

# 地下構造物被害

調査メンバー：足立 紀尚（京都大学工学部土木工学科教授：地盤工学）  
木村 亮（京都大学工学部交通土木工学科助教授：地盤工学）  
日比野 敏（(財)電力中央研究所参事：地盤工学）  
伊藤 洋（(財)電力中央研究所地質地盤部研究主幹：地盤工学）

## 1. 調査方針と調査箇所

今般の直下型地震による震災において、各種地下構造物の震害調査と耐震性に関する検討が必要となった。この際、破壊したあるいは損傷を受けた構造物のみならず、無傷の構造物に対しても、地震動（特に直下型特有の衝撃的上下動）、地形、地盤（地下構造）、構造物の形状、寸法、材質、土かぶり等を考慮した総合的な分析が、地下構造物の耐震を含めた設計規範の再検討には重要である。

そこで、平成7年2月1日～2月3日の3日間にわたり、対象構造物を地下鉄（駅舎とトンネル部）、地下街、共同溝、とう道等として調査を実施した。調査箇所を以下に示す。

- |             |                      |
|-------------|----------------------|
| ・神戸高速鉄道(株)  | 大開駅舎                 |
| ・新港第四突堤     | ポーターミナル共同溝           |
| ・神戸市中央区     | NTT神戸とう道             |
| ・神戸市営地下鉄    | 三宮駅～県庁前駅の駅舎ならびに地下鉄線路 |
| ・神戸市中央区三宮駅前 | さんちか街                |
| ・神戸市中央区     | 関西電力磯辺通シールドトンネル      |

## 2. 調査内容

### 2-1 神戸高速鉄道(株)大開駅舎の被害状況

#### (1) 駅舎の概要

当駅舎は、神戸市兵庫区に位置し、昭和39年1月31日に竣工した地下2階鉄筋コンクリート構造である。

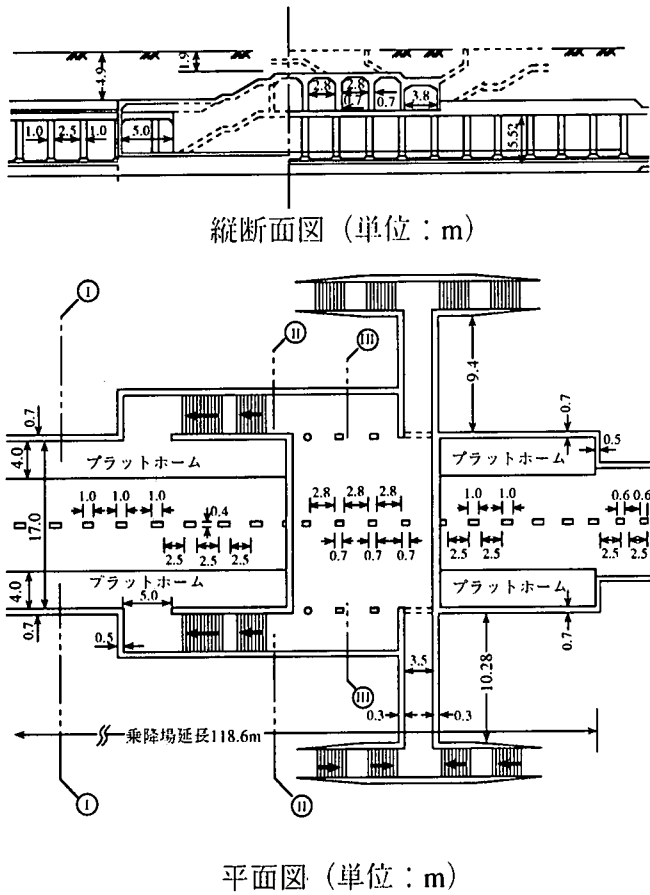
図-1に駅舎の構造図を示す。図-2および図-3には建設当初に路線に沿って実施された、駅舎近くの地盤調査の概要を示す。駅舎底部はGL. -12 mに位置し、土被りは地下1階部で約1.9 m、地下2階部で約4.8 mとなっている。図に示されるように、地盤は沖積層の砂、砂質ローム、砂礫、粘性土からなり、N値は約10程度から50以上と幅広く、地下水位は地表面下約3～4 mと思われる。

なお、駅舎ならびに線路部はいずれも開削工法にて施工されたものである。

#### (2) 被害状況

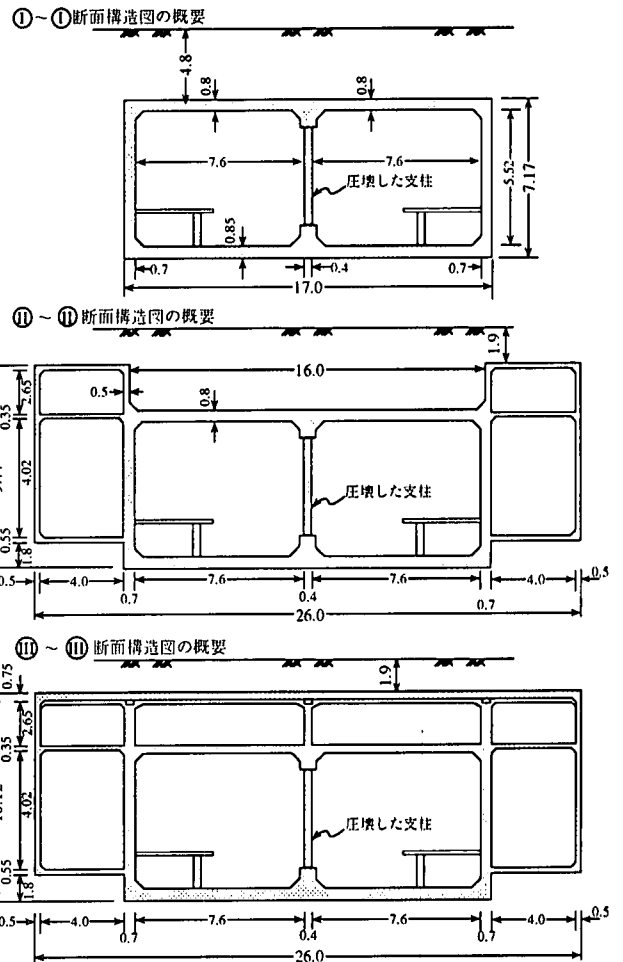
駅舎地下1階の中央コンコースの中央に位置する鉄筋コンクリート支柱（幅70 cm×奥行40 cm×高さ約2.6 mの角柱）の1本が破壊し、残り数本がコンクリート部の一部が剥離し鉄筋が露出していた。また、側壁部分にもクラックが水平ならびに斜めに発生していた。写真-1にその破壊状況を示す。

さらに、地下2階は駅舎中央の鉄筋コンクリート支柱（幅100 cm×奥行40 cm×高さ約4 mの矩形柱）約25本以上がほぼ完全に破壊し、駅舎地下2階中央付近が線路に沿って押しつぶされた状況を呈していた。写真-2、3にはその破壊状況を示す。写真に示される様に中央近くの支柱は完全に押しつぶされ、線路



縦断面図 (単位：m)

平面図 (単位：m)



①～①断面構造図の概要

②～②断面構造図の概要

③～③断面構造図の概要

図-1 神戸高速鉄道(株)大開駅(地下鉄部)の概略構造図

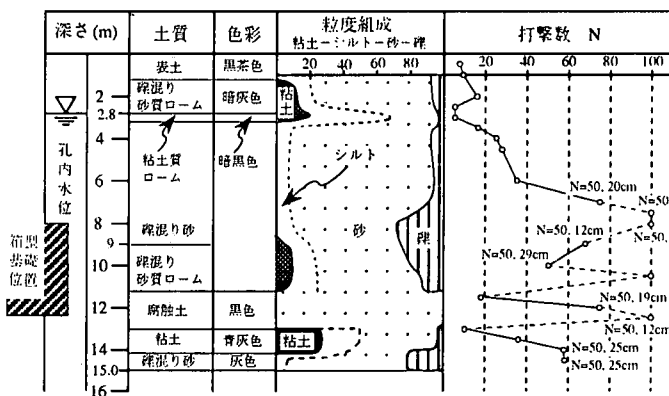


図-2 大開駅東側線路沿いの地盤構造の一例

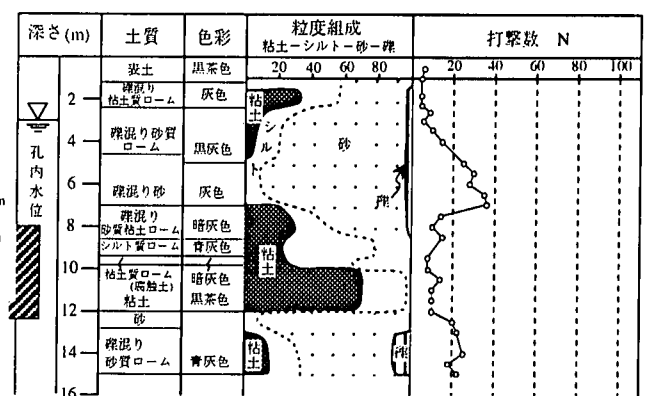


図-3 大開駅西側線路沿いの地盤構造の一例

方向と直角方向に軸鉄筋が大きくふくれて露出し、かつ帯鉄筋も完全に破断されたものが多かった。これら鉄筋コンクリート支柱の破壊箇所は、支柱の足元で膨れるものと支柱の頭部付けねで膨れるものと大きく2つに分けられる。この傾向は数本づつが交互にでているようにも思われた。ただし、側壁4隅の隅角部は中央支柱の破壊により二次的にクラックが生じたものと思われ、中央支柱の崩壊状況に比べ破損の程度は小さいものであった。なお、地下部での湧水は、特に多くなった形跡は認められなかった。



写真-1 大開駅地下1階の被害状況



写真-2 大開駅地下2階の被害状況（長田方面側）



写真-3 大開駅地下2階の被害状況（三宮方面側）



写真-4 大開駅地表面の道路陥没状況

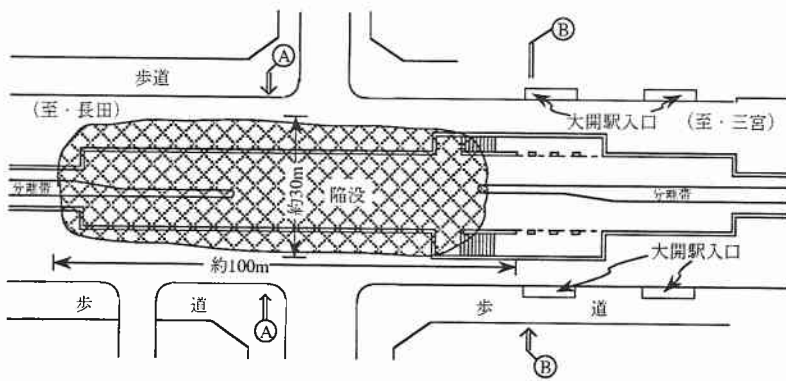
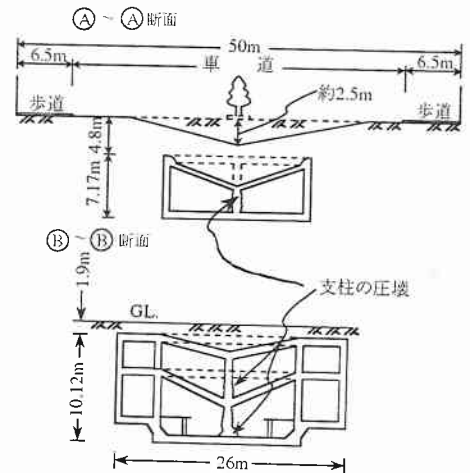


図-4 大開駅地表面の陥没状況



一方、地下2階の破壊の影響により、地表面の国道28号線が長さ約100 m、幅30 mに亘って最大3～4 m陥没していた。この範囲以外にも地表面には線路方向に沿う連続したクラックが長いもので数十mに亘って観察されたが、中央分離帯の縁石の直線性は保たれほとんど変状がなかった。図-4ならびに写真-4は地表面の変状状況を示したものである。

### (3) 考察

上述したように、縦横比が約7.2 m：17 mと大きな空間を持つ地下の箱型構造であること、ならびに箱型

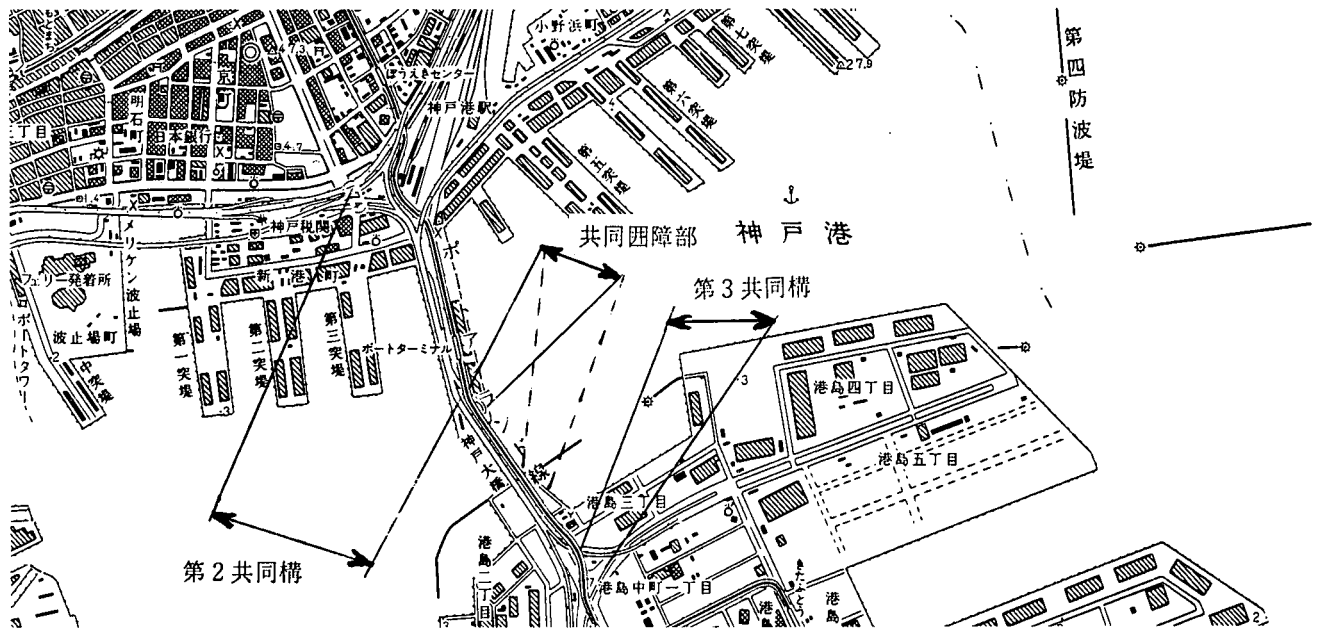


図-5 新港第4突堤ポートターミナル～ポートアイランド内の共同溝敷設ルート

4 隅近傍のせん断破壊よりも中央支柱の破損が主な破壊形態であることなどの状況から判断し、駅舎全体が上向き「く」の字状に鉛直に持ち上げられ、その反動としての下向きの荷重の作用により駅舎上部の床版（厚さ約80 cm）を下向き「く」の字になるように押しつけ、その荷重を中央支柱が支えきれないところに過大な水平動の影響も加わり、破壊したものでないかと考えられる。すなわち、今後の地震動の観測記録の解析等を待たなければならないが、当初設計で考えられていた水平および上下方向の荷重よりもかなり大きい荷重が作用したことが考えられる。

## 2-2 新港第四突堤ポートターミナル共同溝の被災状況

### (1) 共同溝の概要

調査の対象とした共同溝は図-5に示される神戸市中央区新港町新港第四突堤とポートアイランドに敷設された総延長約1 kmのうち、第2共同溝部である。図-6に第2共同溝の一般構造断面図と共同囲壁部概念図を示すが、本共同溝はガス、NTT、水道、送電ならびにOMPの5種類のケーブル、導管を埋設したものである。共同溝の土かぶりには約2~3 m程度と思われる。なお、共同溝の地盤は当該地域の地盤構成から想定し沖積砂、砂質ロームまたはシルト層、あるいは砂礫層からなるものと考えられるが、基礎の地盤処理については不明である。

### (2) 被災状況

今回の地下部の調査は、神戸大橋付近の第2共同溝入り口と立坑の共同囲壁部の約15 mについて行った。共同溝のコンクリートボックス自体には特に大きな変状や被害が認められなかった。ただし、共同溝入り口付近斜向部ではケーブル固定金具の支持ガイシの一部脱落が認められた。また、コンクリートボックスのジョイント部の開口によると思われる地下水の湧水等により、写真-5のようにコンクリートボックス床面に水深10~20 cm程度の水がたまっていた。共同溝の湧水量は不明であるが、作業員によると150 m先は共同溝内が満水となっており、調査不能とのことであった。

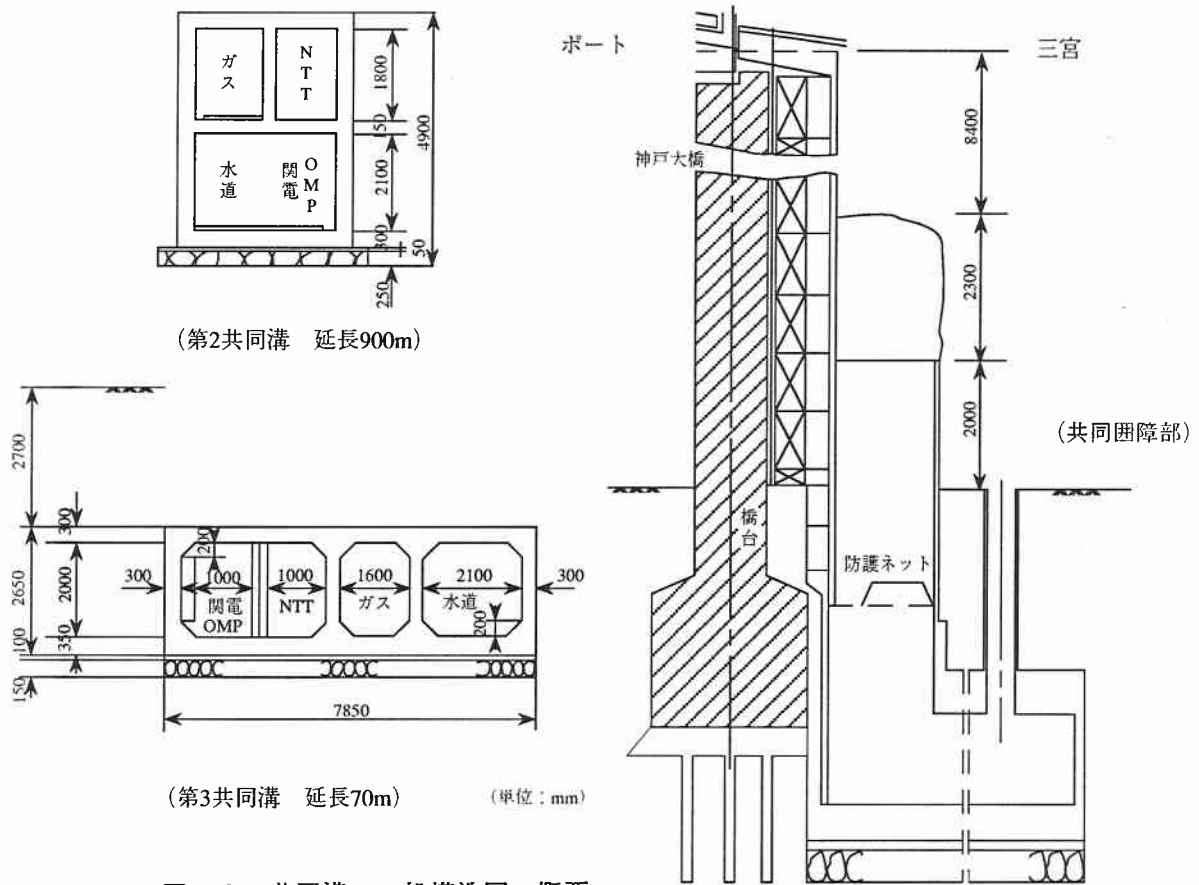
なお、調査した共同溝付近の地表部はターミナル駐車場となっており、しかも神戸大橋の橋脚ならびにアプローチのための取付道路橋が構築されていたが、甚大な被害を受けていた。すなわち、写真-6には駐車場の波打つような陥没状況を示す。しかしながら、共同溝に沿う直上部の駐車場地面や第4突堤内の地面はほとんど変状が無かった。



写真-5 共同溝湧水による浸水状況



写真-6 共同溝敷設上部付近駐車場の被害状況



(3) 考察

上述したように、共同溝は地上の大きな被害に比べ、ほとんど被害を受けていない。しかも、共同溝直上部の地表面もほとんど変状が認められないことから、共同溝直下の基礎地盤は共同溝に沿って何らかの地盤改良、補強対策などの基礎処理がなされていたことが考えられる。共同溝入り口付近の支持ガイシの脱落は共同囲障部の立坑と共同溝のトンネルとの地震時の振動性状の違い、あるいはコンクリートボックスと溝内のケーブルの振動性状の違いなどにより破壊されたものと考えられる。

なお、ケーブルの損傷の有無は不明である。

## 2-3 NTT神戸とう道の被害状況

### (1) 神戸とう道の概要

当該とう道は葺合とう道、三宮とう道、山手とう道の三系統からなり、各系統とも一部南北方向に敷設されているものの基本的には東西方向を主体とする総延長約8 kmのとう道である。とう道本体は開削し構築された断面約2.5 m×1.5 m程度の矩形トンネルと、直径約4 mのシールドトンネルで構成されている。なお、とう道の敷設された地盤は周辺地盤から想定し、砂礫、砂、粘性土からなる沖積層、段丘層からなるものと推察され、矩形とう道の土かぶりは約2～3 m程度、円形とう道では10 m程度である。



写真-7 エキスパンションジョイント部の  
開口破損状況

### (2) 被害状況

今回の調査では神戸支店付近の立坑基地、シールドトンネル、矩形トンネルの数十mについてそれぞれ行った。立坑部については特に目だった被害がなく、シールドトンネルでも坑口部にアーチ天端を主体としたクラックが発生していた以外は本体に顕著な被害は認められなかった。矩形トンネルについては、写真-7に示すようにエキスパンションジョイント部のズレあるいは開口等が数カ所において生じており、地下水の漏水も認められたが、従来の排水設備に若干の水中ポンプを増設し対処していた。このようなジョイント部の動きは、特にビルとの取り付け部や断面の変わる部分で顕著であった。いずれにしても調査箇所で見える限り、地下とう道としての機能を大きく損なわせるものではなかった。

なお、関係者によると、上記とう道区間において収容ケーブルの全てに異常はないものの下記のような被害が見受けられるとのことであった。

- a) 矩形トンネル部においては、エキスパンション部が動き湧水している箇所が十数カ所あり、また、本体構造物にクラックが発生し構造物としての耐力低下が懸念されると思われる箇所が2～3箇所ある。なお、湧水量は10～50 l/min程度である。
- b) シールドトンネル部においては数カ所の坑口に若干のクラックが認められ、湧水があるものの、本体には何等被害はない。湧水量は約10～20 l/min程度である。
- c) 三宮地区にあるとう道基地では、マンホール取り付け部や打ち継ぎ目にクラックが発生し若干の漏水のほか、液状化現象の発生により地盤沈下、地盤隆起が生じている。

### (3) 考察

上記のように、とう道の被害は三宮、長田地区の地上構造物、道路路盤の甚大な被害に比べると、かなり少なく、比較的軽いことがわかる。また、被害は矩形トンネル部に比較的多いものの、ほとんどがエキスパンション部であり、当初設計以上の地震力の作用により、損傷すべきところが損傷したもので構造物としては機能しているものと考えられる。一方、シールドトンネル部は今回の地震力に対しても十分構造物としての機能を維持・発揮したものと考えられる。

なお、とう道の被害は南北方向のものに比べ、東西方向に敷設されたものに比較的多いとのことであるが、断層の動き、地震動特性、地盤構造などとの観点から総合的に検討・分析する必要がある。

## 2-4 神戸市営地下鉄三宮駅～県庁前駅の駅舎ならびに地下鉄線路の被害状況

### (1) 三宮駅舎の概要

当駅舎は神戸市中央区に位置し、昭和60年6月18日に開通した市街地函型トンネル地下3階鉄筋コンクリ

ート構造である。駅舎延長約310 m，幅はホーム部で約15 m，高さ約20 mで，地下1，2ならびに3階は一体構造となっている。地下1階には電気室ならびに換気用の機械室があり，東行ホーム，西行ホームがそれぞれ地下2階および3階に位置している。地盤構造は地下1階部分では沖積砂質土層と砂礫層が卓越するが，それ以深では主に洪積砂質土層と粘性土層の互層である。土被りは駅舎部で約3 mで，駅舎ならびに線路はいずれも開削工法にて施工されている。

### (2) 被害状況

駅舎地下1階換気機械室，西電気室および地下2階換気機械室において，鉄筋コンクリート支柱（幅0.9 m×奥行き0.7 m×高さ4 mの角柱）が約30本が破損している。図-7に破損状況の一例を示す。これら破損の状況はいずれも，一部軸鉄筋が屈曲しコンクリートと軸鉄筋，帯鉄筋が分離し，一部はコンクリートが剥離し鉄筋が露出していた。ただし，支柱の破損は支柱の頭部付けねであったり，足元であったり，または支柱中ほどとか，いろいろの箇所にも数本づつまとまって認められた。破損したコンクリート支柱は，写真-8に見られるようなH鋼とジャッキによる仮設の補強を実施中であった。

一方，駅舎地下2階，3階の直径0.55 mおよび0.65 mの鋼管柱の箇所の被害は無かった。しかも地下水の湧水も特に無かった。図は省略したが，破損したコンクリート支柱の各階における分布には興味深いものがあり，今後十分な検討・考察が必要である。

また，三宮駅舎から西隣の県庁前駅舎まで（片道約1 km）地下鉄線路の状態を調査した。地下鉄線路間の鉄筋コンクリート函は損傷を受けておらず健全で，県庁前駅舎のコンクリート柱は無傷であった。

### (3) 考察

上述のように，三宮駅舎全体は縦横比が約20 m：15 mの地下1，2および3階一体となる鉄筋コンクリート函構造である。しかしながら，各階の縦横比が4 m：15 mの構造形態であること，函側壁の天端4階のせん断破壊よりも支柱が破損されていることなどから，これらの鉄筋コンクリート支柱の破損が，曲げあるいは水平の荷重によるせん断によるものよりも，支柱が一軸的に圧縮されせん断破壊あるいはブリットルな破壊を呈したことが考えられる。すなわち，前述の大開駅の場合と同様，今後の詳細な解析を待たねばならないが，当初設計で想定した以上の水平および上下方向の荷重がかなり大きく作用したものと考えられる。

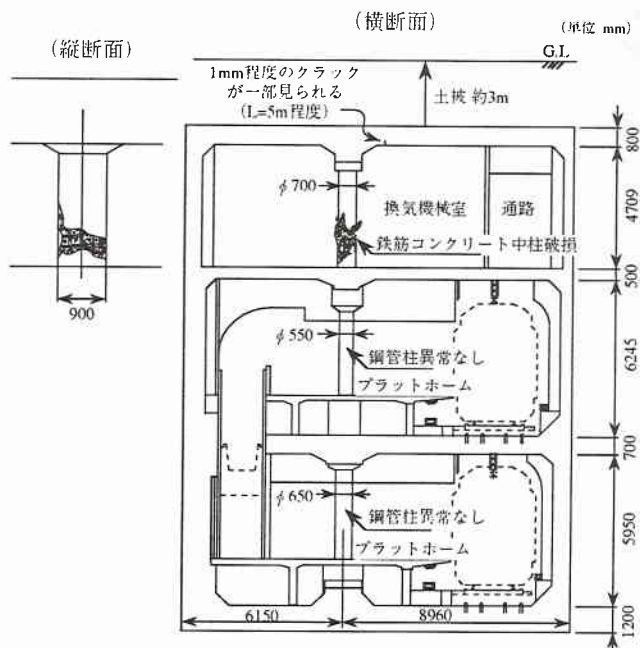


図-7 神戸市営地下鉄三宮駅舎の被災状況の一例



写真-8 神戸市営地下鉄三宮駅舎の中柱の補修状況

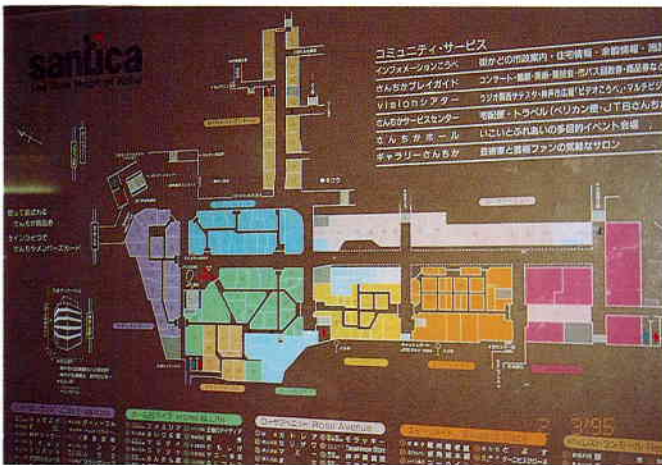


写真-9 サンチカ街の平面図



写真-10 サンチカ街の状況

## 2-5 三宮駅前さんちか街の被災状況

### (1) サンチカ街の概要

さんちか街は、30年前の昭和40年に東京駅八重洲地下街と時を同じくして、最も古い地下街として旧河川上に建設された。写真-9に示すように、地下街は地下1階に位置し、シティエレガンス、ホーム&ライフ、ローザアベニュー、スイーツメイト、グルメスクエアと名付けられたセクションに分割されており、中央左部分の地下2階部に阪神電車三宮駅舎がある。

### (2) 被災状況および考察

本地下街の被害は、ガラスが2枚程度破損しただけで写真-10に示すように無傷であった。もともと水平震度0.1で設計されていたことや、柱はすべて鋼管柱（直径約60 cm）でコンクリートが中詰されていたことが主な理由と考えられる。さらに、写真-9の中央部から左側は新たに増設されたもので、写真上下方向に中壁が存在し、この中壁が耐震壁の機能を果たしたと推測される。阪急三宮駅南側のフラワー通り地下1階に本地下街は位置しており、地上部の被災状況と比較して、階段を20段程度降りたさんちか街が無傷であったのを目の当たりにして、改めて地下構造物の強さを認識した。

本地下街は構造上は問題のないものの、水の供給がなくスプリンクラー設備が機能しないとの理由で、2月3日現在オープンされていなかった。

## 2-6 関西電力磯辺通シールドトンネルの被災状況

### (1) シールドトンネルの概要

関西電力では、神戸市中心部（三宮、兵庫地区）の電力需要増加対策として中央区江戸川町に三宮変電所（全地下変電所）を新設し、同変電所へ27.5万ボルトの地中送電線を導入する工事を計画した。これに先立ち三宮変電所予定地から中央区磯上通り二丁目まで地中電線路を敷設するため、トンネルを泥水土圧式シールド工法で建設中であった。トンネルの建設は平成4年5月より始まり、地震発生時には既に全線掘削・セグメントの組立は終了し、トンネル部では二次覆工を施工する状態（インバート打設時）で、到達立坑は厚さ1 mのコンクリートを地表面下5 mまで打設した状態であった。なお、トンネルの諸元は掘削径4.95 m、セグメント厚20 cmである。また、到達立坑の土留め工法としてソイル柱列式（φ550 mm、長さ約23 m）工法が採用されており、形状寸法は幅8.0 m×長さ9.3 m×深さ約18.5 mである。地盤は主にN値が50以上の洪積砂礫層で、地下水位は地表面から2～3 mの位置にある。シールドは同時裏込め注入で施工されたが、地盤が堅かったこともあり定量通り注入できた。



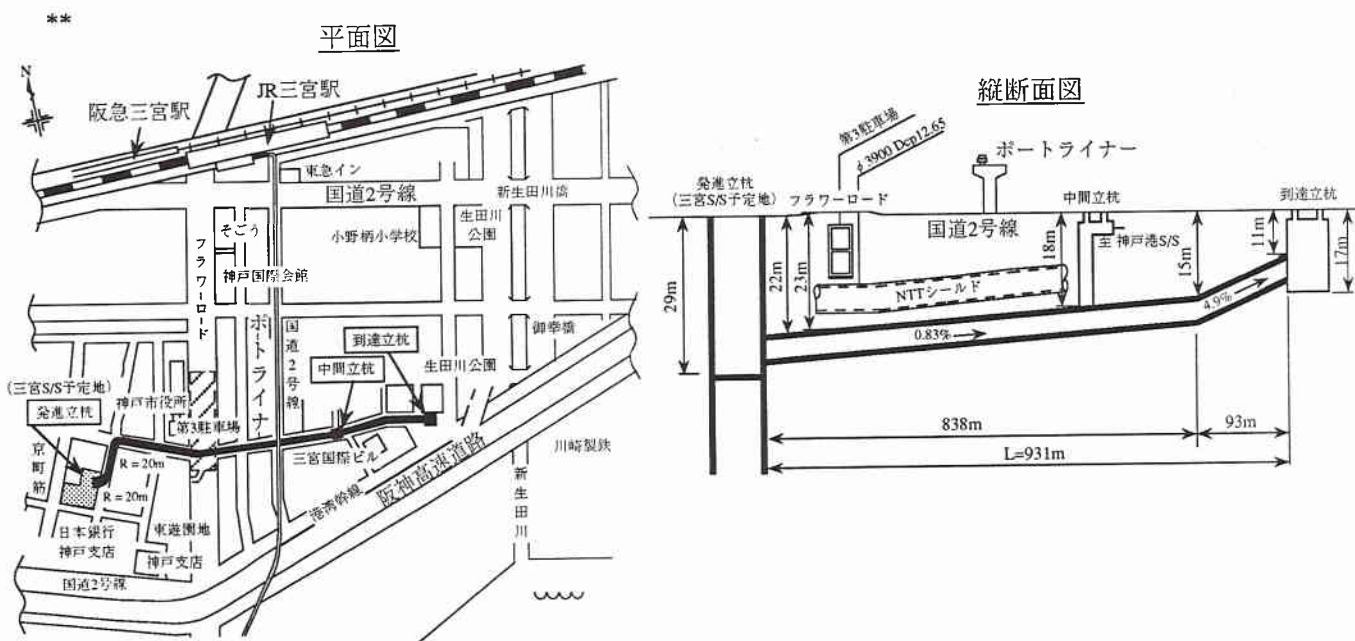


図-8 関西電力磯辺通シールドトンネル

## (2) 被災状況および考察

調査は図-8に示す到達立坑と到達立坑から約300mのシールドトンネル部に対して実施された。調査したシールドトンネルの土被りは11m～15mであった。立坑に0.2mmのクラックが約90cm生じたことと、セグメントリング間のセグメントの角が剥離した部分が若干ある程度で、構造は写真-11に示すように無傷であった。担当者の話では、地震発生後、現場周辺部では建物の倒壊や10cm程度の地盤沈下と地割れが発生しており、トンネル内に入るまでは何らかの被害があると思ったそうである。地震発生直後の点検項目は、1)ガス、特にメタンガスの検知、2)セグメントのボルトのゆるみとクラックであった。



写真-11 関西電力磯辺通シールドトンネルの状況

図-8に示すように、本トンネル上部にNTTのシールドトンネルがあり、施工中は上方のNTTトンネルの変状を調査するために、NTTトンネルで計測（主に沈下計測）が実施されていた。地震発生時に計測が継続されていたかは調査段階で確認はできなかったが、一断面でもセグメントの応力等が計測されていたとすれば貴重なデータとなりえると考えられる。

以上、全壊または一部破損した構造物があることは直視するものの、総合的には地下構造物が地上構造物に比較して、耐震安定性には優れていることは間違いないと言える。しかしながら、前述の考えに立ち、物理的イメージを有する解析により、破壊また健全な構造物の耐震性を検討することが、現行規準の可否の判定には不可欠である。

### 3. 結論および今後の検討課題

調査の結果、以下の知見が導かれた。

- 1) 地下構造物は地上構造物より耐震性には優れている。
- 2) 直下型地震に対しては、被災の事実を直視し、調査・解析検討を加え、設計・施工の規範（あるべき姿）を提言することが必要である。

今後の検討課題として、モデルの構築と解析、震災との比較検討、現行規準の可否（設計規範の提言）が挙げられる。