

I-B 330 非線形動的解析による地下構造物の損傷過程と免震効果の検討

(株)鴻池組土木本部土木設計部 ○正会員 笹川 基史

同上 正会員 嶋村 貞夫

同上 正会員 河西 寛

1. まえがき

兵庫県南部地震では、地下鉄駅舎部の中柱が圧潰し、地表の道路が陥没する被害が生じた。本報告では、地盤と構造物部材の両方の材料非線形性を考慮した地震応答解析により、被害を受けた地下構造物の損傷過程を分析するとともに、柔らかいクッション材で構造物を包み込むことによる免震効果について検討した。

2. 解析モデルおよび条件

検討の対象とした地下構造物は、中柱が連続して圧潰した区間のRCボックスラーメン（幅は17.0m、高さが7.17m）で、断面中央部には高さ3.82m、幅0.4m、奥行き1.0mの鉄筋コンクリート製の支柱（以降、中柱と呼ぶ）がトンネル軸方向に3.5m間隔で並んでいる。解析は、地盤と構造物部材の両方の材料非線形性を考慮できる2次元有限要素解析コード「TDAPIII」を用い、トンネル横断方向について実施した。図-1に地盤条件および要素分割図を示す。紙面の制約から解析条件の詳細は省略するが、構造物部材に関しては、曲げとせん断に対する非線形性を考慮した梁要素でモデル化した。地盤に関しては、せん断剛性のひずみ依存性をHardin-Drnevichモデルで考慮した平面ひずみ要素でモデル化した。地盤および構造物の入力定数は、文献1)～2)を参考に表-1～3に示すように設定した。解析モデル底面への入力加速度波形は、関西地震観測研究協議会の神戸大学観測点で得られたNS成分の速度記録を周波数領域で微分して求め、その主要動付近の10秒間を用いた。図-2に、その加速度波形（最大加速度270Gal）を示す。

3. 解析結果および考察

図-3は、自重解析の後、地震動を与えた解析結果より、構造物部材に生じる損傷の状況を示したものである。側壁には、上部ハンチ付近に曲げひびわれが生じるが、鉄筋が降伏する状態までには至らない。上床版と下床版にも側壁ハンチ付近に同様な曲げひびわれが生じる。一方、中柱には、柱上下端に曲げひびわれが生じ、広範囲にせん断破壊が生じる。これらの損傷の過程を分析すると、最初に下床版端部の曲げひびわれが発生し($t=2.68$ 秒)、ほぼ同時に側壁上端の曲げひびわれ、続いて中柱および上床版の曲げひびわれ($t=2.89$ 秒)、最後に中柱のせん断破壊が発生している($t=2.93$ 秒)。

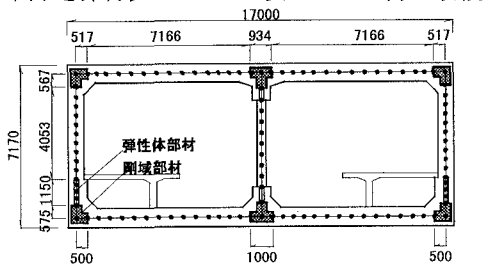
中柱のせん断破壊は、使用した解析コードの制約から、曲げモーメントや軸力の動的変化の影響を考慮できていないので、中柱が全長にわたってほぼ同時にせん断破壊する結果となったが、実際には曲げモーメントの大きい柱上端か、または下端で起きるものと推察される。また、せん断破壊後も耐力相当のせん断力を保持するとともに、曲げモーメントと軸力もそのまま伝えてしまうため、せん断破壊が起きた後の結果は実際の現象を精度よく再現しているとは言い難い。このことから、前述した損傷状況とその過程の分析結果は、せん断破壊が生じる迄の解析結果を用いて行った。なお、入力最大加速度をパラメータとした解析結果では、中柱のせん断破壊は入力最大加速度が150Galを越えると発生した。

これらの結果より、検討対象の地下構造物の被害は、中柱の上端か下端でせん断破壊が生じたことにより、上床版が上載土の重さに耐えきれず折れ曲がった結果として生じたものと推定される。

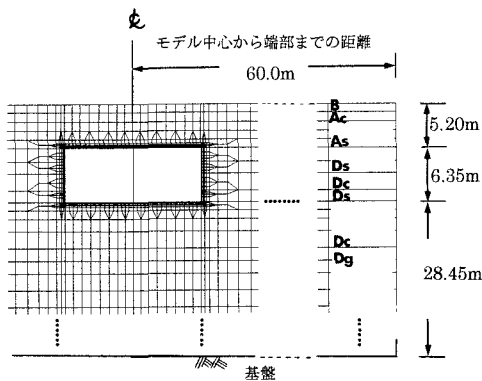
地下構造物の耐震性能を高める場合には、地盤変形がそのまま構造物に伝わらないように柔らかいクッション材（以降、免震材と呼ぶ）を構造物と地盤との間に設置する方法が有効な方法のひとつとなる。図-4は、構造物の全周に表-4に示す免震材（表等方質弾性体でモデル化）を設置したことによる地震時断面力の低減効果を、中柱下端のせん断力と側壁上端ハンチ付近の曲げモーメントを例として示したものである。図中の白抜き記号が自重解析後の初期断面力を、塗りつぶし記号が解析時間中の地震時最大断面力を表す。

中柱のせん断力に関しては、せん断弾性係数が 10 tf/m^2 で、厚さ 40 cm の免震材を設けた場合、最大せん断力は耐力以内に収まり、せん断ひずみは免震材がない場合の 8% に低下する。このケース以外でも、免震材を設けることにより、中柱に生じるせん断ひずみを免震材のない場合の半分程度以下に低下させる効果が認められる。側壁の曲げモーメントに関しても、せん断弾性係数が 10 tf/m^2 で、厚さが 30 cm 以上の免震材を設けた場合、曲げひびわれ発生モーメント以内に収まり、曲率も免震材のない場合の 20% 以下に低下する。

免震材の違いが免震効果に及ぼす影響を構造物部材のせん断ひずみと曲率で評価すると、層厚よりもせん断弾性係数の影響が大きく、その影響は側壁の曲げモーメントよりも中柱のせん断力に大きく現れる。これらの免震効果は柔らかい免震材を設けるほど大きくなるが、これは柔らかい免震材ほど構造物周辺地盤の剛性低下を抑制することにより、地盤に対する免震材の剛性が相対的にさらに小さくなるためと考えられる。



(a) 構造部材概形



(b) 全体モデル概形

図-1 解析モデル概要

表-1 地盤の入力定数

土質	γ (tf/m ³)	G_0 (tf/m ²)	$\tau_y (\times 10^{-4})$	ν
B	1.6	1633	10.0	0.45
Ac	1.7	1735	16.7	0.45
As	1.8	3600	10.0	0.45
Ds	2.0	9878	5.9	0.49
Dc	1.8	7347	7.1	0.49
Ds	1.9	7755	5.9	0.49
Dc	1.8	10580	7.1	0.49
Dg	2.1	34286	5.9	0.49

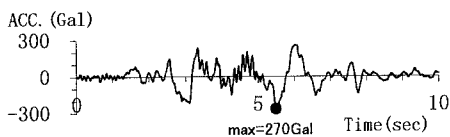
 全層 減衰定数 $h=0.05$


図-2 入力波形

参考文献

- 1) 廣戸敏夫他：神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析，阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集，土木学会，1996。
- 2) 飯田廣臣他：実験に基づく大開駅の既設および復旧柱の耐力および変形性能，阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集，土木学会，1996。

表-2 構造物の入力定数

部材	E (tf/m ²)	A (m ²)	I (m ⁴)	備考
側壁	3000000	0.718	0.030	非線形材料
側壁 (下部)	3000000	0.868	0.053	弾性体材料
中柱	3100000	0.154	0.022	非線形材料
中柱 (上部)	3100000	0.268	0.004	弾性体材料
中柱 (下部)	3100000	0.268	0.004	弾性体材料
上床版	3000000	0.837	0.047	非線形材料
下床版	3000000	0.892	0.056	非線形材料

全部材 $\gamma=2.5 \text{ tf/m}^3$ $\nu=0.2$ $h=0.02$ 有効せん断断面積比 $=1.00$
 非線形特性は曲げがトリコ型，せん断が π 型でモデル化

表-3 構造物の非線形特性

部材	検討位置	曲げ耐力 (tf・m/m)			終局せん断耐力 (tf/m)
		ひびわれ	降伏	終局	
側壁	頂部	35.4	54.3	57.8	46.0
中柱	頂部	10.8	39.1	42.5	7.9
上床版	端部	46.0	114.1	123.9	53.3
下床版	端部	54.0	133.8	145.8	56.9

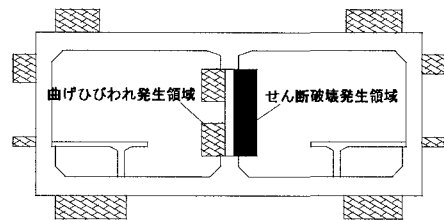


図-3 構造部材の損傷状況

表-4 免震材の物性値

記号	◆◇	●○	▲△	■□
材厚 (cm)	30	30	40	40
G (tf/m ²)	10	30	10	30

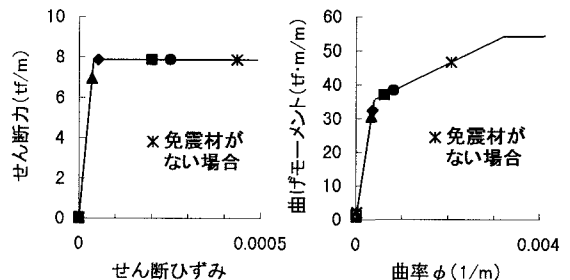
 全ケース $\gamma=1.2 \text{ tf/m}^3$ $\nu=0.49$ $h=0.03$


図-4 免震材による断面力低減効果