

# 神戸市営地下鉄三宮駅の被災原因の検討

神戸市交通局 佐俣千載 \*  
 神戸市交通局 水口和彦 \*  
 日建設計 杉山郁夫 \*\*  
 日建設計 川満逸雄\*\*\*

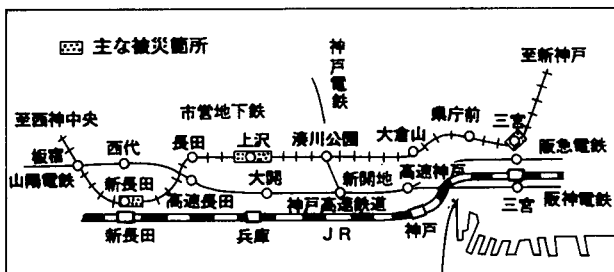
兵庫県南部地震により被災した神戸市営地下鉄三宮駅の被災メカニズムに関する解析を実施した。解析は、まず地盤と地下構造物の動的相互作用を考慮した2次元動的解析を行った。つぎに、構造物だけの非線形骨組モデルを作成し動的解析から求めた構造物の層間変位を強制変位としてモデルに入力した。解析結果は駅部の中柱が、他の部材の鉄筋が降伏する前に、せん断耐力を超え実際の被災状況と一致し、解析法の妥当性が確認された。

## 1. はじめに

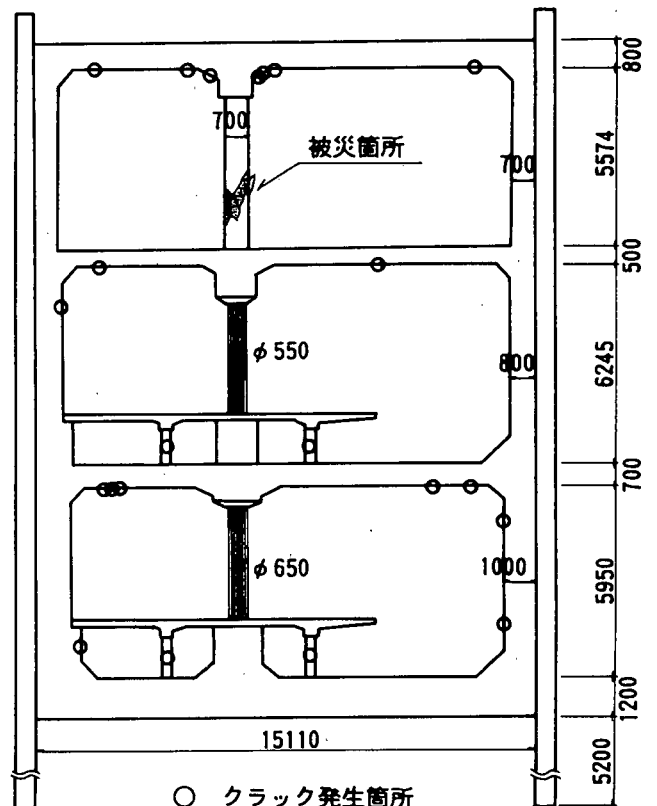
兵庫県南部地震により神戸市営地下鉄も各所で被害を受けた。地下鉄部約8.8kmの内、大きな被害を受けたのは三宮駅部約310m、上沢駅およびその線路部約720m、新長田およびその東線路部約400mであった。図-1に主な被災箇所を示す。幸い、その他の線路部の被害は少なく地震発生後1ヶ月後の2月16日で被災駅を通過して開通し、2ヶ月後の3月末には全駅での供用を開始した。本報告はこれら地下鉄被害の内、山手線三宮駅の被害に関して、被災シミュレーションを行った結果を報告する。

## 2. 三宮駅の被害

市営地下鉄三宮駅は、JRおよび私鉄が集まる



三宮ターミナル地区の北側に位置し、昭和60年に供用が開始された駅である。構造は、地下1階がコンコース、地下2階が東行および地下3階が西行きホームの3層構造となっている。周辺地盤は、地下1階から地下2階上部にかけて沖積層が現れるが、その下底版付近までが段丘層、更にはその下部は大阪層群となる。砂質土が主体となり、N値20以上、一部50を超える比較的良好に締った地盤である。



キーワード：阪神・淡路大震災、地下鉄、応答解析、非線形解析

\*神戸市交通局 078(322)5961  
 \*\*日建設計土木事務所(大阪) 06(203)2361  
 \*\*\*日建設計土木事務所(東京) 03(3813)3361

地震により、これらの構造のうち各階を支える中柱が大きな被害を受けた。図-2に被災状況図を示す。鉄筋コンクリート製の柱がせん断力により被害を受けたもので、ホーム階等で使用していた鋼管柱は無被害であった。また、側壁・床版にもトンネル縦断方向のクラックが発生し、中柱に最も大きな被害を受けた断面では、上床版にわずかな沈下も見られた。なお、設計時は常時荷重のみを考慮し、中柱をピン構造として構造計算しており、柱にせん断力が発生しない前提であった。

復旧は、被害の増大防止と本復旧のため、中柱の仮支えを実施した上で、中柱の被災ランクに応じて、鋼板巻き等の補強からエポキシ樹脂注入を実施した。また、側壁・床版のクラックについては、軽微なものであったため、エポキシ樹脂の注入により補修した。被災後7ヶ月後の8月中旬にはすべての中柱に関して本復旧が完了した。

### 3. 被災シミュレーション

被災シミュレーションは、コンクリート製中柱の被災メカニズムの解明および地震時の発生応力確認のために実施した。被災シミュレーションは、作用した地震動の大きさや地中構造物であることを考慮して、地盤～構造物の動的相互作用を考慮

し、かつ構造物の非線形性を考慮する必要があるために図-3に示す手順で行った。

#### (1) 2次元FEM解析

地盤および構造物を一体としたFEMモデルを作成し地盤～構造物の動的相互作用を考慮した解析を実施した。解析は2次元複素応答解析プログラムであるSuper-FLUSHを用いた。このとき、地盤に関しては等価線形、構造物に関しては弾性で解析を行った。なお、構造物の剛性は全断面有効の剛性を用いたが、剛性を1/2に低下させた場合も計算し、構造物の応答が大きく変わらない事を確認している。

#### (2) 非線形骨組解析

FEM解析結果から構造物の底版を基準とした層間最大水平変位を求め、この変位を非線形骨組み解析モデルに強制変位として入力した。なお、常時荷重の影響を考慮するために、強制変位の入力値は、同モデルにおいて常時荷重による断面力の計算後に続けて入力した。

非線形骨組み解析は、日建設計が開発したSuper-Dynamicsを用いた。このプログラムは、部材断面の構成要素毎に弾塑性パラメータを設定することが可能であるため、図-4に示すように

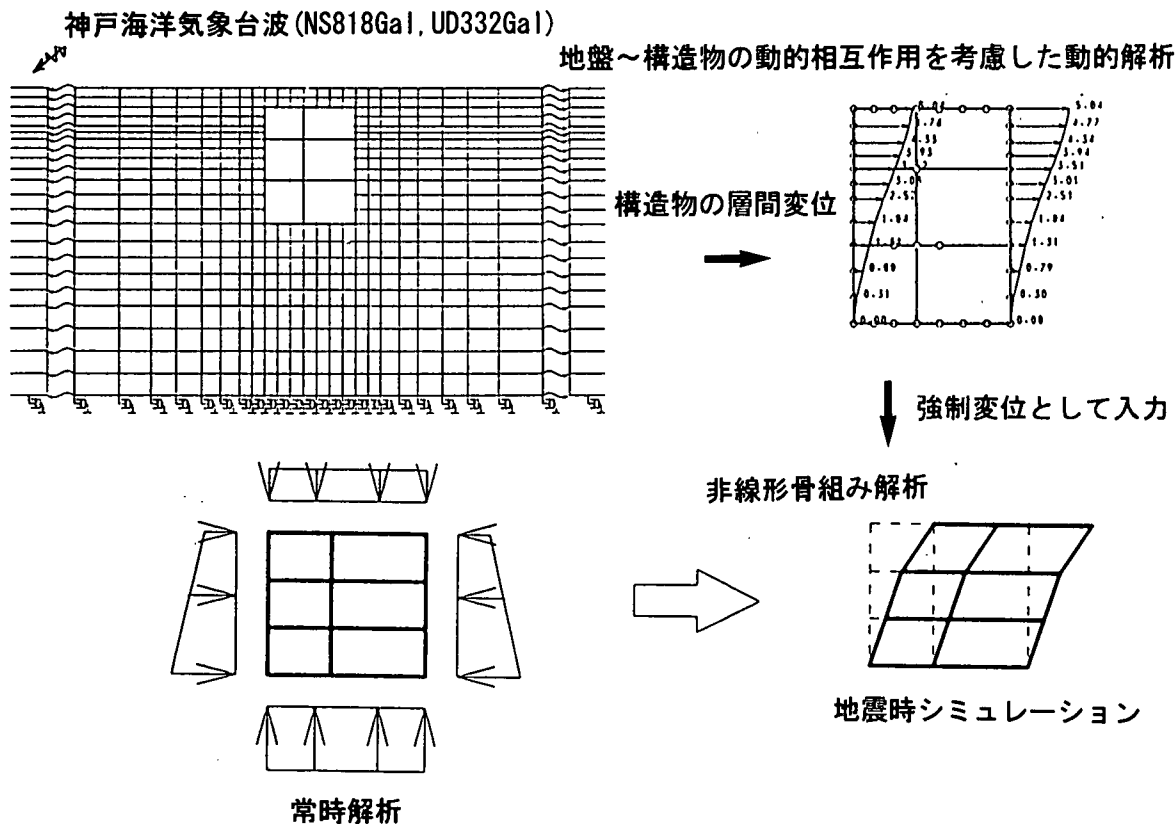


図-3 被災シミュレーション手法

断面をコンクリートと鉄筋に分離し、各要素にその素材の非線形性を入力することにより鉄筋コンクリートの非線形性を表現した。なお、コンクリートは tri-liner 鉄筋は bi-liner により表わした。この方法によると、軸力の変化に対応した非線形性を考慮することが可能となる。

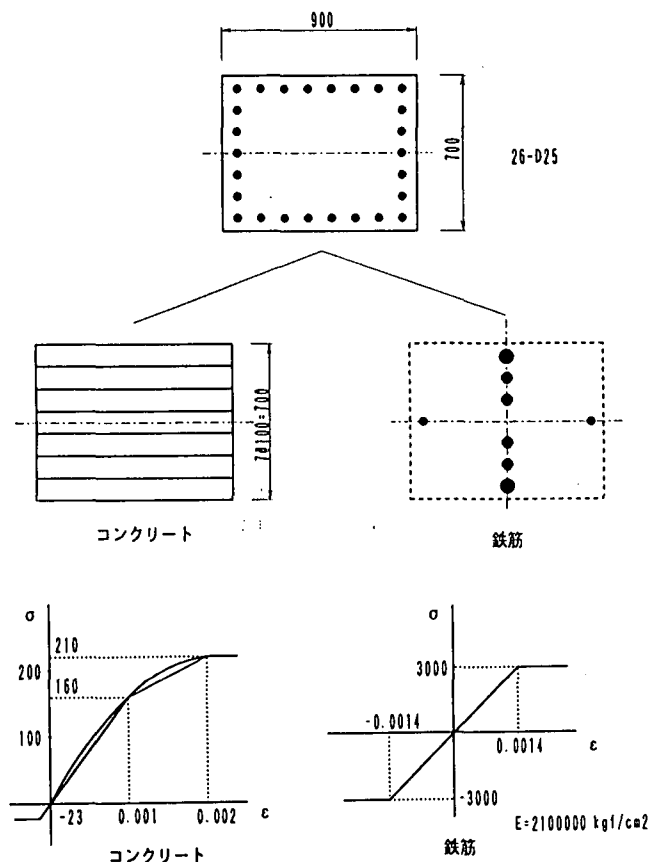


図-4 断面要素のモデル化

### (3) せん断耐力のチェック

中柱部材に関しては、別途せん断耐力を計算しておき、弾塑性骨組解析で発生する中柱のせん断力と比較することにより、せん断破壊の有無を確認した。なお、せん断耐力の算出は、「コンクリート標準示方書」に従って算出した。

動的解析に用いた入力波は、付近に観測された地震波がないため、神戸海洋気象台の観測波（N S成分 818Gal およびUD成分 332Gal）を解析モデルの地表面に入力し、一旦基盤に戻した波を使用した。このように、入力波が現地で観測された波形およびレベルでないため、以降の地震動の評価は、神戸海洋気象台の入力レベルを 100%とした相対的な比率で表わすこととした。

## 4. シミュレーション結果

### (1) 連成振動解析結果

解析は、三宮駅での代表的な断面である駅中央部に関して行った。この断面は、地下1階がコンクリート柱で地下2階および3階が鋼管柱となっており、地下1階のコンクリート柱にせん断による被害が発生した。

地盤～構造物の連成振動解析結果を図-5に示す。水平最大加速度はモデル下端で約 400Gal、上端で約 900Gal となっており、地表面での入力加速度 818Gal とほぼ同じ値となっており、全体として解析の信頼性はあるものと考えられる。駅舎構造物の上下端間水平変位は最大で、5.04cm となった。

### (2) 非線形骨組解析結果

この層間変位を非線形骨組解析モデルに強制変位として入力した。入力は、骨組みモデルの部材の交点に、その位置に相当する節点の強制変位を 0.1 倍ピッチで増加させて入力した。図-6に強制変位入力量と各層間のせん断力との関係を示す。図中の数字は各部材の鉄筋応力が降伏に達した位置を示している。また、図-7には、地下1階での柱に作用するせん断力とせん断耐力の関係を示す。同図によると、柱のせん断力は 80%の強制変位でせん断耐力に達しており、かつ、各部材の鉄筋が降伏する前に達していることがわかる。この結果は、三宮駅の被災状況と一致しており、この方法によりシミュレーションできたと考えられる。

また、同様の方法で地下1階が鋼管で地下2・3階がコンクリート柱の断面に関しても解析を実施した。その結果、各部材の鉄筋が降伏する以前に2・3階のコンクリート柱せん断力が耐力に達するという結果を得た。

## 5. まとめと今後の課題

今回の解析は地盤のせん断振動と中柱に着目して、地盤～構造物の連成振動解析および非線形骨組解析を組み合わせた検討を実施し、被災状況を説明できる解析結果を得ることができた。しかしながら、本解析法的前提は地盤～構造物の連成振動解析結果が実際の地震応答を再現していること、かつ、構造物の水平変位が卓越していることを前提としている。

今回の検討により、中柱のせん断耐力が他の部

材の耐力に比べて弱い事が明らかになった。今後の設計においては、構造計算上の中柱の取り扱い（ピンか固定か）再検討および中柱のせん断補強等の耐力の増加が必要になると思われる。

【参考文献】

- 1) 佐俣千載; 神戸市営地下鉄の震災復旧, pp52-53, 土木学会誌, 1995年9月
- 2) 齊藤安生; 立体構造物の部材レベル弾塑性振動応答解析システム「Super Dynamics」の開発, 建築学会第12回情報システム利用技術シンポジウム, pp67-72, 1989
- 3) 土木学会; コンクリート標準示方書(平成3年度版), 1991.9

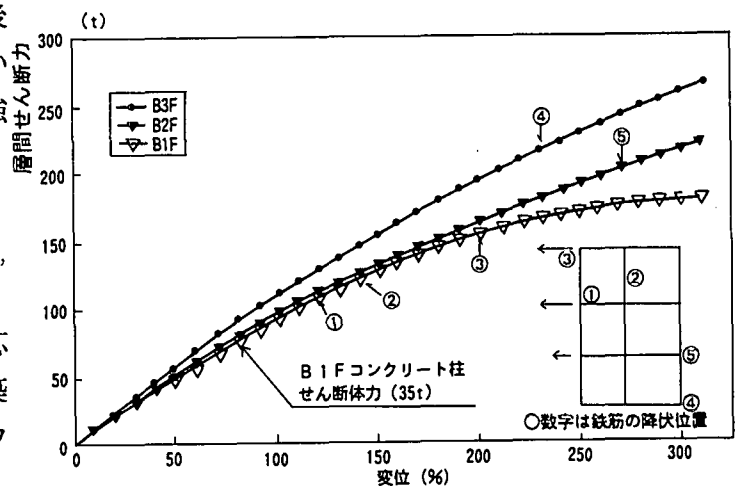


図-6 変位と層間せん断力の関係 (5m 当)

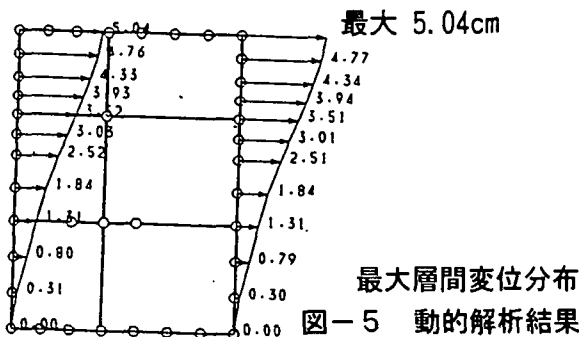
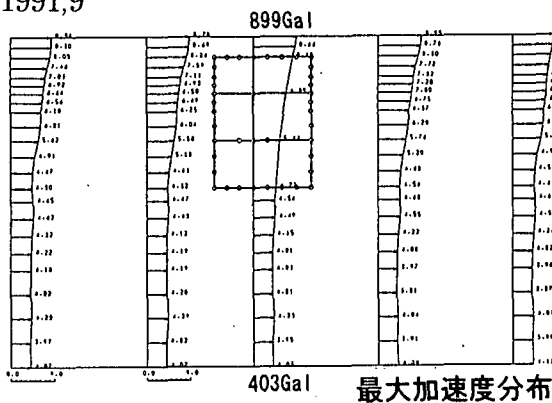


図-5 動的解析結果

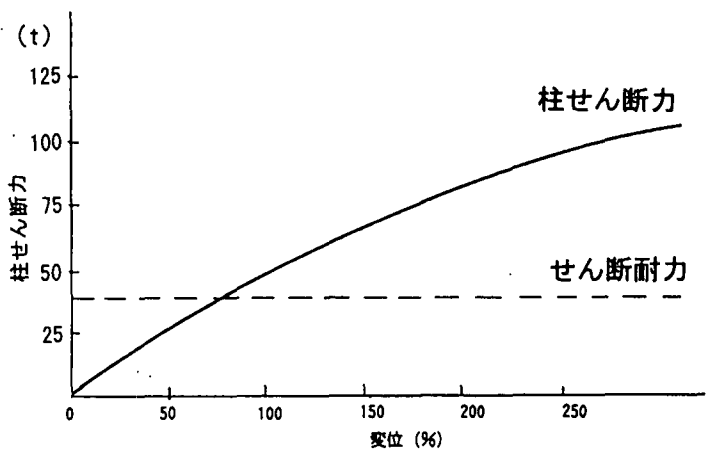


図-7 柱せん断力とせん断耐力の関係

An analysis for the Damage Mechanism of San-no-miya Station

Kobe City Government, Senzai Samata and Kazuhiko Mizukuchi  
Nikken Sekkei, Ikuo Sugiyama and Itsuo Kawama

We have analyzed the Damage Mechanism of San-no-miya Station (Kobe mass rapid transit) caused by South hyogo Prefecture Earthquake. We started the analysis from the two-dimensional dynamic analysis which takes into consideration the dynamic interaction between ground and underground structures. Then made a non-linear framed model, and input into the displacement of structures to the layers as the forced displacement, which was found from dynamic analysis. As a result, our analysis method was proved appropriate because the center column of the station exceed the shear ultimate strength before the reinforces concrete of other members yielded.