

時刻歴応答解析による地下鉄駅舎の被災メカニズムの一考察

若築建設土木本部設計部 正会員 酒井久和
早稲田大学理工学部 正会員 清宮 理

1. はじめに

阪神・淡路大震災の際に甚大な損傷を受けた神戸高速鉄道・大開駅の横断面を対象として、その被災メカニズムを検討する目的で事例解析を行う。解析は2次元FEMによる時刻歴応答解析で、地盤および構造物の非線形性を考慮する。

2. 解析モデルおよび検討方法

地盤は平面ひずみ要素で、その非線形性は地盤を弾性-完全塑性体とし、破壊規準をMohr-Coulombの破壊規準に従うと仮定する。解析に用いる土質分布および解析メッシュを図-1に、地盤物性値を表-1に示す。ただし、解析対象周波数は20Hzまでとしてメッシュ分割を行った。一方、構造物はTimoshenkoの梁理論に基づくBeam要素で、非線形性はせん断に対して弾性-完全塑性体、曲げに対してtri-linearな性状を示すと仮定する。既往の研究の震災前後の横断面¹⁾から、地震時保有水平耐力を算定し²⁾、 $Q-\gamma$ （せん断力-せん断ひずみ）、 $M-\phi$ （曲げモーメント-曲率）関係を設定する。また、地盤および構造物の減衰は、Rayleigh減衰で系の1次の固有振動数と10Hzで減衰定数が5%となるよう設定した。また、側方および底面は粘性境界とする。

解析に用いる入射波は、神戸海洋気象台(JMA)のNS、UD方向の観測波及びポートアイランドK.P.-79mのNS方向の推定波³⁾(PI-IDT)とUD方向の観測波(PI)で、それぞれ2Eと考えて基盤面に入射する。(図-2参照)

検討方法は部材のせん断および曲げの塑性率を次のように定義し、塑性率の値によって部材の破壊状態を推定する。

せん断塑性率

$$\mu_Q : \mu_Q = \delta / \delta_u$$

ここに、 γ_u は終局せん断ひずみを表す。

曲げ塑性率 μ_M :

$$\mu_M = \phi / \phi_c \quad (\phi < \phi_c)$$

$$\mu_M = 1 + (\phi - \phi_c) / (\phi_y - \phi_c) \quad (\phi_c \leq \phi < \phi_y)$$

$$\mu_M = 2 + (\phi - \phi_y) / (\phi_u - \phi_y) \quad (\phi_y \leq \phi < \phi_u)$$

$$\mu_M = 2 + \phi / \phi_u \quad (\phi \leq \phi_u)$$

ここに、 ϕ_c 、 ϕ_y 、 ϕ_u はそれぞれ、ひび割れ時、降伏時、終局時の曲率を表す。したがって、 $1 \leq \mu_M < 2$ でひび割れ破壊状態、 $2 \leq \mu_M < 3$ で降伏破壊状態、 $3 \leq \mu_M$ で終局破壊状態にあることを意味する。

3. 解析結果および考察

前述の2種類の入射波に対してNS成分のみ作用する場合およびNSとUD成分を同時入射する場合について解析を行った。せん断および曲げの塑性率の最大値を表-2に表す。

表-2より、まず曲げに関しては、各部で $1 \leq \mu_M \leq 2$ 、すなわち、

キーワード：埋設地下構造物、非線形動的解析、耐震性

〒153 目黒区下目黒 2-23-18 TEL 03-3492-0495 FAX 03-5487-3867

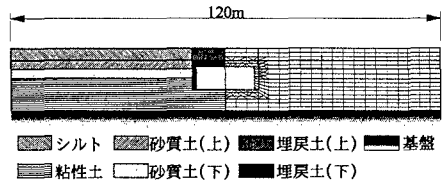


図-1 土質分布および解析メッシュ

表-1 地盤物性値

土質	深度 (m)	Vs (m/sec)	γ (tf/m ³)	ν	ϕ (°)	c_u (tf/m ²)
シルト	0.0~3.4	140	1.7	0.33	0	4.0
砂質土(上)	3.4~5.8	140	2.0	0.49	40	0.0
砂質土(下)	5.8~8.4	220	2.0	0.49	30	0.0
粘性土	8.4~17.5	190	1.9	0.49	0	9.6
埋戻土(上)	0.0~3.4	140	1.9	0.33	27	0.0
埋戻土(下)	3.4~17.5	140	1.9	0.49	27	0.0
基盤	17.5~	330	2.0	0.49	—	—

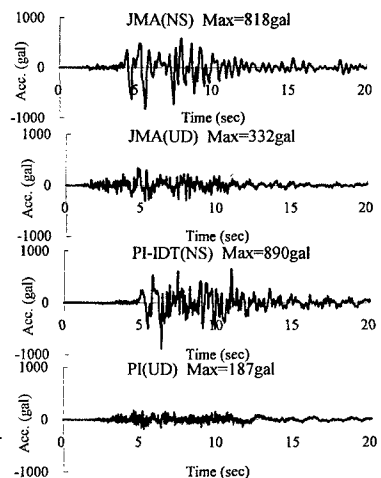


図-2 入力地震動

ひび割れ破壊は起こすが、降伏破壊は起こさない範囲にあったことが分かる。次に、せん断に関しては、側壁上下端部および中柱において、塑性率が1を遥かに上回り、非常に厳しい状態にあったことが推察される。

しかし、上床版に関しては、塑性率は1以下で、曲げに関してもひび割れが発生する程度のモーメントしか作用していないことから、上床版の損傷は、他部材の破壊による構造系の変化が要因であると考えられる。

ここで、表-2 だけでは構造物の崩壊原因を特定できないことから、塑性率の時間的変化に着目する。図-3 に、JMA(NS+UD)の場合の側壁（海側）と中柱の塑性率の時刻歴を示す。

図-3 より、まず中柱に関しては、4.3 秒付近で、上下端部のせん断、曲げ塑性率および中央部のせん断塑性率が、ほぼ同時に1を越えて、塑性域に入っている。しかし、解析ステップ毎に塑性率の変化を注視すると、このうち、下端部のせん断ひずみが終局せん断ひずみに達するのが最も早く、次いで、中央部、上端部と順に終局せん断ひずみに達することが分かる。一方、曲げに関しては、それより少し遅れて、下端部、上端部の順に曲げモーメントがひび割れ曲げモーメントに達している。しかし、下端部の曲げモーメントは、せん断破壊に至るまでは上端部よりも小さく、せん断破壊後に下端部に作用する水平力の増分をせん断が受け持たないために、上端よりも先にひび割れ曲げモーメントに達したと考えられる。したがって、中柱の破壊は、曲げによるひび割れが構造的弱点となりせん断破壊を起こす曲げせん断破壊ではなく、単なるせん断破壊によるものであると考えられる。これは、実際に中柱の下端部が破壊箇所となっているものが多い被災状況とも一致しており、もし、曲げによるひび割れが誘因となり、破壊が起こったとするならば、前述のように上端の曲げモーメントの方が下端よりも、ひび割れ曲げモーメントに達するのが早くなるために、上端部でひび割れによる構造的弱点が生じ、せん断破壊に至るはずであることから裏付けられる。

次に、側壁部では、4.5 秒付近で側壁上端のせん断、曲げ塑性率が1を多少越えている。しかし、表-2 で示したような大きな塑性率が生じるには、さらに時間を要することから、側壁上端部の破壊は中柱の崩壊による構造系の変化が要因となっていると考えられる。

ちなみに、上述の事項は PI-IDT の場合も同様に当てはまる。

最後に上下動の影響は、表-2 より、上床版および側壁部において、概して上下動を考慮した方が大きなせん断塑性率となっている。これは、上床版で上下動による動土圧が直に荷重として作用するため、また、強震時には上下動を入射することで土の非線形性がより進行するためであると考えられる。

参考文献

- 1) 廣戸敏夫・梅原俊夫・青木一二三・中村晋・江崎順一・末富岩雄：神戸高速鉄道・大開町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会論文集、1996。
- 2) 日本道路協会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説案、1995。
- 3) 酒井久和・澤田純男・土岐憲三：地盤の非線形性を考慮したポートアイランド基盤入力地震動の推定、第24回地震工学研究発表会投稿予定、1997。

表-2 部材のせん断および曲げ塑性率の最大値

部材	位置	JMA				PI-IDT			
		NS		NS+UD		NS		NS+UD	
		μ_Q	μ_M	μ_Q	μ_M	μ_Q	μ_M	μ_Q	μ_M
側壁 (海側)	上端	1.71	1.03	4.45	1.04	1.34	1.02	1.19	1.03
	中央	0.74	0.40	0.87	1.02	0.67	0.41	0.69	0.47
	下端	1.21	1.03	2.25	1.04	0.95	1.01	0.93	1.01
側壁 (山側)	上端	1.84	1.04	2.27	1.04	1.09	1.03	1.52	1.03
	中央	0.78	0.64	0.95	0.86	0.66	0.43	0.65	0.52
	下端	1.37	1.02	2.19	1.05	0.93	0.97	1.00	0.98
中柱	上端	3.72	1.37	3.71	1.39	3.58	1.33	3.45	1.33
	中央	4.29	1.00	4.05	0.91	3.38	1.02	3.36	1.02
	下端	4.77	1.42	5.81	1.40	5.59	1.38	5.64	1.40
上床版 (海側)	側壁側	0.84	1.08	1.00	1.08	0.77	1.05	0.80	1.06
	中央	0.42	1.06	0.37	1.05	0.36	1.04	0.37	1.05
	中柱側	0.54	0.27	0.56	0.32	0.49	0.28	0.54	0.24
上床版 (山側)	側壁側	0.89	1.08	0.94	1.09	0.79	1.06	0.84	1.06
	中央	0.40	1.06	0.42	1.07	0.38	1.05	0.37	1.05
	中柱側	0.52	0.24	0.56	0.29	0.51	0.25	0.52	0.28

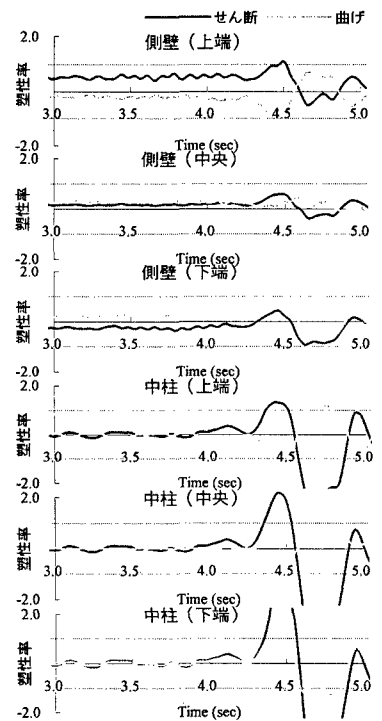


図-3 せん断および曲げ塑性率の時刻歴 (JMA(NS+UD))