

阪神・淡路大震災における被災土木構造物の 補修工事への高性能コンクリートの適用

若松 岳
十河 茂幸
相原 功
横溝 文行
(本社 土木技術本部設計第3部)
原田 暁
(本社 土木技術本部技術第5部)

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、多くの土木構造物に被害が及んだ。このうち、地下鉄駅舎のA駅、B駅は、地下1階部分を中心として、中柱に被害が集中した。構造物が被害を受けた主要因や破壊のメカニズム等については、多くの報告があり、本報告では、RC構造物の補修工法について述べる。

一般にRC柱のコンクリートの補修・補強工法としては、ひび割れ補修工法、断面修復工法、表面保護工法、打換え工法、巻立て工法、鋼板接着工法、FRP接着工法、鋼板巻立て工法、プレストレス導入工法など種々の方法がある。これらの工法は、損傷の評価・判定の結果、損傷原因、構造物の特性や重要度、補強後の構造物に期待される耐用年数、経済性等を総合的に考慮して決定されるものであり、震災復旧工事においては、施工条件や工期の制約についても十分配慮する必要がある。

今回は、早期復旧を目的とした工事の例である。対象の構造物は、鉄筋が大きく曲がるなどの損傷度の高いランクの柱で、H形鋼および鋼板で補強された狭い空間を、自己充填性があり、材齢3日程度で仮支柱を撤去することのできる早強性を有する膨張性高流動コンクリートを用いて復旧した。

2. 柱の被害状況

神戸市により柱の被害調査が行われ、被害の程度をI～IVの4段階にランク分けし、3章に示す補修方法が定められた¹⁾。

最も被害の大きいランクIの被害状況をPhoto 1に示す。柱全断面に貫通クラックがあり、軸方向鉄筋の曲がり角が鉄筋径の3倍以上のものをランクI (A駅8本、B駅10本)とし、柱全断面に貫通クラックがあり、軸方向鉄筋の曲がり角が鉄筋径以上かつ3倍未満のものをランクII (A駅14本、B駅24本)とし、柱にせん断クラックが発生しているが軸方向鉄筋の曲がり角が鉄筋径未満のものをランクIII (A駅47本、B駅94本)とし、ランクI、II、III以外で軽微なクラックが発生しているものをランクIV (A駅34本、B駅78本)とした。



Photo 1 柱の被害状況 (ランク I)
A Damaged Column (Rank I)

3. 柱の復旧方法

3.1 設計上の基本的な考え方

ランクI、IIの粉砕したコンクリートは、上スラブを仮り受けし、はつり取り、打ち換え後、許容軸力の80%の耐力として評価する。ランクIの主鉄筋は、切断除去し、新しく建て込む。ランクI、IIの主鉄筋は、復旧の有無にかかわらず軸方向耐力として評価しない。以上により、設計軸力として耐力が不足する柱については、H形鋼と、鉄筋を考慮しない既設コンクリート柱により軸力を分担する構造となる。

また、せん断補強としては、大規模地震にも耐えられるよう、柱を厚さ6mmの鋼板で巻くこととした。コンクリート打換え部は、帯筋および中間帯筋を増し(D13@125)、コンクリートを打ち換えないために中間帯筋を配置できない箇所のせん断補強の代替措置として、部材幅が1mを超える柱は、柱を削孔してPC鋼棒で鋼板を拘束した。これにより、震災前のRC柱に比べ靱性の向上を図った構造としている。

3.2 補修後の柱の断面形状

ランクI、IIの被害を受けた柱は、旧柱周囲にH形鋼および鋼板を配置した。H形鋼の腐食や地震時の一体化の問題を考慮し、内部にコンクリートを充填する構造となった。この場合、旧柱、鋼板およびH形鋼との間隔が50mmとなる箇所の充填性が課題となる (Fig. 1 参照)。

ランクIIIの被害を受けた柱は、旧柱周りに鋼板を巻く

構造となった (Fig. 2 参照)。この場合は、充填厚が 50mm と薄く、柱 1 本あたりの打設量が少量のため、充填材は無収縮モルタルを採用した。

3.3 逆打ち工法の検討と施工手順

ランク I、II の柱の打換え部および巻立て部は旧柱梁などの逆打ち面が存在する。逆打ち工法としては、Fig. 3 に示すように 3 種類あるが、充填法や注入法は、直接法よりも 1 工程多く、下部コンクリートのレイタンスが除去できないなど、工期および品質確保上問題が生じる。そこで、充填は直接法による逆打ち工法を採用した。

ランク I の被害を受けた柱の補修手順を Fig. 4 に示す。

4. 膨張性高流動コンクリートの採用

4.1 要求性能および配合条件

ランク I の被害を受けた柱の補修コンクリートの要求性能を Table 1 に、配合条件を Table 2 に示す。

逆打ち面が旧コンクリートに密着することが必要であるため、コンクリートは、レイタンスの発生や沈下が少ないものでなければならない。また、H 形鋼と旧柱の離隔が 50mm と狭隘で、主筋の配置は D 25 @ 100、帯筋・中間帯筋の配置は D 13 @ 125 と過密なうえ、逆打ちとなる。そのためパイプレタをかけることが困難となり、締固めなしでも充填できることが望ましい。さらに、鋼板と H 形鋼で囲まれた柱の高さが 2 ~ 5 m であり、筒先を差し込むことができないため、高所落下させても材料分離を生じないことが必要となる。そこで、高流動かつ材料分離抵抗性の高い膨張性高流動コンクリートを採用することとした^{2), 3)}。一方、強度面では、材齢 3 日程度で仮支柱を撤去するため、補強 H 形鋼を設置することのできる強度を発現することが必要とされた。

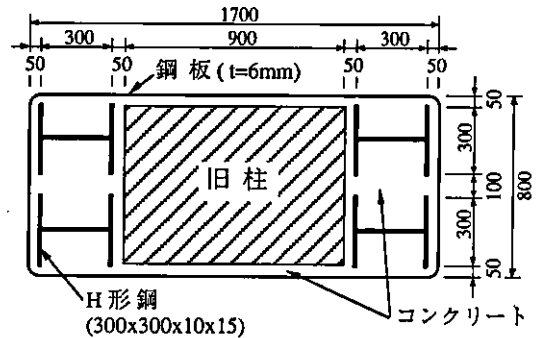


Fig. 1 ランク I、II 柱本復旧断面図
A Cross Section of Restored Column, Rank I, II

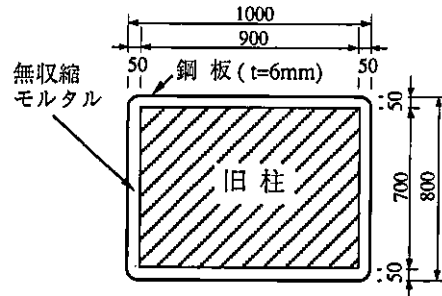


Fig. 2 ランク III 柱本復旧断面図
A Cross Section of Restored Column, Rank III

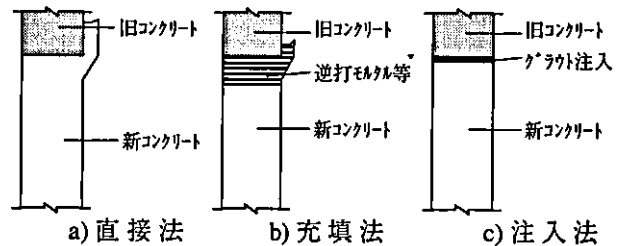


Fig. 3 逆打ち工法の比較
A Comparison of Inverted Construction Methods

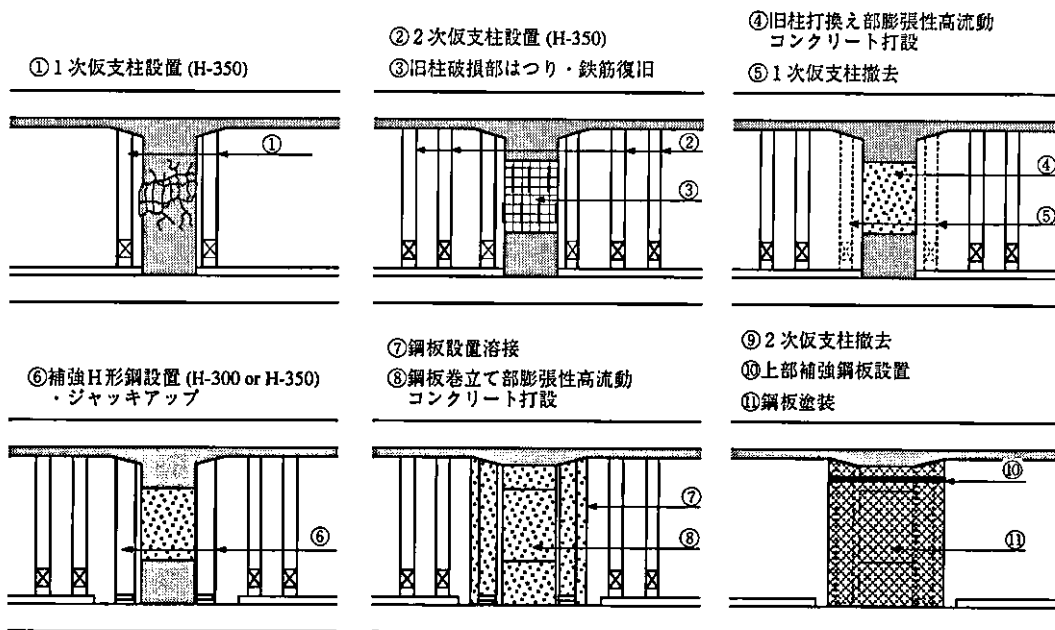


Fig. 4 柱の復旧施工手順 (ランク I)
Process of Column Restraint (Rank I)

次に、現場でのコンクリートの製造は、設備や敷地の都合上困難であったので、地震後一早く復旧したレディーミクストコンクリート工場において、製造することとした。膨張性高流動コンクリートは、特殊コンクリートであり、レディーミクストコンクリート工場への技術支援と工場側の協力が不可欠であったが、2工場で協力を得ることができた。これにより、1回に10数m³の施工量を確保することができた。なお、復興車両による大渋滞に巻き込まれて、打設までの時間が多くかかっても、フレッシュコンクリートの性状が安定するよう配慮した。

4.2 使用材料と配合

使用材料を Table 3 に、配合を Table 4 に示す。ただし、A 駅と B 駅で使用プラントは分けた。

材料の組合せは、打設が少量で多数回になるためプラントの製造および品質管理ができるだけ容易となるよう配慮した。一般に自己充填性を得るためには、多量の粉体または分離低減剤が必要となるが、今回は新たな計量設備や貯蔵用サイロを必要としない普通ポルトランドセメントのみを粉体に使用し、少量の分離低減剤と膨張剤は手投入した。

膨張剤は、打設後に所要の膨張量を得よう運搬時間と打設時間を考慮して膨張開始時間を制御する必要がある。また、ブリーディングがなくても、コンクリートは硬化収縮や圧密によりわずかに沈下する。反応速度の異なる2種類の膨張剤を用いて、プラントAで実施した室内試験におけるコンクリートの膨張率の経時変化を Fig. 5 に示す。これにより、膨張剤の種類は、膨張開始時間がより遅いタイプ1を採用した。膨張剤の添加量については、膨張率が1%程度となるよう各プラントで膨張率の試験を行い決定した。

4.3 コンクリートの品質管理項目と試験方法

コンクリートに要求される品質項目とそれを評価するための試験項目、基準値、試験方法を Table 5 に示す。

復興車両による大渋滞により、打設までの時間がかかるため、運搬や打設中のフレッシュコンクリートの流動性が低下することが予測された。そのため、現場到着時に高性能AE減水剤を現場で後添加し、流動性を保持させることとした。

4.4 コンクリートの品質特性

4.4.1 流動性と分離抵抗性 Fig. 6に実機ミキサによる

Table 1 コンクリートの要求性能

Required Performance of Concrete		
要求性能	品質項目	材料および配合上の対応策
逆打面の一体化	・材料分離抵抗性	・分離低減剤の利用
	・流動性	・高性能AE減水剤の利用
自己充填性	・膨張性	・膨張剤の利用
	・強度特性	・結合材量の増大
自己充填性	・流動性	・高性能AE減水剤の利用
	・材料分離抵抗性	・微粉末量の増大
	・間隙通過性	・粗骨材量の減少

Table 2 コンクリートの配合条件
Condition on Mix Proportion of Concrete

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	強度管理材齢 供試体養生方法	空気量 (%)
24	材齢3日, 現場封緘養生	2±1.0

Table 3 使用材料
Properties of Materials

材 料	記号	プラント	規 格, 性 状 等
セメント	C	A, B	普通ポルトランドセメント, 比重 3.16
細骨材	S	A	海砂(鹿児島産)+砕砂(牡鹿産) 混合比 5:5 比重 2.58, 粗粒率 2.77
		B	海砂(室木産) 比重 2.57, 粗粒率 2.50
粗骨材	G	A	砕石(牡鹿産) 最大寸法 20mm 比重 2.61, 実積率 61.8%
		B	砕石(牡鹿産) 最大寸法 20mm 比重 2.62, 実積率 58.9%
高性能 AE減水剤	SP	A, B	ポリカルボン酸系 (T社)
分離低減剤	Vis	A, B	セルロース系特殊ブリーディング抑止剤
膨張剤	A Q	A, B	逆打用アルミ系特殊膨張剤

Table 4 膨張性高流動コンクリートの配合
Mixture Properties of Expansive Highly Flowabl Concrete

プラント	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混 和 剤		
							混	和	剤
A	37	53	185	500	866	783	0.40	0.03	10.0
B							0.40	0.02	12.0

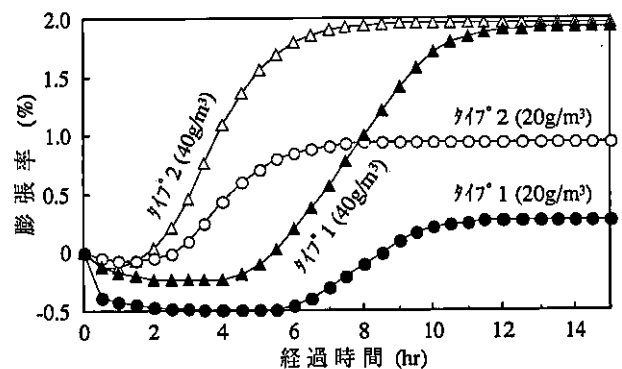


Fig. 5 膨張剤のタイプと膨張率の経時変化
Elapsed Time versus Expansion at Type of Gas Generating Agent

Table 5 コンクリートの品質管理項目
Tests for Quality Control of Concrete

品質管理	試験項目	基準値	試験方法	試験強度
流動性	スランブフロー	65~72cm	土木学会規程「水中不分散性コンクリートの設計施工指針」	1台目および随時
	ブリーディング率	ブリーディングの発生がないこと	JIS A 1123コンクリートのブリーディング試験方法	1回/日
分離抵抗性	スランブフローの目視検査	材料分離がないこと	スランブフロー試験における目視検査	1台目および随時
膨張性	膨張率	1%程度 (0.5~2.0%)	φ12.5×25cmモールドおよび高感度変位計による	1回/月
強度特性	圧縮強度	封緘養生 材齢3日 24 (N/mm ²)	φ10×20cmモールドおよび重り2t/m ² による拘束 ²⁾	1回/日

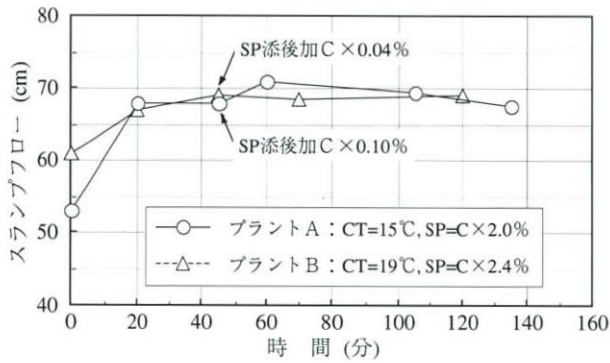


Fig. 6 スランプフローの経時変化
Elapsed Time versus Slumpflow

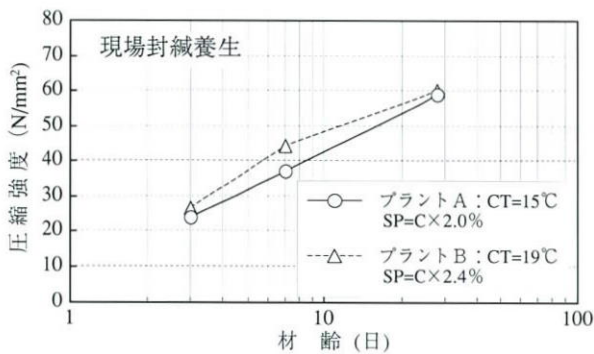


Fig. 7 圧縮強度の発現状況
Development of Compressive Strength

練混ぜ試験のスランプフローの経時変化を示す。製造 45 分後に少量の高性能 A E 減水剤を後添加しているが、製造後 2 時間以上経ても 65cm 以上の高い流動性を保つことを確認した。また、目視であるが材料分離は見られなかった。同時に、材料分離の程度を把握するために測定した O ロート流下時間は、製造 20 分後から 140 分後まで、各プラントにおいて 12 秒および 20 秒程度と安定しており、高い流動性のもとでも十分な材料分離抵抗性があるものと判断された。なお、ブリーディングの発生はなかった。

4.4.2 圧縮強度 圧縮強度試験結果を Fig. 7 に示す。設計基準強度の 24N/mm² 以上となる材齢は 3～4 日であった。仮支柱の撤去は、現場封緘養生による供試体で圧縮強度を確認した後実施した。

4.4.3 膨張特性 一般にアルミ粉末添加率と膨張率との関係には温度依存性があり、コンクリート温度が高くなると膨張率が大きくなる傾向がある。このため、1 カ月に 1 回程度の頻度で自由膨張率試験を実施し、所要の膨張量を得るための膨張剤量を調整した。Fig. 8 は、膨張剤添加量と自由膨張率との関係を示したものである。

4.5 施工状況

コンクリートは地上のポンプ車から、地下 2 階まで、5B の配管で圧送した。配管の最長は実長 190m であり、打設速度は、柱の切り替えに要する配管の段取り替えなどもあり、数 m³/hr～10 数 m³/hr であった。コンクリートの打設総量は、A 駅は 16 回の打設で約 120m³、B 駅は 12 回の打設で約 190m³ となった。柱上部のコンクリートの投入

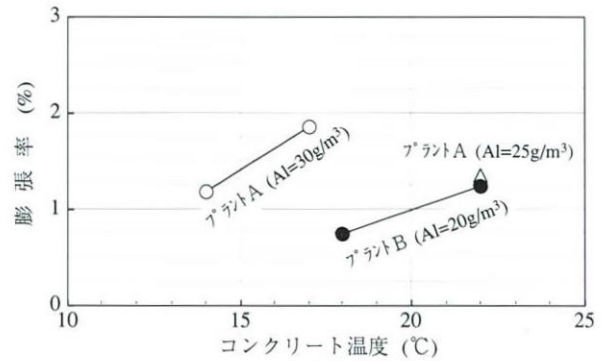


Fig. 8 コンクリート温度と膨張率
Concrete Temperature versus Expansion

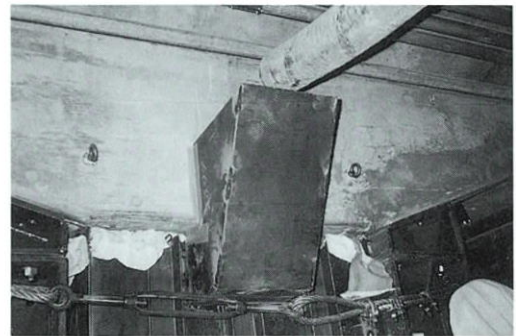


Photo 2 打設状況
Placement of Concrete to the Column

口の形状を Photo 2 に示す。投入口は高さ 20cm 以上のコンクリートの自重圧がかかるように打ち上げ、翌日張出し部分をはつり落とした。

5. まとめ

今回の地震により、大きな被害を受けた地下鉄駅舎の RC 柱は、粉碎部を打ち換え、H 形鋼および鋼板で補強した。過密な配筋の打換え部と、H 形鋼と打換え部を鋼板で巻き立てた狭隘な空間内部の充填を、膨張性高流動コンクリートを用い、直接法による逆打ち工法で復旧した。

震災後に使用できるプラントの限られた条件から、プラント常用の材料を主体に、少量の分離低減剤および膨張剤を用いる配合とした。その結果、製造後 2 時間以上、高い流動性と材料分離抵抗性を保持し、打設後に所要の膨張量を確保し、支保工撤去には早強性を有する膨張性高流動コンクリートができ、所定の強度を得たうえで早期復旧を条件とした補修工事ができた。

参考文献

- 1) 佐俣：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，p.1～17，(1996)
- 2) 竹田，他：薄肉 RC 壁に自由落下で打設できる超流動コンクリートの検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，p.125～130，(1992)
- 3) 熊谷，他：吊橋主塔基礎コンクリートの大深度逆打ち施工での品質向上の研究，土木学会論文集，No.504/VI-25，p.23～32，(1994)