

第2章 地下構造物の被害実態の把握

2.1 概説

1995年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震は、社会資本の集中した近代都市神戸の直下に震源を持ち、土木・建築構造物が致命的な被害を与え、さらに各種都市機能、市民生活に甚大な影響を及ぼした。

この地震以前までは、地下構造物は耐震性に優れていると言われていた。これは、近代化した都市に存在している地下構造物（シールドトンネル、共同溝等）が大地震を経験していないために、その実態が明確でなかったための認識であったかもしれない。地震直後には、周辺地上構造物が目を覆うような被害を受けているのに対し、地下構造物の被害の報告は少なかった。しかし、時間経過とともに、地上構造物の被害規模よりは小さいが、各種地下構造物ごとの被害の実態が明らかになり、地下構造物の耐震に対する配慮の必要性が認識されたのが現実であった。

今回の地震では、“安全神話の崩壊”と新聞などで大きく報じられた神戸高速の大開駅、あるいは市営地下鉄上沢駅および三宮駅のように、かなりの被害を受けた個所も見られる。これらの被害に共通することは、開削工法で施工された地下構造物で、被害はRCの柱に集中していた。これ以外の山岳・シールドトンネル、共同溝等の地下構造物でも被害の程度は小さいもののなんらかの被害を受けている。今後は被災の有無にかかわらず、地形・地質、活断層を考慮に入れた地震動、地下構造物の形状・寸法・材質、施工法（山岳工法、開削工法、シールド工法等）を考慮に入れた総合的な分析を行い、地下構造物の耐震性について考えていく必要がある。

ここでは、代表的な地下構造物（山岳トンネル、都市トンネル（地下鉄）、地下街・地下駐車場、およびライフライン）の被害の実態を客観的に整理することで、今後の地下構造物の耐震性を考慮するための参考となるように被害の実態を取りまとめた。

2.2 山岳トンネルの被害

2.2.1 概説

これまでトンネルは、耐震性に富む構造物であるといわれてきた。しかしながら、吉川¹⁾の日本の鉄道トンネルの震災事例分析によれば、1)地震規模が大きく、2)地震断層面からの距離が近く、3)特殊条件が介在すれば、トンネルも地震の被害を受けている。特殊条件とは、坑口部で斜面災害のもらい災害を受けるケース、トンネルを横切る地震断層がずれた場合、トンネルや周辺地山に何らかの欠陥があった場合等が挙げられている。

兵庫県南部地震では、被災地域内に100を超える山岳工法トンネルが存在した。この中で、軽微なものも含めて30余本のトンネルが地震の影響を受け、補強・補修を要するような被害を受けたトンネルは、約10本であった。この数字は関東地震の際に被災地内にあった百数十本の鉄道トンネルの8割以上が何らかの被害を受けた事例と比べてかなり少なく、微細なクラック、剥落などで被害として報告されていない例も多いと考えられるが、全体的に地上部の甚大な被害と比べて軽微であったと言えるであろう。このことから、トンネルが耐震性に富む構造物であることが再確認されたといえよう。これまでの地震被害の特徴とされていた坑口部被害は少なく、また、断層のずれによる被害も少なかったといえる。そして、トンネル内の被害位置は、建設中に集中湧水や断層粘土が存在するため難工事を強いられた断層や破砕帯の区間が多かったことがこれまでの調査でわかっている。断層部においては、常時の（静的な状態での）健全度の確認と維持・管理が重要であるといえる。

ここでは、地震被害地域内のトンネルをできる限り漏れなく取り上げるよう心がけたが、対象トンネルは、直接現地調査を行ったものだけでなく、トンネル管理者からの情報提供を受けただけのものも含まれているため、情報の精度には若干のばらつきもあるものと考えられる。

また、調査対象から漏れているトンネルも若干ながらあるだろう。

図-2.2.1は、これらの調査対象トンネルの位置を示したものである。また、表-2.2.1に被災地域内の山岳トンネルに関する基本データの一覧を示す。

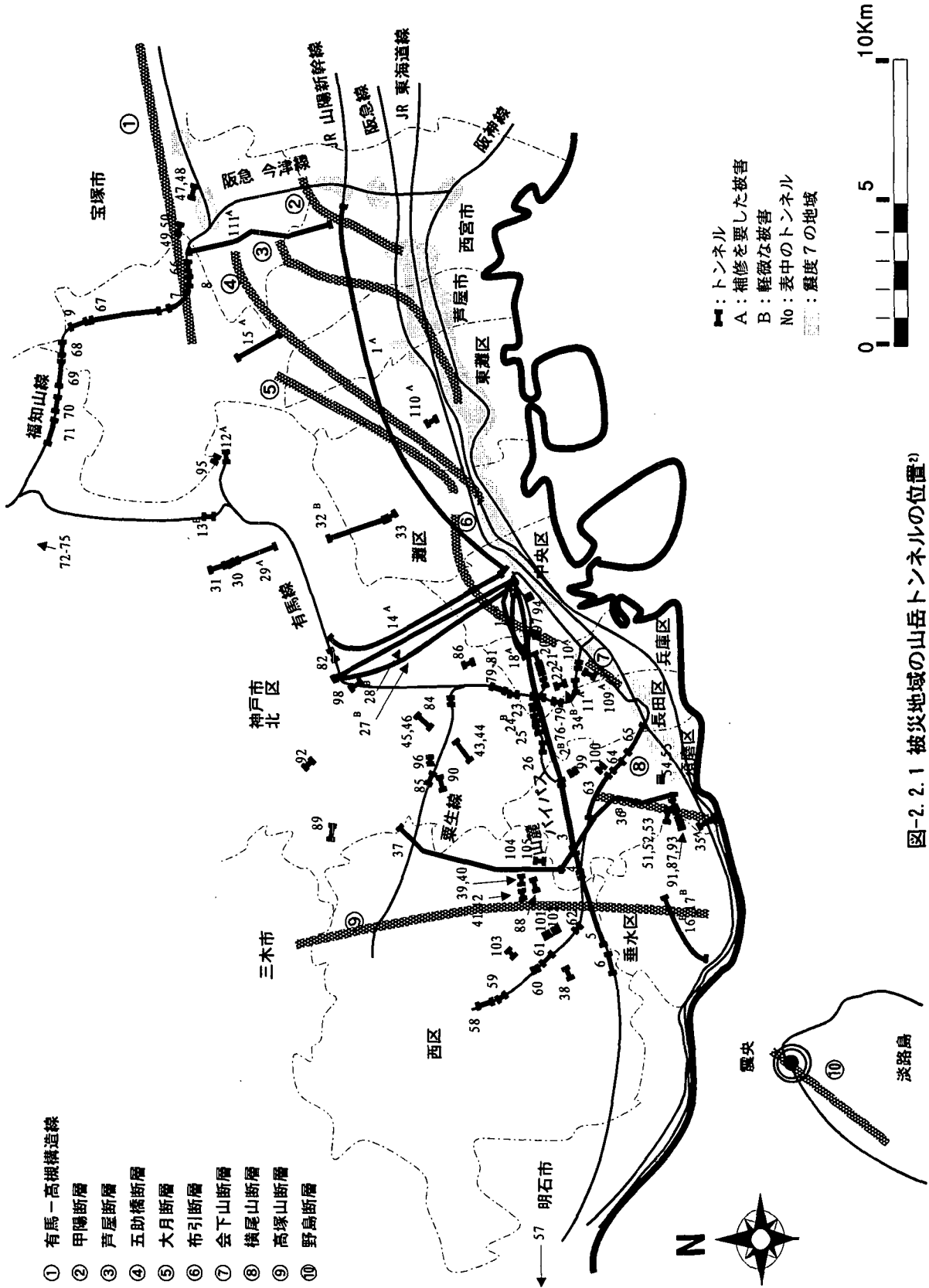


図-2.2.1 被災地域の山岳トンネルの位置②

表-2.2.1 被災地域内の山岳トンネル基本データ²⁾

No	被害程度	トンネル名	企業体	種類1	種類2	単複別	長さ(m)	土被り(m)	覆工(t=cm)	幅、高さ(m)	地形、地質、[著名断層]	被害状況
1	A	六甲	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	16250	460	C	9.6, 8.7	六甲型花崗岩類、[甲陽F、芦屋F、五助橋F、大月F、布引F]	アーチ天端のせん断クラック・剥落、側壁・アーチ打継部の圧ざ・剥落、中央通路壁の前傾、インバート隆起
2	B	神戸	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	7970	272	C	9.6, 8.1	布引花崗閃緑岩が基盤をなし、須磨工区から神戸層群、[布引F]	アーチ肩部のクラック、湧水量増加、打継ぎ目の軽微な剥離
3		須磨	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	2388	45	C	9.6, 8.1	神戸層群-砂岩、泥岩、礫岩	被害報告なし
4		奥畑	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	363	90	C	9.6, 8.1	神戸層群-凝灰岩	被害報告なし
5		高塚山	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	3264	85	C	9.6, 8.1	神戸層群-砂岩、泥岩、礫岩、凝灰岩 大阪層群-礫岩、[高塚山F]	被害報告なし
6		長坂	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	625	20	C	9.6, 8.1	大阪層群-砂岩、泥岩、礫岩	被害報告なし
*7		第1名塩	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	1470	150	C	8.5, 7.2	一部分神戸層群-角れき凝灰岩、大部分は有馬層群-流紋岩-石英安山岩質角れき凝灰岩	被害報告なし
*8		生薮	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	1430	250	C	8.5, 7.2		被害報告なし
*9		第1武田尾	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	570	95	C	8.5, 7.2	有馬層群-流紋石英安山岩-角れき凝灰岩	被害報告なし
10	A	東山	神戸電鉄	鉄道	有馬線	複線	141	4 to 8	CB, C	8.4, 6.5	大阪層群-泥岩、[会下山F]	アーチ肩部の軸方向剥落、トンネル坑口面壁の庇住クラック開口
11	A	会下山	神戸電鉄	鉄道	有馬線	複線	253	2 to 12.5	CB, C	8.1, 6.2	大阪層群-砂岩、泥岩、礫岩、[会下山F]	坑口上部道路面にクラック
12	A	有馬	神戸電鉄	鉄道	有馬線	単線	450	6 to 43.5	CB, C	4.6, 5.8	有馬層群-流紋岩	庇住クラック(引張クラック)の伸び
13	B	五社	神戸電鉄	鉄道	三田線	単線	115	40	C	4.6, 5.8		覆工コンクリートのクラック
*14	A	北神	北神急行	鉄道	北神急行線	複線	6983	350	RC(35)	8.4, 6.93	花崗岩[布引F]	覆工コンクリートが圧縮破壊により剥離、クラック幅増大
*15	A	盤滝	県道路公社	道路	西宮北有料道路	2車線	1743	20 to 250	C(30) RC(35)	8.8, 6.3	六甲花崗岩[五助橋F、F1断層]	鉄筋圧縮・圧ざ、コンクリート剥落、路盤浮き上がり、輪切りクラック多数
*16	B	舞子(上り)	本四公団	道路	本州四国連絡道路	3車線	3293	4 to 50	C	14.7, 9.9	大阪層群(礫質層)-花崗岩	クラック、天端沈下、仮インバートにクラック、切羽吹付け一部剥離
*17	B	舞子(下り)	本四公団	道路	本州四国連絡道路	3車線	3250	4 to 50	C	14.7, 9.9	大阪層群(礫質層)-花崗岩	クラック、天端沈下、仮インバートにクラック、切羽吹付け一部剥離
18	A	布引(上り)	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	3032	260	C(75)	9.5, 7.6	破碎花崗岩	SL付近の覆工コンクリートの剥落、輪切りひび割れ
*19	B	第2布引	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	3032	240	C	9.5, 7.4	花崗岩	一部の両側監査路が沈下
20		平野	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	622	85	C	9.9, 7.4	花崗岩	被害報告なし
21		菊水山第1	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	85	32	C	10.4, 7.4	花崗岩	被害報告なし
22		菊水山第2	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	116	25	C	10.1, 8.2	花崗岩	被害報告なし
23		鶴越第1	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	101	29	C	10.4, 7.6	花崗岩	被害報告なし
24	B	鶴越第2	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	207	40	C	10.4, 7.6	花崗岩	目地に浮き、剥落
25		鶴越第3	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	388	47	C	10.4, 7.6	花崗岩	被害報告なし
*26		ひよどり台	市道路公社	道路	山麓パハス	2車線	240	40	C(50)	9.3, 7.2	花崗岩	被害報告なし
27	B	新神戸	市道路公社	道路	新神戸トンネル有料道路	2車線	6910	330	C(50)	9, 7.5	花崗岩	目地に浮き、剥落あり
*28	B	第2新神戸	市道路公社	道路	新神戸トンネル有料道路	2車線	7175	330	C(60)	9.5, 7.2	花崗岩	目地の浮き、剥落あり。リング状のひび割れ
29	A	唐櫃	市道路公社	道路	六甲北有料道路	2車線	1245	145	C	9, 7	流紋岩質凝灰岩	目地の浮き、剥落、ひび割れ
30		有野第1	市道路公社	道路	六甲北有料道路	2車線	118	25	C	9.7, 8.1	流紋岩質凝灰岩	被害報告なし
31		有野第2	市道路公社	道路	六甲北有料道路	2車線	369	35	C	9.7, 8.1	流紋岩質凝灰岩	被害報告なし
32	B	六甲山	市道路公社	道路	六甲有料道路	2車線	2843	280	C	10.1, 6.7	花崗岩	目地の浮き、剥落、リング状のひび割れ
33		篠原	市道路公社	道路	六甲有料道路	2車線	23	15	C	10.7, 6.7	花崗岩	被害報告なし
34	B	ひよどり	市道路公社	道路	西神戸有料道路	2車線	452	67	C	9.0, 7.0	花崗岩	目地の浮き、剥落
*35	A	塩屋谷川	市土木局	水路	河川		1705	4 to 80	C		神戸層群、六甲花崗岩	覆工コンクリートの施工ジョイントの目開きクラック発生、断層部で8cmのずれ
*36	B	須磨	市開発局	パハス			6000	140	C	5.6, 4.0	六甲花崗岩、神戸層群	一部区間にひび割れ
*37		須磨(延伸)	市開発局	パハス			7451		C			被害報告なし
38		井吹	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	195	20	C(80)	10.2, 8.3	大阪層群	被害報告なし

表-2.2.1 被災地域内の山岳トンネル基本データ²⁾

No	被害程度	トンネル名	企業体	種類1	種類2	単複別	長さ(m)	土積り(m)	覆工(t=cm)	幅、高さ(m)	地形、地質、[著名断層]	被害状況
39		太山寺第1(東行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	283	53	C(60)	10.6、7.8	花崗岩、神戸層群	被害報告なし
40		太山寺第1(西行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	257	37	C(60)	10.6、7.7	花崗岩、神戸層群	被害報告なし
41		太山寺第2(東行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	78	25	C(60)	10.6、7.8	花崗岩、神戸層群	被害報告なし
42		太山寺第2(西行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	66	17	C(60)	10.6、7.7	花崗岩、神戸層群	被害報告なし
43		藍那(東行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	1176	68	C(60)	10.4、7.8	神戸層群	被害報告なし
44		藍那(西行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	1175	65	C(60)	10.4、7.8	神戸層群	被害報告なし
45		長坂山(東行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	745	68	C(40)	10.5、7.8	丹波層群、粘板岩	被害報告なし
46		長坂山(西行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	715	68	C(40)	10.6、7.8	丹波層群、粘板岩	被害報告なし
47		宝塚東(上り)	日本道路公団	高速道	中国自動車道	3車線	364	62	C(80)	13.2、8.2	チャート	被害報告なし
48		宝塚東(下り)	日本道路公団	高速道	中国自動車道	3車線	362	59	C(80)	13.2、8.2	チャート	被害報告なし
49		宝塚西(上り)	日本道路公団	高速道	中国自動車道	3車線	347	42	C(80)	13.2、8.2	花崗岩	被害報告なし
50		宝塚西(下り)	日本道路公団	高速道	中国自動車道	3車線	244	42	C(80)	13.2、8.2	花崗岩	被害報告なし
51		高倉山第一(上り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	530	97	C(50)	9.3、7.3	花崗岩	被害報告なし
52		高倉山第二(上り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	538	86	C(50)		花崗岩	被害報告なし
*53		高倉山(下り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	579	87	C(30)	10.2、7.5	六甲花崗岩	被害報告なし
54		月見山(上り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	236	43	C(80)	9.1、7.7		被害報告なし
55		月見山(下り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	228	34	C(80)	9.1、7.7		被害報告なし
56		的形	山陽電鉄	鉄道	山陽電鉄本線	複線	196		BR(57)		流紋岩	被害報告なし
57		妻鹿	山陽電鉄	鉄道	山陽電鉄本線	複線	181		BR(57)			被害報告なし
58		西神第2	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄西神線	複線	585	7	RC		大阪層群	被害報告なし
59		西神第1	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄西神線	複線	100	3	RC Box		大阪層群	被害報告なし
60		表山第2	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄西神線	複線	100		RC Box		大阪層群	被害報告なし
*61		表山第1	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄西神線	複線	770	41	C(30)	8.6、7.1	大阪層群	被害報告なし
62		小寺	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄西神線	複線	425	7	RC Box		大阪層群	被害報告なし
63		落合	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄西神線	複線	1274		C	8.4、	神戸層群	被害報告なし
64		第1横尾	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄西神線	複線	247		C	8.4、	六甲花崗岩	被害報告なし
65		第2横尾	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄西神線	複線	1802		C	8.4、6.8	六甲花崗岩	被害報告なし
*66		城山	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	65		C	8.5、7.2	有馬層群-流紋岩	被害報告なし
*67		第2名塩	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	2960		C	8.5、7.2		被害報告なし
*68		第2武田尾	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	705		C	8.5、7.2	有馬層群-流紋岩質溶結凝灰岩	被害報告なし
*69		第1道場	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	1235		C	8.5、7.2	有馬層群-流紋岩質溶結凝灰岩~凝灰岩質頁岩	被害報告なし
*70		第2道場	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	150		C	8.5、7.2	有馬層群-凝灰岩質頁岩~泥質凝灰岩の互層	被害報告なし
*71		第3道場	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	475		C	8.5、7.2	同上及び角れき凝灰岩	被害報告なし
72		日出坂	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	380		C	8.5、7.2		被害報告なし
73		第1古市	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	200		C	8.5、7.2		被害報告なし
74		第2古市	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	120		C	8.5、7.2		被害報告なし
75		丹南	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	475		C	8.5、7.2		被害報告なし
76		鶴越	神戸電鉄	鉄道	有馬線		70		C	7.7、5.7		被害報告なし
77		中山	神戸電鉄	鉄道	有馬線		236		C	7.7、5.7		被害報告なし
78		角山	神戸電鉄	鉄道	有馬線	複線	46		C	7.7、6.1		被害報告なし
79		烏原(下り)	神戸電鉄	鉄道	有馬線	単線	154		C	7.7、5.7		被害報告なし
80		烏原(上り)	神戸電鉄	鉄道	有馬線		59		RC	8.6、6.6		被害報告なし
81		菊水山(上り)	神戸電鉄	鉄道	有馬線	単線	1184		C	8.6、6.6		被害報告なし

表-2.2.1 被災地域内の山岳トンネル基本データ²⁾

No	被害程度	トンネル名	企業体	種類1	種類2	単複別	長さ(m)	土盛り(m)	覆工(1=cm)	幅、高さ(m)	地形、地質、[著名断層]	被害状況
83		有井	神戸電鉄	鉄道	都市公園線	単線	890		C	5.1、5.6		被害報告なし
84		小部	神戸電鉄	鉄道	粟生線	単線	79		C	4.5、5.1		被害報告なし
85		藍部	神戸電鉄	鉄道	粟生線	単線	78		C	4.5、5.1		被害報告なし
86		小部	市土木局	道路	428号	2車線	482	50	C	8.62、6.3	花崗岩	被害報告なし
87		鉄枿山	市土木局	道路	神戸明石線	2車線	466	20	C	9.06、6.0	神戸層群	被害報告なし
88		太山寺	市土木局	道路	神戸宝塚線	2車線		50	C	8.48、5.9	花崗岩[高塚山F]	被害報告なし
89		衛原	市土木局	道路		2車線	249	20	C	8.0、6.15	有馬層群	被害報告なし
90		藍部	市土木局	道路	小部明石線	2車線	209	2	C	8.74、6.3	花崗岩	被害報告なし
91		下畑	市土木局	道路	神戸明石線	2車線	163	20	C	8.2、6.0	神戸層群	被害報告なし
*92		福地	市土木局	道路	428号	2車線	149	20	C	8.8、6.1	有馬層群	被害報告なし
93		須磨寺	市土木局	道路	神戸明石線	2車線	121	15	C	8.45、7.0	神戸層群	被害報告なし
94		再度	市土木局	道路		2車線	98	20	C	5.42、5.0	花崗岩	被害報告なし
95		新有馬	市土木局	道路		2車線	78	20	C		神戸層群	被害報告なし
96		東藍部	市土木局	道路	小部明石線	2車線	75	10	C	7.96、6.3	神戸層群	被害報告なし
97		鳳山	市土木局	道路	428号	2車線	44	15	C		花崗岩	被害報告なし
*98		箕谷	市土木局	道路	428号	2車線	330	20	C		花崗岩	被害報告なし
99		岩山東	市土木局	道路		2車線	125	30	C	10.89、6.1	花崗岩	被害報告なし
100		玉坂	市土木局	道路		2車線	200	10	C	8.25、5.0	神戸層群	被害報告なし
101		吹上	市開発局	道路	西神中央線	2車線	252	30	C	9.4、6.4	大阪層群	被害報告なし
102		前開	市開発局	道路	西神中央線	2車線	64	10	C	8.0、5.3	大阪層群	被害報告なし
103		西神2号線	市開発局	道路	西神2号線	2車線	105	20	C	9.0、6.0	大阪層群	被害報告なし
*104		布施畑上	市開発局	道路		2車線	227	30	C	11.0、6.0	神戸層群	被害報告なし
*105		布施畑下	市開発局	道路		2車線	321	30	C	9.0、6.0	神戸層群	被害報告なし
106		送水	市水道局	上水道								被害報告なし
107		随道配水池	市水道局	上水道								被害報告なし
108		管路随道	市水道局	上水道								被害報告なし
109	A	会下山		河川	新湊川		670	37	BR、ST	6.7、7.6	花崗岩、[会下山F]	煉瓦の剝離、剥落、亀裂、坑口崩壊
110	A	本山横坑			共同坑		344	96		3.0、3.0	花崗岩	天端、側壁、扇部の損傷
111	A	千羽瀬水路	市水道局	上水道A~C路線			4900.0	2 to 25	C	1.5、1.9	花崗岩、神戸層群、埋め戻し土	剥落、亀裂、天端圧ざ

・被害程度

A：補強、補修を必要とした被害 B：補強、補修を必要としなかった軽微な被害

・覆工

C：コンクリート CB：コンクリートブロック RC：鉄筋コンクリート BR：レンガ ST：石造

・No

*：NATMによる施工

2.2.2 鉄道トンネルの被害

(1) 六甲トンネル

山陽新幹線六甲トンネルは、中生代の花崗岩中に建設された、延長 16km を超える長大トンネルで、建設時には被圧水を伴う多くの断層破碎帯に遭遇し、難工事を余儀なくされた。

被害は、1) アーチクラウン部のせん断ひび割れとその先端部の剥落、2) アーチ・側壁の打ち継ぎ目部での圧縮性のひび割れに伴う剥落、3) トンネル横断方向のリング状の打ち継ぎ目部の剥落、に代表される。

図-2.2.2 にこれらの被害を模式的に、1枚の図に重ねて示した。主な被害箇所数は12箇所であり、写真-2.2.1～写真 2.2.3 にこれらの被害状況を示す。いずれの箇所も覆工に強い圧縮力が作用したもので、被害の形態の差異は、地震力の作用方向、地質条件、および、トンネル覆工の構造条件によるものと推定される。その位置は、施工時に断層破碎帯に遭遇した位置に一致する(図-2.2.4)。

なお、前述したこれらのトンネル覆工の被害箇所は、無収縮モルタルによる断面修復、ロックボルト工、炭素繊維シートにより補修された。修復方法の概略図を図-2.2.3 に示す。

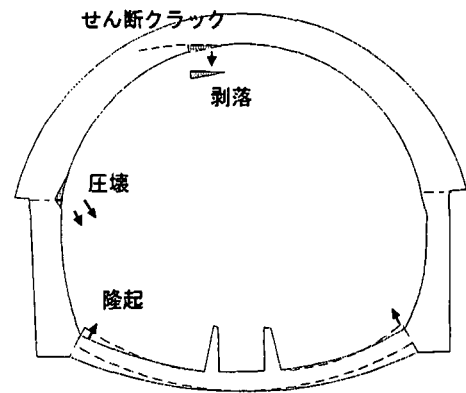


図-2.2.2 六甲トンネルの被害模式図

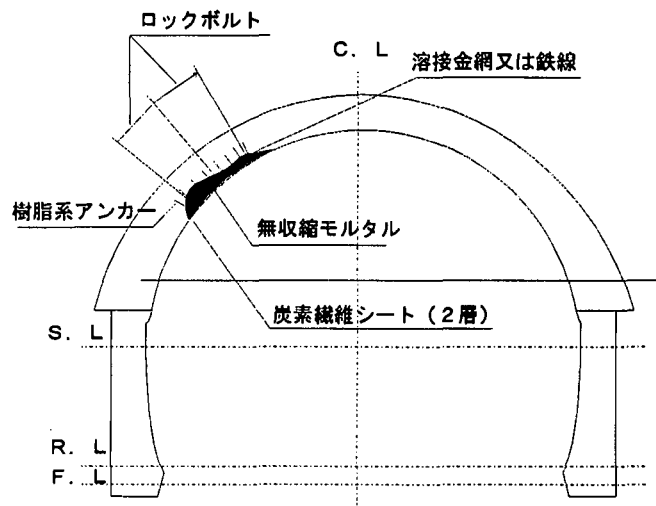


図-2.2.3 六甲トンネルの修復

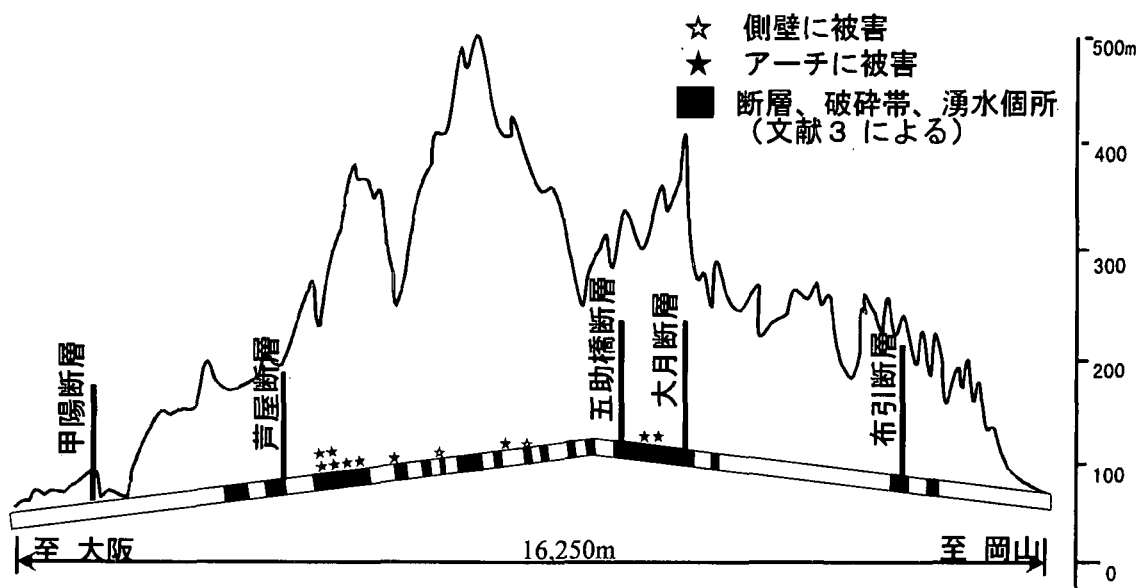


図-2.2.4 六甲トンネルの被害位置(縦断図)



写真-2.2.1 六甲トンネルにおける天端部の圧ざ (541km810m 付近)

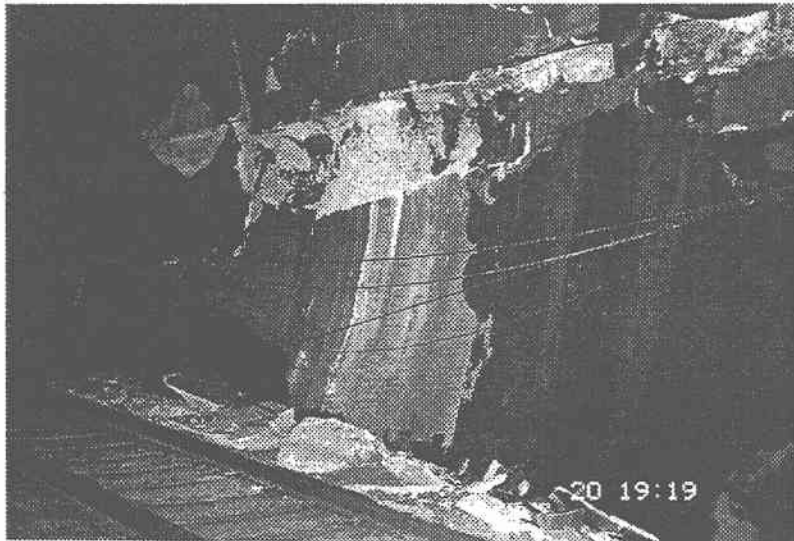


写真-2.2.2 六甲トンネルにおける左側壁圧ざ (538km870m 付近)

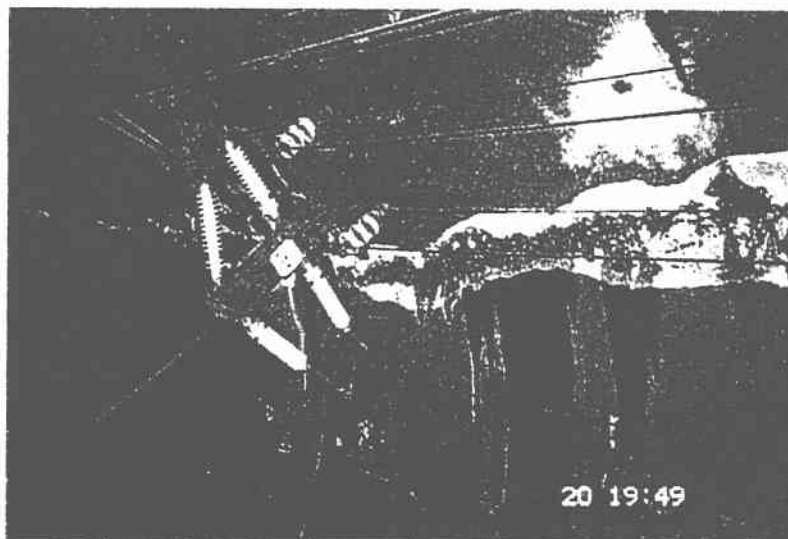


写真-2.2.3 六甲トンネルにおける天端部の圧ざ (537km030m 付近)

(2) その他の新幹線トンネル

他の新幹線トンネルについては、六甲トンネルよりも震央に近いにも関わらず、覆工コンクリートの補修モルタルやコンクリートの小片が落下したのみであり、被害はほとんどなかったと言ってよい。

また、在来線の福知山線にも山岳トンネルがいくつかあるが被害はなかった。

(3) 神戸電鉄

神戸電鉄の東山トンネルは、67年前に建設されたコンクリートブロック造のトンネルで、上部地山、切り取りにより土被りは10m以下と浅い。坑口部面壁の既往クラックが開口し（写真-2.2.4）、アーチ肩部にトンネル軸方向のクラックが数本生じた。隣接する会下山トンネルは、軽微なクラックが生じた程度であった。両トンネルおよび、有馬トンネルは、老朽トンネルということもあり、耐震性を向上させるために覆工改築がなされた。

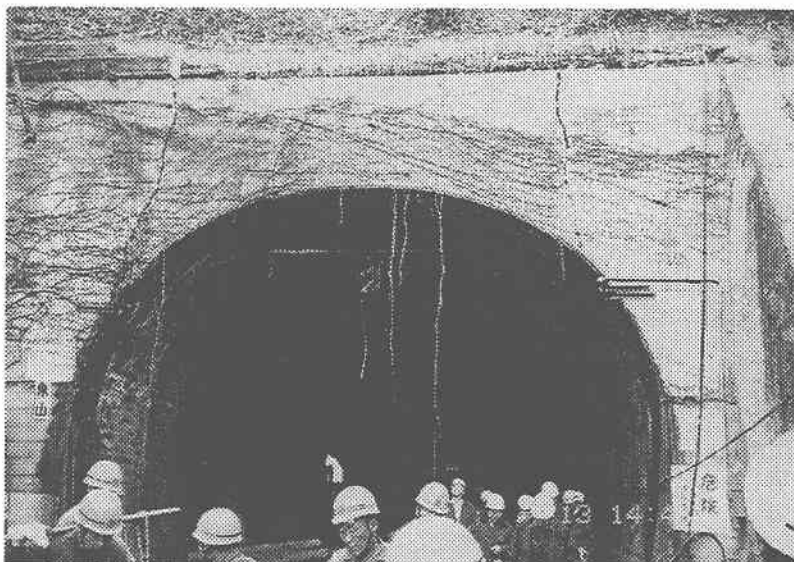


写真-2.2.4 東山トンネルの坑門被害

(4) 北神急行と山陽電鉄

北神急行の北神トンネルには、アーチに小規模なクラックが生じ、一部剥落が生じた。

神戸市営地下鉄の5トンネル、山陽電鉄の2トンネルには、まったく影響はなかった。

2.2.3 道路トンネルの被害

(1) 盤滝トンネル

六甲北有料道路の盤滝トンネルでは、施工時に断層粘土に遭遇した箇所において、アーチから側壁にかけて3mの幅で覆工コンクリート（インバートなし、無筋）が破壊し、落下した。また、約80m離れた地点では、やはり断層粘土部で、側壁部覆工（インバートあり、有筋）が圧壊し、鉄筋が座屈した。舗装版が持ち上がった現象から判断して、強い鉛直上向きの力が作用したものと想定される。本地点のインバートコンクリートは断層粘土に沿ってひび割れが生じてはいたが、変形は見られなかった。

(2) 布引トンネル

山麓バイパス道路の布引トンネルには、若干の亀裂や剥落の他、アーチ・側壁の打ち継ぎ目部にせん断クラックが生じ、一部が剥落した。他の山麓バイパスの8トンネルは、若干のひび割れが生じた程度で、ほとんど被害がなかった。その他の多くの道路トンネルについても、若干のひび割れが生じたか、あるいは全く被害がなかった。

(3) 舞子トンネル

また、震央に最も近い位置にあったトンネルは、建設中の本四連絡道路の舞子トンネルであり、土被りの浅い未固結の大阪層群のれき層に位置している。地上部では、ほぼ直上の4階建ての建物が崩壊したにも関わらず、被害は軽微で、天端沈下および、吹付けコンクリートの剥落が見られた程度であった。

2.2.4 その他のトンネル

(1) 塩屋谷川放水路トンネル

塩屋谷川放水路トンネルは、下流側坑口付近で須磨断層と近接し、中間部で横尾山断層と交差して建設されている。須磨断層付近では、リング状のひび割れが生じた。横尾山断層との交差位置では、トンネルの北西側（上流側）が相対的に右に8cm、上に5cm移動し、アーチ、側壁、インバートにずれを伴うひび割れが多数生じた。（図-2.2.5）改築工事時の観察によれば、内巻きとしての吹付けコンクリートにも覆工コンクリートと同様の破損が生じていたとのことである。なお、断層の下流側は六甲花崗岩、上流側は新第三紀中新世神戸層群の砂岩・泥岩互層よりなっている。

（写真-2.2.5）

(2) 会下山トンネル

新湊川の会下山トンネルは、1901年に建設された煉瓦造の河川トンネルである。上流側坑門には、2cm程度の食い違いを伴うひび割れが生じた。トンネル内の煉瓦覆工には、最大幅5mm程度のひび割れが生じ、幅5cm、深さ3cmの剥離が生じた。また、下流側坑口部は斜面崩壊のために崩壊した。ひび割れ、および剥離は下流方に多く見られ、天端付近とSL付近に集中して発生している。剥離・剥落はトンネル軸方向の圧縮力によるものと推定されている。

(3) 須磨ベルトコンベア用トンネル

須磨ベルトコンベア用トンネルは、南北方向に約13kmの延長をもつトンネルであるが、被害はほとんどなかったと報告されている。

2.3 都市トンネル（地下鉄）および地下街・地下駐車場の被害

2.3.1 都市トンネル（地下鉄）の被害^{6),7),8)}

(1) 概要

神戸市内には神戸高速鉄道（営業キロ数7.6km）と神戸市営地下鉄（同22.7km）の2つの地下鉄営業線がある。

神戸高速鉄道には、西代から高速神戸を経て阪神電鉄の元町および阪急電鉄の三宮に至る東西線と、新開地・神戸電鉄湊川間を結ぶ南北線との2路線がある。これらのうち西代・高速長田間の一部と花隈・阪急三宮間の一部分を除いてほぼ全線が地下トンネルを走り、花隈、西元町、高速神戸、新開地、大開および高速長田の6駅が地下駅舎である。建設時期は1950年代の終わりから1960年代で、すべて開削工法によっている。

神戸市営地下鉄は新神戸と西神中央とを結ぶ地下鉄で、1972年から1987年にかけて建設された。山手線の全区間7,606mと西神線の新長田・板宿間1,431mが開削工法による函型トンネルであり、新神戸、三宮、

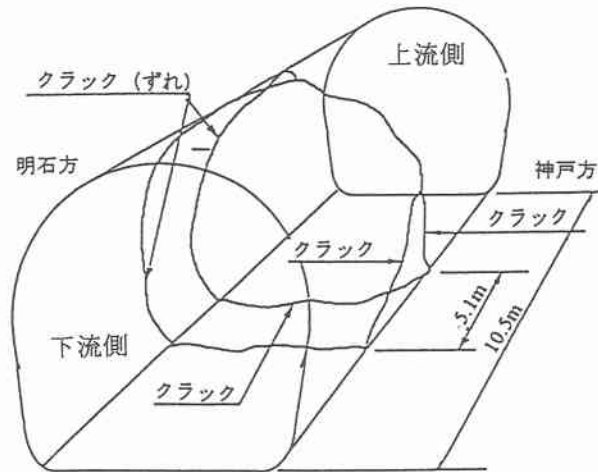


図-2.2.5 塩屋谷川トンネルのリング状クラック⁴⁾

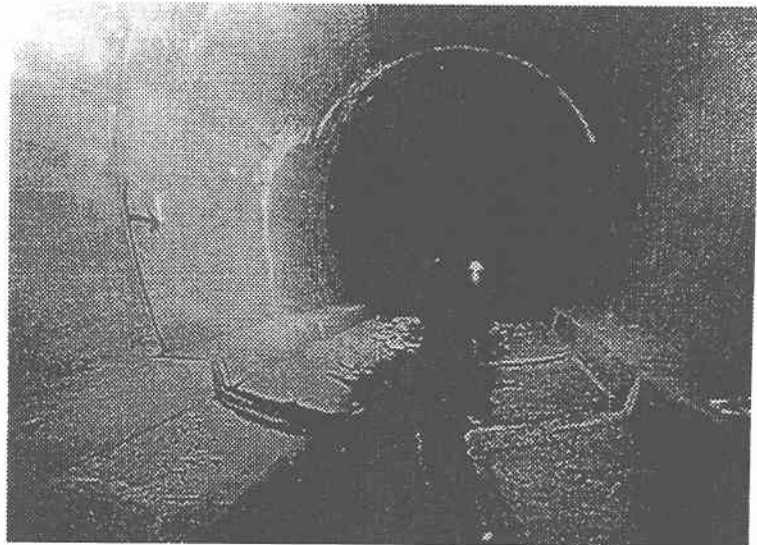


写真-2.2.5 塩屋谷川放水路のリング状のひび割れ

県庁前、大倉山、湊川公園、上沢、長田、新長田、および板宿の9つの地下駅舎がある。板宿の北側363mの区間がシールドトンネル、この先の235mが再び開削工法による函型トンネルである。さらにその先から名谷までは山岳トンネルとなる。西神延伸線においても地下を走る部分が断続的にあり、2つの山岳トンネル(合計1,355m)のほかに、函型トンネルの部分が4箇所(合計1,209m)ある。

以上の地下鉄の営業線以外に、阪神電鉄本線の岩屋・元町間約3.4kmは、1930年代前半に開削工法で建設された地下トンネルであり、この区間に春日野道、阪神三宮、および阪神元町の3つの地下駅舎がある。また、神戸電鉄線の湊川駅が地下駅舎であり、その北側がわずかな区間ではあるが開削トンネルとなっている。そのほか、山陽電鉄の西代駅および板宿駅においては、連続立体交差化事業として地上駅舎とは別に地下駅舎が構築されており、供用目前の状態地震に遭遇した。

兵庫県南部地震により特に大きな被害が生じたのは、上記の21の地下駅舎およびトンネル部のうち、次の地下駅舎およびトンネル部である。

- ・神戸高速鉄道：大開駅、高速長田駅、両駅に接続するトンネル部
- ・神戸市営地下鉄：三宮駅、上沢駅、新長田駅、上沢駅西側のトンネル部、新長田駅東側のトンネル部
- ・阪神電鉄本線：岩屋駅西側のトンネル部
- ・山陽電鉄本線：西代地下駅

被害の形態として圧倒的に多かったのは、函型断面の中間で上下スラブ間を支えているRC構造の中柱の損壊である。損壊の機構は、せん断破壊および上下端部の曲げ破壊である。その中でも特に被害が大きかったのは神戸高速鉄道の大開駅で、中柱が広範囲にかつ完全に破壊し上スラブが崩落した。このほかの被害の形態として、横断面側壁のひび割れや隅角部のハンチの破損などが見受けられた。

被災した構造物には、以下の共通点が見られる。

- ①開削工法によって構築されていた。
- ②地表近くの比較的浅いところに構築されており、土被り厚はいずれも10m未満であった。
- ③RC造の函型断面であり、多くは幅広断面で中間に支柱(中柱)がある。
- ④震度7の地域に位置する。
- ⑤縄文期に低湿地帯であった地域など、表層地盤が比較的軟らかい場所である。
- ⑥設計当時、地下構造物の耐震設計は一般的ではなく、特別な場合を除いて耐震検討はなされていなかった。

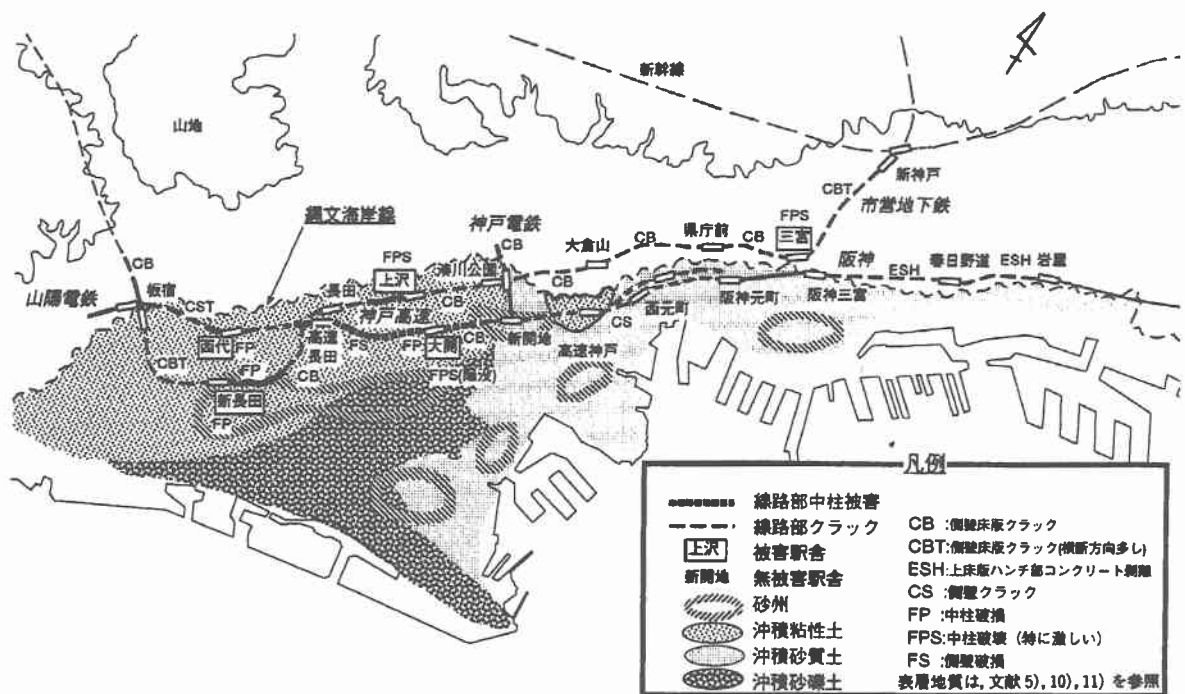


図-2.3.1 神戸市内の地下鉄の被害箇所と表層地質

⑦RC柱などの帯鉄筋量が少なく、せん断に対する耐力・変形性能が低い。

⑧被災したRC柱の多くは、常時、60~100kgf/cm²の高いレベルの圧縮応力が作用していた。

地下構造物は地震に対して強いと考えられてきたが、今回の地震では重大な被害に至った構造物もあった。被害のメカニズムについては、現在も地震の応答解析などによる検討作業が積極的に行なわれている。各方面でこれまでなされた検討の結果は、以下のように結論付けているものが多い。

①RC柱の損傷は殆どせん断または曲げ・せん断によるもので、上下動による軸力変動が主因ではない。

②常時は軸力のみが作用している函型断面の中間支柱にせん断および曲げを生じさせたのは、断面の上下床版間に発生した水平相対変位と考えられる。この水平相対変位は、強烈な水平方向の地震動によって周辺地盤の内部に深さ方向の変位差（せん断ひずみ）が生じたためと考えられる。側壁に生じた水平方向ひび割れや隅角部のハンチの破損なども、この断面変形で説明できる。

③RC柱に被害が集中したのは、上床版からの鉛直荷重のみをうけるものとして設計され、曲げ、せん断に対する靱性が低いところに、地震時に想定外の曲げ・せん断変形が生じたためである。側壁や床版は、一般に曲げ・せん断に対する変形性能が中柱に比べて高い。

(2) 神戸高速鉄道の被害

神戸高速鉄道は、神戸三宮駅から長田区西代駅までを結ぶ東西線 7.2km、新開地から湊川を結ぶ南北線 0.4kmの地下鉄道で、路線はすべて開削工法で建設され、昭和31年1月に竣工された。今回の地震で最も被害が大きかった所は、大開駅と高速長田駅の2つの地下駅舎と、そこに接続するトンネル部である。大開駅以東は、比較的被害が少なかった。構造とおもな被害箇所を表-2.3.1に示す。

a. 大開駅以西の被害

大開駅は南西から北東の方向に120mの長さを有している。一般部は、幅17.0m、高さ7.17mの1層2径

表-2.3.1 神戸高速鉄道の構造と主な被害箇所

場 所	線路部	新開地駅	神戸駅	大開・長田駅 標準部	大開 コンコース部	長田 コンコース部	
形 式	1層2径間	2層上2下4径間	2層上2下6径間	1層2径間	2層4径間	2層4径間	
土被 (m)	2.5~5.5	2~3	2.5	4~5	2	2	
外寸法	幅 (m)	9	24	17	26	26	
	高さ (m)	6.3	12	12.5	7.2	10	
中柱	断面 (m)	0.4~0.8×0.4	0.7×0.6	上層φ0.4 下層φ0.5	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①ピッチ	RC②2.5m	RC⑥6m	RC④4.5m	RC③3.5~3.5m	RC③3.5m	RC③3m
被 害	側壁・床版 中柱	なし	なし	側壁・床版 中柱	側壁・床版 1及び2層中柱	なし	

間の函型断面であり、中央部に高さ3.82m、幅0.4m、奥行き1.0mのRC支柱が3.5m間隔で25本配置されている。また、コンコース部は2層4径間の構造部分からなり、比較的壁の多い構造となっている。地盤は、G.L.-15.0m~-17.0m以深にN値50以上の支持層が存在し、その上層はN値が4~13の砂質土、粘性土およびN値が18~41の礫混じり砂層の互層構造となっている。また、G.L.-5.0~-8.0mにはN値30~40の砂礫層がレンズ状に介在している。

高速長田駅は標準部が幅17.4m、高さ7.31mの1層2径間の函型断面で土被りが3.75~5.35mである。コンコース部は幅26.4m、高さ7.74~10.0mの2層4径間の構造で、土被りは2mであり、いずれもRC支柱を有している。線路部もRC支柱を有する幅8.96、高さ6.3mの1層2径間の函型断面で、土被りは2.5~5.5mである。地盤は、G.L.-20.0m~-30.0m以深にN値50以上の砂礫層が存在し、その上層はN値が10前後の砂質土、粘性土層の互層構造となっている。

大開駅の被害は地下構造物の中で最も大きく、コンコース以西の中柱がほとんど圧壊している（写真-2.3.1、図-2.3.2）。上床版は中央から1.75m~2.00mの位置に幅15~20cmの亀裂が発生し、2.5m沈下した。また、側壁上部ハンチ下でコンクリートが剥離し、内側の主鉄筋が座屈した。側壁は、わずかではあるが内側に倒れ込み、かなりの漏水が見られた。コンコース部は中柱6本のうち、中央部3本は、柱上端の山側および柱下端の海側コンクリートにわずかな剥離が認められる程度の被害であった。コンコース部以東は、中

柱の下部が破壊され、鉄筋が座屈して上床版が5cm程度沈下した。この破壊位置では稲妻型に加工された中間帯鉄筋が柱筋の提灯状の座屈を拘束し、帯鉄筋の役割を果たしている。また、ハンチ部におけるクラックや側壁のコンクリートの剥離などは見られなかった。

西代駅から550mの区間は土被りが0~3.0mの線路部で、躯体に細かなクラックが軸方向に発生した。その先の100m区間は、土被り3.0~3.75mの線路部で躯体にクラックが発生し、中柱8本が損傷している。高速長田駅は、土被りの大きい1層2径間の部分で16本の中柱が損傷した(写真-2.3.2)。さらにその先の940m区間では、線路部で大きな側壁移動と躯体クラックが発生し、249本の中柱が損傷した。また、床スラブから立上がるハンチの上部での床スラブと壁の打継ぎ目は、ほぼ全線にわたって内側にずれている。そのずれは西代から大開に近づくほど大きくなり、最大で200mm程度であった。

b. 大開駅以東の被害

線路部は、基本的には中柱を有する1層2径間の函型構造であるが、断面寸法は路線に沿って変化し、中柱がないところや1径間となる部分がある。駅部も中柱を有する1層2径間の函型構造で、幅17~18m、高さ7m程度の規模である。新開地および高速神戸駅周辺の地盤は、表層が礫の多く混ざる砂質土である。元町方面では、地表面下4~5m以深に、粘土およびシルト分が30%以上となる礫混じり砂質ローム層が出現する。

地下駅舎については、大きな被害はなく、全て小規模な補修で対応できた。高速神戸・西元町駅間、高速神戸・阪急三宮駅間および新開地・湊川駅間のトンネル部では、それぞれの一部の区間で側壁の中央付近およびその上下に幅0.2mm以上の曲げひび割れが軸方向に発生した。また構造目地部分でコンクリートが一部圧壊して鉄筋が露出したり鉛直方向のひび割れが生じた。

大開・新開地駅間のトンネル部は、側壁の曲げひび割れ、ハンチ部のひび割れ、中柱の破損など、大きい被害が生じた。壁の中央付近に軸方向にひび割れが生じ、最大で17mm程度のものがあつた。この場所では側壁が内空側に最大で24mmはらみ出していたほか、中柱の上下端部分にも損傷が生じていた。これは、トンネル軸方向の地震力による数少ない被害形態のひとつである。

(3) 神戸市営地下鉄の被害

神戸市営地下鉄は、新神戸駅から西神中央駅までの全長22.7km区間である。地下部分で被害が大きかったのは、新長田駅舎、駅東線路トンネル部、上沢駅舎お

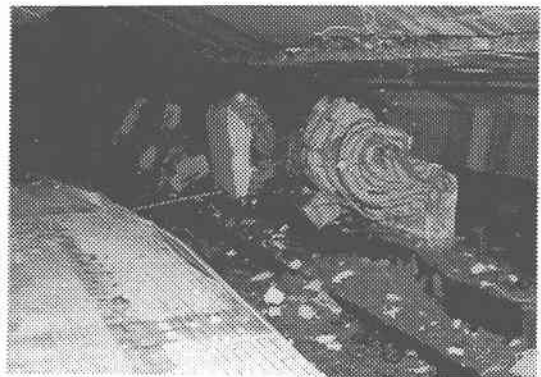


写真-2.3.1 大開駅の中柱の圧壊状況

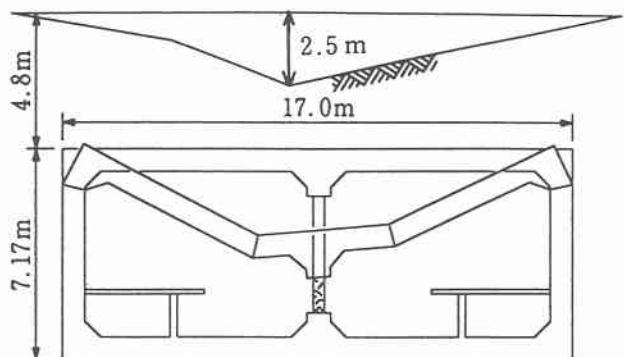


図-2.3.2 大開駅1層2径間断面の被害状況



写真-2.3.2 高速長田駅の中柱のせん断破壊
(下り線ホームより東方・大開方面を見る)

表-2.3.2 市営地下鉄の構造と主な被害箇所

場所	(一般部) 線路部 (県庁～三宮)	(コンコース部) 板宿駅 (機械室部)	新長田駅	長田駅	(コンコース部) 上沢駅 (機械室部)			
形式	1層2径間	2層1径間	3層2径間	2層2径間	2層4～2径間	3層2径間	2層2径間	
土被狭 (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①②③	RCØ2.5m	—	RCØ5m	RCØ5m	RCØ5m	RCØ5m	RCØ5m	RCØ5m
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 上下層中柱	床版側壁 上下層中柱

場所	澁川公園駅	(コンコース部) 大倉山駅 (機械室部)	(標準部) 県庁前駅 (コンコース部)	(標準部) 三宮駅 (コンコース部)	新神戸駅			
形式	3層2径間	3層2径間	2層2径間	3層2径間	3層3径間	3層2径間	3層3～6径間	3層3～4径間
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	28	31
高さ (m)	19～20	6～8	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①②③	RCØ5m	RCØ5m	RCØ5m	RCØ5m	RCØ5m	RCØ5m	RCØ7.5m	RCØ5m
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

よび駅東西線路トンネル部、三宮駅舎および駅東線路トンネル部であり、主な被害は中柱の損傷であった。構造とおもな被害箇所を表-2.3.2に示す。

a. 新長田駅舎、駅東線路トンネル部の被害

新長田駅は南西から北東の方向に195mの長さを有している。幅が13.0～16.8m、高さが11.6～12.1mの2層の函型構造になっており、1列の中柱をもつ一般部と2列の中柱をもつエスカレータ部の2つに分けることができる。また、土被りは5.0mである。地表より5m程度はN値5以下の沖積粘性土であり、その下部にはN値30程度の砂質土が分布している。トンネル区間は、延長1.34kmであり、505本の中柱がある。柱断面は、幅0.4m、奥行き0.8mであり、土被りは7～15mである。

新長田駅では、ほとんどの中柱にせん断破壊によるクラックが発生し、中にはコンクリートが剥離し、鉄筋が露出しているものもあった。クラックは、中柱が1列の部分および断面変化部で顕著であり、B1Fの方が大きかった。一般トンネル部で比較的大きな被害が生じたのは、新長田駅端部から東へ約250mの地点から延長150m前後の区間である。破壊に至ったものはないが、上端付近で損傷した中柱が多い。

b. 上沢駅舎および駅東西線路トンネル部の被害

上沢駅は全長400mで、横断面は基本的に2層構造の区間と3層構造の区間とからなり、それぞれの断面が線路方向に複雑に変化する。土被り厚は3～5mである。駅近傍の地盤は、N値50以上の砂礫層上に、砂礫層、砂質土層および粘性土層の互層と、地表近くに数m厚の沖積粘性土層が、合計25～30mの厚さに堆積している。駅舎の上半部付近の深さの砂質土はやや緩い。

2層構造の種々断面の中で中柱の被災度が高かった代表的な断面は、幅16.68m、高さ13.25mで、上階と下階の内空高さはそれぞれ5m余りである。鉄筋コンクリート造の中柱が両階にあるが、引込み線を含めて3線ある関係で、断面中央ではなく全幅の1/3程度の位置でスラブを支える。中柱の断面寸法は、上階では幅0.7m、奥行き1.4m、下階では幅0.6m、奥行き1.5mと異なるが、建込み間隔はいずれも5mである。また、3層構造の代表的な断面は幅17.22m、高さ14.48mで、中間階は高さが2mと上階・下階よりも低い。中柱は幅の中央にあり、上階と中間階は幅0.5m、奥行き1.3mの矩形断面の鉄筋コンクリート柱、下階は直径0.65mの鋼管柱で、これらが5m間隔で建て込まれている。中柱の被害が顕著であったのは駅の西側半分であり、2層・3層構造ともに上階の被災度が著しく高かった。それらの柱には典型的なせん断破壊または斜めひび割れが生じた(写真-2.3.3、図-2.3.3)。線路直角方向(北西・南東方向)に繰返しせん断を受けたことによるものと考えられるが、大きな破壊面には一定の方向性が認められ、上床が下床に対して南東側により大きく相対変位したことが推定される。中柱の被災程度が高い箇所においては、上床スラブおよび側壁のクラックが生じた箇所もあった。

c. 三宮駅舎および駅東線路トンネル部の被害

三宮は全長が約306mで基本的に3層構造である。幅約15.1m、高さ約21.0mの縦長の函型断面となって

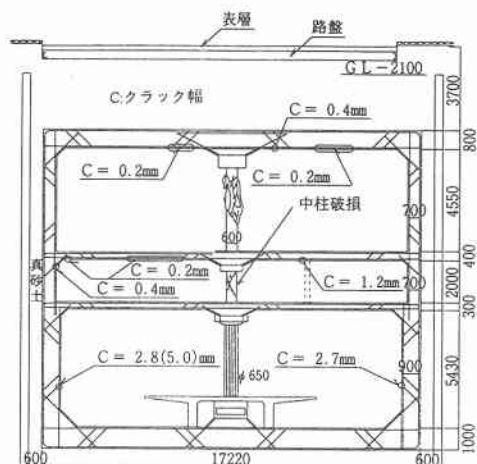
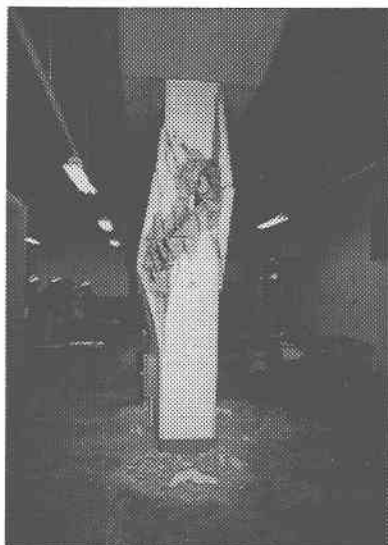


写真-2.3.3 神戸市営地下鉄・上沢駅の中柱の被害 図-2.3.3 上沢駅2層4径間断面の被害状況 (B1階柱の東面を見る：被災ランクII)

表-2.3.3 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		

*総柱本数：板宿～新神戸間(開削区間)の中柱の全数

いる。中柱は断面幅の中央ではなく左右比が約4:6の位置にあり、地下1階が鉄筋コンクリート柱、地下2階と3階が鋼管柱である。駅舎の地下1階部分の深度までは概ね沖積砂礫層であるが、特に東側部分には、ここが明治初頭まで旧生田川の河道であった経緯から、玉石が多く出る。土被り厚は3.0~4.0mである。駅舎中央よりやや西寄りの位置を中心とする100m程度の区間において、中柱の被災度が高かった。

三宮駅における被害の状況も、上沢駅の状況と同様であった。三宮駅舎は全長が約306mで基本的に3層構造である。駅舎中央よりやや西寄りの位置を中心とする100m程度の区間において、中柱の被災度が高かった。この区間は幅約15.1m、高さ約21.0mの縦長の函型断面となっている。中柱は断面幅の中央ではなく左右比が約4:6の位置にあり、地下1階が鉄筋コンクリート柱、地下2階と3階が鋼管柱である。地下1階の中柱は線路直角方向にせん断されているが、ここでは上床が下床に対して北側により大きく相対変位したようである。

d. 中柱の被害

中柱の被害を表-2.3.3 に総括する。ここで、被災の程度を次のようにランク付けしている。ランク I は破壊である。ランク II は破損しているが破壊には至っていない程度であり、ランク III はせん断クラックが発生しているもの、また、ランク IV は軽微なクラックが発生しているものである。被災した施設の中でも、被災柱の数・程度が共に最大であったのは上沢駅であり、三宮駅の被害がこれに次ぐ。新長田駅および駅東線路部の被害と、長田・上沢駅間線路部の被害も比較的大きかった。

(4) 阪神電鉄の被害

阪神電鉄本線は、岩屋・元町までが開削トンネルで、1933～1936年に築造されている。表-2.3.4 に構造物の主な被害箇所を示した。

一般トンネル部は、幅9～12m、高さ6.5mの複線函型断面でRC造である。断面中央に50×40cmの中柱があるが、これはRC造ではなく、4本の山形鋼を主材として組んだ鉄骨をコンクリートで被覆した形式のSCである。地下駅舎は、春日野道、阪神三宮および阪神元町の3つである。春日野道駅は一般トンネル部と同じ構造、阪神三宮と阪神元町駅は鉄骨造とRC造の壁構造である。

地下駅舎では被害がほとんど無かった。線路部(単線延長約3540m)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滑落し、鉄筋が露出した(写真-2.3.4)。土被りが2～3mの比較的浅い春日野道～岩屋間(約1km)で特に被害が目立ち、約920本の中柱の上下端部のコンクリート被覆部分が剥落した。また、躯体の打継面やクラックからの漏水も見られた。コンクリート道床RC枕木の直結軌道であるため、レールに狂いは発生しなかったが、春日野道駅の東方レール溶接部に亀裂を生じた。

(5) 神戸電鉄の被害

神戸電鉄有馬線は、神戸高速鉄道路線との接続駅である湊川駅が地下駅舎であり、湊川駅を含め北側坑口までの約400mが開削トンネルである。建設時期は1962～1967年である。表-2.3.5 に構造と主な被害箇所を示す。

湊川駅は幅14m、高さ7mの1層2径間部分と、同幅で高さ9.5mの2層2径間部分とからなる。躯体はRC造であるが、中柱は鋼管柱である。トンネル部は、坑口部の約50mが1層1径間、その他の区間が1層2径間となっている。坑口部は、幅11～12m、高さ8～9mの中柱なしの函型断面で、H形鋼を用いたSRC造である。

その他の区間は、幅9～12m、高さ6.4～7mの函型断面で、中柱を有するRC造である。被害は全体的に軽微であった。湊川駅地下2層部において上床版、中床版の隈角部においてクラックが発生し、漏水があった。内装タイルの剥離や壁仕上げモルタルのクラックも多く見られた。トンネル部では、1層2径間部で側壁上

表-2.3.4 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層2径間	1層3径間	2層2径間
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)	5.5	9.0	10.3
中柱			
断面 (m)	0.5×0.4	0.8×0.7	0.85×0.55
構造@ピッチ	RC@2m	RC@6m	RC@6m
被害	側壁	—	—
特徴	—	床板・側壁SRC	



写真-2.3.4 阪神電鉄開削トンネルの上部ハンチのコンクリート剥落 (トンネル入口付近から約400m)

表-2.3.5 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	1層2径間	1層2径間	2層2径間
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	RC@5m	RC@5m
被害	なし	側壁	なし	床板
特徴	SRC	—	—	—

部の隈角部にクラックが生じ、中柱の上下端部に軽微なクラックが発生した。

(6) 山陽電鉄の被害

山陽電鉄では1982年より西代および板宿の両駅において、地上駅のほかに地下駅舎を新築していた。躯体は1994年に完成しており、供用を目前に控えての被災であった。表-2.3.6 に構造と主な被害箇所を示す。

表-2.3.6 山陽電鉄の被害

場所	線路部	(一般部) 西代駅 (コンコース部)		板宿駅
形式	1層2径間	1層2径間	2層4径間	2層4径間
土被 (m)	5~9	8~9	4~8	3
外寸法	幅 (m)	9.8	16.8	24.7
	高さ (m)	6.7	7.8	13
中柱	断面 (m)	1.0×0.4	2.5×0.4	2.5×0.4, 0.8~0.9
	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	床板

西代駅は延長180mであり、幅16.8m、高さ7.75mの1層2径間の複線函型断面

部分と、上にコンコースが乗った2層4径間の構造部分からなっている。地盤は砂質土、粘性土および砂礫土の複雑な互層で、1層構造部分の土被りは約9mである。駅舎深度付近に厚さ3~5mの非常によく締まった砂礫層があるが、その上部にはやや緩い砂層がある。板宿駅の構造は、西代駅コンコース部分と同様の幅22.3m、高さ11.7mの2層4径間構造と2層2径間構造からなる。また、トンネル部分は幅9.8m、高さ6.7mの1層2径間函型断面であり中間にRC支柱を有している。

西代駅で最も被害が大きかったのは、東側95mの1層区間で、中柱17本にせん断クラックが発生し、上下床版の両ハンチ付近は、軸方向クラックが発生した(写真-2.3.5、図-2.3.4)。また、上床版に線路直角方向のひび割れが20本あまり生じた。2層構造区間は、地下2階のホーム間柱11本および地下1階のコンコース間柱8本にせん断クラックが発生した。これらの被害のうちで損傷度が大きかったのは1層構造部分の線路間の中柱15本である。これらの柱は40×250cmの断面をもつ壁状の柱で、中心間隔5mで建て込まれているが、コンクリートが剥落し鉄筋が露出したものもあった。

板宿駅の被害は、コンコース階の機械室でRC柱1本にクラック、中下床版のハンチ付近に縦断方向のクラックが発生した。また、間仕切り壁などにクラックが入った。

西代・板宿間の線路部約300m区間で上床版の両側ハンチ部に縦断方向クラック、上下床版、側壁に横断方向のクラックがほぼ全域に見られたが、被害は軽微(1mm未満)であった。

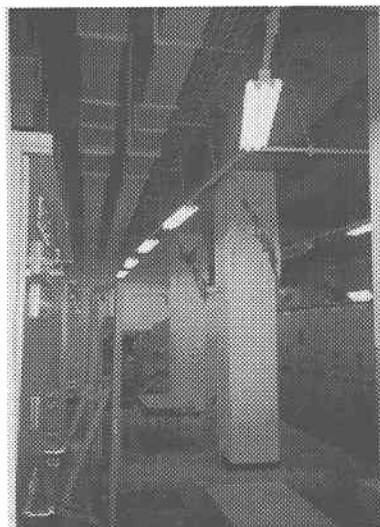


写真-2.3.5 山陽電鉄・西代地下駅の中柱の被害 (軌道階柱の東面を見る)

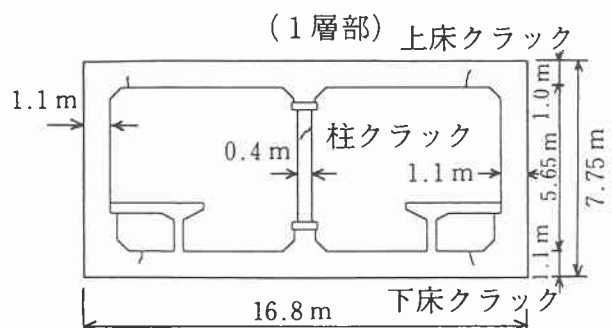


図-2.3.4 西代駅1層2径間断面の被害状況

2.3.2 地下街・地下駐車場の被害^{6),7)}

(1) 地下街の被害

神戸市内には、さんちかタウン、デュオこうべ、センタープラザ、メトロこうべ等の地下街がある。これらの地下街では電気、空調、給排水等の設備系統に若干の被害が生じたものの、構造物本体の損傷はほとんど報告されておらず、他の地下構造物に比べて被害は些少であった。ここでは上記の地下街のうち、さんちかタウンについて被害の概要を報告する。

さんちかタウンは三宮駅から南に延びるフラワーロードの地下に位置しており、昭和40年代に建設された比較的古い地下街である。地下1階の平面図を図-2.3.5に、断面図を図-2.3.6、2.3.7に示す。

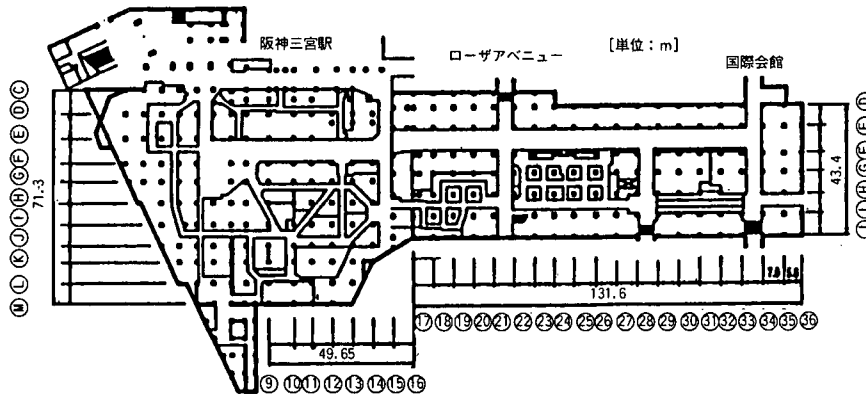


図-2.3.5 さんちかタウン平面図（地下1階）

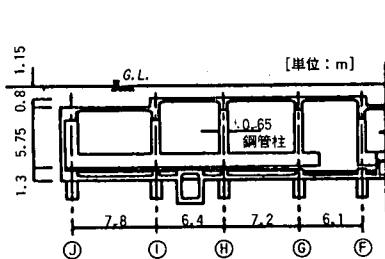


図-2.3.6 さんちかタウン断面図【18 通り】

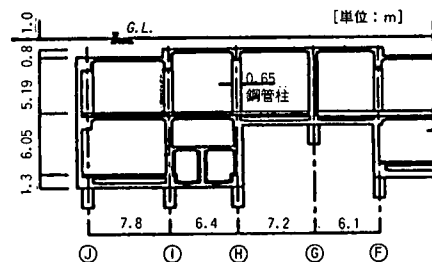


図-2.3.7 さんちかタウン断面図【24 通り】

地下街は店舗、通路として利用されている地下1階部分と、阪神電鉄駅舎、機械室等が配置されている地下2階部分とから成る。構造形式としては梁・柱構造であり、5~8m間隔で格子状に柱が配置されている。柱はすべてφ60cmの鋼管柱でコンクリートが中詰めされている。また、土被りは概ね1m程度であり、地層構成は表-2.3.10に示す柱状図とほぼ同様である。地下街の構造設計では水平震度0.1が考慮されている。

被害状況としては表-2.3.7に示すように、電気・空調・給排水・防災等の設備に関わるものが大半を占めており、構造本体の損傷は報告されていない。

表-2.3.7 さんちかタウンの被害概要

被害箇所		被害内容
設備	電気設備	引き込み高圧電柱倒壊：1箇所 照明器具脱落：数箇所
	空調設備	冷却塔使用不能：3基（ビル倒壊のため） 空調機集塵機，フィルター脱落：2台
	給排水設備	給水配管折損：数箇所 地上放流管折損：3系統
	防災設備	スプリンクラー配管折損：3箇所 火災報知器脱落：数個 防火防煙シャッター変形：1箇所
構造	床・柱・壁	床タイルひび割れ：100m区間 柱・壁大理石脱落：約200枚
	ウィンドウ	ガラス破損：11枚
	天井板	ボーダー天井板脱落：数箇所

(2) 地下駐車場の被害

表-2.3.8 に神戸市内の駐車場の一覧、図-2.3.8 に各駐車場の位置を示す。いずれの駐車場も道路下あるいは公園下に開削工法により築造されており、構造形式としては地下2～3階の鉄筋コンクリート造が採用されている。

表-2.3.8 神戸市営地下駐車場一覧表

	駐車場名	位置	構造形式	延床面積	施工法	竣工
①	三宮第1	神戸市中央区加納町	RC造地下2階2層	10,384m ²	開削工法	昭和42年10月
	三宮第2	神戸市中央区加納町	RC造地下2階2層	14,726m ²	開削工法	昭和48年8月
	三宮第3	神戸市中央区加納町	RC造地下2階2層	19,348m ²	開削工法	平成元年1月
②	花隈	神戸市中央区花隈町	RC造地下3階3層	8,977m ²	開削工法	昭和44年3月
③	湊川公園	神戸市兵庫区新開地	RC造地下2階2層	11,469m ²	開削工法	昭和45年3月
④	神戸駅北	神戸市中央区多聞通り	RC造地下2階2層	8,419m ²	開削工法	昭和46年9月
⑤	新長田	神戸市長田区若松町	RC造地下2階2層	9,414m ²	開削工法	昭和50年3月
⑥	神戸駅南	神戸市中央区相生町	RC造地下2階2層	10,593m ²	開削工法	平成4年3月
⑦	長田北町	神戸市長田区北町	RC造地下2階2層	5,662m ²	開削工法	平成5年12月
⑧	荒田公園	神戸市兵庫区荒田町	RC造地下2階2層	12,980m ²	開削工法	平成7年7月
⑨	元町東	神戸市中央区三宮町	RC造地下2階2層	14,969m ²	開削工法	平成7年12月
⑩	鈴蘭台	神戸市北区鈴蘭台西町	RC造地下2階2層	3,939m ²	開削工法	平成6年4月

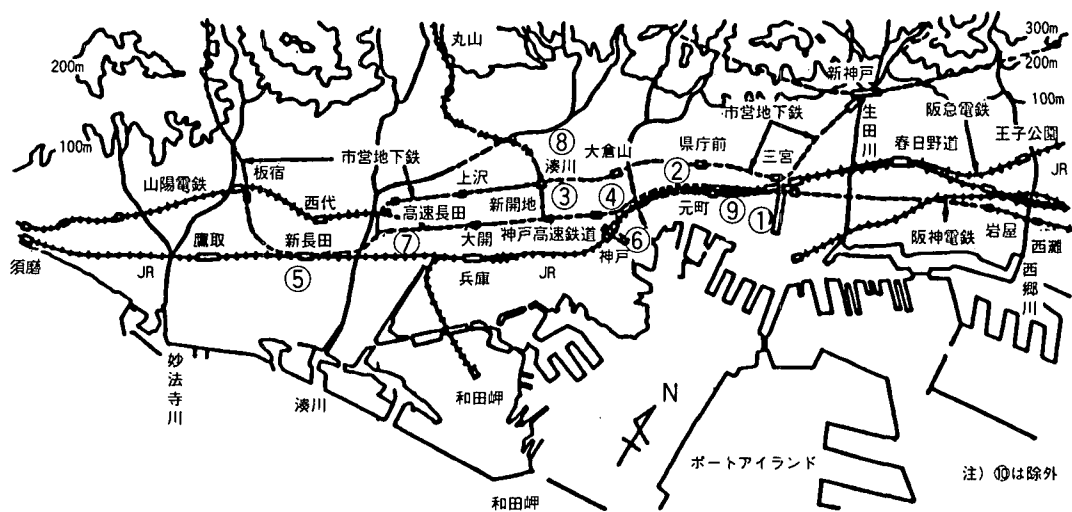


図-2.3.8 地下駐車場位置図

表-2.3.9 は各地下駐車場の被害状況を示したものである。三宮第2駐車場では一部、コンクリートの剥落を生じたが、その他の地下駐車場では躯体被害としては壁面、床にクラックが発生した程度であり、耐震設計が行われていなかったにもかかわらず被害は総じて軽微であったと言える。

表-2.3.9 地下駐車場の被害概要

駐車場名	躯体被害	設備被害
三宮第1	<ul style="list-style-type: none"> ・壁面クラック ・通路石張、階段室タイル貼クラック、脱落 ・通風口内壁剥落 	<ul style="list-style-type: none"> ・照明器具破損 ・火災報知器、車両感知器不良 ・スプリンクラーヘッド破損
三宮第2	<ul style="list-style-type: none"> ・躯体張出部(換気塔、階段室)クラック、破断 ・建具枠変形、扉の開閉不能 	<ul style="list-style-type: none"> ・照明器具、換気ダクト吊具破損 ・火災報知器、車両感知器不良
三宮第3	<ul style="list-style-type: none"> ・壁面、床クラック ・エキスパンションジョイントのずれ ・階段室擁壁の傾斜 	<ul style="list-style-type: none"> ・照明器具破損 ・火災報知器、車両感知器不良
花隈	<ul style="list-style-type: none"> ・被災なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・被災なし
湊川公園	<ul style="list-style-type: none"> ・出入口部壁面クラック ・スラブ天井剥離 	<ul style="list-style-type: none"> ・ダクト、配管吊具破損
神戸駅北	<ul style="list-style-type: none"> ・壁面、梁クラック 	<ul style="list-style-type: none"> ・火災報知器破損 ・給排水設備、誘導灯、消火設備破損
新長田	<ul style="list-style-type: none"> ・壁面、梁クラック ・出入車路土間破壊じゅう 	<ul style="list-style-type: none"> ・照明器具落下 ・ダクトおよび吊具落下 ・火災報知器、誘導灯、消火設備破損
神戸駅南	<ul style="list-style-type: none"> ・被災なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・被災なし
長田北町	<ul style="list-style-type: none"> ・壁面、床クラック 	<ul style="list-style-type: none"> ・車両感知器不良 ・照明設備破損

以下に、三宮第2駐車場について被害の詳細を報告する。

三宮第2駐車場の位置図を図-2.3.9に、平面図、断面図を図-2.3.10～2.3.12に示す。駐車場本体部は長手方向が120.4m、短手方向が66.6mの平面形状を有し、構造物下面の深度はGL-12.15m、土被り1.5mとなっている。構造形式としてはいわゆる梁・柱構造となっており、断面寸法90cm×90cmの柱が長手方向には7～10mピッチ、短手方向には7～8mピッチで配置されている。また、17.2m間隔で厚さ30cmの仕切壁が配置されており、かなり剛性の高い構造になっている。基礎スラブには厚さ1.65mの中空スラブ構造が採用されている。

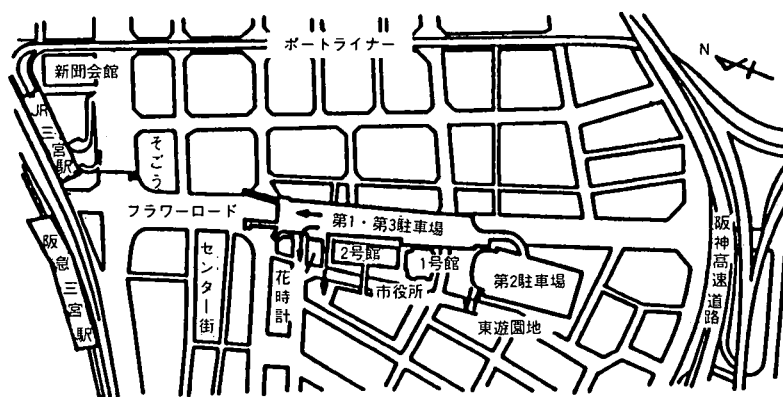


図-2.3.9 三宮第2駐車場位置図

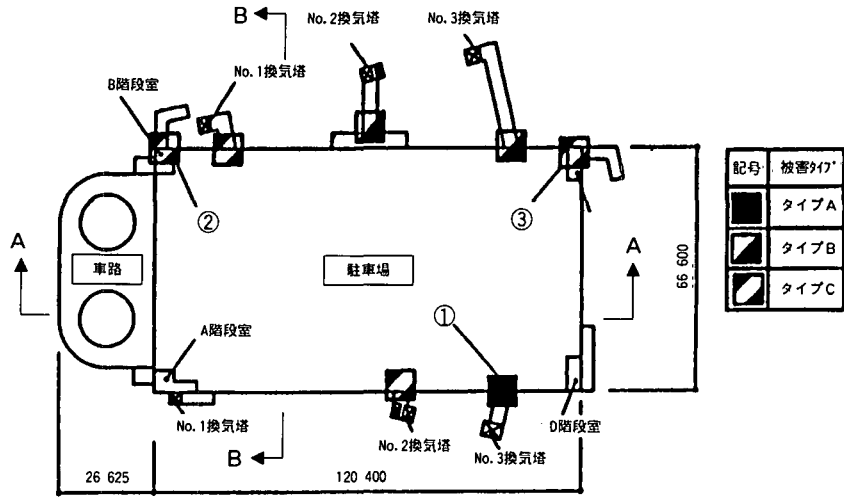


図-2.3.10 三宮第2駐車場平面図と被害箇所

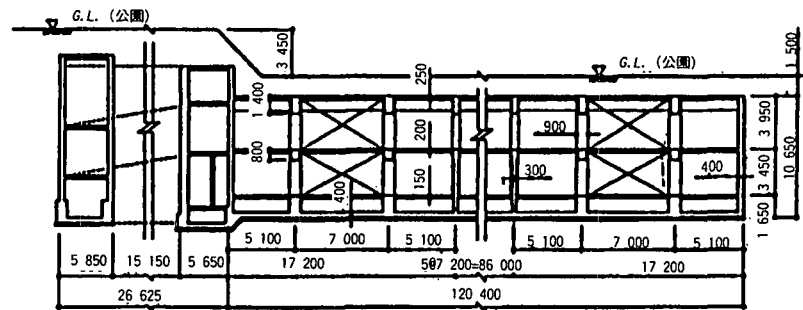


図-2.3.11 三宮第2駐車場断面図 (断面A-A)

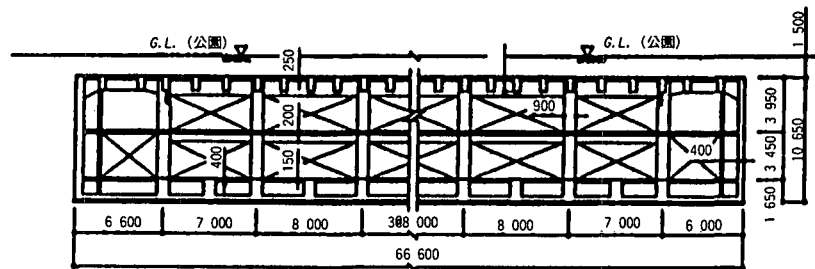


図-2.3.12 三宮第2駐車場断面図 (断面B-B)

三宮第2駐車場に隣接するフラワーロードは旧生田川河川敷にあたり、氾濫原堆積物が広く分布している地域である。三宮周辺は旧生田川の氾濫によって形成された扇状地地形で、扇状地および河川敷では玉石層、砂礫層および砂層から成るが、扇頂から扇端に向かって次第に粒径が小さくなっている。玉石層の分布はJR三宮駅より上流部に見られ、下流部は礫質土から砂質土である。三宮駅の南側に縄文海岸線が位置し、神戸市役所周辺は砂州地帯である(図-2.3.1)。隣接する第3駐車場の土質調査結果による地盤柱状図および標準貫入試験結果を表-2.3.10に示す。

被害状況としては、駐車場本体にはほとんど変状は見られなかったが、図-2.3.10に示すよう

表-2.3.10 地盤概要

深度 (m)	層厚 (m)	記号	名称	標準貫入試験
2	2	T (概土)	粘土混じり砂	
8	8	A ₁ (沖積砂層)	礫混じり砂	N = 10~20
10	8	D ₁ (沖積砂層)	砂	N > 50
18	12	D ₂ (沖積砂層)	砂、シルト混じり砂互層	砂層部: N = 50 その他: N = 20~30
30		D _c (沖積粘土層)	粘土	N = 20

に給排気塔および階段室など、本体構造との接合部においてコンクリートの剥落、ひび割れが生じた。最も大きな損傷はNo.3 給気塔において生じており、壁の一部と天井スラブのコンクリートが剥落して鉄筋が露出した（写真-2.3.6、2.3.7）。一部の鉄筋は変形しているものの破断には至っておらず、 $4\delta y$ 程度の応答変位が生じたものと推定される。No.2 排気塔、No.3 排気塔では壁のかぶりコンクリートが剥離し、ひび割れも多数見られる（写真-2.3.8）。また、No.3 排気塔と駐車場本体との接合部において5~25cm程度のずれが発生している。No.2 給気塔、No.1 排気塔およびB 階段室では1~5mm程度のひび割れが生じた（写真-2.3.9）。

以上のように、駐車場本体と給排気塔、階段室との接合部付近に被害が集中しているのは、剛性の大小に起因する動的応答の違いにより、両者の接合部に相対変位が生じたためと考えられる。

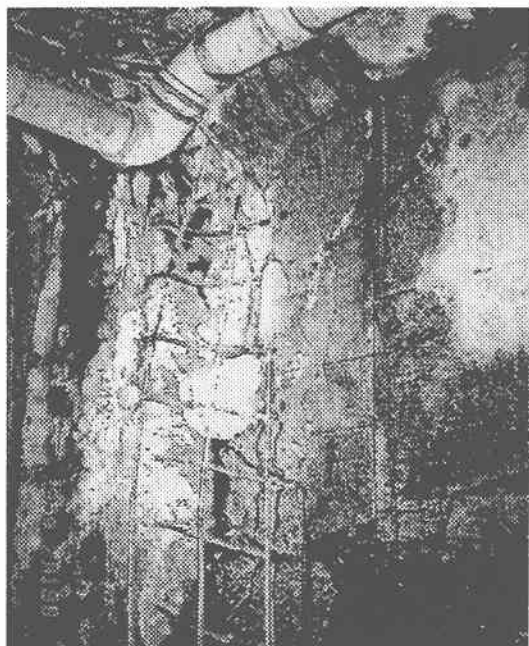


写真-2.3.6 壁のコンクリート剥落、鉄筋露出
(タイプA : ①)

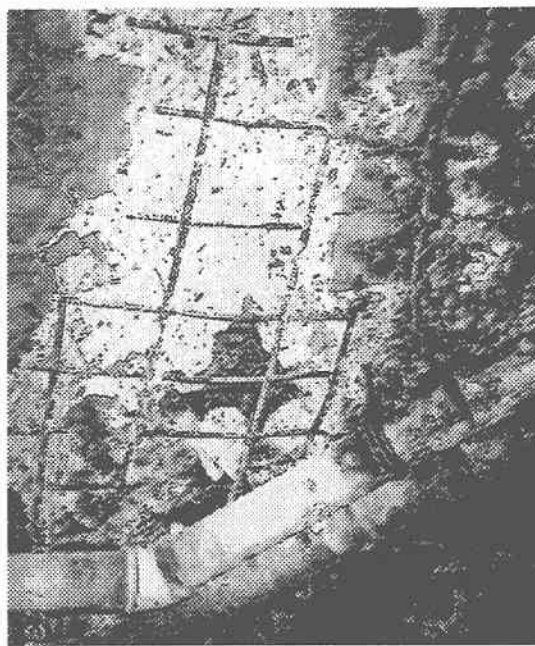


写真-2.3.7 スラブコンクリート剥落、鉄筋露出
(タイプA : ①)

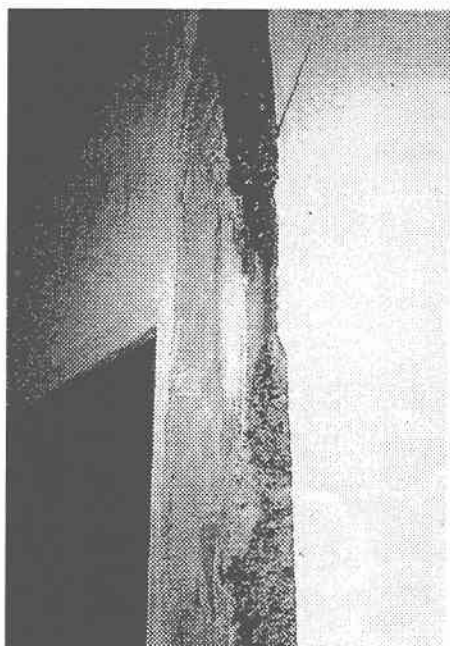


写真-2.3.8 壁コンクリート剥落
(タイプB : ②)

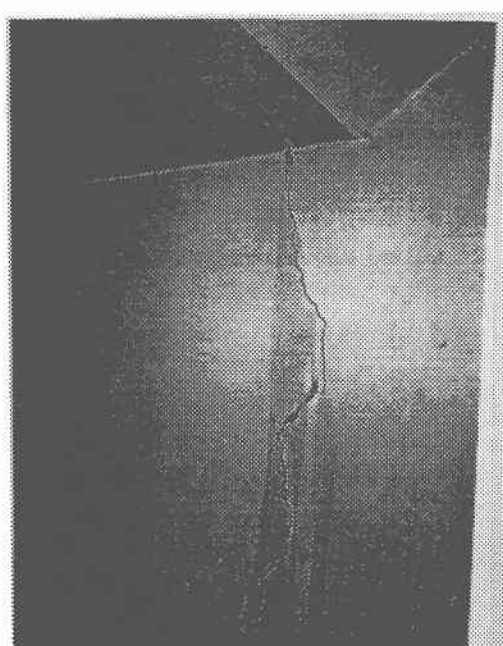


写真-2.3.9 壁のひび割れ
(タイプC : ③)

2.4 ライフライン幹線の被害

ここで扱うライフライン幹線は主にシールド工法による管路やとう道、共同溝、沈埋トンネルおよび立坑など比較的規模の大きい地下構造物であり、小規模の配管等は対象としない。

2.4.1 水道施設の被害

水道施設の地下施設として、ここでは阪神水道企業団の送水路施設および神戸市の導水路トンネル・送水路施設を対象とした。

(1) 阪神水道企業団送水路施設の被害状況^{6)、9)}

阪神水道企業団は琵琶湖・淀川水系を水源とし、尼崎市・西宮市・芦屋市・神戸市などに供給しており、送配水管の延長距離は約163kmである。

阪神水道企業団の送水路施設の被害状況一覧表を表-2.4.1に示すが、被害状況は漏水箇所の調査結果としてまとめられている。3期甲東送水路、4期西宮送水路については、断層付近においてメカニカル継手の拔出しによる被害が計6ヶ所あった。また、3期芦部谷送水路については、φ2,100mm水管橋で橋台の変位により継手部が破損した。なお、水管橋の被害はこの1ヶ所のみであった。

表-2.4.1 阪神水道企業団送水路被害状況

送水路名	被害状況
1期尼崎送水路	・被害なし
3期猪名川送水路	・φ=1,600 継手5ヶ所漏水
5期猪名川送水路	・被害なし
3期甲東送水路	・φ=1,500 DIP 継手5ヶ所漏水
5期甲東送水路	・被害なし
4期西宮送水路	・φ=1,200 DIP 継手1ヶ所漏水
1期越木岩送水路	・被害なし
2期甲山送水路	・被害なし
3期芦部谷送水路	・φ=2,100 SP水管橋伸縮管部破損, 漏水

(2) 神戸市^{7)、10)}

a. 概要

神戸市の水道は、約75%を琵琶湖・淀川等からの水に依存し、25%を自己水源で賄っている。自己水源は、主に千刈・鳥原・布引の3箇所の貯水池から供給されており、水量は1日当たり20万m³になる。その約半分を千刈系が占めており、千刈浄水場と上ヶ原浄水場で浄水処理を行っている。千刈導水路は、神戸市北区の千刈貯水池から宝塚市を経て、西宮市仁川の上ヶ原浄水場まで15kmである。

b. 千刈導水路トンネル

千刈導水路は、大正3年に貯水池と共に建設が開始され、昭和4年に完成した山岳トンネルであるが、起伏の激しい山谷を通過する区間もあり、開削区間が存在している。また、この導水路ルートは芦屋断層の北東側末端付近に位置しており、今回の地震の影響を強く受けた地域にあたる。

本導水路のトンネル標準断面図を図-2.4.1に示す。断面形状は、全線を通して高さ1.88m×幅1.55mの内空断面を有する馬蹄形である。覆工は無筋コンクリートで、厚さは硬岩部で16.7cm、軟岩部で25.8cm、土砂部および開削部で34.8cmである。

地震による被害により、トンネル覆工コンクリートの一部圧潰とクラック発生のため通水不能となった。また、全般的な特徴としてトンネル覆工に広範囲でひび割れが入っており、大部分はスプリングライン部に軸方向に伸びる開口ひび割れであった。地震による側圧が作用して施工の弱点になりやすい側壁とアーチの打継目付近でひび割れが発生したものと推定される。

c. 送水施設

上ヶ原浄水場内の送水管、および会下山中層・十文字山特1・甲南特1送水管では漏水が発生し、本山および熊内送水路トンネルでは一部が圧潰し、内部に収容した送水管に継手漏水や亀裂が発生した。また、鳥原坑内送水ポンプが浸水した。

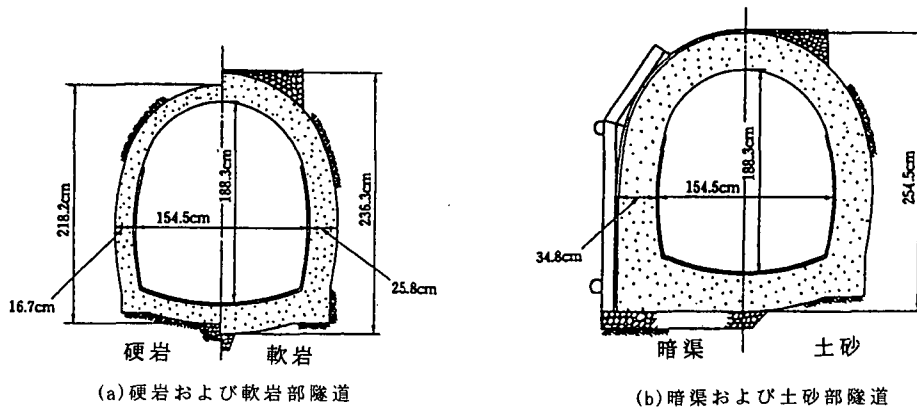


図-2.4.1 千刈導水路の横断面図

2.4.2 下水道施設の被害^{6), 7)}

神戸市の下水道シールド管渠は昭和42年から建設されており、これまで89件、80.7kmが施工されている。土質条件は六甲花崗岩のほか、砂礫、軟弱粘性土等多岐にわたっており、工法的には手掘りから密閉式までさまざまである。近年は密閉式の気泡材を添加した土圧系シールドの施工例が多い。

分流式の汚水管渠のシールドは、比較的小断面であり、一部管廊形式のものを除き、内部がそのまま水路となるため場所打ちコンクリートによって二次覆工されているという特徴がある。

今回調査を行った神戸市の下水道施設の中でシールド管渠の被害は小さく、下水の排水機能に影響するようなものは生じていない。ここでは鳴尾御影汚水幹線を中心に説明する。

(1) 鳴尾御影汚水幹線

このシールドは神戸市東灘区にある東灘処理場に流入する汚水幹線の一つである。幹線は、阪神電鉄御影駅～深江駅付近に至る東西管路とその中間点より南（東灘処理場）へ至る南北管路よりなる。表-2.4.2に被害のあった工区の工事概要を示す。

表-2.4.2 工事概要

	セグメント 外径	仕上り 内径	工事延長	工法	土質	土被り
西(その1) 工区	3,150mm (鋼製)	2,400mm (※)	1,009.4m	土圧式(気泡式) シールド工法	沖積砂質土 (N=5~24) 沖積粘性土 (N=2~3)	9 ~14m
東(その2) 工区	2,150mm (鋼製)	1,500mm (※)	965.53m	土圧式(気泡式) シールド工法	沖積砂質土 (N=29~50以上) 沖積粘性土 (N=39~50以上)	5.6 ~8.3m

(※) 二次覆工は場所打ちコンクリート

西(その1)工区の発進立坑側坑口付近では二次覆工コンクリートに多数のクラックが発生している。クラックはリング方向のものと管軸方向のものがあり、リング方向クラックはセグメントピース間付近と二次覆工の施工継目で生じている。

管軸方向クラックは、管頂を0度として両側に45度と135度付近に計4本入っている。(図-2.4.2)この管軸方向のクラックはほぼ全線で確認される。

クラック幅は最大9mm程度で、坑口から60~70m付近で発生している。

二次覆工の被害が比較的大きい坑口付近で、セグメントとボルトを調査したところ、継手板に若干の変形が見られるものの、ボルトの抜差しは可能であり、継手板に大きな目違いは発生していない。ボルト自体も検査の結果、特に異常は見受けられず、

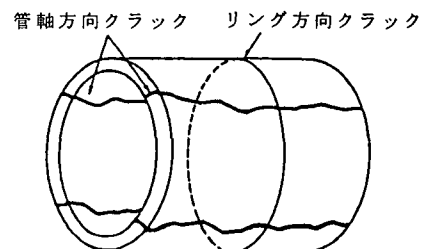


図-2.4.2 シールド二次覆工の被害

一次覆工の被害はないものと思われる。

また、発進坑口から約 150m にわたって管路が最大 10cm 程度沈下している。この付近は極めて軟弱なシルトを含む土層である。

東（その 2）工区では二次覆工コンクリートの施工継目部が剥離し漏水しているが、被害としては軽微なものであった。

その他の工区でも二次覆工コンクリートには幅 0.2~0.3mm 程度の軽微なクラックが生じており、にじむ程度の漏水も見られる所がある。クラックはリング方向と管軸方向のものが確認されている。リング方向は施工継目、管軸方向は西（その 1）工区と同様の位置で 4 箇所生じている。

表-2.4.3 にその他で被害が生じたシールドの概要を示す。六甲アイランド連絡管では管渠の被害は軽微であったが、立坑（ケーソン）にクラックおよび漏水が見られた。新生田汚水幹線と高松汚水幹線は、二次覆工コンクリートが施されているが、いずれも施工継目の剥離やリング方向にクラックが生じている。苅藻島連絡汚水管路は六甲アイランド連絡汚水幹線と同様、海底横断シールドで、RCセグメント仕上げである。被害は、両立坑の坑口付近で RCセグメントのコンクリート部に浮上がりなどの破損が見られる。また、セグメントのリング間で一部ずれが生じている。

表-2.4.3 その他の下水道幹線の被害状況

名称	工事概要				被害概要
	セグメント外径	仕上がり内径	延長	シールド工法	
六甲アイランド 連絡管	2,750mm (RCセグメント)	2,400mm (一次覆工のみ)	566.40m	泥水加圧式	・立坑(ケーソン)のクラック および漏水 2ヶ所 ・漏水 108ヶ所
新生田汚水幹線 (その1)工区	3,800mm	3,000mm	1738.46m	泥水加圧式	・施工継目剥離 1ヶ所 ・マンホール蓋のずれ 1ヶ所
新生田汚水幹線 (その1-2)工区	3,800mm	3,000mm	73.39m	泥水加圧式	・周管クラックおよび漏水 1ヶ所
新生田汚水幹線 (その3)工区	2,150mm	1,500mm	1912.60m	泥水加圧式	・施工継目剥離および漏水 1ヶ所
高松汚水幹線 (その1)工区	3,800mm	3,000mm	1393.39m		・施工継目剥離および漏水 4ヶ所
高松汚水幹線 (その2)工区	3,800mm	3,000mm	1974.73m		・施工継目剥離および漏水 2ヶ所
苅藻島連絡管	2,280mm (RCセグメント)	1,800mm (一次覆工のみ)	823.69m	気泡式	セグメント破損(24リング) 4ヶ所

2.4.3 電力施設の被害⁶⁾

都市域における電力施設の地下利用としては、送電線や変電所施設等があるが、ここでは、地震動の大きかった神戸市域における建設中のシールドの被害状況についてまとめる。

(1) 磯部通シールドトンネル

神戸市中心部（三宮、兵庫地区）における電力需要増加対策として中央区江戸町に三宮変電所（全地下式変電所）を新設し、同変電所へ 275kV の地中送電線を導入する工事を計画中であり、これに先立ち、三宮変電所用地から磯上通 3 丁目まで地中電線路を敷設するため、仕上がり内径 4,000mm のシールドトンネルを構築中であった。図-2.4.3 にトンネルの平面図、縦断面図を示す。

当工事場所の地質は、第四紀の沖積層および洪積層であり、シールドルートの掘進土層は、N値 50 以上、透水係数 $2\sim 3 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ の砂礫層が主体の地盤である。

地震発生時におけるトンネル工事進捗状況は、全線掘削・セグメント（一次覆工）の組立を終了し、二次覆工のうち、インパットコンクリートの打設を発進側から 450m の区間行っており、また到達立坑側壁は厚さ 1m のコンクリートを地表面下 5m まで打設した状態であった。

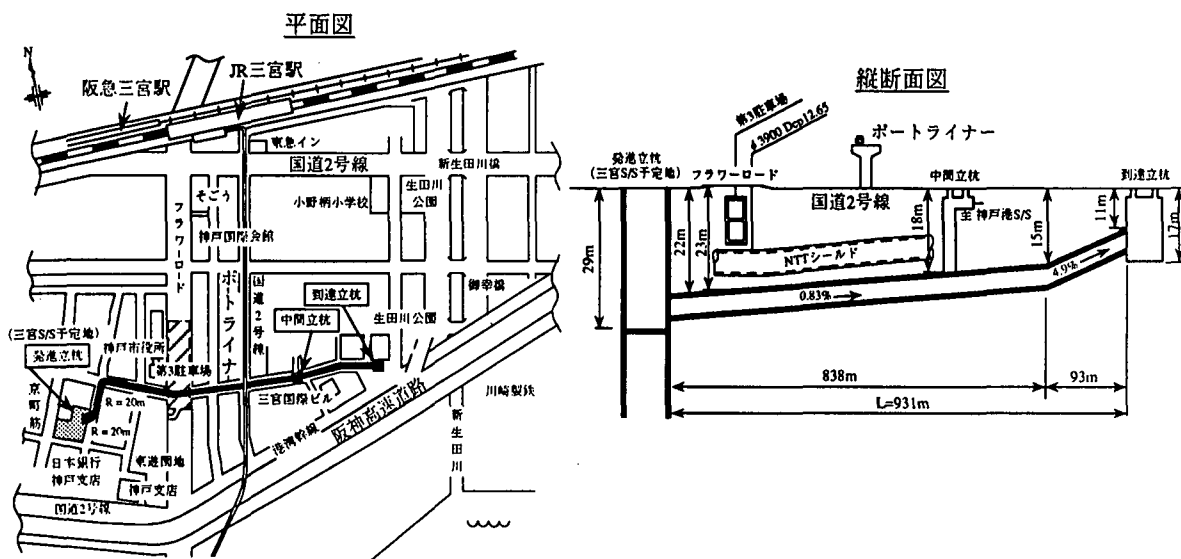


図-2.4.3 磯辺通シールドトンネル

地震発生後の調査結果では、シールドトンネル全体にわたりインバートコンクリート打設区間に0.3～0.5mm程度のクラックがトンネル軸直角方向にほぼ10mピッチに見られた。また、シールドトンネルが南北に布設されている区間においては、地震の圧縮力のためと思われる、一次覆工のコンクリート製セグメントに上部90度の幅で、リング間部のコンクリートエッジが損傷していた。ただし、断面形状の変化等は見られなかった。また、東西方向の区間ではこのような現象は見られなかった。本工事では、R=20mの部分にスチールセグメントを使用しているが、この区間にも異常は見られなかった。

到達立坑については、側壁部にクラックが見られた。

以上のように地下の被害については比較的軽かったが、地上部の到達基地では、門型クレーンの脱線・変形・軌条損壊・地盤亀裂があった他、現場事務所も傾斜するなどの被害があった。

2.4.4 通信施設の被害⁶⁾

通信の施設としては、東灘区から長田区迄(途中一部を除いて)今回の地震で動いたとされる断層に平行し東西に長く構築された”とう道”がある。被害は浅層部に位置している矩形とう道(開削で構築)に多く発生し、円形とう道(シールドで構築)には殆ど被害はなかった。

被害の発生場所は、ビルとの取り付け部或いは断面変換部に設置している伸縮継手部(エキスパンション)に多く、その状況は接続している構造物が横ズレ、縦ズレを起こし、止水機能が著しく低下したことにより地下水がとう道内に流入した。本報告では、神戸に位置するとう道の被害状況について比較的被害の大きかった三宮地域を中心としてとりまとめたものである。

(1) とう道の被害概要

神戸とう道は、図-2.4.4に示すように葺合ビルから長田ビルの間で約10km、東灘ビルからQ立坑間で2kmの合計約12kmの長さを持つ。矩形とう道(開削式とう道)と円形とう道(シールド式とう道)の割合は、4:6で円形とう道が長い。

a. 矩形とう道

比較的浅層部に位置する矩形とう道の被害は、伸縮継手部にズレが生じ著しく止水機能が低下し、地下水がとう道内に流入し、一時的に満水状態になった場所もあった。

この被害はビルととう道の取り付け部および断面形状が変化する部分で発生し、地震動により動くべきところが動いたものでありとう道本体構造物に影響を及ぼす被害ではなかったが、一部の特殊断面部のスラブや側壁にクラックおよびストラットに曲げ破壊と見られる構造的被害もあった。

b. 円形とう道

円形とう道においては、立坑との取り付け部に若干のクラックやコンクリートの剥離が発生したが本体構造物に影響を与える被害ではなかった。また、一般部においては新たなクラックの発生、潜在クラックの拡

大、漏水の増加もなく健全な状態を維持していた。

c. 立坑

C、D立坑付近は液状化現象による地盤沈下、隆起が発生したものの、立坑本体には影響はなかった。

以上のようにとう道の被害は、地上構造物の大きな被害に比較するとかなり小さなものであった。被害は、土被りの浅い（約 2~3m）矩形とう道に集中したが、通信用ケーブルには一切、障害を出さず、とう道としての機能を大きく損なうものではなかった。これは、地震等の発生に対し局部的に被害をくい止めるよう設置された伸縮継手部が地震動に対して有効に働いたものであり、伸縮継手の機能を十二分に果たしたものと考えられる。また、土被りの深い（10~30m）位置に構築している円形とう道にはほとんど被害はなく、今回の地震に対して構造体として十分な機能を維持・発揮したものと考えられる。

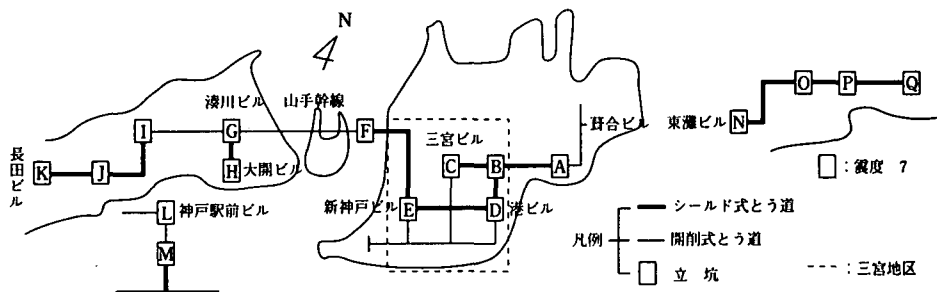


図-2.4.4 神戸とう道の位置図

(2) 三宮地域のとう道被害

図-2.4.4 の三宮地区（中央区内）のとう道における伸縮継手部およびシールド坑口部の被害状況について以下に記述する。なお、D立坑付近は液状化による周辺地盤の沈下・隆起現象が見られた。

a. 土質概要等

図-2.4.5 に示すとおり東西方向に位置しているD~E立坑間の矩形とう道は土被り 2~3m でN値 3~10 程度の沖積砂層に位置し、円形とう道は土被り 14~19m でN値 20~50 程度の洪積層中に位置している。

また、南北方向に位置しているD~C間の矩形とう道では、土被り 2~3m でN値 10~15 程度の沖積砂層および砂礫層に位置し、D~B間の円形とう道は土被り 7~14m でN値 5~10 程度の沖積砂層とN値 30 程度の沖積層の砂混じり礫層の中に位置している。

b. 伸縮継手部への影響

開削式とう道の伸縮継手はカラー式であり土質の変化点、とう道断面の変化点等に設置している。この伸縮継手部のズレおよび開き量の調査結果より、サンプル数 19ヶ所の伸縮継手の約 68%について東西方向、約 21%について南北方向、約 37%について上下方向の変位が確認された。また、最大変位量（ズレ量または開き量）は東西方向で 18cm、南北方向で 6cm、上下方向で 13cm にも及んだ。

以上のように矩形とう道の伸縮継手については、東西方向の変位が顕著であり、次に直下型地震によるものと想定される上下方向のズレが多く認められた。

以上のように矩形とう道の伸縮継手については、東西方向の変位が顕著であり、次に直下型地震によるものと想定される上下方向のズレが多く認められた。

c. シールド坑口への影響

シールド坑口部では立坑ハンチ部のコンクリートの剥離および円周方向の亀裂が見られた。また、トンネル軸方向の押し出しが立坑内側に数 cm 発生した。この押し出しは矩形とう道と同じく東西方向のものであ

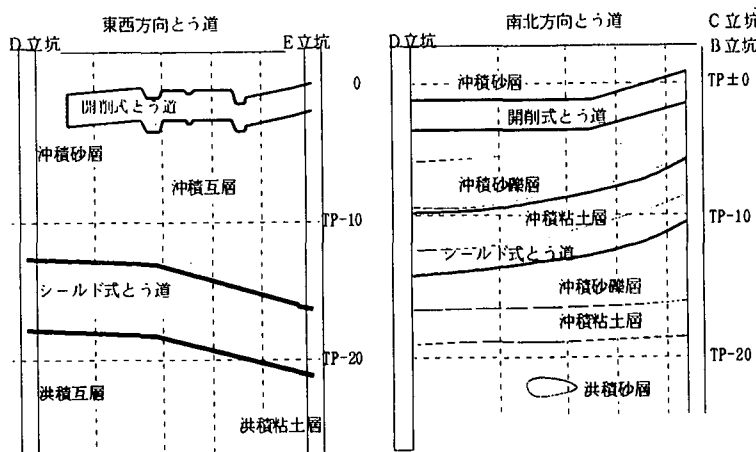


図-2.4.5 とう道断面図

り、南北方向の坑口部では見られなかった。また、東西方向であっても土被り 19m と深い位置では、コンクリートが少し浮いた程度の被害であった。

2.4.5 地下河川の被害⁶⁾

ここでは、神戸市内の地下河川における被害の概要を述べる。神戸市はその地形上、南北方向に流れる多くの小規模河川を有し、その一部は地下河川となっている。地震による被害が調査されたもののうち、特筆すべき数例を以下に示す。

鯉川は神戸市中央区山本通から鯉川筋に沿ってメリケン波止場へ至るルート付近が地下構造となっている。本ルートは開削工法、シールド工法（ $\phi=3,250\text{mm}$ ）の両区間に分かれているが、シールド工法の区間については特に被害は見られなかった。開削工法の区間においては、コンクリートボックスのセグメント継手部に 5～10mm の開きが確認された。また、潜水調査の結果、同程度の継手の開きが数ヶ所で認められている。

千森川放水路は神戸市須磨区須磨寺町から、ほぼ南方向に海岸まで通じる、延長約 840m のシールドトンネル（ $\phi=3,900\text{mm}$ ）である。本トンネルの北端付近には須磨断層がほぼ東西方向に走っている。本トンネルにおいては、各所においてさまざまな形態の損傷が認められた。ある区間ではトンネル底部に幅 0.5～2.0mm 程度の軸方向クラックが 400m にわたって認められた。この軸方向クラックは、トンネル底部中心線からややどちらかの方向にずれたところに生じているところに特徴がある。また別の区間ではトンネルの横断面にリング状のクラック（幅 1～5mm 程度）が発生し、これらは漏水の原因となった。これらのリング状クラックはトンネル横断面において上下左右どの部分にも発生し、その発生箇所に関する特殊性は認められない。また、この区間では覆工打継目のジョイント部において破損が認められた。これらの破損・クラックはジョイント部の全周にわたって閉じたリングを形成することは極めて少なく、左右どちらかに片寄るものが多かった。また、この種の破損は目地部のコンクリートが剥離・飛散したものが多く、目地が完全に開いている箇所は少なかった。さらに、本トンネルにおいてはジョイント部付近の天端両側に亀甲状のクラック群が認められる箇所があった。このように、本トンネルの被害は底板の軸方向クラックと横断面のリング状クラックとに大別されるが、それらは別々の場所で発生し、両者が同一の区間に発生していない。

これらの他にも覆工コンクリートの剥離、クラック、継ぎ目部の損傷などをうけた地下河川があるが、総合的にはこれらの被害は軽微であった。これらをまとめて表-2.4.4 に示す。

表-2.4.4 神戸市内の地下河川被災状況

河川名	工法	平均土被り	被災状況
1. 天神川	・開削工法 ・シールド（ $\phi=4,050\text{mm}$ ）	約 2.0m	・開削部 継手部(BOX)のずれ ・シールド部(工事中)無し
2. 観音寺川	・開削工法	約 2.0m	・開口部のバラベット部にクラック ・継手部(BOX)のコンクリート剥離
3. 狐川	・開削工法	約 2.0m	・被災軽微
4. 北野川	・開削工法	約 2.0m	・継手部(BOX)の剥離クラック
5. 鯉川	・開削工法 ・シールド（ $\phi=3,250\text{mm}$ ）	約 3.0m	・継手部(BOX)の開き(5～10mm) ・シールド部は被災無し
6. 細沢谷川	・シールド（ $\phi=2,200\text{mm}$ ）	約 6.0m	・被災無し
7. 千森川	・シールド（ $\phi=3,900\text{mm}$ ）	約 30.0m	・打設目地にクラック
8. 塩屋谷川	・NATM	約 75.0m	トンネル内で約 80mm の変位

2.4.6 共同溝の被害

表-2.4.5 に阪神地区における主要な共同溝の被害の概要を示す。

表-2.4.5 阪神地区における主要な共同溝の被害概要

共同溝名		液状化の発生程度	躯体のひびわれ等の損傷	躯体等の変状	備考
2号神戸共同溝	東川崎地区	・噴砂はあまり目立っておらず、液状化の発生程度は低かったと考えられる。	・全体的に躯体の横断方向に走るひびわれが目立つ ・目地部の損傷程度も高い	・目視によれば大規模な変状は生じていない。	・共同溝両脇には、SMWおよび鋼矢板壁が埋設されている。
	弁天地区	・大規模に噴砂が発生している区間があり、液状化の発生程度は高かったと考えられる。	・全体的に躯体の長手方向に走るひびわれが目立つ ・目地部の損傷もあるが程度は低い	・目視によれば大規模な変状は生じていない。	・共同溝両脇には、SMWが埋設されている。
新港第4突堤共同溝	第1共同溝	・噴砂は全体的に見られ、液状化発生程度は高かったと考えられる。	—————	—————	
	第2共同溝		・全体的に横断方向に走るひびわれが目立つ。 ・目地部も損傷程度も低い。		
	第3共同溝		—————		
芦屋浜共同溝		・芦屋浜全体で噴砂が見られ、浜全体が液状化していたものと考えられる。 ・芦屋浜中心部を流れる宮川の護岸は河心方向に1.5m程度移動している。	・西地区、東地区とも横断方向に走るひびわれが目立ち、ひびわれ幅は最大で10mmにおよぶものもあり、また、ひびわれ間隔も1～5mである。	・宮川大橋右岸側台取付け部で60cmの上下方向のズレが発生。	
2号尼崎共同溝		・噴砂は見られず、液状化は発生していないが、程度は低かったものと考えられる。	・全体的にひびわれはほとんど発生していない。 ・シールド部では横断方向に走るひびわれが発生している。	—————	

震源からやや遠い尼崎共同溝を除けば、いずれもひびわれを発生しているものの、大きく崩壊したものは認められていない。ここでは、2号神戸共同溝および新港第4突堤共同溝について報告する。

(1) 神戸共同溝

神戸共同溝の断面形状は2連2層を基本としており、東側の「弁天地区」では施工のためのSMWが残置されているのに対し、西側の「東川崎地区」では施工時の土留めは撤去されている。また、ほぼ全長にわたって液状化層に埋設されており、底面部には厚さ7～9mの地盤改良が施されていた。

被害の概要としては、構造目地の多くがぶつかり合ったり開いたりして、コンクリートが剥落もしくは止水板損傷した形跡が認められた。また、特徴としてはSMW残置区間では縦断クラックが卓越しており、土留め撤去区間では横断方向のクラックが卓越していた。

(2) 新港第4突堤共同溝⁶⁾

共同溝とは、複数の地下埋設企業が物件を収容するため、共同して道路地下に設ける施設であり、道路管理者が2以上の公益事業者の公益物件を収容するために道路地下に設ける「共同溝」と区別している。

本共同溝は、ガス、NTT、水道、電力ならびにOMPの5種類のケーブル、導管を埋設したものであり、ポートアイランドへのライフライン供給を目的としている。図-2.4.6に第2共同溝(延長900m)、第3共同溝(延長70m)他の敷設ルート図、一般構造図および共同囲障部の概念図を示す。共同溝の土被りは約2～3m程度であり、地盤は沖積砂、砂質ロームまたは、シルト層、あるいは砂礫層からなるものと想定される。

被害としては、共同溝のコンクリートボックス自体には特に大きな変状や被害は認められなく、入口付近斜向部ではケーブル固定金具の支持碍子の一部脱落が認められた程度である。また、共同溝直上部以外のターミナル駐車場は波打つような陥没が見られ、甚大な被害があったが、共同溝に沿う直上部の駐車場地面や第4突堤内の地面はほとんど変状がなかった。

2.4.7 沈埋トンネル

(1) 大阪南港トンネル⁷⁾

大阪南港トンネルは大阪港と南港を結ぶ海底トンネルでトンネル断面の中央部を鉄道が、その両側を道路が通るものである。図-2.4.7 に縦断面図および標準断面図を示す。特徴としては、鋼・コンクリートの合成構造が採用されていることや、沈埋函と換気塔、および沈埋函相互の結合は、地盤沈下や地震による地盤変位を吸収するための可とう構造が採用されている。

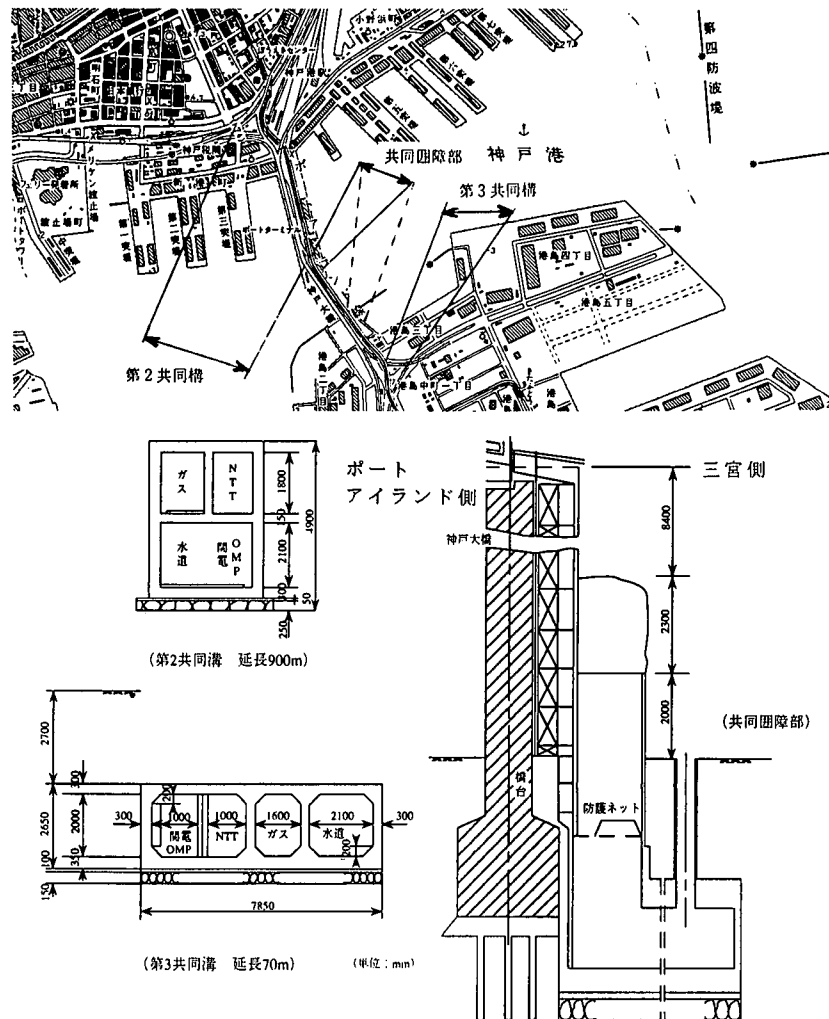


図-2.4.6 共調溝敷設ルートおよび一般構造図の概要

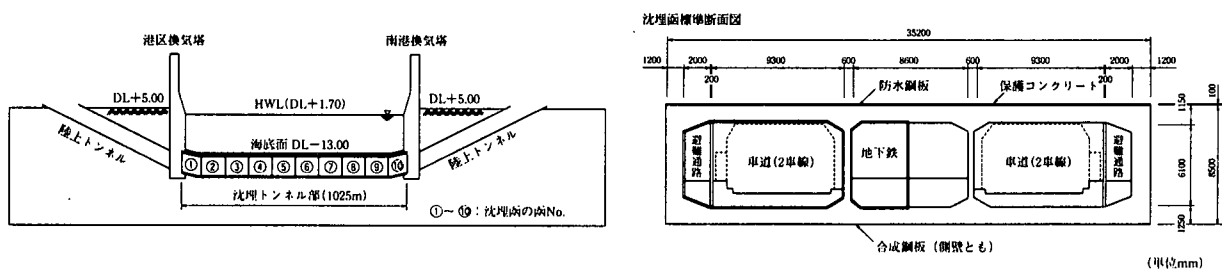


図-2.4.7 縦断面図および標準断面図

a. 地震時の施工状況

港区側から数えて6号函まで沈設が完了しており、函底コンクリートは6号函まで、継手連結ケーブル、二次止水ゴムは5号継手まで、水平せん断キーは3号継手まで各々施工が完了していた。また、埋め戻しについては、5号函までは埋め戻しが完了し、6号函は2/3程が埋め戻された状態にあった。したがって、6号函については、連結ケーブル、水平せん断キーともに未施工であったが、沈設時のガイド(仮受ブラケット

ト)は残されていた状況であった。

b. 地震による影響

地震後直ちに点検を行った結果、可とう継手部に移動痕跡が認められる等、地震の影響はいくつか確認されたが、トンネルの安全性や使用性に影響を及ぼすような異常は認められなかった。また、地震前後の沈埋部の測量結果より、沈埋函が断面方向に5cm程度水平移動したが、沈埋トンネルの延長には殆ど差がなかった。

2.5 まとめ

兵庫県南部地震は、人口約150万人が生活している近代都市神戸市を襲った内陸直下型地震であった。また、この地震では、山岳トンネルやこれまで大地震の洗礼を受けていなかった近代都市に存在する地下構造物(都市トンネル(地下鉄)、地下街・地下駐車場、およびライフライン)等の土木施設になんらかの被害が発生した。各地下構造物の被害をまとめると以下のようであった。

山岳トンネルの被害は、地上部の甚大な被害と比較し軽微であった。これまでの地震被害の特徴であったトンネル坑口部では少なく、また、断層のずれによる被害も少なかった。今回の被害の特徴は、断層粘土、或いは断層破砕帯で発生しており、断層部における常時の健全度確認と維持・管理の必要性が再認識された。

都市トンネル(地下鉄)では、神戸高速鉄道大開駅の被害は安全神話の崩壊等との表現から、その甚大さは目を覆うばかりであった。被害の規模は異なるものの三宮駅、上沢駅、新長田駅等で被害が発生している。被害は、それぞれの構造物が構築された時代の設計背景を基に原因説明がなされつつあり、それらの結果から地震規模が設計で想定した以上であったり、耐震設計を考慮していなかった等が明らかになるであろう。

地下街・地下駐車場は、構造本体の損傷は軽微で、付属施設との取り付け部付近の壁と天井スラブのコンクリートが剥落して鉄筋が露出した例があったが、全体として被害は軽微であった。

ライフライン施設害として水道・下水道施設、NTT施設、および共同溝等の被害を紹介した。特に、下水道施設では、シールドトンネルでの被害が見られた。その規模は大きくはないが、シールドトンネル内の二次覆工コンクリートにクラック発生、立坑付近のRCセグメントに被害の発生が見られた。施工中の沈埋トンネルには、ほとんど発生しなかった。

今回の地震では、地下構造物の被害は、地上構造物に比べて軽微ではあったが、神戸高速鉄道の大開駅のような前例のない被害が生じた。地下構造物の被害を整理していくと、地下構造物も地震動や構造物・地盤特性の影響を受ける可能性があることが明らかになった。この地震で被害を受けた記録を整理することは、将来襲われる可能性のある大規模地震に対する地下構造物の耐震性を評価するための貴重な資料となる。今後、これがいかに有効に生かされるかが問われることになるであろう。

参考文献

- 1) 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査，*鉄道技術研究報告*，No. 1123，1979年9月。
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，*鉄道総研報告*，特別 No. 4，1995年4月
- 3) 日本国有鉄道大阪新幹線工事局：山陽新幹線(新大阪～岡山)地質図，1972年3月
- 4) 鹿島建設(株)：塩屋谷川放水路災害復旧工事 横尾山断層部覆工及び地山状況報告書，1995年6月。
- 5) 佐野信夫：トンネルにおける損傷状況，*ハイウェイ技術*，No. 2，1995年10月
- 6) 社団法人地盤工学会 阪神大震災調査委員会：阪神淡路大震災調査報告書(解説編)，1996年3月。
- 7) 社団法人土木学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神大震災調査報告 土木構造物の被害 第2章 トンネル・地下構造物，1997年。(印刷中)
- 8) 佐俣千載：兵庫県南部地震での地下鉄構造物の被害と復旧，*土木学会論文集*，No. 534/VI-30，pp. 1-17，1996年。
- 9) 社団法人土木学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神大震災調査報告 ライフライン施設の被害と復旧 第2章 水道，1997年。
- 10) 関西ライフライン研究会：阪神・淡路大震災に学ぶ，1997年6月。