

8. 鉄道施設の復旧

(1) 被害の特徴

① 高架橋の被害分析

鉄筋コンクリート高架橋には、ラーメン高架橋、あるいはラーメン橋台の柱部の破壊により、上スラブの落下や桁の落橋に至る被害が多く発生した。現地調査の結果、倒壊した多くの高架橋にせん断破壊が生じる被害が観察された。曲げによる破損・損傷は、比較的背が高く変形性能を有している1層高架橋の柱に多く見られた。

また、今回の地震で被災したコンクリート高架橋は、その多くが1968～1976年に完成したものであった。1983年制定の「国鉄建造物設計標準」を適用して設計された比較的新しい高架橋は、阪急今津線今津駅付近、同宝塚線宝塚駅付近、阪神電鉄本線武庫川駅～尼崎駅間などにあったが、被害は軽微な損傷が一部に見られる程度であった。一方、JR西日本東海道本線三宮駅付近の大正～昭和初期（1926～1938年）に建設された高架橋では、破損・損傷が見られたものの破壊に至ったものはなかった。

鉄道施設耐震構造検討委員会では、被災した主な高架橋について耐力や固有周期の推計など被害の分析を行った。ここでは、山陽新幹線阪水高架橋の事例を紹介する。

倒壊した阪水高架橋は、2層3径間（杭基礎）で、高さ10.9～11.6mであり、4ブロックの高架橋が連続して倒壊した。

ここでは、線形解析により、水平震度を逐次増加させて断面力を求め、部材が曲げ降伏耐力、曲げ耐力及びせん断耐力に達する時の各水平震度を求めた。解析モデルは平面骨組みモデルとし、橋軸方向及び橋軸直角方向にそれぞれモデル化した。なお、材料強度は規格値とした。その結果、阪水高架橋の主たる損傷方向である橋軸方向の柱の曲げ降伏、曲げ耐力及びせん断耐力に達する震度は、それぞれ0.42, 0.53, 0.40となった。これは、曲げ耐力に達する震度よりせん断耐力に達する震度が小さく、せん断破壊が曲げ破壊に先行することを示している。

また、阪水高架橋の水平動の固有周期を、1自由度の振動モデルに置換して求めると0.76秒となった。これに対し、今回の地震は、この付近の固有周期の範囲において極めて大きな成分を有しており、共振に近い振動をしたものと推測できる。

以上の結果から、被災した主な高架橋において同様の解析を行ったが、その結果、落橋した高架橋はせん断破壊が曲げ破壊に先行する破壊形態であったこと、また、各高架橋の固有周期が今回の地震動の主要な周期帯の範囲にあり、共振に近い振動をしたことなどが推測され、これら分析結果等から判断すると被災した高架橋は建設当時の設計震度に対して必要な耐力を有していたものの、それを上回る地震力が作用し、せん断破壊したものと考えられる。

② 橋脚の被害分析

山陽新幹線武庫川橋梁では、11径間の単純桁橋梁で、下部工は小判型橋脚（ケーソン基礎）である。被害は、橋脚の軸方向鉄筋段落し部において、かぶりコンクリートが剥落した。

前述「①高架橋の被害分析」と同様な手法を用いて計算すると、大きな被害を受けた橋脚の主たる損傷方向である橋軸方向について、曲げ降伏耐力に達する震度を求めると鉄筋の段落し位置が低かった。橋脚の鉄筋段落し位置における曲げ降伏、曲げ耐力及びせん断耐力に達する震度はそれぞれ、0.20、0.29、0.28となり、曲げ耐力とせん断耐力に至る震度が同程度であった。このことから、今回の地震により橋脚の軸方向鉄筋の段落し部で鉄筋が降伏して、その繰返しによりかぶりコンクリートを押し出し、破損に至ったものと考えられる。

また、橋脚の固有周期は0.92秒となり、今回の地震により、本橋梁は共振に近い振動をしたものと推測できる。

③ 開削トンネルの被害分析

被害を受けた神戸高速鉄道大開駅は、1962年に開削工法で建設されたボックスラーメン構造で中央部に鉄筋コンクリート製の支柱（中柱）を有している。この構造は、土被りが厚く中柱に作用する軸力が大きいことが特徴となっている。しかし、建設当時の設計基準では耐震設計について明確に規定されてなく、側壁は主として両側からの土圧に対して、中柱は上載荷重に対して設計された。

今回の地震によって、大開駅は中柱が圧潰して崩壊したが、この柱の破壊は地震時の表層地盤の振動によって上床版と下床版との間に相対変位が生じ、柱の変形がこれに追従できずに破壊したものである。中柱に水平力を加えると約2cmの相対変位で降伏する。また、中柱及び側壁の耐力を計算で求めると下表の通りとなるが、中柱のせん断耐力は、曲げ破壊時のせん断耐力と同程度の値となっており、中柱は曲げまたはせん断により破壊したものと推定される。

表-V.8.1 主要部材の耐力

部 材	位 置	せん断耐力	曲げ破壊時のせん断力
中 柱	上 端	14.4 tf/本	14.2 tf/本
	下 端	14.4 tf/本	14.2 tf/本
側 壁	上 端	45.0 tf/本	26.9 tf/本
	下 端	44.0 tf/本	26.9 tf/本



写真-V.8.1 大開駅の被災状況



写真-V.8.2 大開駅の復旧状況

④ 被災構造物の材料の性質

土木工事は屋外で行われることから、コンクリートや鉄筋の品質にはある程度のばらつきがあるが、そのばらつきを考えて設計の安全率を定めている。今回の被災構造物に関して施工上の問題により、この安全率が低下したかどうかを確かめるために、コンクリート及び鉄筋の抜き取り調査を行った。

その結果は以下のとおりである。

- ・コンクリートの圧縮強度は試料によりばらつきはあるが、いずれも設計基準強度を満たしていた。
- ・鉄筋の引張試験結果は、降伏強度・引張強度・伸びとも規格値を下回るものはなかった。また、ガス圧接部での試験結果では、一部引張強度を下回っていたものや圧接部で破断したものがあつたが、降伏強度の規格値は上回っていた。
- ・コンクリートのアルカリ骨材反応、中性化及び海砂の使用は一部構造物で認められたが、強度的には所要の強度を満たしていた。
- ・その他、コンクリートの打ち継ぎ目のレイタンス処理が不十分と思われるもの、帯鉄筋の間隔が不均一なもの、木片、発砲スチロールの残存等が一部で認められた。しかし、このような事象が認められない箇所でも被害を受けていることから、これらが被害の主因であるとは考えられない。

以上の結果より、今回調査した範囲においてもかなりばらつきがあつたが、ほぼ所定の品質が保たれていたものと判断できる。

(2) 復旧仕様・工法

① 鉄道施設耐震構造検討委員会

阪神・淡路大震災は、死者6,300人を超すなど自然災害としては関東大震災以来最大の惨事となり、鉄道にも甚大な被害をもたらした。特に高架橋の崩壊や開削トンネル駅部の陥没など、安全を使命とする鉄道の根幹を揺るがす重大な事態も発生した。運輸省では、このような事態を重大に受けとめ、被災した翌日には、学識経験者や鉄道事業者等で構成する「鉄道施設耐震構造検討委員会」（委員長：松本嘉司東京理科大学教授）（以下、略して「検討委員会」という）を設置し、被災原因の調査分析、被災鉄道施設の復旧の考え方、既存施設への対応方針、今後の耐震構造のあり方等を検討することとした。

なお、検討に用いるデータの収集、解析等は（財）鉄道総合技術研究所に委託した。

（委員会の検討内容）

- ・構造物の被害分析
- ・補強による復旧方策の検討
- ・復旧構造物の耐震性の評価
- ・再構築する場合の復旧対策の検討
- ・運転再開のための調査・試験

② 復旧方法の概要

1) 高架橋（ラーメン橋）の復旧

a. 補強による復旧

損壊した高架橋の柱を補強して復旧する場合の具体的な復旧方法は、被害の程度により以下の方法とした。

- ・ 柱の損壊部を新設する場合は、10cm間隔に帯鉄筋を配置し、その外側を鋼板で被覆する。
- ・ 破損しているが、破壊に至っていない柱を修復する場合は、破損部分を修復し、その外側を鋼板で被覆する。
- ・ 被災によるクラックを修復する場合は、クラック部にエポキシ樹脂等を注入して、修復したうえで、その外側を鋼板で被覆する。

なお、在来線において、軽微なクラックについては、エポキシ樹脂等で補修した。柱の補強に用いる鋼板の厚さは6mmを基本とし、部材と鋼板との隙間は無収縮モルタルで充填した。

また、高架橋の柱の鋼板被覆による補強については、同じブロックの中で被災しなかった柱を含めて、高架橋のブロック単位で行った。

このほか、高架橋のスラブや桁については、安全性を確認した上で可能なものについては再使用した。

被災程度	破 壊	破 損	損 傷
被災のイメージ			
復旧の考え方	<p>部材の破壊部を新設する場合</p> <p>(被災前) (復旧)</p> <p>鋼板被覆 鋼板被覆 t=6mm t=6mm</p> <p>無収縮モルタル</p> <p>帯鉄筋増量 帯鉄筋増量 D13 etc 100mm D13 etc 100mm</p>	<p>破損しているが、破壊に至っていない部材を修復する場合</p> <p>破損部修復 無収縮モルタル</p> <p>鋼板被覆 鋼板被覆 t=6mm t=6mm</p>	<p>被災によるクラックを修復する場合</p> <p>エポキシ樹脂等注入</p> <p>鋼板被覆 鋼板被覆 t=6mm t=6mm</p>
主な適用線区	JR西日本 山陽新幹線（新大阪駅～姫路駅間） JR西日本 東海道線（住吉駅～灘駅間） 阪神電鉄 本線（西灘駅～御影駅間）	JR西日本 山陽新幹線（新大阪駅～姫路駅間） JR西日本 東海道線（住吉駅～灘駅間） JR東海 東海道新幹線（京都駅～新大阪駅間） 阪神電鉄 本線（西灘駅～御影駅間） 阪急 神戸線（三宮駅付近） 神戸市交 西神延伸線	JR西日本 山陽新幹線（新大阪駅～姫路駅間） JR西日本 東海道線（住吉駅～灘駅間） JR東海 東海道新幹線（京都駅～新大阪駅間） 阪神電鉄 本線（西灘駅～御影駅間） 阪急 神戸線（三宮駅付近） 神戸市交 西神延伸線 *在来線においては、軽微なクラックはエポキシ樹脂等注入で補修のみ

図-V.8.1 高架橋の復旧方法

b. 再構築による復旧

被災した高架橋のうち、阪急神戸線西宮北口～夙川駅間の西宮高架橋の被害は甚大であったため、基礎部も含めて鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）構造で復旧した。この工法は、高架橋のく体の鉄骨を組み上げた後、軌道や電気設備等の工事をく体のコンクリート工事と並行して行えるため、急速施工ができる工法であった。

当初計画の段階では、まだ「阪神・淡路大震災に伴う鉄道復旧構造物の設計に関する特別仕様（以下、「特別仕様」という）」が示されていないことから、さらに柱・杭部材に鋼板巻き補強を行うこととしていたが、「特別仕様」が示された段階で、再度「特別仕様」に基づき耐震性能を照査した結果、今回の地震の最大地震動に耐える構造物であることが確認されたので、当初計画の鋼板巻き補強を省略することとした。

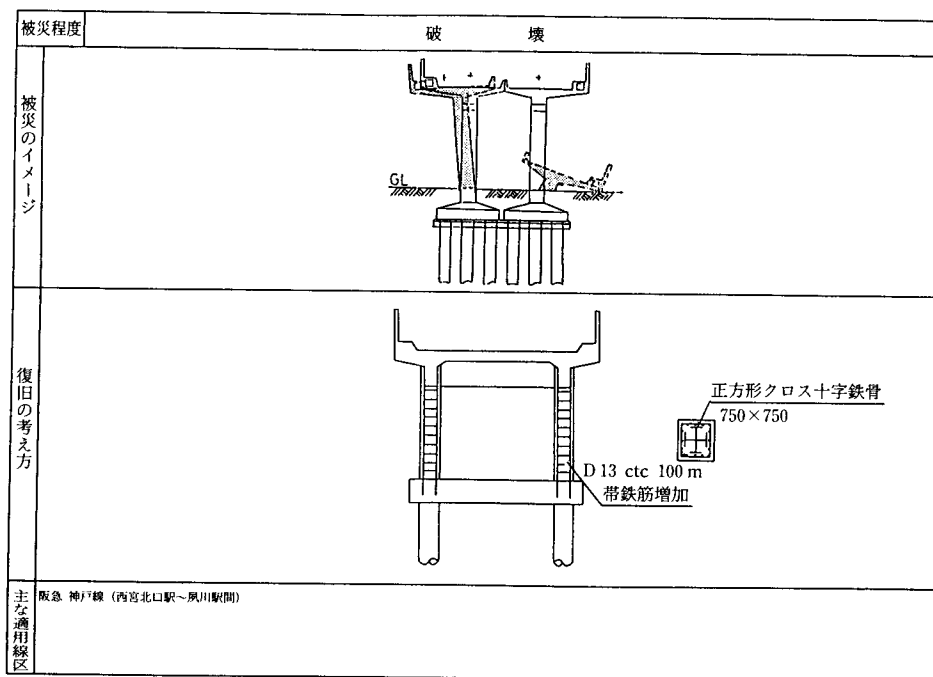


図-V. 8. 2 再構築による復旧方法

2) 桁式橋りょうの復旧

損壊した桁式橋りょうの橋脚や橋台の復旧方法については高架橋の柱と同様に、破壊部を新設、もしくは破損、損傷部を補修したうえで鋼板を被覆した。

なお、ラーメン橋台の破壊部を新設する場合は、10cm間隔に帯鉄筋を配置して鋼板で柱部を強化するか、鉄筋コンクリート製の壁構造とした。

山陽新幹線武庫川橋梁の橋脚については、破損した橋脚を修復し、鉄筋コンクリートで外巻き補強（30cm厚）したうえで厚さ9mmの鋼板で被覆した。

神戸高速東西線三宮付近の橋梁で破損した鋼管柱については、破損した鋼管柱を取り替え、さらに内部に鉄筋を挿入し、コンクリートで充填した。

被災程度	破 壊	破 損	損 傷
被災のイメージ			
復旧の考え方	<p>(耐震壁による補強) (鋼板等による補強)</p> <p>耐震壁</p> <p>鋼板被覆 $t=6\text{ mm}$</p> <p>耐震壁の構造は鉄筋コンクリート</p> <p>帯鉄筋増加 $D13\sim D16$</p> <p>$100\sim150\text{ mm}$ ピッチ</p>	<p>鉄筋コンクリート</p> <p>外巻補強</p> <p>鋼板被覆</p> <p>破損部補修</p> <p>$D22\sim100\sim150\text{ mm}$ ピッチ</p> <p>鉄筋コンクリート外巻補強</p> <p>鋼板被覆</p>	<p>鉄筋コンクリート</p> <p>外巻補強</p> <p>鋼板被覆</p> <p>特殊樹脂等注入</p> <p>$D22\sim100\sim150\text{ mm}$ ピッチ</p> <p>鉄筋コンクリート外巻補強</p> <p>鋼板被覆</p>
主な適用線区	JR 西日本 山陽新幹線 (新大塚駅～姫路駅間)	JR 西日本 山陽新幹線 (武庫川橋梁)	JR 西日本 山陽新幹線 (武庫川橋梁)

図-V.8.3 橋脚・橋台の復旧方法

3) 開削トンネルの復旧

a. 補強による復旧

損壊した開削トンネルの柱部材を強化して復旧する場合は、高架橋の柱の復旧と同様に、被害の程度に応じて、破壊部を新設、もしくは破損、損傷部を補修したうえで、鋼板で被覆（鋼板の厚さは6mm以上）した。なお、軽微なクラックについては、エポキシ樹脂等で補修した。

被災程度	破 壊	破 損	損 傷
被災のイメージ			
復旧の考え方	<p>部材の破壊部を新設する場合</p> <p>(被災前) (復旧)</p> <p>帯鉄筋増加 $D13\sim D15$</p> <p>鋼板被覆 $t=6\text{ mm}$</p> <p>無収縮モルタル充填</p> <p>スチールアップD15</p>	<p>破損しているが、破壊に至っていない部材を修復する場合</p> <p>モルタル充填</p> <p>鋼材 $H=350$</p> <p>鋼板被覆 $t=6\text{ mm}$</p> <p>無収縮モルタル充填</p>	<p>被災によるクラックを修復する場合</p> <p>破損部修復</p> <p>鋼板巻付</p> <p>鋼板巻付 $t=6\text{ mm}$</p> <p>無収縮モルタル充填</p>
主な適用線区	神戸市交 山手線 (新長田駅～三宮駅間)	神戸市交 山手線 (新長田駅～三宮駅間) 山陽電鉄 本線 (西代駅)	神戸市交 山手線 (新長田駅～三宮駅間) 西神線 (新長田駅) 山陽電鉄 本線 (西代駅～板宿駅間) 神戸高速 東西線 (西代駅～三宮駅間)

図-V.8.4 補強による開削トンネルの復旧 (中柱)

被害を受けたトンネルの応急処置として、損壊した柱部材の側方にH型鋼等の鋼材で上床版を仮受けしていたが、本復旧の際にこの鋼材を撤去せずにそのまま補強材として残し、この補強材も含めて鋼板で被覆し、その中にモルタルを充填した。

また、神戸高速東西線の一部区間の側壁において、側壁下部がトンネルの内側へ変位したり、クラックが生じるなどの被害を受けたが、これらの区間においては、上床版及び側壁の内側にH型鋼(H-150)と鋼板(厚さ9mm)を取り付け、その間にモルタルを充填し補強するとともに、中柱を鋼板被覆により補強して復旧した。

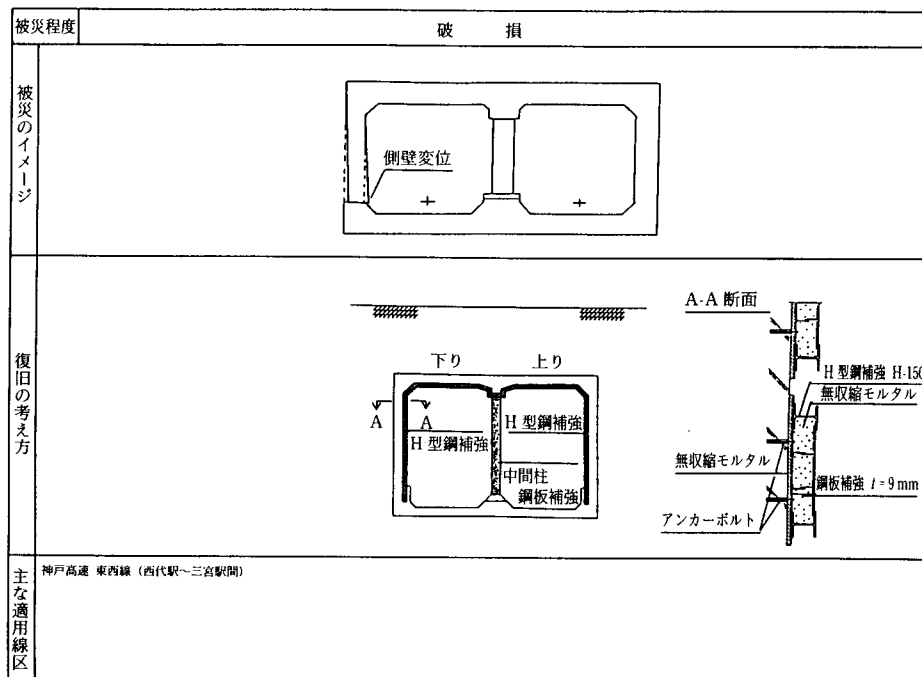


図-V.8.5 補強による開削トンネルの復旧方法(側壁)

b. 再構築による復旧

神戸高速東西線の大開駅部は、中柱が破壊し中央部が線路に沿って圧壊し、道路が陥没するなど甚大な被害を受けたため、復旧にあたっては、道路面より開削し、下床版を除くトンネルく体を再構築して復旧した。開削トンネルを再構築する前に、破壊した構造物を撤去しなければならないが、この撤去に時間を要するため、まず、一次分割復旧計画として側壁の取壊し・撤去までの方法を承認し、トンネルの設計は「特別仕様」がまとまった段階で行った。

再構築するトンネルは、「特別仕様」に基づき設計されており、今回の地震の最大地震動に耐える構造であることを確認した。

なお、トンネルの中柱については、角型鋼管(厚さ12mm)を建植し、その中に鉄筋コンクリート柱を構築した。

4) その他構造物の復旧

トンネル覆工コンクリートに比較的大きなクラックが発生した神戸電鉄有馬線の東山トンネルなどは、被災した覆工を取り壊して新設したが、この際、ロックボルトを打設する等、当初の設計よりも支保および覆工を強化した。また、山陽新幹線六甲トンネルにおいては、覆工コンクリートの剥離・剥落など損傷した部分を樹脂注入および無収縮モルタル等で補修したうえで、ロックボルトを打設し、また炭素繊維シートを貼り付けることにより覆工コンクリート修復した。

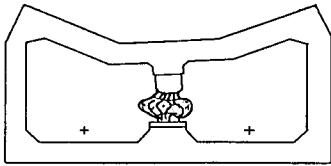
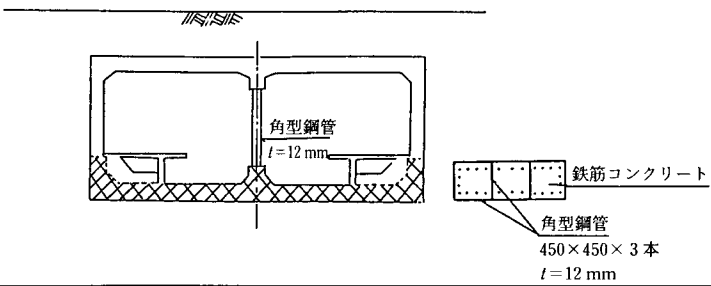
被災程度	破 壊	
被災のイメージ		
復旧の考え方		
主な適用線区	神戸高速 東西線 (大間駅)	

図-V.8.6 再構築による開削トンネルの復旧方法

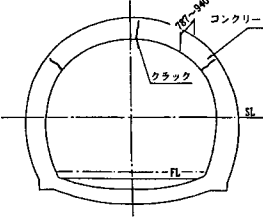
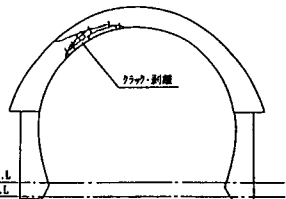
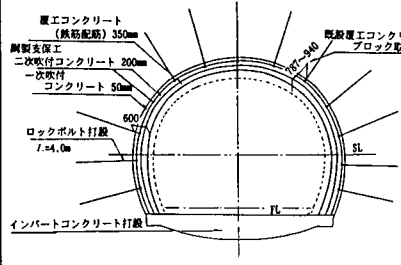
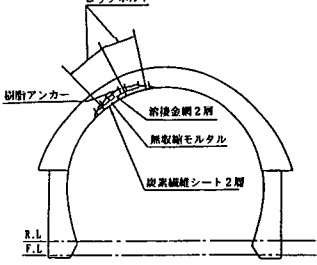
被災程度	破 損	損 傷
被災のイメージ		
復旧の考え方		
主な適用線区	神鉄 有馬線 (東山トンネル他)	JR 西日本 山陽新幹線 (六甲トンネル)

図-V.8.7 山岳トンネルの主な復旧方法

(3) 鉄道施設の復旧

第II章でも示しているように、被災地域の鉄道施設は、JR西日本の山陽新幹線、在来線の東海道本線、山陽本線、阪急電鉄(株)、阪神電鉄(株)、など13事業者、29に及ぶ路線が被災し、なかでも、神戸市及び阪神間における10事業者の25路線では運行が不可能となる被害が発生した(表-V.8.2)。

これら鉄道の復旧に際しては、鉄道施設の変更認可(運輸局)、建築確認(各自治体建築主事)、道路の占用許可(道路管理者)、道路使用許可(警察)等の諸手続きが必要であった。これらの手続きに通常の間を要したのでは、復旧工事の遅れにつながる事が予想されたため、関西鉄道協会等の要望を受け、国、県等の所轄部署において通常では考えられない迅速かつ弾力的な運用が行われた。

また、工事事務所用地確保のため都市公園の長期にわたる借用の許可、鉄道車両の道路運搬に際しパトカーの先導、さらには、代替バスの運行に際してバス優先レーンの設置、臨時バス停の確保等、警察や国、県、市の道路管理者の全面的な協力が行われた。

これら、鉄道事業者、国、地方公共団体等挙げての協力体制のもと、被災鉄道の運行再開は、震災の翌日から順次行われ、4月1日にはJR在来線、4月8日には山陽新幹線、6月12日には阪急電鉄、6月26日には阪神電鉄が全線運行再開する運びとなり、全路線が運行再開されたのは震災後約7箇月が経過した8月23日(神戸新交通：六甲アイランド線)と、当初の予定を大幅に上回るペースで復旧が進んだ。

表-V.8.2 鉄軌道各線の全線開通記録

会社名	路線名	運転再開日	備考
西日本旅客鉄道	山陽新幹線	4月8日	……伊丹駅の仮駅、本来の駅の復旧には1年半 ……西代～東須磨間は地下新線で再開 大開駅 H8.1/17再開 三宮・新長田駅 3/16再開 上沢駅 3/31再開 ……全路線開通
	東海道・山陽本線	4月1日	
	福知山線	1月21日	
阪急電鉄	神戸本線	6月12日	
	今津線	2月5日	
	甲陽線	3月1日	
	伊丹線	3月11日	
	宝塚本線	1月19日	
阪神電気鉄道	本線	6月26日	
	西大阪線	1月18日	
	武庫川線	1月26日	
山陽電気鉄道	本線	6月18日	
	網干線	1月18日	
神戸電鉄	有馬線	6月22日	
	三田・粟生・公園都市線	1月19日	
神戸高速鉄道	東西線	8月13日	
	南北線	6月22日	
北神急行電鉄	北神線	1月18日	
神戸市交通局	山手・西神線	2月16日	
神戸新交通	ポートライナー	7月31日	
	六甲ライナー	8月23日	
日本貨物鉄道 (JR貨物)	神戸港線	4月1日	

注) 表中に年次を記入していないものは全て平成7年。

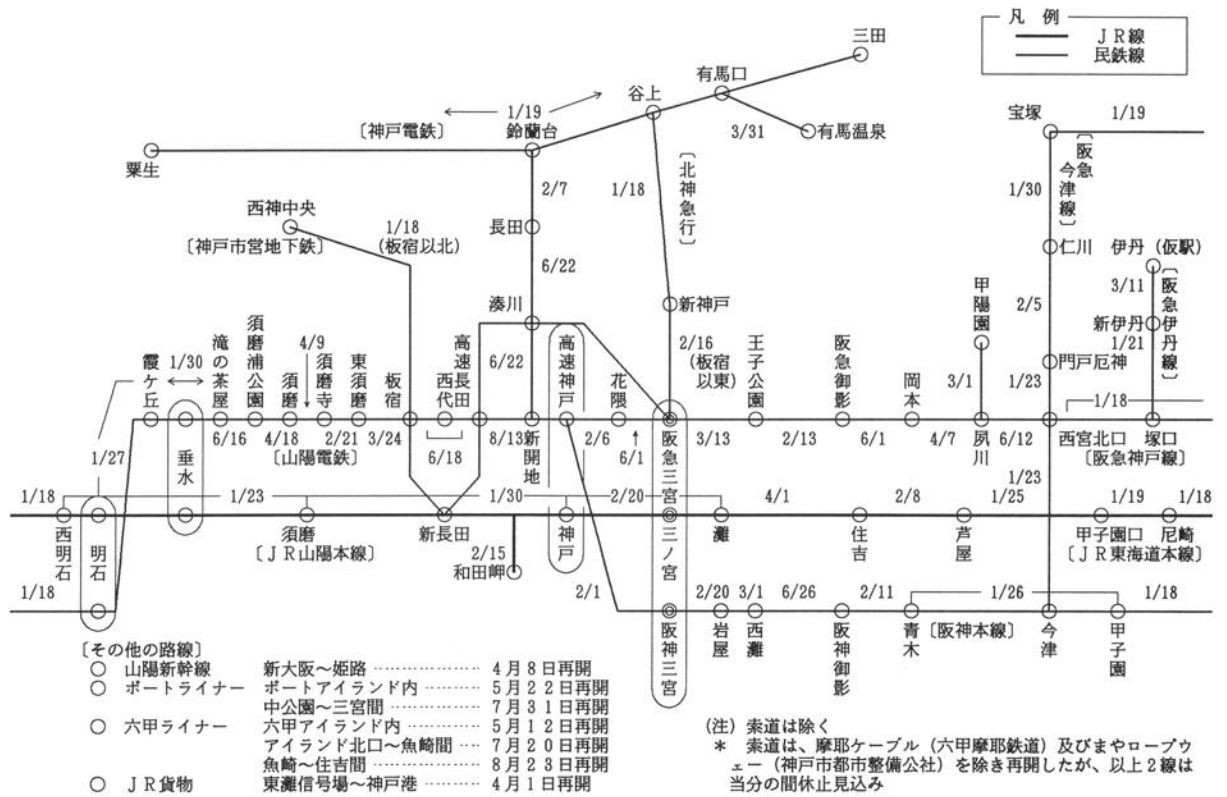


図-V.8.8 鉄軌道の復旧記録(平成7年8月23日全線開通)



写真-V.8.3 搬出される車両



写真-V.8.4 道路上を輸送される車両