.

また,**表**-8には,盛土の被災歴,また支持地盤が軟弱 か否かについても明記しておく.「被災歴有」は,盛土 が過去の降雨や地震により被災していることを指してい る.また,「支持地盤が軟弱」は,N値が0~4程度の地 層が4m以上存在する地盤であることを指している.

図 - 6に観測変位量と再現解析結果から算出された滑動変位量の関係を示す.図-6から,再現解析結果から 算出された滑動変位量と実際の観測変位量の明確な相関 を確認することは困難である.なお,図-6には,実際 の変位量が軽微であった8-2Dの観測変位量は0mm とし てプロットしている.また,実際,大崩壊に至った9-2D はプロットから除外している.

図 - 7に補正最大地震動と降伏震度の関係を示す.被 災盛土が,降伏震度が低く補正最大地震動が大きいほど, 多くなる傾向は,図 - 7から確認できない.降伏震度約 0.6と高い盛土でも,補正最大地震動が約50~300galにて 被災している結果となっている.こららの補正地震動は 観測地震動の0.1~0.7倍と小さくなっており,支持地盤 が軟弱であるため計算上の補正地震動が著しく小さくな ったことが推定される.

また、このような結果は、再現解析において算定され る円弧すべりと実際の円弧すべりの形状が一致していな いといった誤差、実際は円弧すべりモードで破壊してい なかった、地盤材料物性値の誤差、地震動補正計算の地 盤物性設定パラメータ等の誤差といったように、検討手

2500 2000 × Х ×被災 ○未被災 変位量【観測】(mm) 1500 1000 × X 500 X 00000 500 1000 1500 2000 2500 滑動変位量【解析】(mm) 観測変位量と再現解析による滑動変位量の関係 図-6 4000 ×被災 ○未被災 3000 0 動(gal) Х





\*○:該当する,×:該当しない

法における様々な誤差が重なったため、明確な傾向が確認できなかったと推定される.

これに対し,表-8から,未被災盛土は,すべて被災 歴が無かった点が確認できる.また,被災盛土は未被災 盛土に対して,支持地盤が軟弱である割合が高い点も特 徴的である.

これは、盛土の地震時被害の発生は、今回行った調査 レベル、検討レベルの円弧すべり法による再現解析から は傾向が掴めず、支持地盤の状況や被災歴といった情報 も考慮しなければ、評価が困難であることを示唆するも のである.

# 5. 再現解析結果と被害要因を考慮した地震被災 リスク検討

地震時の盛土の被害は、文献<sup>4~9</sup>に示されるように、 様々な要因が影響していることは、これまでの研究で述 べられている.今回、東北地方太平洋沖地震を対象とし て、被害要因の分析を行っておりその評価手法の一例が 文献<sup>14</sup>に述べられている.

本評価手法は、盛土高さ、盛土勾配、微地形区分、周 辺環境、排水設備の有無、計測震度、災害歴の有無、降 雨時弱点箇所の該当といった項目に対し配点を行い、そ の配点の合計(以下,評価点と称す.)が大きいほど、 地震時に被害を受けるリスクが高いとするものである

(表-9参照).文献<sup>40</sup>では、本配点は、評価点が80点 以上となる場合は被害規模大となる確率が80%以上,評 価点が58点以上の盛土は被害規模中となる確率が60%以 上となるように設定されている.なお、「被害規模 大」とは、大規模な軌道変状を伴う沈下および盛土の崩 壊、「被害規模中」とは、小規模な軌道変状を伴う沈下 および盛土表層の流出と定義している.

図-8に、評価点を横軸に、降伏震度を縦軸にして 被災盛土と未被災盛土が判別可能なようにプロットした グラフを示す.

図-8から,評価点が高く,降伏震度が0.3以下の範囲 にある盛土の被災率が高いことが確認できる.また,評 価点が低くとも,降伏震度が0.2以下の盛土は被災して いる状況が確認できる.

降伏震度が0.3以上あったにも関わらず,被災した盛 土に5-1D, 6-1D, 4-1D, 8-2D が挙げられる. 観測最大地 震動に関して、5-1Dは2475gal, 6-1Dは1690galと非常に強 い地震動作用を受けたために被災したと考えられる.ま た、5-1D, 6-1D, 8-2Dは、地下水位が高く、盛土下部に 地下水が入り込んでいて、支持地盤付近の地盤や盛土材 料が細粒分含有率35%以下の地盤であった.また、4-1D は支持地盤中に約0.8mの有機質土層を含み地下水位も高 い状況であった.

表—9	盛十の被害要因項目の配点例 <sup>14</sup>	F)
·		

調査項目	評価区分	配点
	H<2	0
母に中々	2≦H<4	2
└II)[…]	4≦H<6	10
(H) [m]	6≦H<8	15
	8≦H	20
	2.0≦x	0
	1.6≦x≪2.0	2
盛土勾配	1.4≦x<1.6	4
(1:x)	1.2≦x<1.4	6
	1.0≦x<1.2	8
	x<1.0	10
	下記以外	0
	崖錐・麓屑面・土石流堆,丘陵, 上位面,中位面,下位面,洪積台 地,台地段丘状の地形,砂礫質台 地,扇状地	10
微地形 区分	凹地・浅い谷,自然堤防, 谷底 平野・氾濫平野,谷底低地,平坦 化地	20
	山地,火山性丘陵,ローム台地, 切土斜面,自然堤防・砂州・砂 堆,海岸平野・三角州,三角州・ 海岸低地,後背低地,後背湿地, 旧河道,盛土地,埋土地,干拓地	30
国辺彊悟	下記以外	0
问起來死	畑,草地,水田	30
排水設備		0
	無	2
	<u>I &lt;5.8</u>	0
計測震度	5.8≦I<6.0	4
(I)	<u>6.0≦I&lt;6.2</u>	6
~ ~ ~	<u>6.2≦I&lt;6.4</u>	8
	<u>6.4≦ 1</u>	10
災害歴		0
	有	20
降雨時	該当しない	0
羽息固肝	該当する	15
	評価点(最大値)	137



図-8 降伏震度と評価点の関係

評価点が高く、降伏震度が0.3以下にも関わらず、被災 しなかった盛土に1-2N、2-4N、4-2Nが挙げられる.1-2N、 2-4Nの両者に共通する特徴は、支持地盤に洪積層の礫や 岩が存在する点であった.4-2Nは、4-1Dに対して腐植土 層が存在していなかった点、傾斜地盤ではなく水平成層 地盤であった点が被災しなかった要因と推察される.

評価点が低いにも関わらず被災した盛土に9-2Dが挙げ られる.本盛土は,被災時は融雪期で雪を被っており, また,沢地形に位置し常に水が供給されて地下水位が高 い状態にあった盛土のため被災したと推定される.

以上より,評価点が高く降伏震度が0.3以下となる盛 土の地震被災リスクが高い点,評価点が低くても降伏震 度が0.2以下の盛土の地震被災リスクが高い点が推察さ れる.

また、仮に降伏震度が高くても、支持地盤に有機質土 層を含んでいたり、下部盛土材料や支持地盤上層が細粒 分が低い砂であり地下水位が高い場合は、地震時被災リ スクが高い点が考えられる.これらの盛土は、「円弧す べり」モードの変形ではなく、「ストレッチング」や下 部盛土や支持地盤の「流動」モードで破壊したと推察さ れる.

# 6. まとめ

本論では、東北地方太平洋沖地震において円弧すべり モードで比較的大きな被害を受けたと想定された盛土と その近傍の盛土を対象に、円弧すべり安定計算及びニュ ーマーク法を用いた再現解析を実施し、被害要因に関す る考察を行った.また、その被害要因と再現解析結果か ら地震被害リスクの高い盛土の特徴について考察を行った.

得られた考察結果を以下に述べる.

- 再現解析結果から算出された滑動変位量が大きいほど、実際の観測変位量が大きくなる傾向とはならなかった.これは、再現解析と実現象の変形モードの誤差、地震動補正方法の誤差や、地盤物性値の誤差等、複数の誤差が重なったためと考えられる.
- ② 盛土高さ、盛土勾配、微地形区分、周辺環境、排水設備の有無、計測震度、災害歴の有無、降雨時弱点箇所の該当といった項目による評価を行い、その評価点が高く、降伏震度が0.3以下である盛土の地震被害リスクが高い点が確認された。
- ③ 仮に降伏震度が高くても、支持地盤に有機質土層を 含んでいたり、下部盛土材料や支持地盤上層が細粒 分が低い砂であり地下水位が高い場合は、地震時被 災リスクが高い点が推察された.これらの盛土は、 変形モードが「円弧すべり」ではなく、「ストレッ チング」もしくは下部盛土の「流動」で破壊したと 推察される.

今後は,再現解析時の円弧すべり形状のフィッティン グ等を実施し,その精度を高めるとともに,項目評価の 精度を高めて,盛土の地震時リスクの評価手法の向上に 努めたいと考えている.

**謝辞**:本論を執筆するにあたり,(独)防災科学研究所 により運用されているK-NETのデータを利用させていた だきました.関係各位に感謝申し上げます.

#### 参考文献

- 1) 特集「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」,東日本旅客鉄道株式会社編,SED,No.37,2011.11.
- 中村貴志,金田淳,藤原寅士良,高崎秀明,橘内真 太郎,川嵜淳:東北地方太平洋沖地震における盛土 の被害要因分析,東日本旅客鉄道株式会社編,SED No.42, pp.66-75, 2013.11.
- 中村貴志,藤原寅士良,金田淳,高崎秀明:東北地 方太平洋沖地震の盛土被害再現解析による盛土被害 要因の考察,東日本旅客鉄道株式会社編,SED, No.43, pp.72-81, 2014.5.
- 那須誠:地盤被害が大規模に生じた盛土や自然斜面 と地盤の関係,第26回地震工学研究発表会講演論文 集,pp.101-104,2001.8.
- 高浜勉,翠川三郎:地盤条件を考慮した鉄道構造物の被害関数の構築,日本地震工学会論文集,第9巻, 第5号, pp.42-56, 2009.
- 国富和眞、小林育夫、松井保、山崎聡一、安川郁夫:阪神・淡路大震災による道路盛土被害の構造的要因分析、日本地震工学シンポジウム論文集、vol.10-1、pp.437-442、1998.
- 丸山喜久、山崎文雄、用害比呂之、土屋良之:新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係、土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.208-216, 2008.
- 8) 石塚真記子,松丸貴樹,渡辺健治,小島謙一,舘山 勝,篠田昌弘:2004 年新潟県中越地震で被災した鉄 道盛土の動的応答解析,第21回ジオシンセテックス シンポジウム論文集,2006.
- 9) 堀井克己, 舘山勝,小島謙一,渡辺健治,篠田昌 弘:2004 年新潟県中越地震で被災した鉄道盛土の滑 動変位量にもとづく復旧性能の評価,ジオシンセテ ィックス論文集,第21巻,2006.
- 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,2007.1.
- 11) 東日本旅客鉄道株式会社編:土構造物耐震補強設計 マニュアル, 2014.05.
- 12) 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同 解説 基礎構造物,丸善,2000.6.
- 13)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,丸善,2012.9.
- 14)藤原寅士良、中村貴志、高崎秀明、金田淳:東北地 方太平洋沖地震における鉄道盛土の再現解析結果に よる被害要因差の考察,第34回地震工学研究発表会 論文集,2014.10.(投稿中)

# A STUDY ABOUT FACTORS WHICH CAUSED RAILWAY EMBANKMENT DAMAGES BY REPRODUCTON STABILITY ANALYSIS

# Torajiro FUJIWARA, Takashi NAKAMURA, Yoshinori TANIGUCHI, Hideaki TAKASAKI and Jun KANEDA

2011 Off the Pacific Coast Tohoku Earthquake caused damages of railway embankments in East Japan area widely. We calculated the deformation of circular slip mode damaged and nearby no-damaged railway embankments within about 10 areas by Newmark method(circular slip surface analysis).

This study says that railway embankments of which yield seismic intencity is less than 0.3 was sevierly damaged. Neverthless, those of which yield seisimic intencity is over than 0.3 was sivierly damaged in case that the groundwater leve was high, and the fine fraction content of lower embankment materials or upper ground soils were less than 35%, or bearing stratum contained thick organic soil layer, and so on.