

招待論文

**INVITED
PAPER**

招待論文

兵庫県南部地震での地下鉄構造物の被害と復旧

UNDERGROUND SUBWAY DAMAGE DURING THE HYOGO-KEN NAMBU
EARTHQUAKE AND RECONSTRUCTION TECHNOLOGY

佐俣千載

Senzai SAMATA

正会員 神戸市交通局高速鉄道技術部計画課長
(〒650 神戸市中央区加納町6丁目5-1)**Key Words** : Hyogo-Ken Nambu Earthquake, Seismic damage, Underground Subway structure, Reconstruction, Seismic analysis

1. はじめに

まさに“不意を突かれた”というのが正直な表現なのだろう。約1000年に1度の確率でしか起こらない内陸直下型地震であり、大方が予測してなかった関西、しかも大都市神戸が被災したということに油断があったように思う。もちろん早くから六甲断層系に地震の空白域があることを指摘し危険性を訴えていた技術者や地震学者がいたわけであるから、全ての土木屋が油断していたわけではない。しかし、近代土木技術の範疇で経験してきた地震力に対する耐震設計で十分だと考えていたこと、危機管理体制については風水害を主として想定し、地震災害に対する心構えが不足していたことなども油断の一つであろう。

1995年1月15日と16日(振替え休日)の連休明けとなった17日午前5時46分に突如として大地がゆれた。その時、東の空に日が昇るまではあと1時間20分、地震発生20分前に望を迎えた満月が西の空にあと1時間で沈まんとするところであった。空は快晴である。

淡路島北端明石海峡付近地下14kmを震源とするマグニチュード7.2の内陸直下型地震。大都市部での震度7は史上初めての経験である。結果的に死者・行方不明者が6300人を越え、そのうち倒壊した建物の下敷きになり圧死した人が8割と言われる。1868年の開港以来127年、営々と築いてきた近代港湾都市神戸の基盤施設も信じられないほどに破壊された。特に、港湾、鉄道、道路などの交通インフラの被害が目立った。完全復旧まで港湾は2年、鉄道は1年、道路は1年半と土木技術者の懸命な努力によって、当初の想定より早い復旧が見込まれることになった。しかし、問題はこれらが後追的に明らかになってきたものであり、被災当初、土木技術者の

多くは何のチャートも持たず、とにかく走り出すしかなかったことである。事前に想定どおり起こったのであれば、すみやかに復旧方法、工期、費用、そして暫定措置としての代替機関、代替ルートへの振り替え等について明らかにすることが可能であったであろう。列島が地震の活動期に入ったといわれる今、これらの反省に立ち、今後次のことを明らかにし、また確立していく必要があると思われる。

- ①震源に関して：場所の特定と規模、発生確率
- ②媒体に関して：基岩面の位置と断層構造、表層の堆積環境
- ③地震動に関して：構造物建設予定地における①に対応した設計用地震波形
- ④構造系に関して：③の地震動に対する構造物と地盤の動的相互作用を考慮した非線形解析法。これと等価な、容易に設計で用いることのできる静的解析手法。
- ⑤耐震性能に関して：構造物の非線形性を考慮した変形性能と耐力の評価法。特に不均一材料である土構造物、合成材料である鉄筋コンクリート(以下、RCと称す)構造物の変形性能と耐力の評価法。
- ⑥その他：地盤の液状化や現在の地震計では地震波として観測できない衝撃波の評価法

これらが明らかになったうえで構造物の重要度を社会的合意のうえで決定し、何がどのレベルでどこまで壊れるか、その時の補修方法は、代替施設は、などのシステムマネジメントが望まれるわけである。勿論このようなことを実現するにはまだ未解明な部分が多く、相当な議論と時間を要することになるが、土木技術者として頑張らなければならないことである。

これをめざして進む第1歩は、あまりにもむごい出来事ではあったが、この震災を冷静かつ十分な観察のうえ、

表一 神戸市内の地下鉄の延長

鉄道種別	建設年代	延長(km)	駅数
阪神電鉄	1931～36	3.4	3
神戸電鉄	1962～67	0.4	1
神戸高速	1962～67	6.6	6
市営地下鉄	1972～85	9.5	9
山陽電鉄	1983～97	1.5	2
計	—	21.4	21

そこから出されているサインを見逃さず、今は解明できぬことは後世に伝えることが重要である。土木学会耐震工学委員会あるいは、地元関西支部においても今後2年間をかけてじっくりと被害原因の糾明にあたらうということになったが、まさに的を得た判断であると思う。

以上のような趣旨を踏まえて、わたしが今たずさわっている地下鉄構造物について、被害状況から出されているサインを基に被災原因を考察するとともに、復旧の方法や工夫について報告する。

2. 神戸市内の地下鉄

(1) 概要

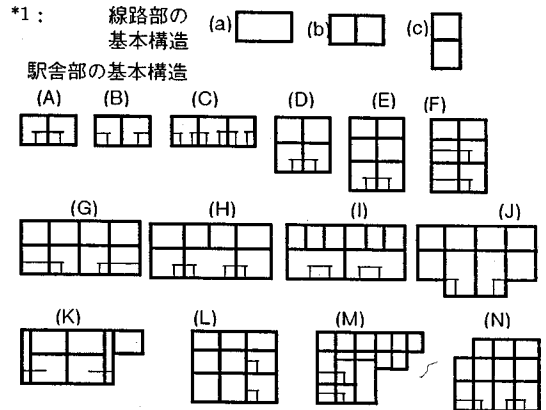
神戸市内の主要鉄道施設のうち都市部で地下鉄構造となっているものは阪神、山陽、神戸電鉄、神戸高速、市営地下鉄の5路線である(表一1)。このうち建設年代が最も古いのは阪神電鉄の岩屋～三宮間で昭和8年の完成であり、引き続き三宮～元町間が昭和11年に完成している。また建設年代が最も新しいのは山陽電鉄の西代～板宿間で、連続立体事業として平成6年に構築物が完成しており、まだ未供用段階での被災であった。

地下鉄道部の構造は市営地下鉄板宿駅より西方約360mの区間に外径6.8mのシールドトンネルがあるのみで、そのほかはすべて開削工法によって構築された箱型ラーメンである。駅間の線路部は中柱を有する1層2径間が基本となっている。

駅部はプラットフォームを設置する停車場部と改札等を設けるコンコースや換気機械室、電気室等機器室により構成され、それらの配置関係から多層多径間になり断面寸法も変化し、やや複雑な構造となる。また駅部の前後には上下線の渡り区間が設けられることがあり、その区間は中柱の無い大きなスパンとなっている。以下に各地下鉄道の特徴的な構造を述べる。

表一2 阪神電鉄の構造と主な被害箇所

場所	線路部	三宮駅	元町駅	
形式 *1	1層2径間(b)	1層3径間(C)	2層2径間(D)	
土被(m)	5～6	3～4	2～3	
外寸法	幅(m)	9.3～11.8	27.2	14.3
	高さ(m)	6.5	9.0	10.3
中柱	断面(m) *2	0.5×0.4	0.8×0.7	0.85×0.55
	構造@ピッチ *3	SC@2m	SC@6m	SC@6m
被害	側壁	—	—	
特徴	—	床板・側壁SRC		



*2: トンネル軸方向長さ×断面方向幅、φ=鋼管の外径

*3: 構造 SC=鉄骨コンクリート
SRC=鉄骨鉄筋コンクリート、
RC=鉄筋コンクリート

表一3 神戸電鉄の構造と主な被害箇所

場所	線路部		湊川駅		
形式	1層1径間(a)	1層2径間(b)	1層2径間(A)	2層2径間(D)	
土被(m)	1～4	5～7	3～6	2	
外寸法	幅(m)	11～12	9～12	14	14
	高さ(m)	8～9	6.4～7	7	9.5
中柱	断面(m)	—	0.6×0.4	上層φ0.4 下層φ0.6	
	構造@ピッチ	—	RC@2.5m	鋼管@5m 鋼管@5m	
被害	なし	側壁	なし	床板	
特徴	SRC	—	—	—	

(2) 阪神電鉄(表一2)

線路部の中柱はアングル4本を厚さ9mmのプレートで取り囲み角柱としたものを芯材とした鉄骨コンクリート造で50×40cmの断面である。中柱の上下部の縦桁(桁高約90cm)も同様にアングルとプレートによって組み立てられた桁を巻き込んだ鉄骨コンクリート造となっている。駅部は三宮駅、元町駅ともに骨組み構造は

表一 4 (1) 神戸高速鉄道の構造と主な被害箇所 (その1)

場所	線路部	新開地駅	神戸駅	
形式	1層2径間(b)	2層上2下4径間(H)	2層上2下6径間(I)	
土被(m)	2.5~5.5	2~3	2.5	
外寸法	幅(m)	9	28	
	高さ(m)	6.3	12.5	
中柱	断面(m)	0.4~0.8×0.4	0.7×0.6	上層φ0.4 下層φ0.5
	構造@ピッチ	RC@2.5m	鋼管@6m	鋼管@4.5m
被害	側壁・床版 中柱	なし	なし	

表一 4 (2) 神戸高速鉄道の構造と主な被害箇所 (その2)

場所	大開 長田 駅標準部	大開コナース部	長田コナース部	
形式	1層2径間(b)	2層4径間(I)	2層4径間(I)	
土被(m)	4~5	2	2	
外寸法	幅(m)	17	26	
	高さ(m)	7.2	10	
中柱	断面(m)	1.0×0.4	上層0.7×0.4 下層1.0×0.4	上層0.55×0.55 下層1.0×0.4
	構造@ピッチ	RC@3~3.5m	RC@3.5m	RC@3m
被害	側壁・床版 中柱	側壁・床版 1及び2層 中柱	なし	

表一 5 (1) 市営地下鉄の構造と主な被害箇所 (その1)

場所	(一般部) 線路部 (県庁~三宮)	(コナース部) 板宿駅 (機械室部)	新長田駅	長田駅	(コナース部) 上沢駅 (機械室部)				
形式	1層2径間(b)	2層1径間(c)	3層2径間(E)	2層2径間(D)	2層4~5径間(K)	3層2径間(E)	2層2径間(D)		
土被(m)	6~16	7~9	3~4	4~6	3~4	3~4	4~6		
外寸法	幅(m)	9~11	6	17~18	17~18	17	20	17	16~17
	高さ(m)	6~7	13	16~18	13~14	12	13	14.5	13
中柱	断面(m)	0.8~1.2×0.4	—	中層0.9×0.9	上層0.9×0.9	上層0.9×0.8	上層1.0×0.4	上層1.3×0.5	上層1.4×0.7
	構造@ピッチ	RC@2.5m	—	RC@5m	RC@5m	RC@5m	RC@5m	RC@5m	RC@5m
被害	側壁 中柱	なし	なし	なし	床版側壁 上下層 中柱	上層中柱	床版側壁 上中層中柱	床版側壁 上下層中柱	

表一 5 (2) 市営地下鉄の構造と主な被害箇所 (その2)

	湊川公園駅	(コナース部) 大倉山駅 (機械室部)	(標準部) 県庁前駅 (コナース部)	(標準部) 三宮駅 (コナース部)	新神戸駅				
形式	3層2径間(E)	3層2径間(E)	2層2径間(D)	3層2径間(F)	3層3径間(L)	3層2径間(F)	3層3~6径間(M)	3層3~4径間(N)	
土被(m)	3~4	3~4	4~6	3	3	3	3	2~4	
外寸法	幅(m)	19	17~18	17~18	15	27	15	38	31
	高さ(m)	19~20	16~18	13~14	19	19	20	22	13
中柱	断面(m)	中層1.2×0.8	中層1.0×1.0	下層1.1×1.1	上層1.0×0.6	下層1.2×0.6	上層0.9×0.7	中層1.3×1.0	上層0.9×0.7
	構造@ピッチ	RC@5m	RC@5m	RC@5m	RC@5m	RC@5m	RC@5m	RC@7.5m	RC@5m
被害	なし	なし	下層 中柱	なし	なし	床版側壁 上層中柱	側壁 中下層中柱	なし	

鉄骨造であり、床版および側壁はRC2方向スラブとなっている。

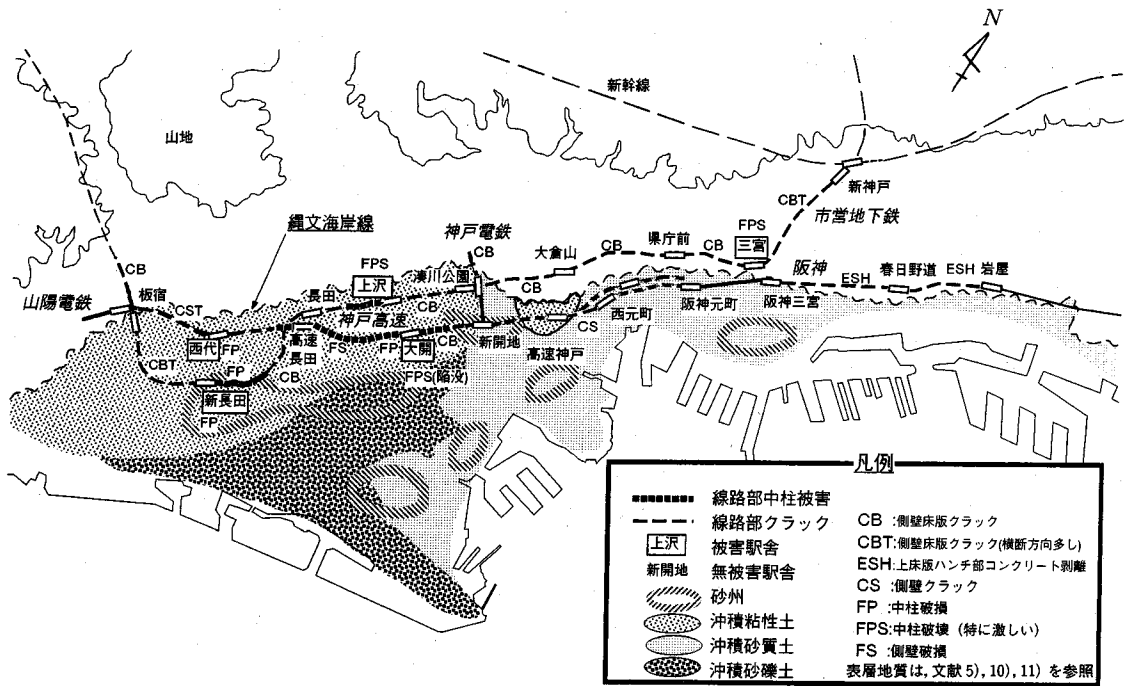
(3) 神戸電鉄 (表一 3)

線路部の中柱は主鉄筋16mm、帯筋は9mmである。1層1径間の開削トンネルへの入り口部約50mは鉄骨RC造となっている。

地下駅は湊川駅1駅のみで幅は14m、高さは1層部が7m、2層部が9.5mで、中柱はすべて鋼管柱である。

(4) 神戸高速鉄道¹⁾ (表一 4)

長田駅と大開駅はほぼ同じ構造であるが、中柱のピッチが長田駅では3mであるのに対して、大開駅では3.5mとなっている。花隈駅のコンコースは駅ビルの中であり、西元町駅は西側改札が駅ビルに接続している。新開地駅は東西線と南北線がL字型に交差しており南北線は神戸電鉄のターミナルとなっている。東西線の床版と側壁は型钢を用いた鉄骨RC造で、コンコース階の中柱を副材とするフィーレンデル桁として設計されている。南北線の床版と側壁はRC造であるが、中柱は鋼管を使用している。高速神戸駅は阪急線と阪神線の分岐部と



図一 神戸市内の地下鉄の被害箇所と表層地質

なるため2ホーム4線を有す。構造は新開地駅と同様鉄骨RC造であり、コンコース階の中柱を副材とするフィレンデール桁として設計されている。

(5) 市営地下鉄^{2),3),4)} (表一5)

線路部の中柱の標準断面寸法は80×40cmで、設置間隔は芯々2.5mピッチ、帯筋ピッチは両端部12.5cm/中央部25cmである。最も土被りの大きい区間は神戸高速鉄道の下越しをする長田駅付近の約16mであり、ついで湊川から大倉山〜県庁前にかけて土被りが約12m〜13mとなっている。

全駅について主要構造材はRCであるが、ホーム部やコンコースの一部は空間確保のため、同じ軸力に対して断面積を小さくできる鋼管柱を用いている。

板宿駅・上沢駅・湊川公園駅・大倉山駅の4駅はコンコースを設ける区間は3層2径間で1層目はコンコース、2層目は機械室やダクトスペース、3層目は軌道階となっている。ただし上沢駅の2層目はダクトスペースのみとなっており4駅の中で全高は最も低くなっている。また電気室や換気機械室のみを設ける区間は2層2径間とし1層目を機械室、2層目は軌道階となっている。県庁前駅と三宮駅は東行線と西行線が上下に配された2層ホーム形式となっておりコンコース部は県庁前駅では3径間、三宮駅では6径間となっている。コンコース部の柱はすべて鋼管柱である。2層目は換気機械室とな

表一6 山陽電鉄の構造と主な被害箇所

場所	線路部	(一般部) 西代駅 (コア部)	板宿駅
形式	1層2径間(B)	1層2径間(B)	2層4径間(G)
土被(m)	5~9	8~9	4~8
外寸法			
幅(m)	9.8	16.8	24.7
高さ(m)	6.7	7.8	13.0
中柱			
断面(m)	1.0×0.4	2.5×0.4	2.5×0.4, 0.8~0.9×0.8
構造@ピッチ	RC@2.5m	RC@5m	RC@5m
被害	側壁 床板	床版 中柱	床板 中柱

ている。

新神戸駅は軌道階が深く3層構造で、ターミナルであることから停車場は2ホーム3線を有する4径間となっている。

(6) 山陽電鉄 (表一6)

線路部は標準的な1層2径間であり幅約10m、高さ約7mである。土被りは5~9mとなっている。西代駅は1層2径間の相対式ホームで、中柱はすべてRC造である。コンコース部は2層4径間で板宿駅はこれとほぼ同じ2層4径間と、それよりやや幅の狭い2層2径間が主たる断面となっている。

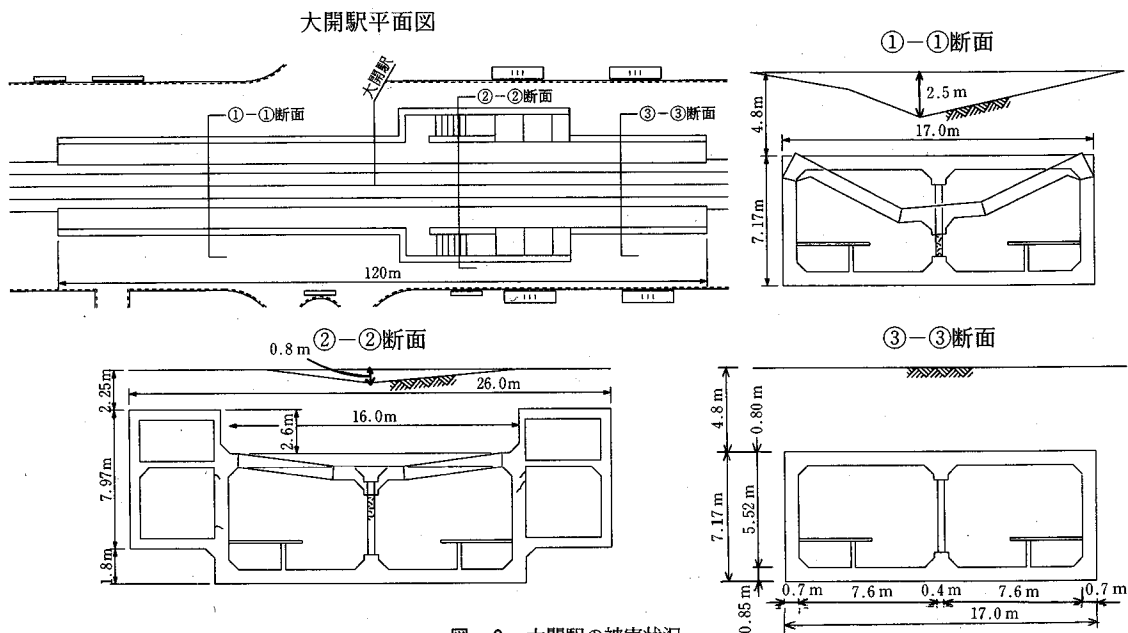


図-2 大開駅の被害状況

3. 被害状況

地下鉄全体の被害箇所を図-1に、被害部位を表-2～表-6に示す。

(1) 阪神電鉄

線路部では側壁と上床版の取り合いハンチ部のコンクリートが剝落した(単線延長約3,540m)。土被りが2～3mと比較的浅い春日野道～岩屋間(約1km)で特に被害が目立ち、線路内が剝落したコンクリートで埋まるような状態であった。約920本の中柱の上下端部のコンクリート被覆部分が剝離した。

(2) 神戸電鉄

線路部では、側壁上部の隅角部下にクラックが発生し、中柱の上下端部に軽微なクラックが発生した。湊川駅の地下2層部において上床版および柱床版の隅角部付近にクラックが発生した。

(3) 神戸高速鉄道

線路部は新開地駅以西で中柱、側壁等に大きな被害が見られ、新開地駅以东と湊川駅までの南北線の区間では側壁や上下端ハンチ部に軽微なクラックが発生した程度であった。中柱の破損は西代駅～新開地駅間で見られ、810本の柱のうち709本が破損した。破損の程度は柱上下端部の軽微な曲げクラックから、かぶりコンクリートの剝落、せん断破壊までであるが、特に高速長田駅と大開駅間の大開駅側約2/3の区間にせん断破壊が集中してい

る。高速長田駅～大開駅間の側壁は南側下部隅角部のハンチ上端部が構内側に押し出されるように変位が生じ、北側はそれに対応する下部隅角部および中央、上部にも縦断方向にクラックが発生した。変位量、クラック共に大開駅に近づくほど大きくなり変位量は最大で200mm、クラック幅は最大で5mmを超えた。大開駅～新開地駅間は南側、北側とも側壁中央付近を中心として縦断方向に多数のクラックが発生した。クラック幅は大開駅に近づくほど大きくなり最大12～17mmであった。

駅部は全6駅のうち大開駅と高速長田駅が大きな被害を受け、その他はわずかなコンクリートのひび割れが発生した程度である。

大開駅は全長120mであるが、最も被害の大きかったのは階段部より西の1層2径間部約60mの区間で、中柱が破壊しこの柱に支えられていた上床版が上載荷重(土被約5m)に耐えきれずに陥没した。これに引きずられるように東側の階段部も同様に中柱が破壊し、陥没延長は約90mとなった。横断面での被害形状を見ると、上床版の両端の剛結部は保存され、側壁上部のハンチ下付近外側が曲げ引張り破壊し、全体形がM字のように破壊した(図-2)。それより東側のコンコース部および基本断面部約40m区間は中柱がせん断破壊し上床版の沈下も見られたが陥没には至らなかった。駅部の中柱35本の全てが破壊した。

高速長田駅は大開駅とほぼ同じ構造であり、1層2径間部中柱41本のうち、大開寄りの中柱5本が連続して大きなせん断破壊を受けた。また、せん断クラックは発生したもののコンクリートの剝離等はなかったものが11

表一 市営地下鉄の被害

場 所		被災ランク別本数					被害の程度・概要	
		I	II	III	IV	計		
函 型 隧 道 部 ・ 中 柱	新長田駅 及び 線路部	板宿～新長田	—	—	—	4	4	・中柱のコンクリートが破損し一部はく離し、 鉄筋が露出(延長400m)
		新長田駅	—	—	9	39	48	
		新長田～長田	—	6	55	13	74	
	長田駅	—	—	2	3	5	5	・中柱のコンクリートが破損している
	上沢駅 及び 線路部	長田～上沢	—	1	34	—	35	・中柱のコンクリートが破損し一部はく離し、 鉄筋が露出。また、一部について軸方向鉄筋 が分離。 ・駅部の上床版、側壁等にクラックが発生 (延長720m)
		上沢駅	10	23	59	20	112	
		上沢～湊川公園	—	—	1	58	59	
	大倉山駅 及び 線路部	湊川公園～大倉山	—	—	1	—	1	・中柱のコンクリートが破損。
		大倉山駅	—	—	—	14	14	
		大倉山～県庁前	—	—	—	2	2	
三宮駅 及び 線路部	三宮駅	8	14	23	34	79	電気室(B1F)、換気機械室(B1F,B2F) ・中柱のコンクリートが破損し、一部はく離、 鉄筋が露出。一部について軸向鉄筋が屈曲し コンクリートと鉄筋が分離。 ・上床版、側壁等にクラックが発生(延長310m)	
	三宮～新神戸	—	—	24	—	24		
被災柱 総 数	駅部	18	37	93	110	258	総柱本数 1609本(鋼管柱388本含む) ※	
	線路部	—	7	115	77	199	総柱本数 1961本(鋼管柱 0本) ※	
	計	18	44	208	187	457	総柱本数 3570本(鋼管柱388本含む) ※	
駅プラット ホーム支柱	長田駅	—	—	—	14	14	・コンクリート支柱が破損している	
	県庁前駅	—	—	—	25	25		
	三宮駅	—	—	117	—	117		

被災ランクの定義

- ランクⅠ：破壊している
- ランクⅡ：破損しているが、破壊に至っていない
- ランクⅢ：せん断クラックが発生
- ランクⅣ：軽微なクラックが発生

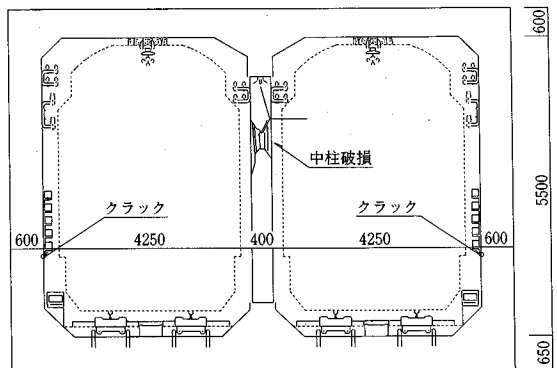
※総柱本数：板宿～新神戸間（開削区間）の中柱の全数

本で被災柱は合計 16 本であった。2 層 4 径間部は上層、下層共に被害は無かった。

(4) 市営地下鉄

被害はコンクリート中柱に顕著に現れ、特に新長田駅およびその東線路部約 400 m、上沢駅およびその東西線路部約 720 m、三宮駅(約 310 m)の 3 地域(計 1.4 km)に集中した。この地域では側壁や上床版中床版にも縦断方向にクラックが発生し、構造力学的には問題とならないとして見落とされがちだが、横断方向のクラックは全線にわたって発生していた。なお鋼管製の中柱には何の被害もみられなかった。中柱の被災の程度をランクⅠからⅣに分類した被害本数を表一 7 に示す。

線路部での被害は比較的少なく、新長田駅中心より約 450 m 東方の約 170 m 区間(被災柱約 70 本)と上沢駅中心より西方約 300 m の約 90 m 区間(被災柱 35 本)にま



図一 新長田東方軌道間の被害状況

とまった。新長田駅東方におけるランクⅢの被害状況を図一 3 に示す。

新長田駅は駅東部の被害が大きく、上層の中柱 9 本に

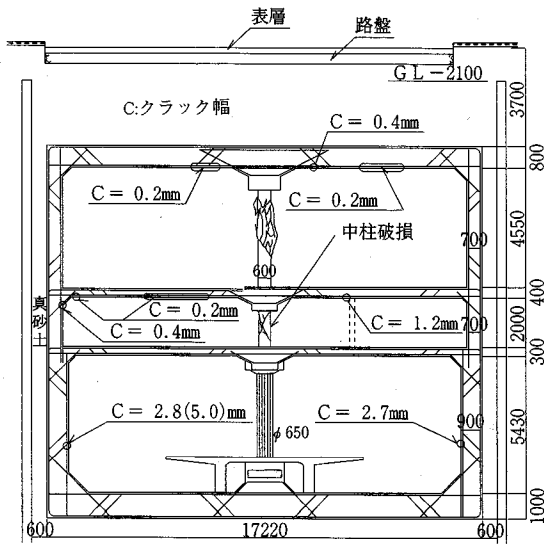


図-4 上沢駅 G2 断面の被害状況 (西面)

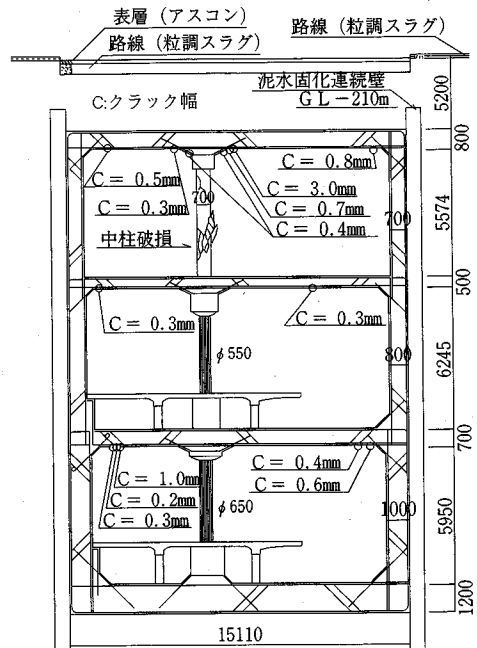
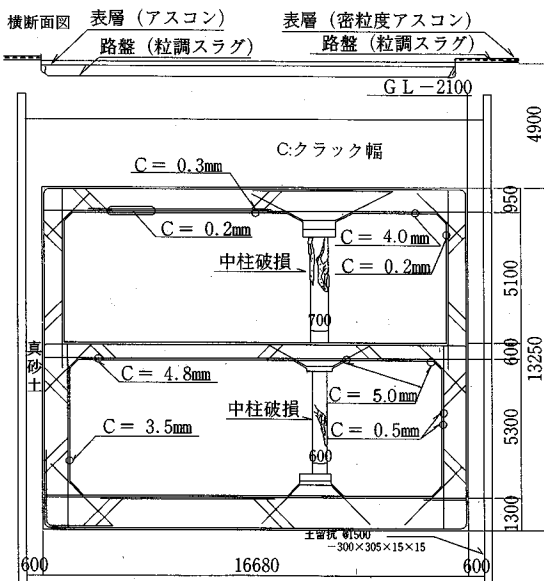


図-6 三宮駅 I3 断面の被害状況 (西面)



(注) クラックは、縦路方向のみを記入している。
() 内数値は、対象断面付近の最大クラック幅を示している。

図-5 上沢駅 C 断面の被害状況 (西面)

ランクIII, 6本にランクIVのせん断クラックが生じた。下層部の柱においてもホーム端を過ぎて鋼管柱からコンクリート柱に変わった区間ではせん断クラックが発生した。ただし、当駅は被害のあった3駅中では比較的軽微な被害であった。

上沢駅で最も大きな損傷を受けた柱は3層2径間(G断面)第1層目の中柱で、せん断面に沿ってコンクリートは抜け落ち鉄筋は大きく曲がった。柱天端の沈下量は

当初の施工誤差もあって確定できないが鉄筋の曲がりから2~3cm生じたのではないと思われる。当該断面の被害状態を図-4に示す。

駅西部はスパン比が約2対1の割合で中柱が南側に偏った2層2径間非対称面(C断面)となっており、上層が電気室、下層が軌道階となっている。この間のRC中柱のすべてが被災した。上層部の被害が顕著で、27本中21本がランクIとIIの被害であった。下層はランクIIが2本、残りはランクIIIであった。スパンの小さい側の上床版側壁ハンチに近いところに床版を貫通するほどの鉛直なクラックが130m区間にわたって発生した。柱上端部の沈下量は最も大きな被害を受けた柱で10数mmと推定している。当該断面の被害の状態を図-5に示す。

三宮駅の被害は第1層目の中柱が最も大きく42本中33本にせん断クラックが発生した。内訳はランクIが8本、IIが11本、IIIが6本、IVが8本であった。この断面における被害状況を図-6に示す。コンコース部は第2層目の換気機械室の南側の柱にせん断クラックが発生し、RC柱27本中12本が被災しランクIまたはIIが3本であった。第3層目の中柱やプラットホームを支えるRC柱にもせん断クラックが発生したがいずれも被災ランクはIIIまたはIVであった。新長田、上沢のせん断方向が、柱の西面を見て右下がり方向が優勢であったのに対し、三宮駅では右上がり方向が優勢であった。

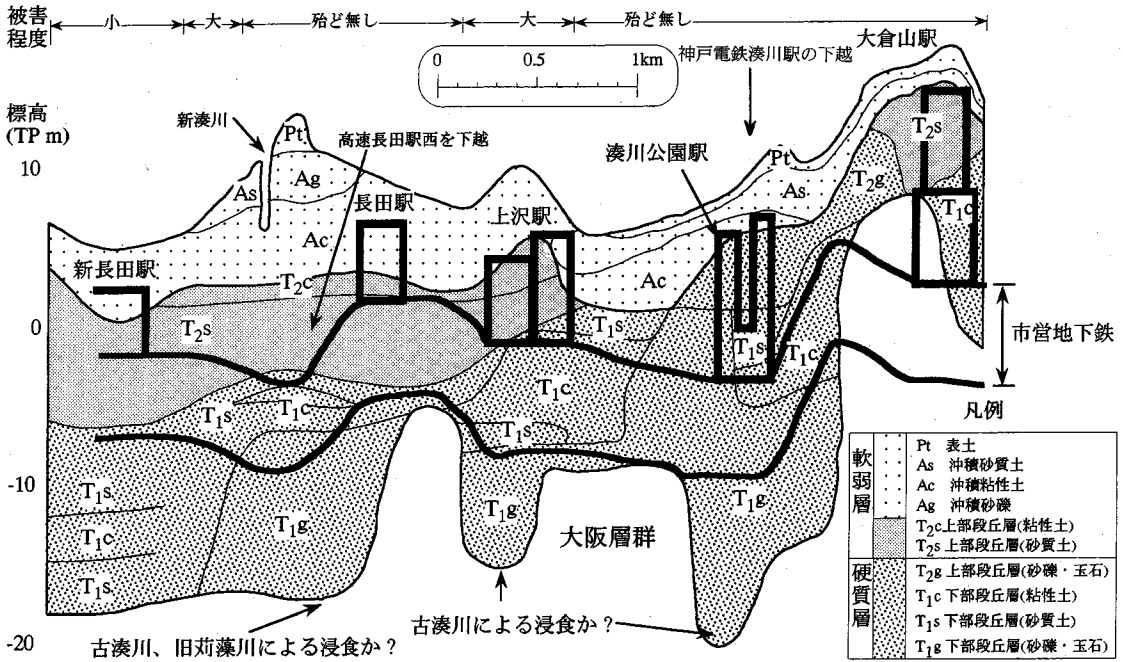


図-8 市営地下鉄，新長田～大倉山駅間地質断面

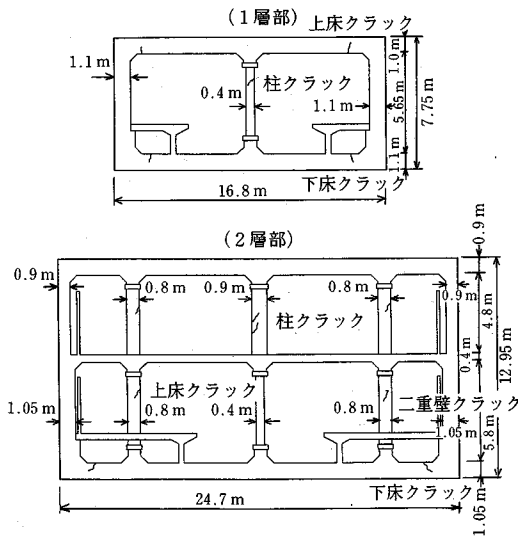


図-7 西代駅の被害状況(東面)

(5) 山陽電鉄

西代～板宿間の線路部約 300 m 区間で上床版の両側ハンチ部に縦断クラックが発生し漏水もみられた。横断方向のクラックは全区間にわたって上下床版・側壁ともに見られたが、すべて 1 mm 未満の軽微なものであった。

西代駅は延長 180 m のうち東側 95 m の 1 層区間が大

きな被害を受けた。中柱 17 本のうち 16 本にせん断クラックが発生し、被害の大きなものはコンクリートが剥離して鉄筋が露出した。また上下床版の両側ハンチ付近に縦断方向のクラックが発生した。2 層構造区間の上層は中央の柱と側径間の柱ともせん断クラックが発生し、中央柱は 8 本のうち 4 本が、両側側径間柱はそれぞれ 14 本のうち 2 本が被災した。下層の軌道階は上層階に比べて軽微な被害であった。せん断クラックの方向は 1 層部、2 層部ともに西面を見た場合斜め右下がり型が優勢である。西代駅区間の被害の状況を図-7 に示す。

板宿駅の被害はコンコース階の機械室で RC 柱の 1 本にクラックが、下床版及び中床版の両ハンチ付近にも縦断クラックが発生した。

4. 周辺地盤の状況

(1) 表層地質⁵⁾

図-1 は地下鉄構造物が構築されている須磨区から中央区までの表層地質図であるが、板宿から新開地までの間が市街地のなかで最も大きな海岸低地帯であることがわかる。この地域は湊川の河川流出土砂と瀬戸内海の潮流による流砂により形成された三角州である。国道 2 号線に沿って砂層が堆積しているが、これは潮流によりできた砂州と考えられる。この砂州の部分と縄文海岸線の間広い凹地があり粘性土が厚く堆積している。砂州の

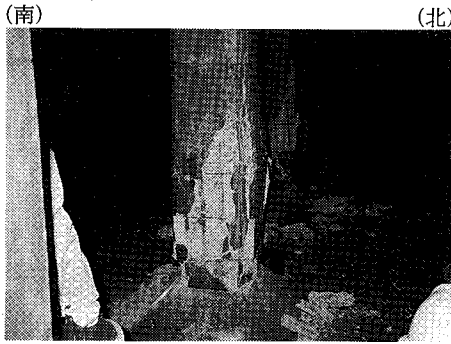


写真-1 大開駅西軌道階中柱被災

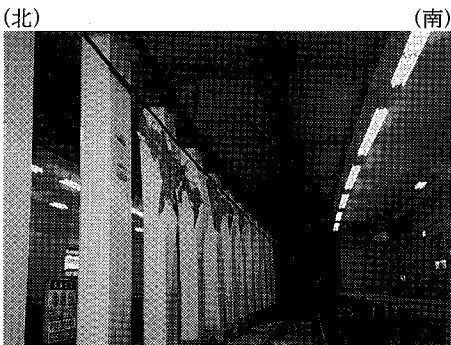


写真-2 高速長田駅軌道階中柱被災

南側では表層近くに粘土層が2～3 m あるが、その下は緩い砂が和田岬先端地区まで存在し、薄い粘土層を挟んだ沖積層が約30 m 堆積している部分もある。

(2) 海岸低地帯の層序

神戸市営地下鉄の建設にあたって調査された新長田～大倉山間の17本のボーリング結果⁹⁾から推定した地質縦断を図-8に示す。層序は地表から沖積層、段丘層、大阪層群と大きく3層に分類している。Ac層はN値10未満の粘土層で、前述した縄文海進時に形成された低湿地帯に堆積したものと思われる。その下に分布するT₂sは段丘層上部に相当する砂質土でN値は20～30である。その下に分布するT₁層は、段丘層下部に相当し大阪層を深く浸食し、底部に礫を堆積している。N値は粘性土で10～20、砂質土で30～40、砂礫・玉石層は50以上とよく締まった層である。市営地下鉄は、T₁層とT₂層中に構築されているが、各駅部ではコンコース階の一部がAc層にまたがって構築されている。

5. 被害の特徴と原因の考察

今回の開削トンネルの被害の特徴は、大開駅での陥没から柱上下端の軽微な水平クラックまで被害の程度が大きく異なることであり、側壁や床版のハンチ部から少し

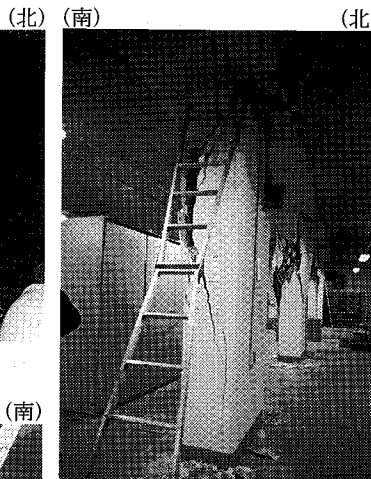


写真-3 上沢駅G2断面B1階中柱被災

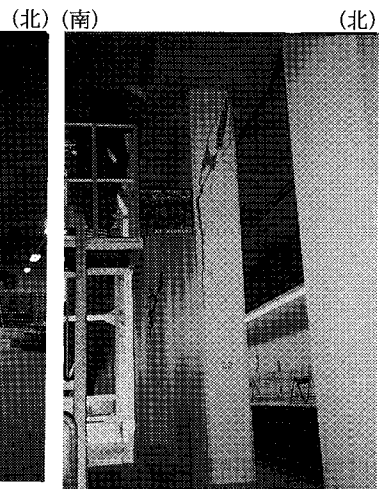


写真-4 西代駅軌道階中柱被災

離れたところに縦断方向のクラックが見られ、横断方向のクラックも多く見られることである。以下これらの特徴を観察しながら被害に影響を及ぼした要因について考察をしてみる。

(1) 上下動および水平動の影響

三宮駅で被害を受けた中柱を見た瞬間まず頭に浮かんだのはテストピースの圧縮試験の光景であった。この破壊形態と後述する車両の脱線現象から当初、大きな上下動が破壊の主たる要因ではないかと思えた。しかし、次に述べる柱の破壊方向の一意性や解析的な検討から開削トンネルの被害の支配的な要因は、地盤のせん断変形(主として水平動)によるせん断変形が、構造物を強制変形させたことではないかと考える。

a) 破壊方向の一意性

写真-1から写真-4に見られるように主たるクラックはほとんど同一方向に入り、しかも西から東に向かって断面を見た場合右下がり方向のクラックがほとんどである。左右対称断面において中柱が上下の圧縮により破壊した場合、ここまで破壊の方向が一様になるとは考え難い。

b) 水平変位と中柱のせん断破壊

西代駅の中柱は250×40 cmと壁のような断面となっているため横断面方向の剛性が他の中柱に比べて小さい。そのため柱上下端部が曲げ降伏した後にせん断破壊に至ったと思われる状態が17本の柱すべてに見られる。このせん断破壊線がすべての柱について図-9のスケッチのように上端北面または、下端南面に達している。下端北面側に達しているのはわずかに1本のみである。このことは図-10に示すように中柱の上端が下端に対して相対的に北から南へ変位したときの中柱に発生する曲

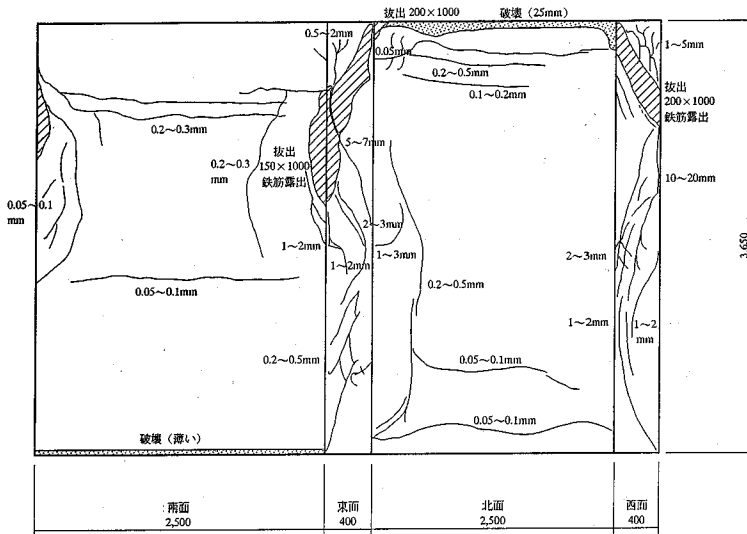


図-9 西代駅中柱のクラック発生状況

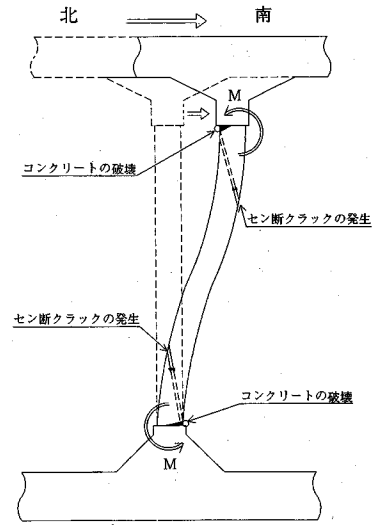


図-10 箱型ラーメンのせん断変形に伴う中柱の破壊形態

げ圧縮とせん断クラックにより説明することができ、破壊方向の一樣性とともな構造物が北から南に変形したときに支配的な被害を受けたものと推定される。

c) 車両の脱線と車体の損傷

地下鉄道部での車両被害の特徴的なものは、阪神三宮駅での留置中の車両の脱線とホーム接触による損傷、阪神元町～三宮間を走行中車両の側壁接触による損傷、神戸高速大開駅を通過した直後の走行中の車両が脱線したことである。さらに阪神三宮駅の停車中の車両は、車体と台車をつなぐ5mmの重なりのある上心皿と下心皿が外れていた。一方、市営地下鉄上沢駅には、停車中の6両編成の車両があったが何の損傷も受けなかった。

電車の脱線は上下動による両輪の浮き上がりと水平移動、または水平動によるローリング現象に伴う片輪の浮上がりと水平移動が考えられ、走行中の車両については軌道変状により発生する過大横圧の影響も受ける。今回の車両の脱線や被害から、地下では上下動、水平動のいずれかが卓越したかは判断し難い面はあるが、水平動と車両の共振現象があったのではないかと考える。

(2) 構造特性の影響

構造特性に着目した被害の特徴は次の通りである。

- ① 駅部では、RC柱は被災し、鋼管柱は何の被害もなかった。線路部においてもRC柱はせん断破壊したが、鉄骨コンクリート製柱は上下端の被覆コンクリートが剝離したに留まった。
- ② 鉄骨造の阪神三宮駅に被害はなく、隣接するRC造の市営地下鉄三宮駅は大きな被害を受けた。
- ③ 1径間構造部分については側壁に縦断方向のクラック

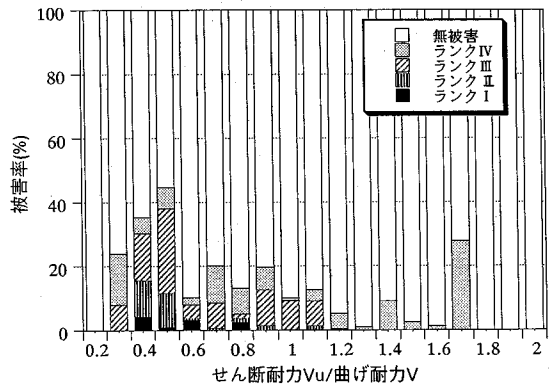


図-11 V_u/V と被害本数

は発生したが全体としては被害が軽微であった。

これら被害の状況から開削トンネルにおいては耐震上、RC製中柱が大きな弱点であると言え、その要因は次の2項目挙げられる。

- ① 構造設計では中柱はヒンジとして解析しており、曲げやせん断が発生しない。これに対して、実際の中柱では、縦桁からの軸力伝達を鉄筋に負担させるため、軸方向主鉄筋を縦桁に深く定着させる剛結構造となっていた。そのため想定していない曲げモーメントやせん断力を受けた。
 - ② 中柱には60～100 kgf/cm²程度の大きな軸方向圧縮応力を負担させているため鉄筋量が非常に多く、曲げ剛性が大きくなり相対的に曲げに対してせん断耐力が劣った柱が多かった。
- せん断耐力 V_u と曲げ耐力 V の比を市営地下鉄のコ

表一 8 駅部の土被り別の被害の有無

土被り (m)	被災あり	被災なし
2	大開 (2 層部)	高速長田 (2 層部)
3	地下鉄三宮	県庁前、山陽板宿
2~4		新神戸
3~4	新長田、市営長田、上沢 (3 層部)	地下鉄板宿 (3 層部) 湊川公園、大倉山
4~5	高速長田 (1 層部)、大開 (1 層部)	
4~6	上沢 (2 層部) 大倉山	地下鉄板宿 (2 層部)
4~8	西代 (2 層部)	
8~9	西代 (1 層部)	

注 〃は被害の大きかったもの

ンクリート柱 3144 本例に取り、この比 V_u/V と被害との関係を図一 11 に示す。ここで V_u は鉄道構造物等設計標準²⁾ に準じて計算した柱上下端部のせん断耐力、 V は中柱を 1/2 L の片持ち梁と考えたときに固定端を曲げ破壊させる水平力である。これによると曲げに対してせん断耐力の劣る柱がより多く被害を受けたことがわかる。

(3) 土被りの影響

土被り別に中柱に被災のあった駅と無かった駅を整理すると表一 8 のようになる。これによると土被り 9 m までは、土被りと被害の関係は見られない。

(4) 地盤の影響

地下部の大きな被害は市営地下鉄三宮駅をのぞいて旧湊川以西の海岸低地帯に集中している。ここで、図一 8 の地質縦断面図において沖積層 A_c 、 A_s と段丘層上部の砂礫 (T_{2s}) を耐震性から見た軟弱層、段丘層上部の砂礫・玉石層 (T_{2g}) おもよび段丘層下部を硬質層とすると、被災した新長田駅東部と上沢駅は軟弱層と硬質層にまたがり、被災が少なかった長田駅は総て軟弱層のなかに、また被災のなかった湊川公園駅は総て硬質層の中に構築されている。特に上沢駅は地下 1 層と 2 層の境が軟弱層と硬質層の境と一致しており、上層階の柱が下層階の柱に比べて大きく破壊した原因の一つと思われる。さらに新長田駅東部で被災した中柱のせん断クラックは、ランク II 以上の 61 本すべてが柱上部に発生していることも、この地層境の影響を大きく受けているものと思われる。

一方、大倉山駅から三宮駅にかけては大阪層群が高い位置にあり、下床版がこの層の中もしくはこれをかすめる位置に構造物が構築され、大阪層群の上部には湊川以西のような軟弱な層は見当たらない。三宮駅を除きこの間

の被害は非常に少ない。震度 7 の地域が神戸市中央区西部で一旦途切れ、再び三宮周辺から東へ延びることを考慮すると、市営地下鉄三宮駅の被害は、大きな揺れによる地盤変位が原因であり、平行する阪神三宮駅は鉄骨構造により被災を免れたものと考えられる。この大きな揺れの原因は、深い地盤の影響を受けているのではないかと思われるが³⁾、これについては今後の深層地盤調査の結果が待たれる。

(5) 地震応答解析⁹⁾による推定

市営地下鉄上沢駅の被害を対象に、地盤の非線形性を考慮した 2 次元地震応答解析法を用い被害の要因を推定した。検討対象は図一 5 に示す C 型断面である。地盤構成は成層状態を仮定し、入力地震動はポートアイランドでの観測記録を重複反射解析を用いて入射波成分に分離したものを採用した。最大加速度は自由地盤地表面 F で 765 gal、入力位置となる工学的基盤 B で 427 gal (図一 12(4)) となった。

図一 12 に中柱上端部 T の加速度、相対変位および断面力の応答波形を示す。図一 13 に最大変位分布を示すが、中柱の変位は自由地盤の変位より大きくなることが特徴的である。側壁はほぼ地盤の変形に支配され、その変形に伴いスラブが変形し、中柱はそれらの影響を受け、大きな変形を示す。このことが、中柱の被害に影響したと考えられる。

断面力のせん断力 (図一 12(3)) に関しては躯体の相対変位 (同図(2)) と、軸力 (同図(7)) は上下方向加速度 (同図(5)) との相関が確認できる。地震時に常時成分を加えた合成断面力の強度に対する比の分布を図一 14 に示す。この比が 1 を越えたとき部材に損傷が生じるものと考えられる。曲げ降伏モーメント M_y とせん断耐力 V_y は土木学会コンクリート示方書¹⁰⁾ による。図から B1F 部中柱のせん断に関する強度比は 1 を大きく越え、破壊につながったものと考えられる。また、B2F の側壁下部においてもせん断強度比は 1 をやや越えており、この部分に生じたクラックが説明できる。曲げモーメントに関しては、中柱に大きな値を示す部位があり、破壊との関係がわかる。

(6) 応答変位による破損部位の推定

前項で述べたように、地下鉄構造物が地盤のせん断変形によって変形したものと推定できる。ここでは、応答変位により、曲げクラック (M_i) あるいはせん断クラック (S_i) が発生する部位を想定した。図一 15 および表一 9 に常時荷重および地震時応答変位によって生じる曲げモーメントの概念図と想定されるクラックおよびその要因 (M_i および S_i) 示す。表一 9 のなかで実際に観測されたクラックにアンダーラインを付している。耐震設計を

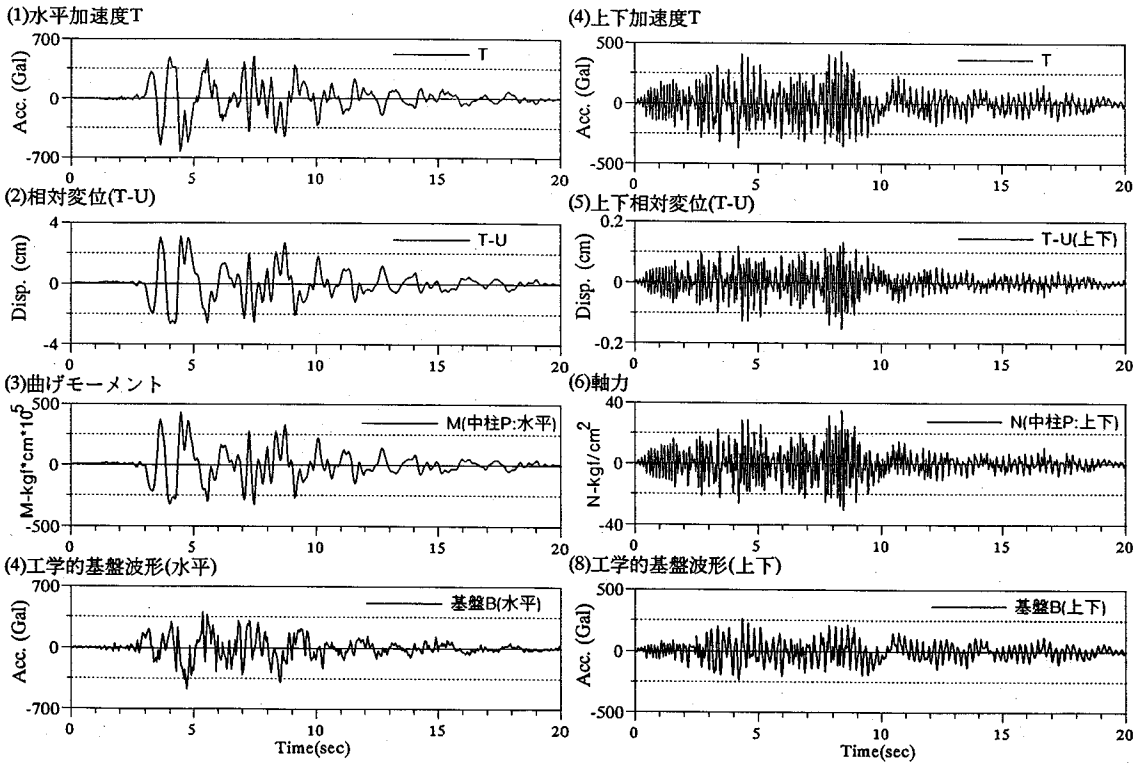


図-12 時刻歴応答波形

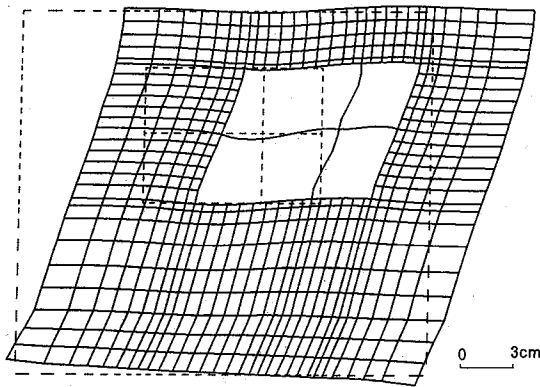


図-13 最大変位モード

していないか、あるいは中柱をピン結合と考えたために設計時に想定していなかった力が働いたと思われる部位のすべてにクラックの発生が確認されている。設計計算以上の力が働く部分のクラックは外側に多くあり観測ができていない。M12は大開駅を復旧するために掘削した際に発見されたものである。これより応答変位法を用いて地下構造物の耐震設計を行なう妥当性があると思われる。

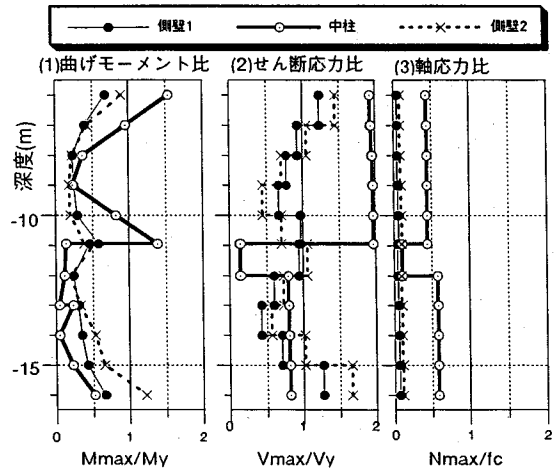
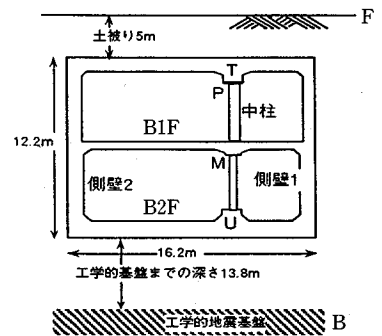


図-14 断面力の強度比分析

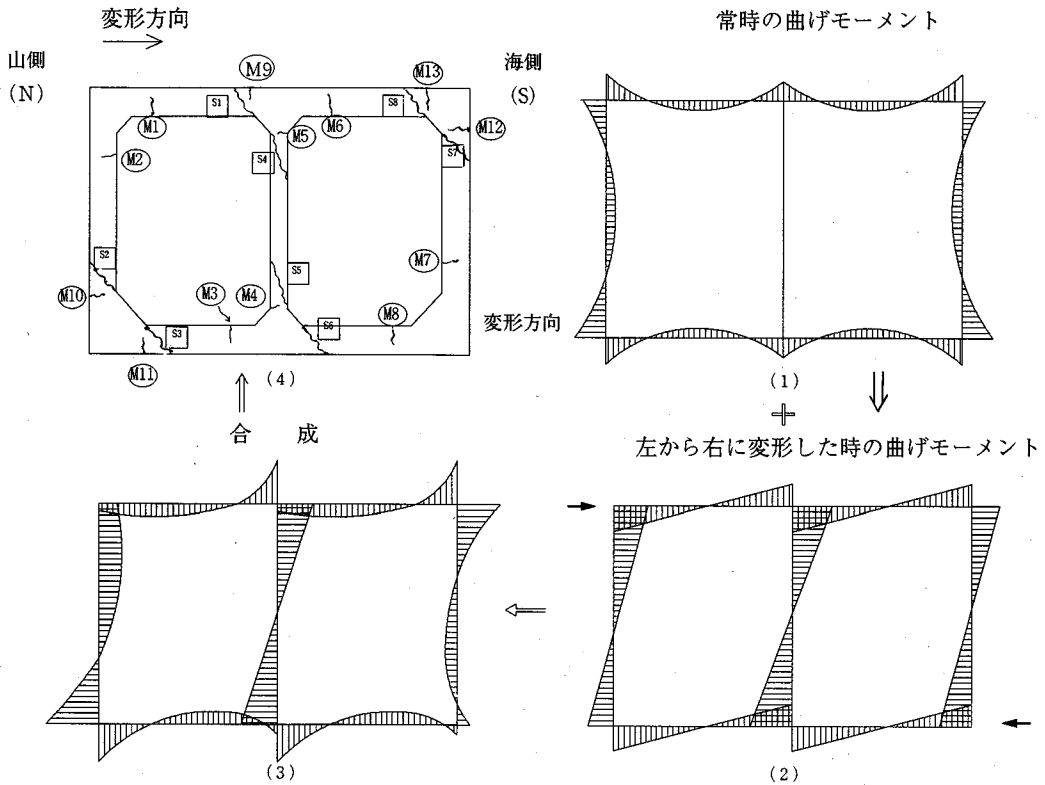


図-15 曲げモーメント分布とクラック発生箇所 (応答変位法)

表-9 クラックの発生原因と発生部位

発生原因	発生部位
(a) 設計時に想定していない引張り力が働く	<u>M1</u> , <u>M2</u> , <u>M4</u> <u>M5</u> , <u>M6</u> , <u>M7</u> <u>M8</u>
(b) 設計時に想定していた以上の引張り力が働く	M3, M9, M10 M11, M12, M13
(c) 設計時に想定していないせん断力が働く	<u>S4</u> , <u>S5</u>
(d) 設計時に想定していた以上のせん断力が働く	S1, S2, S3 S6, S7, S8

注 〃は被害が確認できたもの

4. 復旧

(1) 市営地下鉄の復旧概要

地下鉄の公共性を考えたとき、早期開通が至上課題であり、昼夜兼行で復旧作業を実施した。市営地下鉄では電車運行に影響する箇所の緊急復旧を完了し、震災から1ヶ月後の2月16日に全区間の営業運転を再開した。ただし、大きく被災した三宮、上沢、新長田の3駅は本復

旧工事を継続するため通過駅とした。本復旧は、列車運行に支障を及ぼさない様に工事区域との境界に仮囲いを設置し、緊急非常停止装置や列車監視員を配置して工事を実施した。この間、三宮へ向かう利用者が両隣駅の県庁前駅や新神戸駅で下車し約20分の徒歩を余儀なくされたため、特に三宮駅の早期開通が市民から望まれた。

三宮駅の緊急復旧は1月末に完了したが、被災が大きかった換気機械室、電気室、通信機器室などでは、本復旧工事に支障をきたすためにその中にある諸設備を撤去した。開駅にはこれら一時的に撤去した換気、排煙等の防災設備を復旧しなければならず、この部分の本復旧を先行させた。各所に設置した仮支柱は耐火ボードで囲い、非常灯や避難誘導表示、改札機の移設、増設、各出入口の整備を完了し、震災後2ヶ月経った3月16日に三宮駅と新長田駅が開駅した。なお、上沢駅の開業は3月31日になった。以後、三宮駅を例に復旧工事の概要(図-16)を紹介することとする。

(2) 緊急復旧工事

地下1階のRC造の中柱が大きく被災しており、余震の可能性もあり、被害を拡大させないため1次仮支柱を設置した。1次仮支柱の設置は図-17に示すように、地

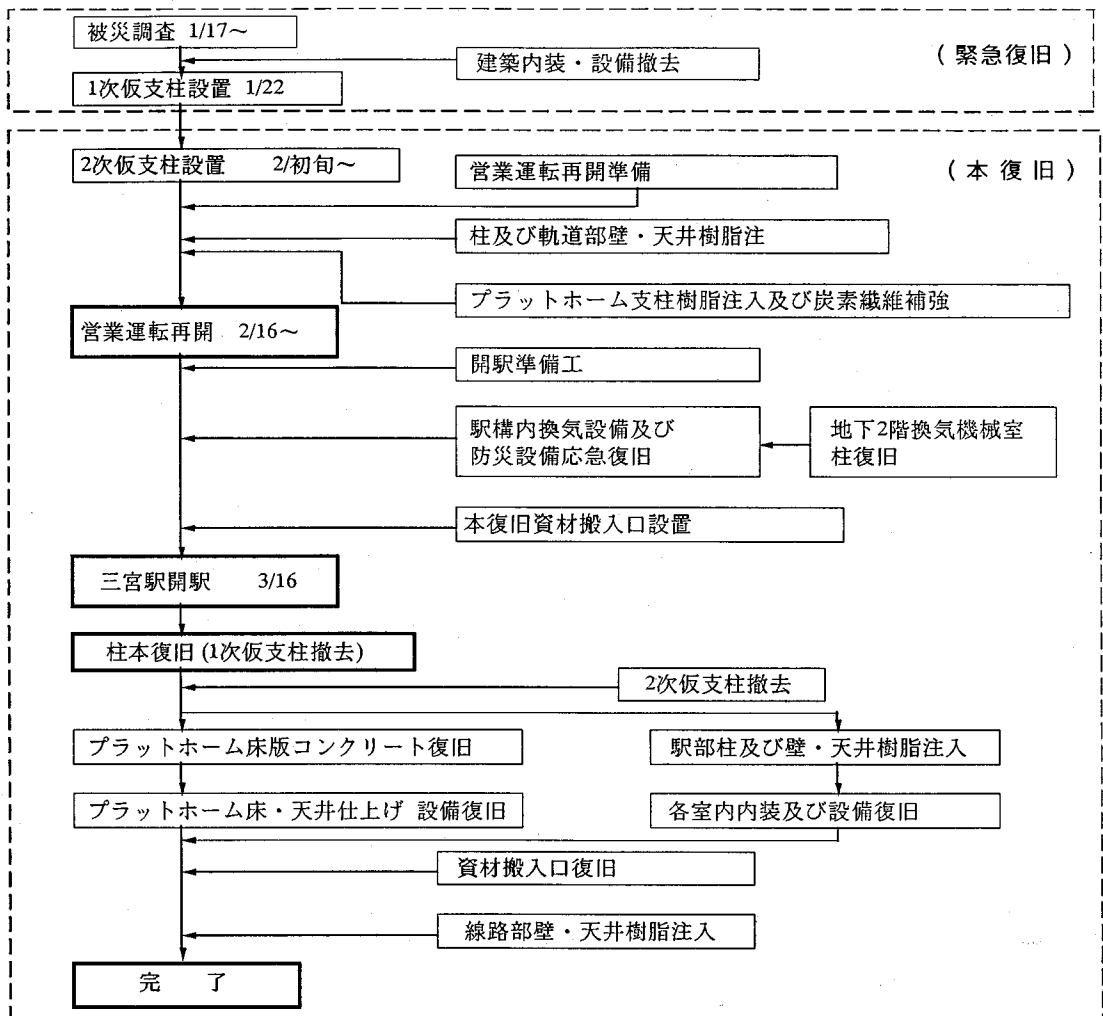


図-16 復旧工事の流れ

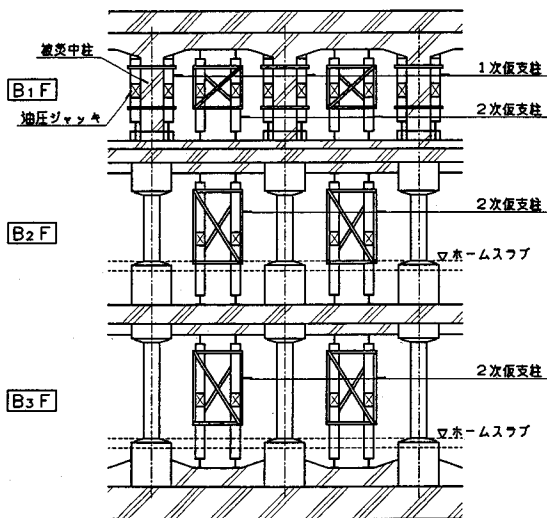
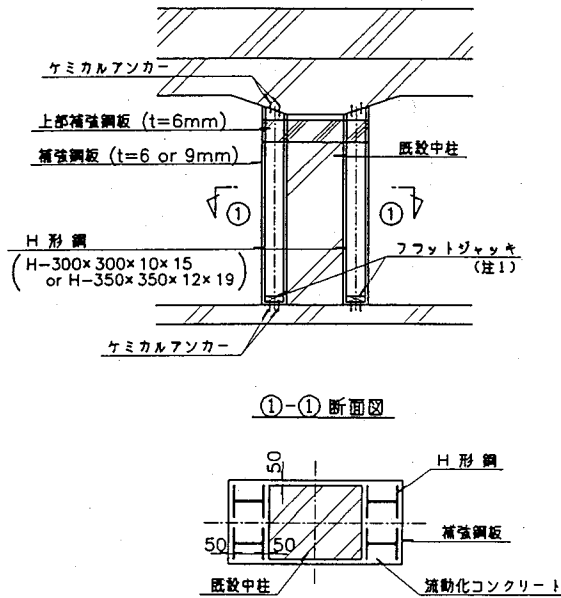


図-17 仮支柱設置方法

下2,3階の被害のない鋼管柱に軸力がスムーズに伝達するように被災した中柱に密着させ配置した。1次仮支柱は中柱の設計軸力に対して十分な強度を有する構造とし、1本当たり20tfのプレロード力も導入した。

主要資材である鋼材を調達するにあたり、神戸地区には既に資材はなく大阪あるいは東京からの調達となった。しかし、震災復興車輛幹線道路である国道2号線等が大渋滞となったため、輸送に多大な時間を要し、到着時間が最大で1日程度遅れたこともあった。

総重量約550tfの仮受資材は出入口階段から人力で搬入せざるを得なかった。1次仮支柱設置工事を着手前に被災調査と中柱周辺の化粧材、設備機器、配管ダクト及び天井仕上げ材の撤去が必要であり、それらの作業にほぼ3日を要した。



(注1)

地下1階：FJ80(耐力80tf/台)，アロード量20tf/本
 地下2階：FJ120(耐力120tf/台)，アロード量25tf/本

フック毎の中柱復旧仕様

補強方法 フック	被災部コンクリート 新り、撤去	主筋取り替え	帯筋補強	H形鋼補強	鋼板補強	樹脂注入
I	○	○	○	○ (H-300x300x10x15)	○ (t=6mm)	○
II	○	—	○	○ (H-300x300x10x15) ○ (H-350x350x12x19)	○ (t=6 or 9mm)	○
III	—	—	—	—	○ (t=6mm)	○
IV	—	—	—	—	—	○

図一18 中柱本復旧構造

(3) 本復旧工事

本復旧工事を実施するに際し、本復旧構造には下記の基本方針を設定した。

- ① 損傷部を補強あるいは新たに部材を構築する場合には、建設時より強度の高い構造物となるような方法をとる。
- ② 軸方向鉄筋の曲がり著しい柱についてはH鋼材で補強する。
- ③ 柱に鋼板を巻く場合には、帯鉄筋断面積相当以上の断面積を有する鋼板で全周を拘束する。

本復旧構造は上記の基本方針に基づいて図一18に示す構造とした。施工順序を図一19に示す。

地下1階の中柱は1次仮支柱により仮復旧されているが、本復旧の施工を考慮すると中柱と仮支柱の間に施工スペースが必要なため、中柱間に上床版縦桁を支える2次仮支柱を設置した(図一17)。このとき、地下1階の2次仮支柱の荷重を伝達させるため地下2階および地下3

階にも2次仮支柱を設置した。また、地下2、3階にはプラットフォーム床版があり荷重の伝達を確実にするため、床版の仮支柱設置部分にはつり撤去し、仮支柱部材を床版縦桁まで通した。2次仮支柱部材は1次仮支柱と同様に中柱の設計軸力に対し十分な強度を有する構造とし、油圧ジャッキを設置してプレロードを導入した。

H鋼材や鋼板等の本復旧資材及び設備機器等の大型機械の搬入用としての出入口階段が開駅に伴い夜間にしか使用できないため、駅部上床版に開口部を新たに設け資材搬入口とした。

被災ランクI、IIの中柱は被災箇所を人力によりはつり撤去した。撤去範囲は目視およびテストハンマーの打撃により健全と判断される箇所までとした。健全部についてはコアを採取し、圧縮強度試験を実施して建設時の設計基準強度以上の強度があることを確認した。

主鉄筋の曲がり鉄筋径の3倍以上であるランクIの中柱については、その部分を切断撤去し、同径の新しい鉄筋と取り替えた。鉄筋の継手方法はスプライススリーブ継手を基本としたが、JRの実績も参考にして一部フレア溶接も使用した。なお、被災コンクリートを撤去した範囲については帯鉄筋およびスターラップを増筋補強した。

中柱のコンクリートが健全な範囲については帯筋による補強ができないため、柱幅が1mを越える柱についてはφ26mm PC鋼棒による補強を実施した。補強は上下方向に1m間隔、水平方向では柱幅2m未満の場合1列、それ以上で2列とした。PC鋼棒はダイヤモンドカッターで削孔後挿入し、1本当たり13tfの緊張力を導入した後、隙間にはエポキシ樹脂を注入した。

既設柱打換えコンクリートおよび鋼板巻立てコンクリートは逆打工法となる。逆打工法としては図一20に示す3種類があるが、充填法と注入法は直接法よりも1工程多く、後打ち下部コンクリートのレイタンスが除去できないことから、工期および品質確保上有利となる直接法で打設することとした。

直接法の場合、逆打面を既設コンクリートに密着させるためには充填材としてブリージングがなく沈下を生じさせないための膨張性を持たせることが必要である。また、ランクI、IIの場合、D25の主鉄筋が10cmピッチ、D13の帯鉄筋およびスターラップ12.5cmと過密な配筋と継手の存在のため、バイブレーターによる締固めが不可能な状況であった。さらに高さ約2~5mの高所から落下させた場合に従来のコンクリートでは材料分離が生じる恐れもあった。鋼板巻立て部も5cm程度の隔離しかない部分もあり、厳しい条件下でのコンクリート打設であった。従って、高所落下でも材料分離せず自己充填型の高流動コンクリートを基本に、ノンブリージングで膨張性がある逆打用膨張コンクリートの特性を兼ね備

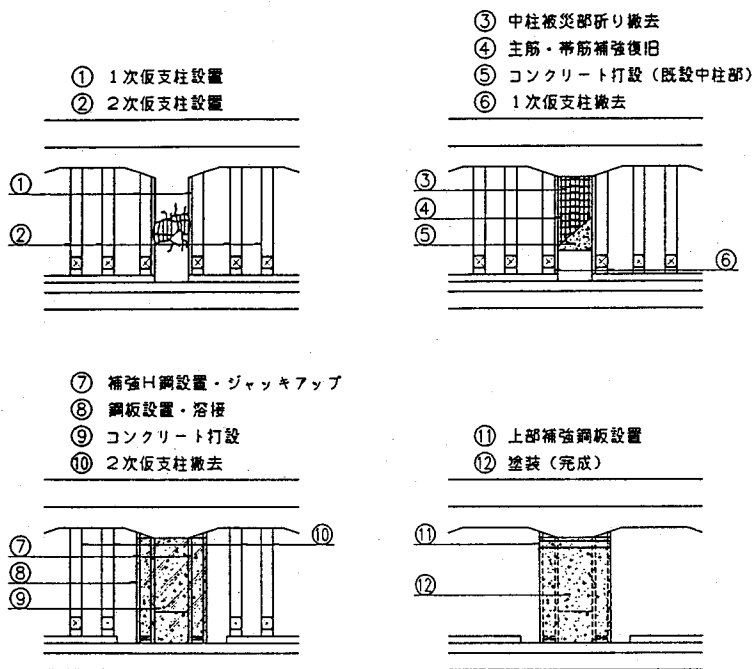


図-19 中柱本復旧施工順序 (ランク I)

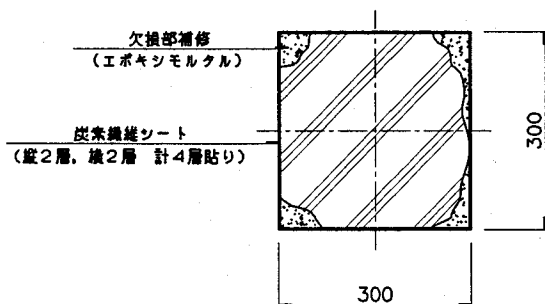


図-21 炭素繊維シートによる補強

えた、逆打用膨張高流動コンクリート (表-10) を採用した。

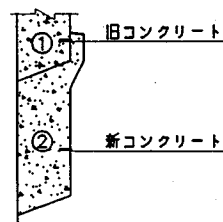
H 形鋼による補強のないランク III の復旧は、全充填厚が 50 mm と薄く、柱 1 本当たりの打設量が少量なため、無収縮モルタルを採用した。

ランク I, II の場合、既設柱のコンクリート打ち替え後、H 形鋼による補強を実施した。H 形鋼は基本的には継手のない 1 本状態で、H 形鋼下端に埋殺しのフラットジャッキを設置して所定の軸力が確実に伝達するようにプレロードを導入した。

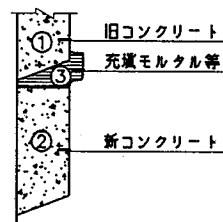
鋼板巻立てによるせん断強度増強は、ランク I ~ III には板厚 6 mm あるいは 9 mm の鋼板を使用した。鋼板継手は開先加工、突合わせ溶接とした。

プラットホーム下柱は被災程度はランク III であるが、

(直接法)



(充填法)



(注入法)

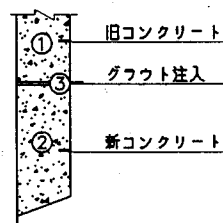


図-20 逆打工法の種類

表-10 逆打用膨張高流動コンクリートの仕様と材料

項目	管理値 (製造後 20~120 分)
スランプフロー	65.0~72.0cm (現場後添加後)
空気量	2.0 ± 1.0 %
圧縮強度	24N/mm ² (封緘材令 3 日)
自由膨張率	1% 程度 (0.5~2.0%)

材 料	規 格 ・ 性 状 等
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	海砂+砕砂 (比重: 2.57)
粗骨材	砕石 (比重: 2.61, G _{max} : 20mm)
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
分離低減剤	セルロース系特殊フーリング抑制剤
膨張剤	逆打用アルミ系特殊膨張剤

高さが約 1 m と低く、配管やダクトが近接しているため鋼板巻立てが困難であった。そこで、図-21 に示す炭素繊維シートによる補強を実施した。炭素繊維シートは 4 層貼りとし、柱のエポキシ樹脂注入および欠損部の断面修復後、含浸性エポキシ樹脂にて縦方向、横方向と向き

を変えて順次貼り付け、表面は含浸性エポキシ樹脂でコーティングした。

RCの幅0.2mm以上のひび割れにはエポキシ樹脂を注入した。注入方法はひびわれ部のシール後、シリンドラ工法で注入した。なお、注入後柱部でコアを採取し、圧縮強度試験を実施して注入効果の確認をしている。

5. おわりに

故久保慶三郎先生が論文「関東大震災の今日的意義を考える」の中で、“震害はつぎの4つの理由で根絶することは難しい。したがって軽減する努力が大切である。”と説かれている、その理由とは、

- (1) 地震に対し脆弱な構造物が現存している。
 - (2) 地震現象は完全には解明されていない。
 - (3) 構造物の設計は経済原則に基づいている。
 - (4) 地震を経験していない構造物が多く存在する。
- (4)の説明では、地下鉄トンネル、超高層建物、長大橋梁を挙げておられた。今回の地震では、まさに指摘された地下鉄トンネルが被災した。幸いにして1名の死者や重傷者も出なかったわけであるが、このことを我々地下鉄建設に係わる土木技術者としては“自然からのやさしい警告”であると受けとめる必要がある。

被災の状況、そしてそれに対する解析の試みから、RC造の中柱に弱点があり、周辺地盤の変形に拘束されて構造物が変形するとして概ね被災再現が可能、などのことが分かった。また、復旧工事においては材料運搬経路の確保が初期において最も肝要なことであることもわかった。

今回の震災経験により

- (1) 危機における交通管理体制の確立
- (2) 応答変位法による設計手法の確立とそのための

地盤評価手法の確立

(3) 耐震設計レベルの社会的合意

などが地下鉄構造物から見た今後の主要課題ではないかと考えている。

なお、本論文執筆にあたり、阪神電鉄、神戸電鉄、神戸高速鉄道、山陽電鉄の各電鉄の方々に多くの資料提供をいただいたこと、ならびに(株)大林組の皆様方のご協力に対して厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 神戸市高速鉄道(株)：創立20年記念誌，pp.132-142，1978年10月。
- 2) 神戸市交通局：神戸市高速鉄道山手線（新長田～大倉山間）工事記録，pp.40-77，1984年2月。
- 3) 神戸市交通局：神戸市高速鉄道西神線（名谷～新長田間）工事記録，pp.3-9，1979年3月。
- 4) 神戸市交通局：神戸市高速鉄道山手線（大倉山～新神戸間）工事記録，pp.19-105，1986年3月。
- 5) 神戸市企画局総合調査課：神戸の地盤，p.38，1980年3月。
- 6) 神戸市交通局：神戸市高速鉄道山手線，新長田～大倉山間工事誌，1984年2月。
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準，同解説コンクリート構造，p.87，1992年11月。
- 8) 土岐憲三ほか：兵庫県南部地質の震源特性と地震振動特性，土木学会誌，p.40，1995年9月。
- 9) 田尻勝，佐俣千載，松田隆，大内一：地下鉄駅者の被害に関する一考察，土木学会，阪神淡路大地震に関する学術講演会，1996年1月。
- 10) 岩見義男：神戸のまち兵庫県南部地震での地下鉄構造物の被害と復旧。
- 11) (財)建設工学研究所：阪神大震災被害状況調査報告書，1995年4月

(1996.1.12 受付)