

## 報告 耐震補強工作車による地下鉄中柱の補強計画

島 拓造\*<sup>1</sup>・山田昌弘\*<sup>2</sup>・中尾正人\*<sup>3</sup>

要旨：1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、それまで安全とされていた地下構造物も多くの損壊を見た。特に応力の集中し易い中柱がせん断破壊をおこしたものであった。大阪市交通局では地下鉄中柱の耐力診断を行い、地盤変位が大きい箇所、せん断破壊先行の柱、約1,000本を鋼板で補強することになった。本報告は、我が国で初めての耐震補強工作車の導入経過と、これを使用した施工計画および実施結果を報告するものである。その結果として、我々は地下鉄の営業線内という限られた時間と空間の中で、効率的かつ安全に作業が行える施工方法を確立した。

キーワード：鋼板補強、耐震補強工作車、地下鉄中柱、流動化モルタル、営業線内作業

### 1. はじめに

兵庫県南部地震により被災した地下構造物は、大開駅に代表される神戸高速鉄道、三宮～新長田間に被害が集中した神戸市営地下鉄等その多くは開削トンネル部の中柱がせん断破壊をおこし損傷したものであった[1]。

震災後、運輸省鉄道局では鉄道構造物の被害の原因および復旧工法の検討を行う「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）が設置され、各鉄道事業者に委員会の提言に基づく通達があった。当局ではその通達に従い開削トンネル（RC中柱）等の耐力の診断を行い「緊急耐震補強計画」を策定し、95年から概ね5年で耐震補強を行うこととした。

緊急性および営業線内のトンネル内ということを考慮し、軌道車クレーン、チェーンブロック等を使った従来からの工法に替えて耐震補強工作車（以下、工作車と略記する）を製作し、これによる施工計画を立案した。

### 2. 工作車の導入

#### 2.1 工作車概要

##### (1) 主要諸元

工作車については文献[2]で詳しく紹介されているので、ここでは概要について記す。

工作車の全景を写真1に主要諸元を表1に示す。

通常は、図1に示す編成を1組として作業にあ

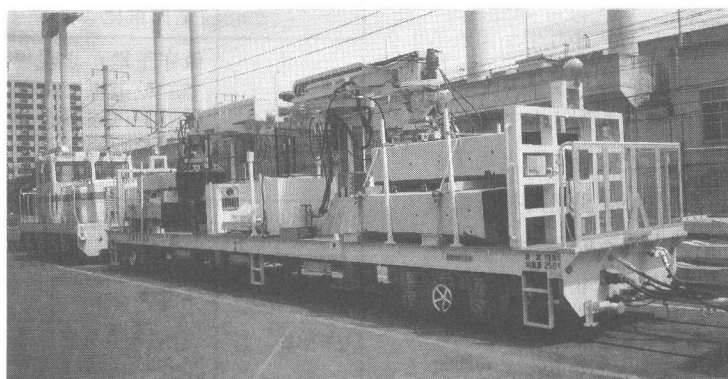


写真-1 耐震補強工作車

\*1 大阪市交通局建設技術本部技術部工務課技術係（正会員）

\*2 大阪市交通局建設技術本部技術部工務課主査

\*3 大阪市交通局建設技術本部技術部工務課技術係

たっている。床上には人間のアームにあたる配材装置（マニピュレータ）が2台設置され台車両端には鋼板積載スペースがあり片側9枚ずつ計18枚（中柱9本分）積載できるようになっている。

(2) 配材装置

配材装置はアーム上昇・旋回・伸縮・先端部旋回・振り上げ・カント調整装置より構成されており、ACサーボモータを用いて3軸制御を行い、限りなくロボットに近い装置を設備している。

なお、吊り上げ能力は、最大250kg/台である。

表-1 工作車主要諸元

	寸法・重量
台車全長	13.6 m
台車幅	2.2 m
総重量	25.6 t
軸間距離	9.7 m

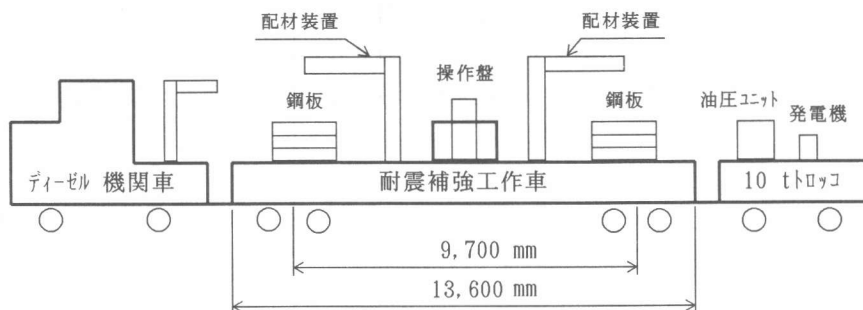


図-1 工作車編成図

2.2 工作車導入効果

工作車を導入するにあたり、在来工法との比較を表2より下記に整理すると、

- ① 作業効率が良い
- ② 遠隔操作で安全作業ができる
- ③ 省人化・省力化が図れる
- ④ 直に移動ができるので、準閉鎖でも作業ができる
- ⑤ 鋼板設置時に、足場工がいらぬ。現場溶接・塗装が減少するので長期的に見て経済性でも有利

表-2 工作車による施工と在来工法との比較表（計画）

	工作車による施工	他の機器による施工
施工方法	保守基地から現場まで、軌道車で牽引し、現場では遠隔操作で鋼板の仮組を行う	予め上床版にアッカーを打設しておき、足場を組み、チェーンブロックを使って鋼板の仮組を行う
作業効率	9本/日 (0.56人/本)	5本/日 (1.60人/本)
鋼板分割数	2枚	4 or 8枚
作業足場	不要	要
安全性	遠隔操作ができるのでより安全	重量物の吊り上げ作業、危険
作業性	直ぐに移動出来るため、準閉鎖でも作業ができる	足場組立て、解体に時間がかかるので閉鎖作業となる
労働力	省力化(OP2・補助2・運転1) 計5人	(3人×2班)+運転1+指揮1 計8人
投資費用	82,500千円/台	

3. 施工計画

3.1 補強対象柱の抽出  
 神戸高速鉄道大開駅の崩壊は、激しい地震動による大きな地盤変位が側壁に変形を与え、特に応力の集中しやすい

中柱にせん断破壊が生じたと推定されている。このことから前述の通達では開削トンネルのRC製中柱については次の条件にかかる柱を補強するように指導されている[3]。

① 大規模地震が発生した時、大きな地盤変位を起こしやすい地盤条件下にある

(地盤変位が大きく、地震時に上床版と底床版のズレが大きい場所)

② せん断に対する安全度が、曲げに対する安全度より小さい中柱(せん断破壊先行型)

照査の結果全柱本数15,623本中、1,029本を補強することになった。なお、理論上対象柱であっても、支障物の移設に多額の費用と時間のかかる柱は大規模改良時等に補強することにした。

### 3. 2 施工方法および施工順序

#### (1) 地下鉄隧道内での施工条件

##### ① 時間的制約条件

- a. 実作業時間は、基地から現場までの移動時間、後片付け等を考えると2時間程度しかない
- b. その他の軌道内工事が輻輳している
- c. 当日の作業完了後1時間程すると営業電車が通るため、工作車の帰着は絶対条件

##### ② 空間的制約条件

- a. 補強柱の支障物を移設しても、隧道内には電気・通信施設等が多い
- b. 作業前後の建築限界のチェックが必要

#### (2) 施工順序

施工順序を図2に示す。

### 3. 3 施工方法

#### (1) 鋼板補強

鋼板巻きの基本補強方法について、松本委員会より「高架橋の柱は外方を鋼板で囲んで、鋼板と柱との間の隙間を無収縮モルタル等で充填することが最も効果的な工法である」という所見が発表された[4]。鋼板補強は耐震補強として実績があり、部材試験も多く行われており、さらに95年3月には運輸省が鉄道総合技術研究所に、実物大の供試体で委託実験を行った結果が報告されている[5],[6]。

そこでは、「柱のまわりを鋼板(t=6mm)補強することによりじん性率(ねばり強さ)は5倍耐震性は2.5倍向上すると想定される。」と評価されている。よって当局の補強構造も、表3

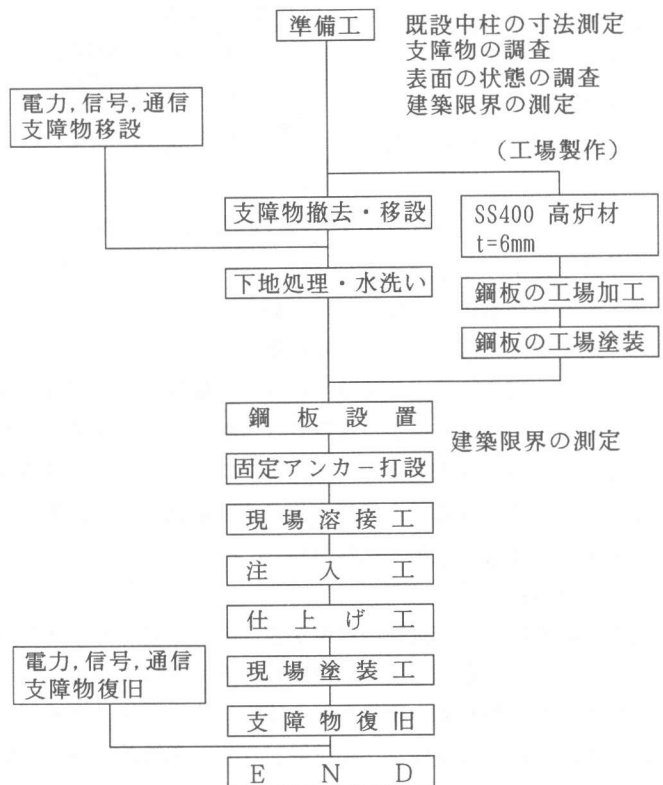


図-2 施工順序図

及び図3に示す構造とした。鋼板は2分割とし、工作車キャッチング用の金具を工場溶接で取り付けしている。設置にあたっては柱の両側を線路縦断方向から2本のアームで同時に取り付けを行う。設置作業当日は、ボルトで締結（仮止め）して作業を終える計画とした。

(写真2)

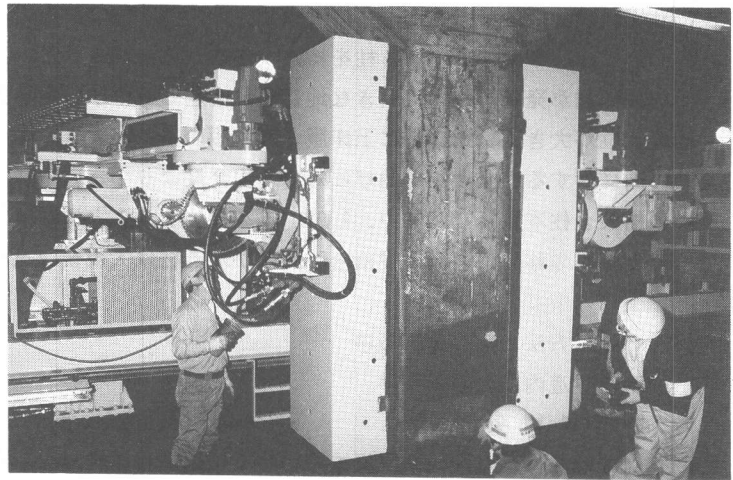


写真-2 工作車による鋼板設置

### (2) 充填材の選定

充填材を選定するにあたって、下記5項目を設定し高架橋脚で比較実験（以下現場実験と略記する）を行った[7], [8] [9]。

- a. 既設橋脚（柱）コンクリートと同等以上の強度を有する
- b. 初期材齢で収縮をおこさない
- c. 材料分離や目詰まりをおこさないで、比較的狭い隙間に充填できる
- d. 作業の急速化、現場練りが可能
- e. 既存の無収縮モルタルより安価

その結果、表4に示すセルフレベリング材をベースにした材料Aと、市販のPCグラウト混和剤セメント、けい砂を混合した材料D（材料B, Cは文献[7]を参照）を選定した。

充填作業は、現場実験等でブリージングがなく、打ち継ぎ部も一体化されていることを確認したので、2日に分けて柱上部から流入する計画とした。また、固定アンカーを現場実験結果から500 mm間隔で打設することにした。

### (3) 現場品質管理

現場実験ではロート試験の結果が表5のとおり大きく異なったが、充填性はどちらも満足されており、流し込みを行う場合は流動性は充填性に大きな影響を及ぼさない結果となった。しかしトンネル内で現場基地の確保が難しく、プレミックスタイプを使用する場合でも、単純な調合ミスを防ぐため作業日毎にロート試験、フロー試験及びポリエチレン袋試験を行い、流動性・充填性・材料分離抵抗性を確認することにした。

なお品質管理の参考値として、日本コンクリート工学協会の「コンクリートひびわれ調査、補修、補強指針」と建設省総プロの「塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）」で提案されている

表-3 充填材料の種別

建築限界の制限	離隔 a(mm)	充填材料
無	10	流動化モルタル
有	5	エポキシ樹脂

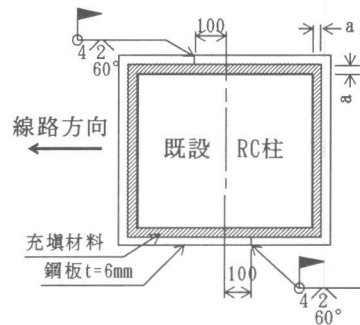


図-3 中柱断面図

が、現場実験では数字がバラついたので表6のように各材料個別で設定した。

表-4 充填材の標準配合 (kg/m<sup>3</sup>) ( ) 数字は冬用

充填材	W/P	水 (w)	結合材(P)	砂	混和剤
A	38.4%	360	937 *1	846 *3	6.7(6.5)
D	45.0% (47.0)	494 (505)	1,098 *2 (1,074)	412 *4 (403)	11.0 (10.7)

\*1 高炉セメントB種+石膏系収縮低減材 \*2 普通ポルトランドセメント \*3 石灰石砕砂 \*4 けい砂4号

#### 4. まとめ

- ① 工作車による鋼板設置のペースは、当初平均6本/日であったが、オペレータが慣れるに従い計画どおりで設置出来るようになった。また、配材装置の先端部の鋼板キャッチング部を2箇所から1箇所に改良し、設置速度をさらに向上させた。
- ② 充填材を2度打ちにしたこと、及び固定アンカーを500mm間隔で固定したことで充填による鋼板の変形を、高さ3.5mの柱で、2mm程度に押さえることができた。
- ③ 充填材を施工してから1週間後、鋼板天端より1cm程度の沈降が見られた。これは、充填材の乾燥収縮及び柱の吸水と考えられる。追加充填で対処した。
- ④ 充填材は計画どおり施工でき、品質管理試験は、すべて標準値を満足した。
- ⑤ 溶接の品質管理は、全数を浸透液探査法で確認した。その結果、自動溶接と手動溶接の接続部で一部キズがあった以外は良好であった。なお、97年度からは超音波探傷検査の併用を予定している。
- ⑥ 現場塗装が増加した。当初設計では、現場溶接の熱影響部のみを現場塗装にしていたが、仮止め金具等のガス切断箇所の増加とあて傷等でほとんど塗り直しとなった。よって、96年度からは下塗りまでを工場塗装とし、中、上塗りは現場塗装とした。

表-5 現場実験結果

	材料A	材料D
P-ポート	86.7秒	63.4秒
J <sub>14</sub> -ポート	11.7秒	7.5秒

表-6 品質管理基準

品質項目	試験方法	標準値	備考
流動性	フロー試験	300±15mm (混練直後) ・270mm以上 (混練6時間後)	φ5×10cm 円筒器による フリ-フロー (材料A)
		220±15mm (混練直後) ・200mm以上 (混練6時間後)	” (材料D)
充填性	ロート試験	40±10秒 (混練直後) ・100秒以下 (混練6時間後)	J <sub>10</sub> (材料A)
		6±1秒 (混練直後～ 3時間後)	J <sub>14</sub> (材料D)
材料分離 抵抗性	ポリエチレン袋 試験 (φ50mm)	フリ-ソグ率 0～1%	24時間後
		膨張率 0～5%	
圧縮強度 σ <sub>28</sub>	PCクラフト 試験方法	24N/mm <sup>2</sup> 以上	

## 5. 今後の課題

### ① 鋼板補強以外の耐震補強方法について

耐震補強として現在進めている鋼板補強以外にa. RC増し打ち・b. 炭素繊維シート・c. アラミド繊維シート・d. 鋼管柱建込み等があり、それぞれの材料共、実験および実施工の実績が増えてきている。当局でも柱間隔の狭い箇所、支障物の移転費用が高額になる箇所等の補強方法に現在検討中である。

### ② 鋼板のジョイント方法の検討[10],[11]

鋼板のジョイントは溶接が一般的であるが、品質管理に厳正な管理が必要であり手間がかかるため、溶接に代わる機械継手等の検討を行う。

### ③ 工作車の転用について

鋼板補強に替わる前記①の鋼管柱の建込み用、また鋼板補強工事完成後、工作車に一部改良を加えて線路保守工作車（例えば、まくらぎ交換機・重量物運搬機等）に改造する検討。

## 6. おわりに

今回の施工計画のポイントは、緊急性を考慮していかに早く、安全・確実に施工できるかであった。その中で工作車の使用は昨今の若年労働者不足等の労働環境も考え併せると、タイムリーな結果と考えている。97年度からは2台の工作車が稼働し補強工事もピークを迎える。今までの実績を生かしてより一層の効率的な施工計画を立案し、実施工に反映していきたいと考えている。

また、石積・無筋アーチ等の特殊隧道の耐震工事にも専用の工作車を採用する検討がなされており、今回の事例が参考になることを期待する。

## 参考文献

- [1]大震災シリーズ(その13)(その14) : 日本鉄道施設協会誌, vol.34, No4 ~ 5, 1995.4~5
- [2]藤田昭治・野口俊彦: 機械化施工による地下鉄ずい道内中柱補強鋼板の取付、建設の機械化 No559, pp38-42、1996.9
- [3]運輸省鉄道局: 既存の鉄道構造物に係る耐震補強の緊急措置について・同解説, 1995.7
- [4]運輸省鉄道局: 鉄道施設耐震構造検討委員会報告(中間整理)、1995.8
- [5]運輸省鉄道局: 鉄道施設耐震構造検討委員会第一次中間とりまとめ、1995.3
- [6]小山幸則・佐藤 勉: 鉄道高架橋の鋼板補強による復旧、土木学会誌、vol.81、No6, pp39-41、1996.6
- [7]瀬野康弘ほか: 流し込みによる鋼板巻立て補強用充填材料の検討(その1: 充填性検討実験)、土木学会第51回年次学術講演会、pp1074-1075、1996.9
- [8]齊藤一明ほか: 流し込みによる鋼板巻立て補強用充填材料の検討(その2: 施工性検証実験) 土木学会第51回年次学術講演会、pp1076-1077、1996.9
- [9]渋沢重彦ほか: 流し込みによる鋼板巻立て補強用充填材料の検討(その3: 材料充填時の鋼板の挙動)、土木学会第51回年次学術講演会、pp1078-1079、1996.9
- [10]石橋忠良: 鉄道構造物の耐震診断・耐震補強、土木学会研究討論会資料、pp23、1996.9
- [11]小原和宏: 機械式継手及び新開発モルタルを使用したRC柱の耐震補強工、日本鉄道施設協会誌 vol.34, No11, pp37-39、1996.11