

Ⅲ - A106

兵庫県南部地震における鉄道盛土の破壊メカニズムの検討

(株)日産技術コンサルタント 正 山村 真由子
 大阪市立大学工学部 正 望月 秋利
 阪急エンジニアリング(株) 正 庄 健介

1. はじめに

兵庫県南部地震では、阪神地区の24区間で鉄道盛土が被害を受けた。擁壁の転倒、倒壊、沈下、法面の変形、クラック等が主であるが、大崩壊に至ったものはない¹⁾。しかし、これらの被害は、通常地盤が悪い地域(沖積層等)に集中すると考えられてきたが、今回の被害の約半数は地盤が良いとされる段丘礫層地帯で発生した。本解析で対象とした阪急神戸線、岡本―御影駅間の盛土区間も、山手近くに位置し、地層は段丘層に分類されるが、被害は大きい部類に入る。そこでこの盛土を対象に二次元動的応答解析を行い、破壊のメカニズムを検討することにした。材料定数は、ボーリング調査が少ないので、既存資料をもとに地域全体の地盤構造を検討し、それに基づいて推定した。まずN値と地盤特性をもとに、段丘礫層と洪積礫層を区分した。次いで神戸地域のPS検層結果および地層区分を考慮し、Vs値を推定した。解析では、①地表の最大加速度が500～600Galである、②擁壁には、地表付近に水平クラックが発生した、③盛土天端は約50cm沈下した、④擁壁は天端で約75cm前傾した、等を説明する必要がある。本論文では主として、「もたれ擁壁(8m)の安定と壁のクラック発生メカニズム」について検討した結果をまとめた。

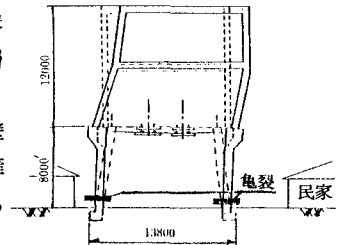


図-1 被害状況図

2. 解析地点の被害、地質、および解析条件

解析を行ったのは被災盛土区間550m(盛土高2～8m)の内、盛土高さ8m地点の断面である。まさ土を堤体とする、勾配1:0.15のもたれ擁壁(無筋コンクリート)構造物である。擁壁は、玉石を積み上げた部分を含んで1mの厚さがあるが、これをコンクリート部の厚さ0.5mで解析し、転倒解析(表-2)では玉石部分の圧縮抵抗も可能と考えて、0.75mで検討した。図-1に被害状況図を示す。擁壁下部にクラックが入り、天端で約75cm程開口した。表-1に解析定数の一覧を示す。付近の地盤は洪積礫層と段丘礫層がほとんどを占めるが、一部砂層、粘土層を挟む。地盤解析部分の横幅を80m、深度を20mとし、解析下層面を「半無限境界」とした。せん断波速度(Vs)は神戸地域の計測結果(5地点)を基にして得た実験式(1)で推定した。解析プログラムには、二次元応答解析(FLUSH)を用いた。動的解析は簡単のため、盛土幅14m、擁壁厚さ0.5mの直壁盛土として解析した。また現地付近で地表最大加速度500～600Galが推定されており、神戸大学内の岩盤上で得られたNS波を解析基盤面に入力したところ、地表で約530Galを得たため、妥当な応答値と判断し、NS、UD波ともに記録波をそのまま解析に用いた。

$$V_s = B \times N^{0.01} \times H^{0.025} \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

	砂礫	砂	粘土
B	$60.63 \times N^{0.44}$	$62.12 \times N^{0.43}$	$96.94 \times N^{0.30}$

表-1 解析定数一覧表

8 (m)	N値	ρ (tf/m ³)	Vs (m/s)
7	7	142.9	一面強度
6	7	146.9	$c' = 2.4$ (tf/m ²)
5	7	148.8	$\phi = 41.5^\circ$
4	7	150.0	
3	7	151.0	
2	9	169.3	三軸強度
1	9	170.0	$c_u = 4.3$
0	9	170.6	$\phi_s = 37.7^\circ$
0.8	擁壁	2.5	2248.0

深度(m)	材料	N値	ρ (tf/m ³)	Vs (m/s)
0.8	砂	8	1.80	151
3.0	礫	17	2.00	221
5.0	礫	23	2.00	257
5.5	粘土/礫	5/35	1.54/2.00	165/314
6.0	粘土/礫	5/35	1.54/2.00	165/314
8.2	礫	35	2.05	315
11.5	礫	55	2.05	390
12.0	粘土/礫	10/60	1.58/2.05	208/406
16.0	礫	70	2.10	438
20.0	礫	80	2.10	470

段丘層と
洪積層の境界

キーワード: 兵庫県南部地震、地震時土圧、擁壁、引張応力、二次元応答解析、クラック

連絡先: 〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138 TEL 06-605-2726 FAX 06-605-2726

3. 解析結果と破壊メカニズムの検討

図-2は解析のフロー図である。実際の構造物はいもたれ擁壁であるが、解析条件が単純な鉛直壁についてまず行い、次いでいもたれ擁壁について検討した。表-2に解析検討表を示す。Aでは「鉛直壁」、Bでは「いもたれ擁壁」の検討結果を示す。水平土圧は、自重による常時土圧を計算により求め、次いで上下動と水平動による地震時・水平土圧（各高さで求めた応答値）を合計したものである。

まず擁壁の転倒安定を検討した（表-2、2.1）。モード1は図(3)中のA点を、モード2（図(4)）はB点を転倒中心としたものである。転倒安全率(F_{SM} =抵抗モーメント/回転モーメント)の小さいモード2が生じる。しかし、転倒過程で受働土圧の抵抗を受け、転倒中心はB→Cへ移動する（モード2'）。これによって F_{SM} は0.1まで上がる。このメカニズムが「いもたれ擁壁」についても同様に成り立つと考え、 $F_{SM}=0.32$ を得る。

次に、クラックを生じた擁壁下部（図(8)F点）でのモーメントを計算し、擁壁の縁応力を求めると、 -55.4 kgf/cm^2 ($F_{SM}=0.51$)を得る（表-2中の2.1及び2.2）。したがって、転倒が始まるとほぼ時を同じくして壁にクラックが発生したことが推定される。また、転倒及び引張破壊応力を越えるような波が数波存在することから、複数回の破壊応力を受けながら徐々に擁壁が開く、という過程を経たのではないかと考えられる。

4. まとめ

今回の検討では既知情報が少なく、解析の厳密さを欠く点もあるが、擁壁が複数回の引張強度を超える破壊応力を受けて、擁壁のクラックが発生し、擁壁天端が徐々に開いていったことを説明できた。盛土構造物の地震被害は「壊滅的」ではなく、また被害後の対策も対応しやすいので、条件が整うところでは今後も取り入れてよい構造であると言える。

謝辞

本解析は阪神淡路大震災調査研究委員会の活動の一環として実施したもので、委員会から資料の提供を受けました。また解析で用いたFLUSHは（株）地震工学研究所から提供を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編集委員会：よみがえる鉄路，山海堂，第2章

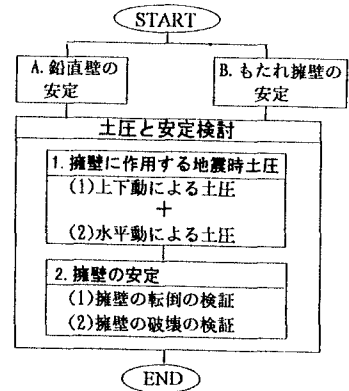
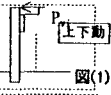
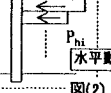
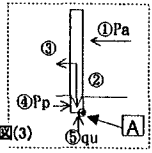
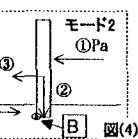
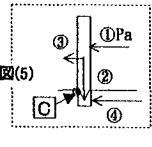
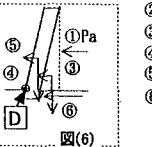
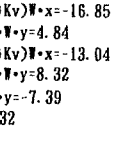
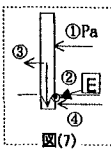
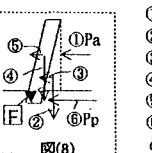


図-2 解析フローチャート

表-2 解析検討表

A. 鉛直壁	B. いもたれ擁壁	 
1.1 上下動による土圧 $P_v = P_{v\text{常時}} + \Sigma P_{vi\text{地震時}} = 0.72 \text{ tf/m}$ 1.2 水平動による土圧 $P_h = \Sigma P_{hi} = 23.15$ 上下+水平: $P_a = P_v + P_h = 23.87 \text{ tf/m}$	同左	
2.1 擁壁の転倒検証 モード1 ① $M_r = \Sigma P_{ai} \cdot y_i = 120.8 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ② $M_r = (1+K_v) \cdot W \cdot x = 4.125$ ③ $M_r = K_h \cdot W \cdot y = 10.16$ ④ $M_y = P_p \cdot y = -6.49$ ⑤ $M_y = q_u \cdot A \cdot x = -43.5$ $F_{SM} = 0.37$ 	2.1 擁壁の転倒検証 (省略)	
モード2 ① $M_r = \Sigma P_{ai} \cdot y_i = 120.8 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ② $M_y = (1+K_v) \cdot W \cdot x = -4.125$ ③ $M_r = K_h \cdot W \cdot y = 10.16$ ④ $M_y = P_p \cdot y = -6.49$ $F_{SM} = 0.08$		
モード2' ① $M_r = \Sigma P_{ai} \cdot y_i = 101.7 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ② $M_y = (1+K_v) \cdot W \cdot x = -4.125$ ③ $M_r = K_h \cdot W \cdot y = 8.32$ ④ $M_y = P_p \cdot y = -7.39$ $F_{SM} = 0.10$ 	モード2' ① $M_r = \Sigma P_{ai} \cdot y_i = 101.7 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ② $M_y = (1+K_v) \cdot W \cdot x = -16.85$ ③ $M_r = K_h \cdot W \cdot y = 4.84$ ④ $M_y = (1+K_v) \cdot W \cdot x = -13.04$ ⑤ $M_r = K_h \cdot W \cdot y = 8.32$ ⑥ $M_y = P_p \cdot y = -7.39$ $F_{SM} = 0.32$ 	
2.2 擁壁の破壊の検証  ① $M_r = \Sigma P_{ai} \cdot y_i = 101.7 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ② $M_r = (1+K_v) \cdot W \cdot x = 4.125$ ③ $M_r = K_h \cdot W \cdot y = 8.32$ ④ $M_y = P_p \cdot y = -7.39$ ⑤ $\sigma = (\Sigma M/I) \cdot y = 64.1 \text{ kgf/cm}^2$ $> \sigma_T = 28 \text{ kgf/cm}^2$	2.2 擁壁の破壊の検証  ① $M_r = \Sigma P_{ai} \cdot y_i = 101.7 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ② $M_y = K_h \cdot W \cdot y = -16.85$ ③ $M_r = K_h \cdot W \cdot y = 4.84$ ④ $M_y = (1+K_v) \cdot W \cdot x = -13.04$ ⑤ $M_r = K_h \cdot W \cdot y = 8.32$ ⑥ $M_y = P_p \cdot y = -7.39$ ⑦ $\sigma = (\Sigma M/I) \cdot y = 55.4 \text{ kgf/cm}^2$ $> \sigma_T = 28 \text{ kgf/cm}^2$	

*参考図中の○印は回転中心