

神戸高速鉄道・大開駅復旧工事の設計と施工

神戸高速鉄道(株)	廣戸 敏夫*
日本鉄道建設公団	飯田 廣臣**
日本鉄道建設公団	青木一二三***
佐藤工業(株)	小向 將介****
佐藤工業(株)	山原 陽一*****
佐藤工業(株)	横山 正樹*****

神戸高速鉄道・大開駅は、開削工法により建設された地下駅であるが、ホーム階の中柱が圧壊したことにより上床版が折れ曲がり沈下し、直上の国道28号線に最大2.5mに及ぶ陥没が生じる大被害を受けた。

被害状況を勘案した結果、地下駅の躯体は下床版を残して撤去し、側壁、中柱、上床版を改築することとした。設計に当たっては、運輸省から示された「鉄道復旧構造物の設計に関する特別仕様」に基づき、今回程度の地震に耐えられるよう構造計算を行った。特に大被害の引き金となった中柱については、角形鋼管を用いて十分な耐力と変形性能を持たせた。施工に当たっては、SMW工法による仮土留工を施工した後、被災した躯体を撤去して新設躯体を構築した。

1. はじめに

兵庫県南部地震地震による神戸高速鉄道・大開駅の崩壊は、「地中構造物は地震に強い」という常識を覆すものである。今回の地震では、大開駅以外でも開削トンネルや地下駅は、崩壊に至らないまでも、RC中柱や側壁がかなりの被害を受けている。

地中構造物は、地上構造物と異なり、見かけの質量が周辺地盤より小さいことや周辺地盤に拘束され周辺地盤と同様に振動するという特徴を有している。沖積軟弱地盤では、地震動による地盤のせん断変形が無視できないほど大きいことから、この影響を考慮した耐震設計が普及しつつある。しかし、大開駅付近の地盤のように、軟弱地盤とは言えない普通地盤でも、今回と同程度の地震が作用すれば、地中構造物に無視できない影響を与えることが明らかに

なった。また、地中構造物においても、部材の終局耐力をも意識した限界状態設計法を採用しなければならないようである。

大開駅については、地震被害状況と動的解析等により原因の分析を行い、崩壊の引き金になった圧壊した中柱について既設柱および補強柱の耐力確認を実施し、今回併せて報告している^{1),2)}。本文は、復旧工事における設計と施工概要を報告するものである。

2. 復旧方針

(1) 被災状況の分析

今回の地震で大開駅が崩壊に至る破壊メカニズムを被害状況から想定したものが図-1である。地盤のせん断変形により構造物が強制的にせん断変形を受け、高軸力状態の中柱が圧壊したことが、主たる要因である。復旧設計における耐震設計法は、このような地震時の地盤のせん断変形を考慮する設計法として一般的な応答変位法によることとした。

(2) 設計・施工の基本方針

復旧は、被害の大きさに鑑み、先ず運輸省に復旧計画書を提出し、鉄道施設耐震構造検討委員会（以下、委員会と呼ぶ）で検討、承認された後、作業を進めることとなった。

被災直後は、復旧設計方針が固まっていなかったこと

キーワード：地下構造物、耐震設計、耐震補強、応答変位法、非線形解析、復旧工事

* 神戸高速鉄道(株)専務取締役、078-351-0881

** 日本鉄道建設公団大阪支社（旧神戸高速鉄道(株)）、06-374-7953

*** 日本鉄道建設公団設計技術室、03-3506-1861

**** 佐藤工業(株)東京支店、03-5323-5830

***** 佐藤工業(株)大阪支店、06-203-7224

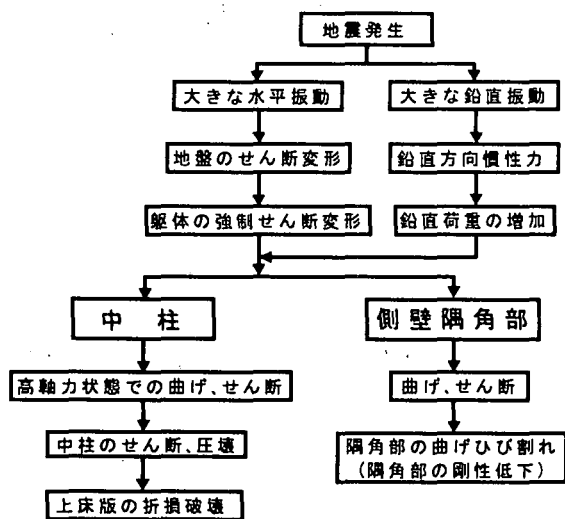


図-1 破壊メカニズムの概念

から、段階的な復旧方法をとることとした。ただし、被害状況から、土留工を施工して上載土を取除き、崩壊した上床版と圧壊した中柱および変形した側壁を取壊し撤去した後、再構築することとした。

すなわち、第一次復旧工事計画書(2月28日)で土留工の施工と掘削、上床版と中柱および側壁の取壊しが承認され、第二次復旧工事計画書(5月31日)で再構築の設計、施工法が承認された。

再構築の設計は、4月に委員会が取りまとめた「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」に基づくことになった。これの耐震設計の考え方は、次の通りである。

- ① 耐震設計に用いる地震動は、兵庫県南部地震において基盤で観測された最大地震動を用いる。具体的には、神戸ポートアイランドで観測された地下83mの地震波とする。
- ② 耐震設計法は、応答変位法によることとする。また、鉛直地震動による荷重として、鉛直方向の慣性力を作用させる。
- ③ 構造部材等の検討は、限界状態設計法によることとし、せん断耐力が曲げ耐力以上になるようにして十分じん性のある耐震性能を確保する。

3. 設計

(1) 設計の基本的考え方

開削トンネル等の地中構造物の耐震設計は、地震時の地盤変位を考慮する応答変位法が一般的であるが、構造部材の弾塑性挙動を考慮しても地上構造物のようにエネルギー吸収能(例えば、Newmarkのエネルギー一定則の適用)で対応できないことなどが最大の相違点であろう。このため、降伏耐力を超えた終局耐力を考えるならば、解析手法は部材の非線形特性を考慮したものでなければならない。しかし、復旧設計に当たっては、復旧工事の工程を滞らせることのないよう、迅速に設計成果が得られなければならない。このため、解析が容易であること、設計方法の細部が確定されていないことを配慮して線形解析によることとした。なお、事前の線形解析による概略検討によって、部材断面を殆ど変更なく設計できることが予想された。

構造物は、特に被害が見られない下床版と側壁下端を存置し、それ以外は全て取壊して再構築することとしたため、新・旧混在の構造で設計することになった。

(2) 設計条件

既存構造物の設計は、神戸高速鉄道東西線構造物設計示方書および計算基準により昭和37年に実施されている。今回の復旧設計における適用基準は、常時は、神戸高速鉄道東西線土木構造物設計基準(昭和58年)を用い、耐震設計は、特別仕様を基本に、建造物設計標準(基礎構造物、抗土圧構造物)(昭和61年)³⁾

表-1 大開駅新・旧設計条件の比較

項目		旧設計	新設計
設計法	常時	許容応力度法	許容応力度法
	地震時	無し	限界状態設計法
荷重	土圧	Rankine 主動土圧(K=0.33)	静止土圧(K=0.5)
	上載土	地下水位以上 $\gamma = 1.6 \text{ tf/m}^3$ 地下水位以下 $\gamma' = 2.0 \text{ tf/m}^3$	同左
	地震時	無し	地盤変位による水平土圧 上載土によるせん断力 鉛直慣性力 $K_v = 0.35$
使用材料	コンクリート	躯体: $\sigma_{ck} = 210 \text{ kgf/cm}^2$ 中柱: $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$	躯体: $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ 中柱: $\sigma_{ck} = 300 \text{ kgf/cm}^2$
	鉄筋	普通丸鋼 SS41	異形鉄筋 SD295
解析法		とう角法	変形法

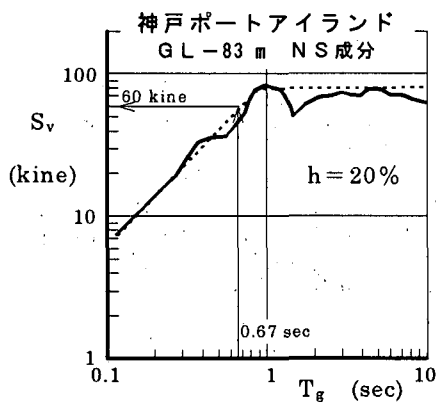


図-2 速度応答スペクトル

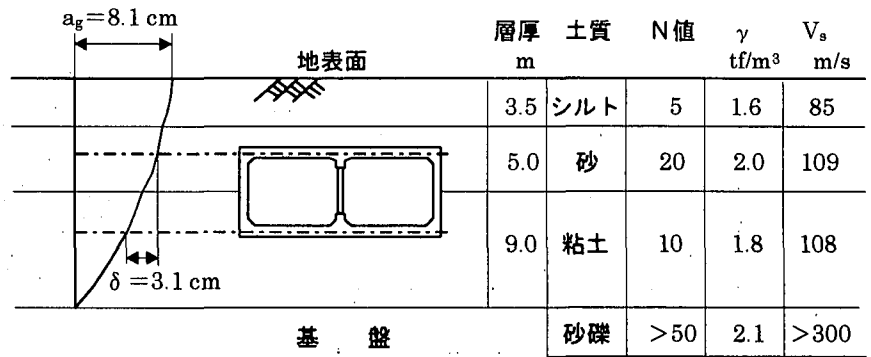


図-3 地盤定数と地震時地盤変位量

表-2 N値および層厚による特殊地盤の条件

粘性土		砂質土	
N値	層厚	N値	層厚
N=0	2 m 以上	N ≤ 5	5 m 以上
N ≤ 2	5 m 以上	N < 10	10 m 以上
N < 4	10 m 以上		

(以下基礎標準と呼ぶ) と鉄道構造物設計標準(コンクリート構造物)(平成4年)⁴⁾ を、細部については「基礎・抗土構造物設計標準に関する委員会」資料を用いた。大開駅の新・旧設計条件の比較を表-1に示す。

今回の復旧設計では、高架橋の柱の耐震補強が鋼板巻きRC柱としていることや高軸力部材の設計法が示されていないこともあり、圧壊した中柱は角形鋼管補強RC柱とした。また、地中構造物の今回の被害では主鉄筋の折曲げ始点付近でコンクリートのひび割れが顕著なことおよび施工性を考慮して躯体の主鉄筋は、直筋主体の配筋とした。

なお、大開駅付近の地盤は、現行の基礎標準における地盤区分では、応答変位法により耐震設計を行う特殊地盤*に該当しないことから、現行の基準では耐震設計を必要とせず、若干の差異はあるものの、中柱を含め、旧設計と大差ないものになるであろう。

[*特殊地盤とは、表層地盤のN値および層厚が表-2の条件に該当するか設計水平震度0.2における水平地盤変位量が3.0 cm 以上の場合である。ちなみに、当該地盤の水平地盤変位量は2.5 cm で特殊地盤に該当しない。]

(3) 設計結果

a) 地盤変位量

地盤条件と神戸ポートアイランドの地下83 mの地震波から求めた図-2に示す速度応答スペクトル

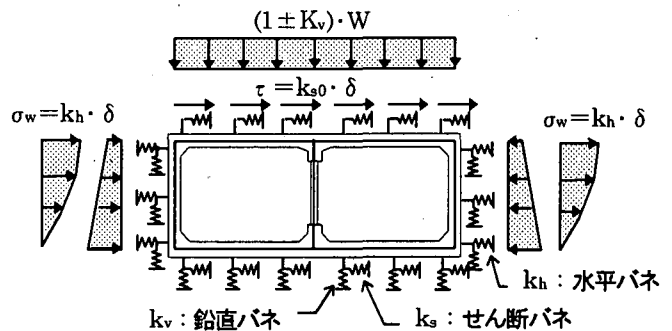


図-4 地震時の構造解析モデルと荷重

から計算した地盤変位量を図-3に示す。地表面の変位量 a_g が 8.1 cm に対して上・下床版間の相対変位量 δ は 3.1 cm である。

b) 荷重および解析モデル

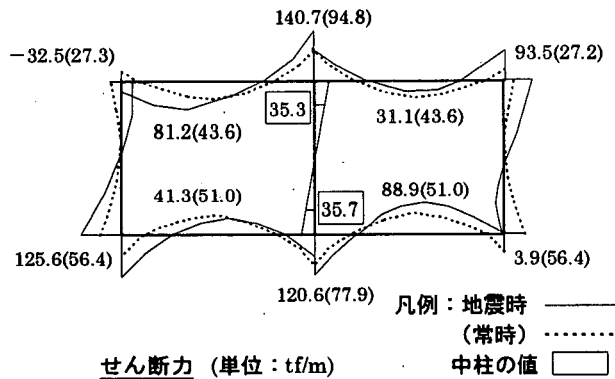
地震時の荷重および解析モデルを図-4に示す。鉛直震度は、水平震度の1/2、 $K_v=0.35$ とした。

c) 断面力

地震時の曲げモーメントおよびせん断力を図-5に示す。地震時の曲げモーメントは、側壁上・下端隅角部が常時に比べはるかに大きく、耐力の向上を要することから、再構築する上床版および側壁は必要鉄筋量を配置し、側壁下端隅角部は鉄筋コンクリートの増打ちで耐力増加を図った(図-6)。

図-7に配筋概要図を示す。せん断耐力向上のための帯鉄筋の増加も含め、鉄筋量の増加率は、側壁で2.5倍、上床版で1.3倍、全体で1.5倍である。中柱の断面力は、3.5 m 間隔であるので、1柱当たり曲げモーメント $M_d=125.0$ tf·m、せん断力 $V_d=62.0$ tf である。旧断面 0.4×1.0 m に対して、新設計では、図-8に示すように、 0.45×0.45 の角形鋼管(厚さ12 mm)を3本組合わせて耐力向上を図った結果、鋼管を帯鉄筋とみなした帯鉄筋比 p_w は 5.3 % で、せん断に対する安全性は問題無いものとなった。

曲げモーメント (単位: tf・m/m)



せん断力 (単位: tf/m)

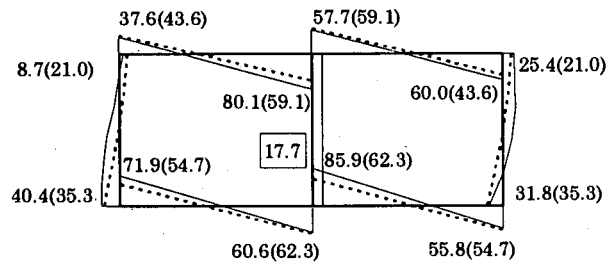


図-5 断面力分布

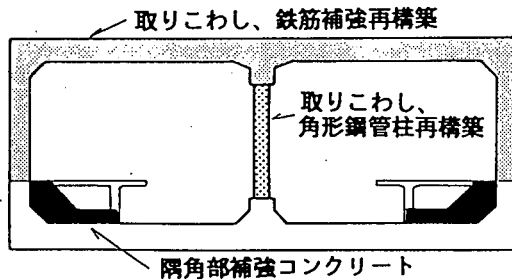


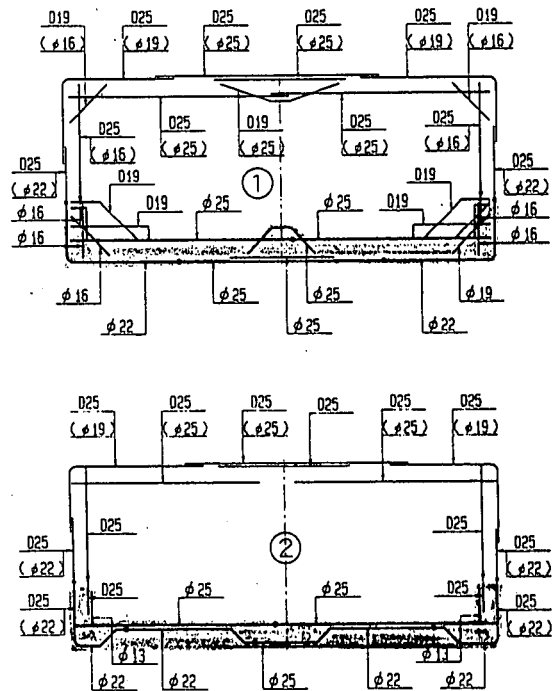
図-6 1層部再構築範囲

細部の設計を含め、全設計が終了したのは6月末であり、7月6日には最初の躯体コンクリートが打設され、7月29日には1層部の最後の躯体コンクリートが打設されるに至った。

(4) 非線形解析による検討

RC構造物では、今回程度の地震に対して非線形領域の耐力、変形性能を考慮した耐震設計法が一般化しつつある。

迅速な設計を要することから復旧設計では、線形解析によったが、角形鋼管補強RC柱の強度特性、隅角部補強コンクリートによる剛域への影響など構造および解析上の問題がある。その後、8月に角形鋼管の実大供試体による高軸力交番水平載荷試験を実施して強度特性が明らかになったこともあり、部材の非線形性を考慮した解析による安全性の照査を試みた。なお、運輸省から7月26日に「既存構造物の耐震補強の緊急措置および新設構造物の耐震設計の当面の措置について」が通達され、開削トンネルで



- ・下床版等でφ〇〇と記してある鉄筋は、既設部材をそのまま利用するものである。
- ・上床版、側壁等で(φ〇〇)と記してある寸法は、撤去した既設構造物に配置してあった鉄筋の径である。
- ・鉄筋間隔: 125 mm c.t.c.
- は既設コンクリート部分

図-7 配筋概要図

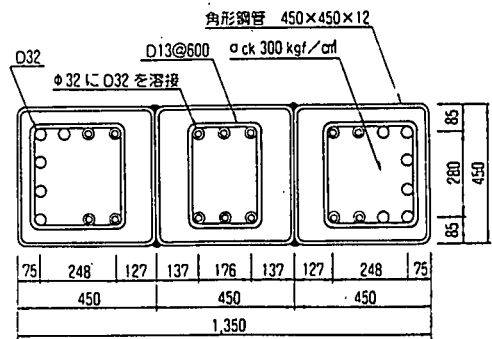


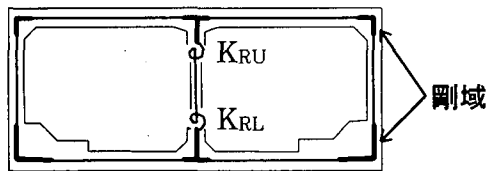
図-8 角形鋼管補強中柱構造図

も、部材の非線形性を考慮することになった。以下、1層部の非線形解析による照査結果を紹介する。

a) 解析条件

解析モデルを図-9に示す。一般の鉄筋コンクリート部材はM-φ特性を考慮したトリリニアモデル、地盤はバイリニアモデルとし、部材の剛域を考慮した非線形骨組解析である。角形鋼管柱は、試験結果²⁾から上・下端にトリリニアの回転バネを設定した。

応答変位法における地盤変位量を計算する際に必



K_{RU}, K_{RL} : 材端回転バネ

図-9 非線形構造解析モデル

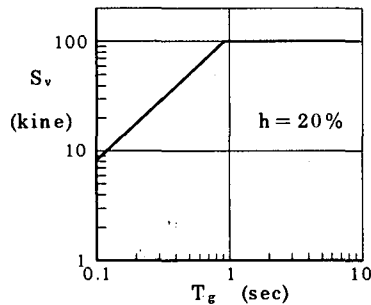


図-10 応答速度スペクトル
(スペクトル適合波)

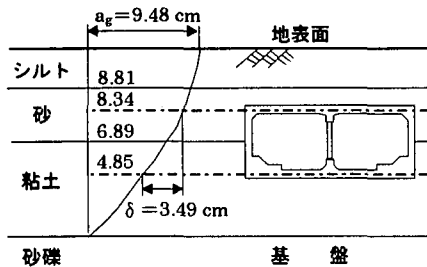
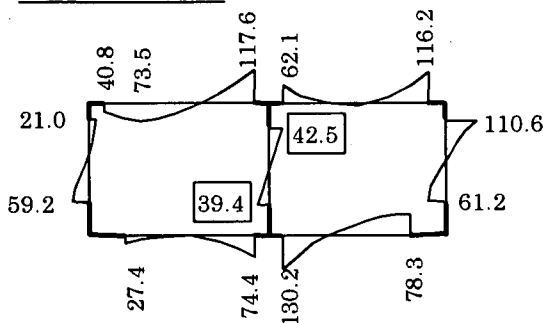


図-11 地震時地盤変位量

曲げモーメント (単位: $\text{tf}\cdot\text{m}/\text{m}$)



注: 数値は剛域端の値を示す

変位 (単位: mm)

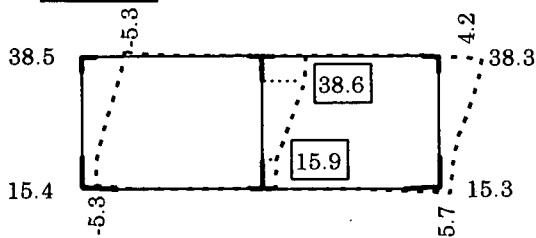


図-12 非線形解析による断面力と変位量

要な地震動の速度応答スペクトルは、鉄道総合技術研究所が作成した図-10の値を用いた。これは、神戸ポートアイランドの地下83mと神戸大学で観測

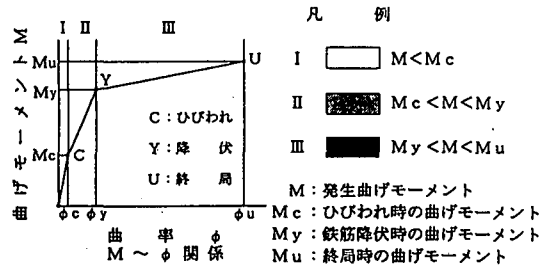
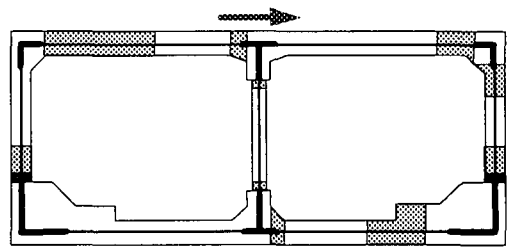


図-13 部材の発生曲げモーメント

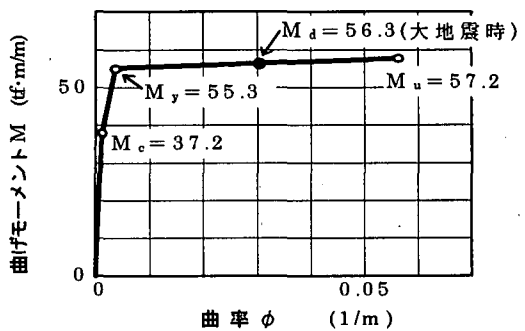


図-14 側壁下端のM-phi関係

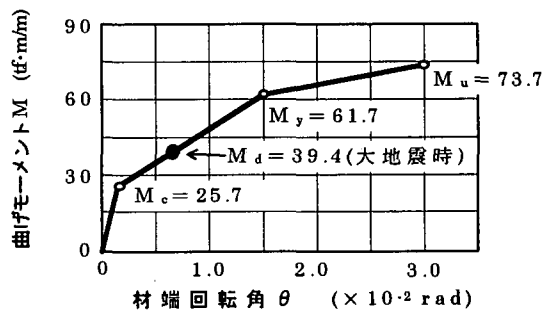


図-15 中柱下端のM-theta関係

された波形に基づき地盤の減衰定数を20%として決定されたものである。3層地盤として計算した地盤変位量を図-11に示す。復旧設計より10%程度増えている。

b) 解析結果

断面力および躯体の変位量の計算結果を図-12に、各部材の発生曲げモーメントの非線形状況を図-13に示す。側壁下端の曲げモーメントが降伏曲げモーメントを超えているが、図-14に示すように終局曲げモーメントには十分入っている。一方、図-15に示すように角形鋼管柱の曲げモーメントは降伏曲げモーメントに対して余力を残している。

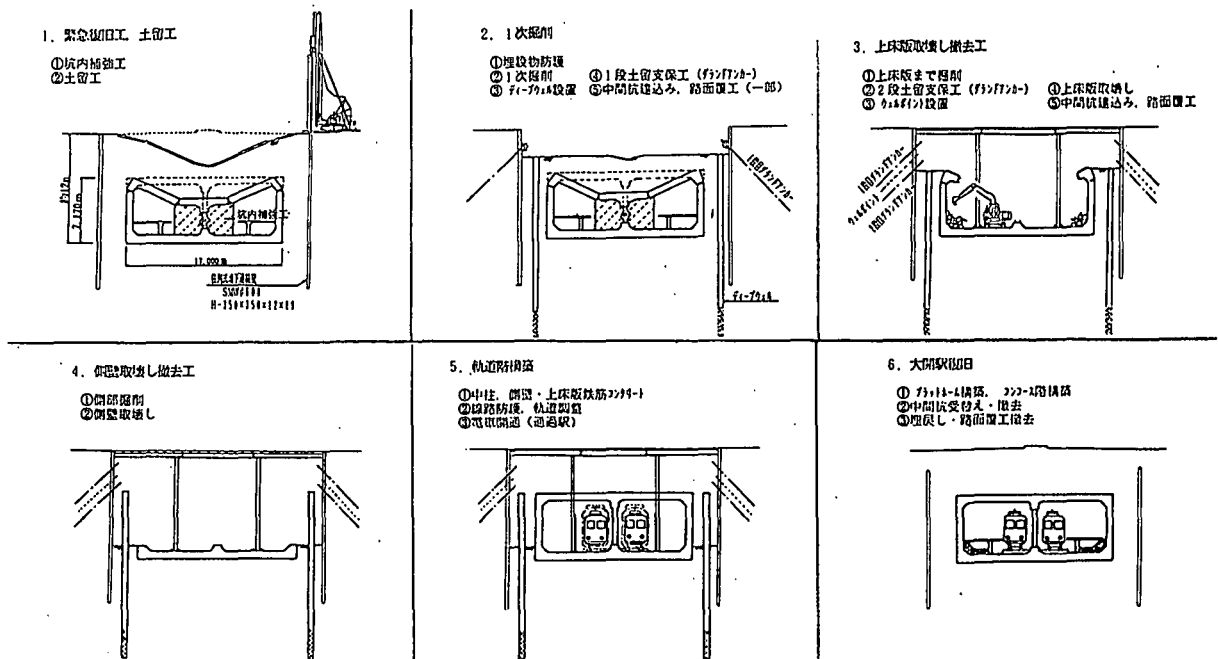


図-16 施工順序図

4. 施工

震災直後の緊急処置から復旧工事完了までの施工順序を図-16に示す。以下、施工順序にしたがって復旧工事の施工状況を述べる。

(1) 緊急復旧工

震災直後の最優先課題は二次災害の防止と、マヒしている道路交通を一刻も早く回復させることであった。

地下では中柱が圧壊し上床版が折れて沈下しているため、余震および重機の重量や振動などによりこれ以上沈下陥没が進まないように、中柱付近の上床版折損箇所エアミルクを打設し補強した。一方、路上では陥没箇所への進入禁止措置をするとともに、駅出入口の地上部分を撤去し、電柱を移設するなどして歩道を切削し、車道の拡幅を行って両側最外端部にそれぞれ2車線の通行を確保した。これらの緊急復旧工は約10日間で終了したが、震災直後から2月初めまでの間はこれら以外にも破損した埋設管の応急処置、被害状況の調査、復旧計画の策定、作業員および資機材の手配と確保、職員の宿舍の確保など課題は山積みであった。

(2) 土留工

昭和37年の建設当時は親杭横矢板工法で施工されていたが、工期短縮と安全性などから柱列式地下連続壁(SMW)工法を採用した。削孔径φ600mm、芯材は長さ17mのH形鋼(H-350)とし4孔当り3本を挿入した。建設当時の残存横矢板を避け、杭中心線

は躯体端部から3mの離隔をとった。

道路の中央部を占有帯として確保しているものの中央部は陥没しており、杭打ち機を占有帯内に据えるのは危険と判断し、杭打ち期間中は片側1車線通行として道路を片側にそれぞれ切り替え、道路側に杭打ち機を据えて施工した。使用機械は三点式杭打ち機(DH608)と芯材設置用として50tクローラクレーンをセットでそれぞれ2台づつ配置し昼夜で施工した結果、5,880m²の地下連続壁を約1ヶ月で完了することができた。

(3) 土留支保工

土留支保工は、一般に切梁・腹起し方式が多く用いられるが、

- ・工期短縮が最優先であること
- ・取壊し時の作業空間を十分に確保したいこと
- ・中間杭の施工が困難なこと

などの理由からグランドアンカー方式を採用した。しかしながら一部の区間では埋設物が支障し、1段目のグランドアンカーの施工が不可能であったのでやむなく切梁方式を採用した。この場合においても変則的ではあるが2段目はグランドアンカー方式とした。また、作業架台として一部路面覆工を行ったが、切梁および路面覆工の施工に伴い中間杭の施工が必要になり、深礎で掘り下がって上床版に孔を空け、中間杭を建込み下床版にボルトで固定した。

(4) 地下水位低下

掘削の深さは約12mで、この程度の掘削深さでは



写真-1 躯体の取壊し状況

3段支保工が一般的であるが、3段目の支保工は側壁の取壊しの途中で設置しなければならず、工程的に不利と判断し、ウェルポイントにて土留背面の水頭を低下させ2段支保工とした。ウェルポイントは1段目と2段目のグランドアンカーの間に設置した。

また、下部の掘削、取壊しに伴い、躯体の載る洪積粘性土層下の砂礫層の被圧水により盤膨れが生ずるので、オールケーシング工法でφ1000mmの削孔を7ヶ所行い、φ600mm、深さ23mのディープウェルを設置した。これらから揚水される地下水には溶解性鉄分が90mg/l程度含まれており、神戸市の排水基準を越えているためプラント処理を行った後、下水に放流した。

(5) 掘削および躯体の取壊し・撤去

掘削は建設当時の埋戻し土であるマサ土が主体であり、施工性は非常に良好であった。使用機械は、掘削深さが浅い段階では進入路を直接場内に造成し0.7m³級バックホウにてダンプに積込み、搬出した。また掘削が深くなった段階では路面覆工上から0.8m³級クラムシェルで積込を行った。天候に恵まれたこともあり、約20,000m³の土砂を実質2ヶ月ほどで掘削、搬出できた。

4月中旬には掘削に併せて2層構造部分の地下1階の取壊しを開始したが、取壊しの最盛期は地下2階部分を取壊した5月末から6月末であった。

取壊しの範囲は、下床版および側壁下部ハンチ付近を除いた全てで、駅部に接続するトンネル一般部の被害状況と配筋上の問題を考慮し、駅部120mと一般部起点方6.5m、終点方1mとした。

施工方法は、先ず縁切り工として、両端部を鉛直方向にワイヤソーで、側壁下部を水平方向にウォールソーで切断した。また、残置する下床版およびレ



写真-2 角形鋼管中柱の施工状況

ールの保護のため鉄板、シートなどで養生後、エアミルクとコンクリートを打設してクッション材とした。

取壊し作業は主にブレイカーと圧砕機によった。当初1.6m³級のジャイアントブレイカーを導入して昼夜兼行で行ったが騒音・振動が大きかったので0.7m³級の中型ブレイカーに変更するとともにブレイカーの使用は夜10時までとし、それ以降朝6時までには小割り作業と鉄筋の切断を行うことにした。取壊し状況を写真-1に示す。

復旧工事に着手した時点から、過去に市街地でこのように大規模な地下構造物を取壊した例がないため、この躯体取壊しが最も困難であると予想され、工期の算定も非常に難しかった。しかしながら周辺住民の方々の協力のお蔭で、夜10時までブレイカーによる取壊しができたことが大きく、約5,400m³のコンクリートを実質約1ヶ月で取壊し、撤去することができた。

(6) 再構築

駅部の再構築は約20mごとの6ブロックに分けて行うことにし、躯体の撤去が終了したブロックより中柱の施工を追いかけて行い、続いて側壁および上床版の鉄筋を組み、コンクリートを打設した。

中柱の施工は、先ず既存鉄筋を曲げ延ばし、鉄筋の不足分は既存下床桁にケミカルアンカーを増打ちしてこれらに新設の鉄筋をエンクローズ溶接した。次に1辺450mmの角形鋼管を工場で3本接合したものを上から被せて建込み、中空にコンクリートを打設した(写真-2)。

側壁の新・旧接合部分の鉄筋の処置は中柱と同様である。側壁および上床版の構築は型枠工、鉄筋工、土工など200名を越える作業員が昼夜を徹して行い、



写真-3 運転再開による大開駅通過列車

鉄筋量約 400 t、コンクリート数量約 2,450 m³の躯体を酷暑のなか僅か 7 月の 1 ヶ月で構築した。

8 月に入り型枠の撤去、清掃などを行った後、軌道整備や電気関係工事に併せて建築限界外にある中間杭に線路防護網を設置した。最後に、運輸省の所定の検査を受け、8 月 13 日には大開駅は通過ながら 208 日ぶりに運転が再開された（写真-3）。

(7) 早期復旧の主な要因

震災から軌道階の再構築を完了し、運転再開まで 7 ヶ月という工期は驚異的と思われるが、早期復旧の主な要因を挙げると次の事項が考えられよう。

- ・手戻りのない適切な復旧計画が策定できた。
- ・工程に合せた迅速な復旧設計ができた。
- ・周辺も被災しているため臨場感があり、工事関係者全員が早期復旧という目標に対して一体となることができた。
- ・早期復旧を願う地元住民の方々から最大限の協力を得ることができた。

- ・復旧の緊急性が高いため、警察、道路管理者、埋設企業者とも優先的に対応してくれた。
- ・歩・車道が広く、中央に広い占用帯を確保することができた。

5. おわりに

震災復旧という特殊な状況下ではあったが、関係者の懸命の努力により大震災から僅か 7 ヶ月後には軌道階の構築が終わり運転が再開された。

しかしながら大開駅は通過扱いで、今後中間杭の受替えおよび撤去、プラットホームの築造、コンコース階の構築、埋戻しなどの土木工事の外、建築・機械・電気のいわゆる開業設備工事が残されている。これらの工事には営業線近接工事も多く含まれており、安全を最優先とすることは勿論のことであるが、工事にあたり協力を頂いた地元住民の方々のためにも 1 日も早い大開駅の供用開始に向け、これまでと同様に最大限の努力をしていく所存である。

【参考文献】

- 1) 廣戸他：神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析、阪神・淡路大震災に関する学術講演会、1996.(投稿中)
- 2) 飯田他：実験に基づく大開駅の既設および復旧柱の耐力および変形性能、阪神・淡路大震災に関する学術講演会、1996.(投稿中)
- 3) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説 基礎構造物、抗土圧構造物、土木学会、昭和 61 年 3 月
- 4) 運輸省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、丸善(株)、平成 4 年 10 月

RESTORATION WORKS AGAINST EARTHQUAKE DISASTER IN DAIKAI SUBWAY STATION, KOBE RAPID TRANSIT SYSTEM

Toshio Hiroto, Hiroomi Iida, Hifumi Aoki, Masasuke Komukai, Yoiti Yamahara, Masaki Yokoyama

DAIKAI Station at KOBE Rapid Transit Railway is subway station which was constructed by open cut method. Complete collapse of center pillars resulted in the falling down of the ceiling slab and surface on Route 28 over the station by more than 2.5m at maximum.

Considering the severe damages of the structure, the fundamental restored procedure is planned as follows; first of all, such a suffered member of structure as side walls and ceiling slab are removed except floor slab. And then these members are reconstructed. The structure is designed based on the special manner with respect to design of the restored railway structure which has been specified by ministry of transportation. The required performance of structure is to resist the earthquake as well as Hyougoken Nunbu earthquake. By use of reinforced concrete pillar confined by steel square tube as a center pillar, sufficient seismic performance are given to the reconstructed subway station. After constructing temporal earth retaining work by SMW method, the suffered members of structure are removed. Then the new members are reconstructed.