

## (16) 阪神・淡路大震災による地下鉄トンネルの被害と地盤の関係

前橋工科大学 フェロー会員 那須 誠

### 1. はじめに

阪神・淡路大震災で発生した地下鉄トンネルの被害を地盤条件に着目して調べた。即ち、地形図や地盤条件図や土質調査結果等をもとにトンネル周辺の地盤状態並びに地形とトンネル躯体の亀裂や食い違いや傾斜等の変形状態の関係を調べた。次に、地下鉄トンネルを新設するときの耐震設計や、既設トンネルの耐震補強・補修並びに耐震診断を行う際の参考に供するために、地下鉄トンネルの地震被害がいかなる地盤で、地盤がどのように動いて地盤からどのような地震力を受けて被害が生じたか推定した。

### 2. 盛土や建物、橋梁等の建造物の地震被害への地盤と基礎の影響のまとめ

先ず、前回のシンポジウムでの発表等<sup>1)</sup>を含む調査結果から盛土や橋梁、建物の地震被害と基礎と地盤の関係を次にまとめる。

盛土や建物、橋梁等の建造物の地震被害は、それらの建造物全体が地盤の動きに追従しないで地盤の動きに抵抗する場合に発生しやすく、それらの建造物全体が地盤にほぼ追従して動く場合に発生しにくいと考えられる。被害原因としては地盤の不同変位やそれに伴う偏土圧等が挙げられる。各々の場合について説明する。

(1) 建造物が地盤の動きに追従しない場合としては、自然にできた地盤条件の不連続点と、水平方向に一様ではあるが、鉛直方向に不連続な地盤に人工的にできた不連続点につくられた建造物の2つが挙げられる。

自然にできた地盤条件の不連続点には硬軟地盤の境界部があり、これには硬軟地盤境界部の軟地盤側に建造物が作られている場合と、硬軟両地盤に跨って建造物が作られている場合がある。この軟地盤として、砂・礫層の下に軟弱な粘性土層がある上下逆転型地盤で、支持杭基礎等を持つ建造物の場合である。

人工的な地盤条件の不連続点には、基礎のしっかりした建造物それ自身が地盤条件の不連続点を作る場合と、該建造物の脇に基礎のしっかりした別な建造物がある場合がある。これは水平方向に一様ではあるが、鉛直方向に不連続な地盤、即ち砂・礫層の下に軟弱な粘性土層がある上下逆転型地盤で、支持杭基礎等を持つ建造物の場合である。

(2) 建造物が地盤の動きにほぼ追従して動く場合としては、良好な地盤上に建造物が作られている場合と、軟弱地盤に直接基礎や摩擦基礎やボックスタイプ基礎、浮き基礎等で建造物が作られている場合が挙げられる。

### 3. 地下鉄トンネル等の地震被害と地盤の関係

主な地下鉄トンネル等について地震被害状態と地盤状態と推定した被害機構を次に述べる<sup>2)-6)</sup>。

#### (1) 神戸市営地下鉄三宮駅

地下鉄三宮駅の建造物は図1<sup>7)</sup>に示すように玉石地帯STの南端部の縄文海岸線(古海岸線)付近に位置し、その南側の砂・粘土層SCとの境界部に存在している。線路は玉石地帯STの南端部をほぼ平行に走っている<sup>3)4)7)</sup>。

RC製中柱に南上より北に下がる斜め亀裂と、北上より南に下がる斜め亀裂が発生した。地下1,2階にある約30本の柱が壊れ、鉄筋がむき出しになったが、地下3階には目立った損傷は無かった。地下1階の天井は地表から3m下、地下3階は地下約20mにつくられている<sup>8)</sup>。

地下1階のRC中柱に発生した南上より北に下がる斜め亀裂は、北側の地盤から強い力が特に地下1階の床板位置付近に図2<sup>9)9)</sup>の矢印方向に作用したため生じたことが考えられる<sup>3)4)</sup>。ここは地盤面の勾配変更点付近にあり(相対的に北側が急勾配で南側が緩い勾配であり遷緩点付近に当たる)、北側の地盤が南側に変位した

キーワード：阪神・淡路大震災、地下鉄トンネル等被害、地盤条件変化点、上下逆転型地盤、不同地盤変位  
連絡先：〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1, Tel./Fax.027-265-7342 E-mail:nasu@maebashi-it.ac.jp

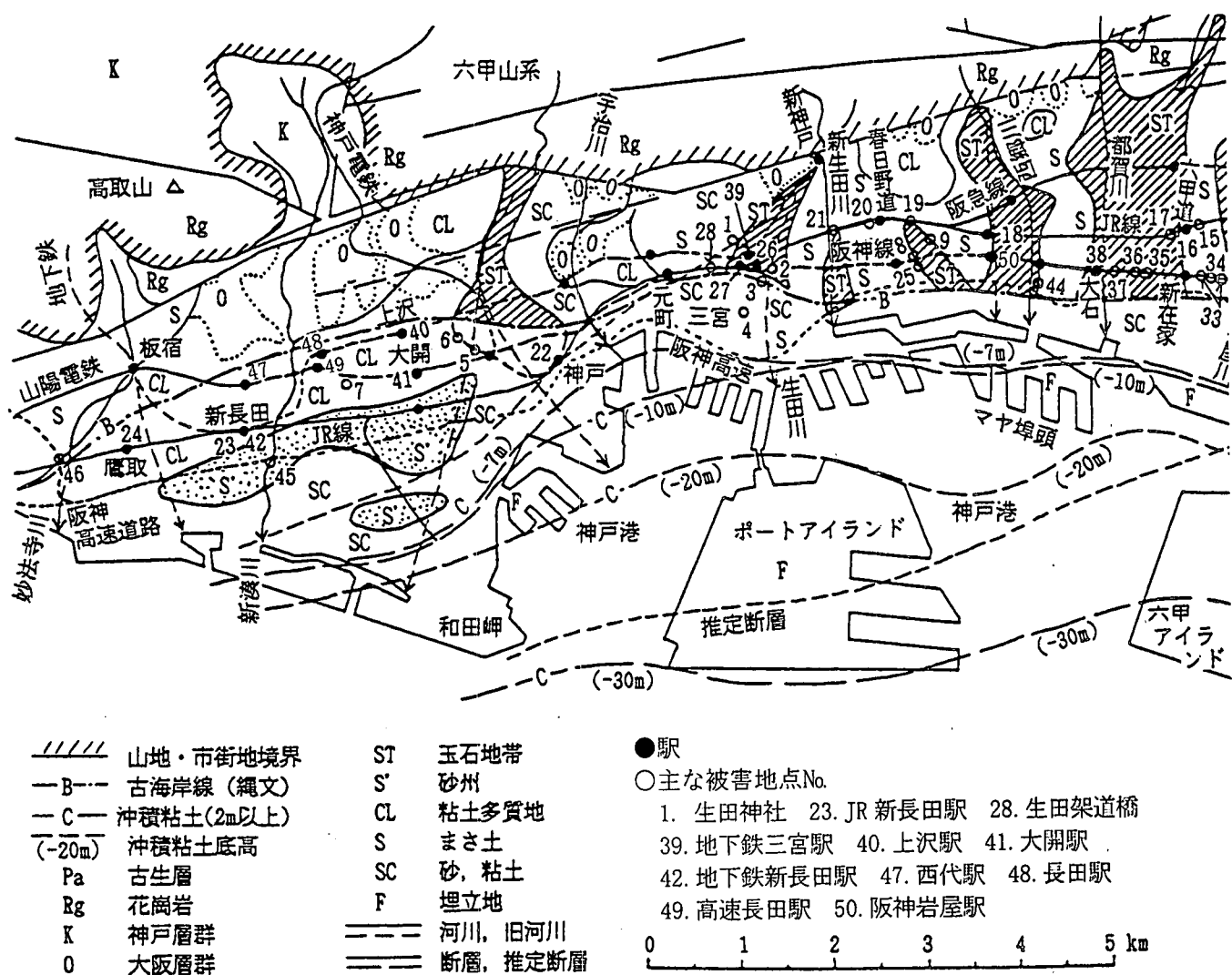


図1 神戸地区の地盤状態と主な被害箇所<sup>7)</sup>

とき駅構造物基礎の根入れがよかったためその変位を一身に受けとめるような状態が生じて大きい力(偏土圧)が作用したことが推察される。この地盤の北側から南側に動いた方向は JR・阪急両三宮駅建物の壁面の南上より北に下がる斜め亀裂や付近の加納町架道橋と生田架道橋等の北側への傾斜, 移動等から推定される地盤の動いた方向<sup>11)</sup>と一致している。なお, 地下鉄トンネルに沿う地盤上の建物被害はトンネルの北側で顕著に発生している。そのことはトンネルの北側の地盤が南側の地盤よりも顕著な動き方をしたことを示しており, 荷重作用方向の推定結果と一致している。

全長306mの地下鉄三宮駅部構造物の東側部分は明治初頭まで旧生田川河道に当たる。しかし, 駅中央部よりもやや西寄りの位置を中心とする100m程度の区間において中柱の被災度が高い<sup>10)</sup>。RC中柱に発生した北上より南に下がる斜め亀裂の発生は, 南側の地盤から強い力が地下1階の床板位置付近に作用したため生じたことが考えられる。ここで, 地下鉄線路に沿う地表面の残留変位(線路直角方向成分)の分布<sup>11)</sup>をみると, それは地下鉄三宮駅の東側では南側へ生じ, 西側では北側に生じているが西側の方が大きく変位を示しており, その変位の大きさと方向が被害程度と被害からの推定方向と一致していることが分かる。なお, 地下鉄三宮駅西端の北方にある生田神社(図1参照)の拝殿が地震で南側に倒壊しており, 拝殿基礎が地盤から北側に向かう強い力を受けたことが推定されるが<sup>1)</sup>, その地盤の動きの方向の推定結果と地表面の残留変位の分布が一致していることが分かる。

## (2) 神戸市営地下鉄上沢駅

地下鉄上沢駅構内の中柱に北上から南に下がる斜め亀裂が発生し, 鉄筋がむき出しとなった。地下1, 2階と

も約40本の柱が壊れたが、地下1階B1の方が酷かった<sup>12)</sup>。図1に示すようにこの駅は縄文海岸線(古海岸線)付近にあり<sup>7)</sup>、また図3<sup>2)13)</sup>、図5<sup>2)3)10)12)</sup>から分かるように駅の東寄りの南側に元溜池があり、ここは現在は埋立地となっている。上沢駅は大開駅の北西方向にあり、図3の地盤標高線をみると両者は同じ尾根筋にある。ここでは、埋立土層が地震のとき北側に動いて駅構造物に強い衝撃的な力を与えたこと等が考えられる。図3をみると、北側の比較的近いところに山があり、この山の地盤は比較的良いと考えられる。埋立土層が地震で北向きに動いたときにこの北側の地盤が不動点のようになったため、中柱に南下がりの斜め亀裂が発生したことが考えられる。

(3) 神戸市営地下鉄上沢駅・長田駅間トンネル

地下鉄上沢駅・長田駅間の線路部トンネルの内、上沢駅西側のトンネル部の被害も比較的大きい<sup>10)</sup>。図3の地盤標高線をみると、被害区間は大開駅と同じ尾根状地形である。

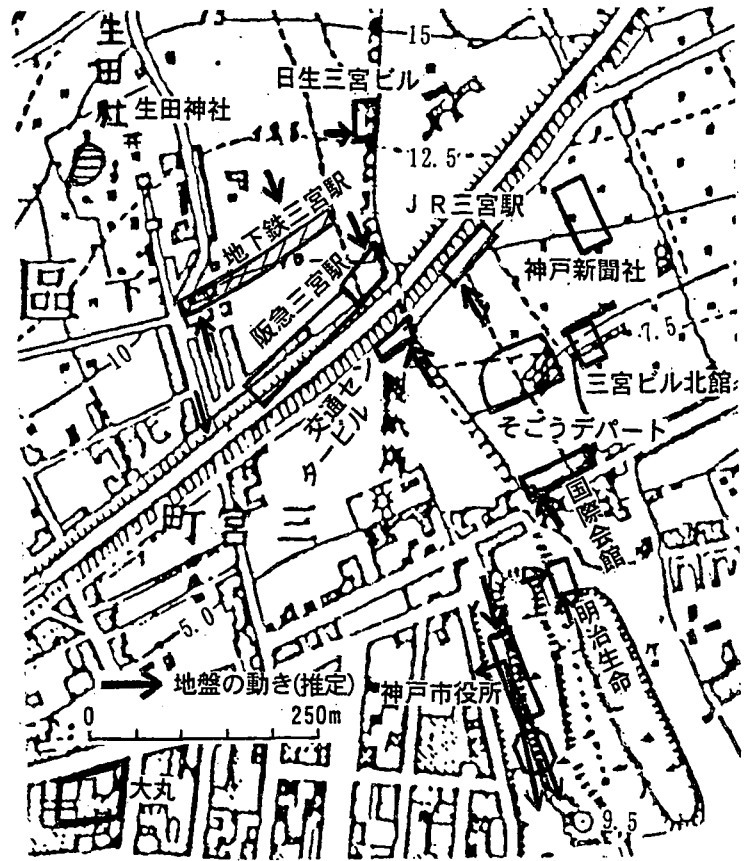


図2 三宮付近の旧版地形図と地震被害箇所<sup>4)9)</sup>

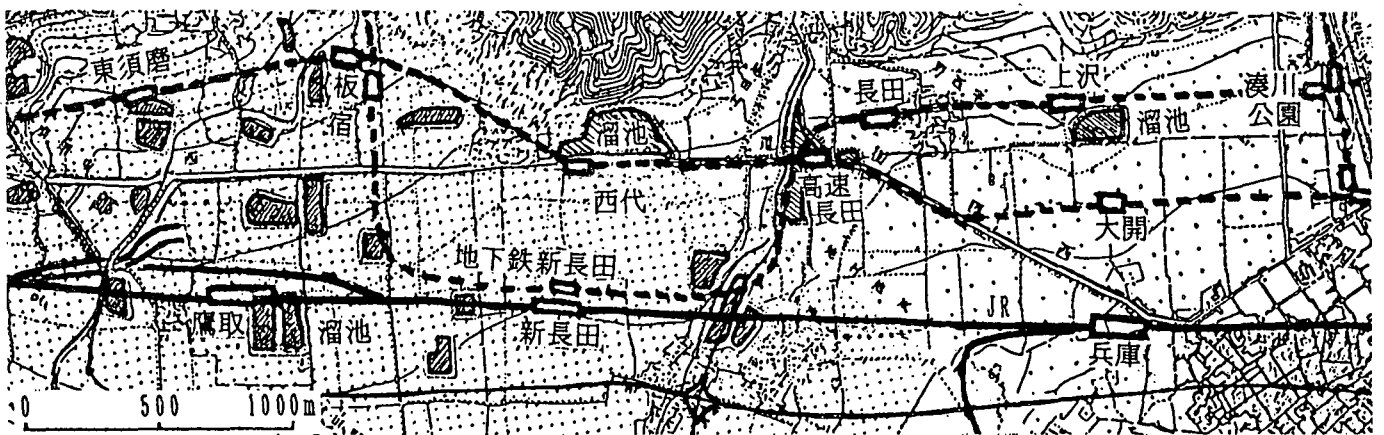


図3 兵庫・須磨間の旧版地形図と地下鉄線路等<sup>2)13)</sup>

(4) 神戸市営地下鉄長田駅・地下鉄新長田駅間トンネル

長田駅・地下鉄新長田駅間の線路部トンネルの内、新長田駅端から東へ約250mの地点から延長150m前後の区間で、多くのRC中柱の上端付近に、破壊はしていないが損傷が発生した<sup>10)</sup>。被害区間の東側にある新湊川沿いの元溜池の埋立土層あるいは次に述べる神戸市営地下鉄新長田駅と同様な地盤状態(上下逆転型地盤)等が被害に関与したことが推定される。

ここで、地下鉄長田駅は旧版地形図(図3)をみると旧集落のある自然堤防の西側にあり、その駅のあるとこ

ろは地盤が一様であったため被害が出なかったこと等が推定される。

(5) 神戸市営地下鉄新長田駅

地下鉄新長田駅構内の中柱の被害も比較的大きく亀裂が発生した<sup>10)</sup>。図1に示すように、ここのすぐ南側の地上に被害を受けたJR山陽本線の鉄道盛土があり、両者は南側の砂州S'と北側の粘土多質地CLの境界部の後者に位置している<sup>2)17)</sup>。ここでは地震のときに地盤の動きが砂州で小さく粘土多質地で大きくて、両地盤の動きに差が生じて不同変位が発生して、例えば駅躯体が押し潰されるようになって被害が生じたこと等が推定される(位置は図3参照)。

(6) 神戸高速鉄道新開地駅・大開駅間トンネル

新開地駅・大開駅間の線路部トンネルの左右側壁にトンネル軸方向の亀裂が全長の約9割の区間で発生している。特に、大開駅東端から東側へ130m~391m間で断続的に大きいひび割れが発生し、側壁が内空側にはらみ出すとともに、中柱の上下端部にも損傷が発生した<sup>10)</sup>。トンネル側壁が内空側にはらみ出してトンネル軸方向の亀裂が生じたことから<sup>10)</sup>、側壁が地盤から強く押されたことが推定される<sup>2)</sup>。なお、図3の地盤標高線をみると被害区間は尾根~谷状地形内にあるが、被害が出ていることから谷状地形に近いと考えられる。

(7) 神戸高速鉄道大開駅

大開通り(国道2号線)の真下にある大開駅(図1, 3, 4<sup>3)</sup>参照)の構内のRC中柱に斜め亀裂が発生し、亀裂から上の柱は北側等に沈下した。側壁にずれが生じたが北側の側壁が南側にずれ(約10cm)、南側の側壁が北側により大きく(約20cm)ずれた<sup>15)</sup>。中柱の斜め亀裂は駅の東側と西側で異なり、図4(b), (c)に示すように東側では北上から南に下がり、西側では南上から北に下がっている<sup>2)5)6)15)</sup>。また、図4(a)<sup>3)</sup>に示すように、地上の東側の北側に規模の大きいサン大開プラザ建物(関西スーパー、4階建て)があり、西側の南側に建物A(5階建てのガス設備店で地下室あり)があり、さらに終点寄りの南側に県営大開住宅(5階建て)がある。地盤は図4(d)に示すように砂質土層の下に軟弱粘性土層がある上下逆転型地盤であるが<sup>6)</sup>、砂質土層の下の粘性土層の厚さが一定

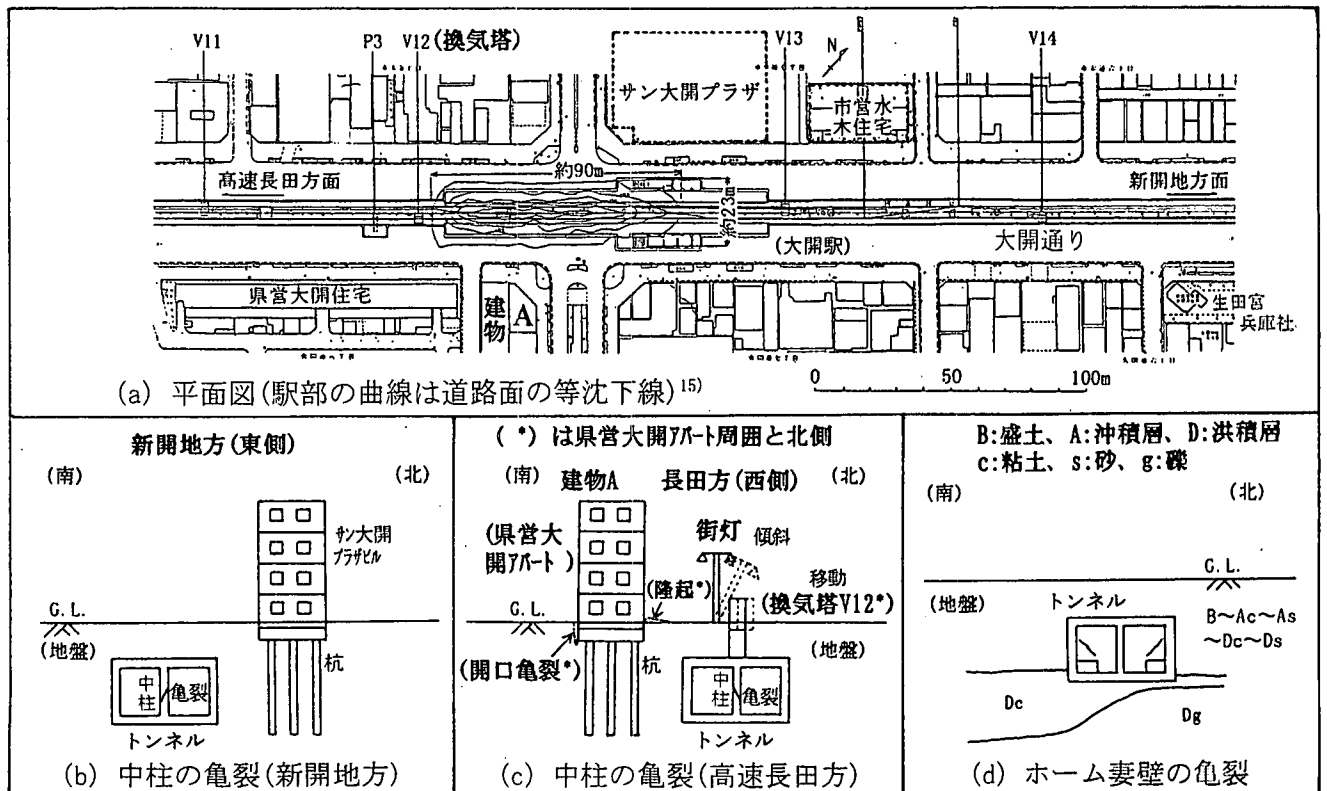


図4 大開駅の変形模式図と地盤(文献2)5)6)15)をもとに作成)<sup>3)</sup>

でなく、北側が薄くて南側が厚くトンネルボックス底部付近にもあり<sup>15)</sup>異種支持地盤状態になっている。また、図4(c)に示すように直上の国道2号線上の街路灯が北側に傾斜するとともに、高速長田駅側の換気塔V12が施工継ぎ手位置からずれるとともにその上部が下部に対して相対的に山(北)側に移動している<sup>6)16)</sup>。以上のようなことからこの付近の地盤の動き方が駅の東西両側で異なっていたことが推定される。即ち、地震時に地盤内の粘性土層を境に上部の砂質土層が南側に(駅の西側で)あるいは北側に(駅の東側で)動いたとき、異種支持地盤状態にあったためと、さらに基礎のしっかりした、脇にある建物が不動点の機能を発揮したため砂質土層がトンネルに強い衝撃的な力(偏土圧)を与えて、酷い被害を発生させたこと等が推定される<sup>6)</sup>。

大開駅のホームの東西両端の妻壁に図4(d)に示すように逆ハの字型の亀裂が発生したが<sup>15)</sup>、それは粘土層厚さが北側が薄くて南側が厚くなっていたため、粘土層の地震時の沈下が北側が小さく南側が大きく生じたため(不同沈下が生じたため)、トンネル躯体がへりの字形に変形したことによって発生したことが考えられる。

大開駅の終点寄りの県営大開アパートの北側壁面沿いの地盤は浮き上がり、南側では側壁面と地盤の間にすき間が発生している(図4(c)参照)。このことからこの付近では地盤が北から南に動いたことが分かる。

建物Aの右脇(東側)の南北方向の道路面は北側から南側にほぼ一様に傾斜している。しかし、建物Aから東側に少し離れてある生田宮兵庫社のところではその地盤はたぶん砂洲と考えられるが周囲より僅か高く、北側と南側に傾斜している。北側は大開通り(国道2号線)まで下がっており、そこからは北側方向(六甲山の方)に上り勾配となっており、大開通り(国道2号線)は南北方向の地盤面の勾配変更点となっていることが分かる。このような地盤面の勾配変更点は、例えば三宮駅付近のように地震被害が多くみられるところである。

阪急三宮駅行きの電車の先頭車が大開駅ホーム東端から新開地方面に190m走って、2両目と3両目の車輪が脱線した(大開駅・新開地駅間、山陽電鉄車両6両編成の内2両脱線、交通新聞による)。これは地震でレールに折れ角が発生したためと考えられるが、地盤の不均等な動きに伴ってトンネルが不均等に動いたためと推定される。

ここで、神戸高速鉄道東西線大開駅付近の地震被害状態をみると、大開駅がその地下を走っているほぼ東西方向に走る大開通り(国道2号線)において、東側の生田神社兵庫宮付近から西側の神戸市立西市民病院付近までの範囲で、その通りの北側で地震被害が顕著に発生している<sup>15)</sup>。そのため、各種の変形状態から大開駅を含むこの付近一帯では地盤が主に北から南に動いたことが推定できる。この地盤の動きが地下鉄トンネルで止められて地盤が圧縮されて、通りの北で被害が顕著に発生したことも考えられる。また、この大開通りの南側の歩道(生田神社兵庫宮の北側)と車道の間には亀裂が走っており<sup>17)</sup>、地盤が北側から南側に動いたときトンネルと地盤が遊離したものと推定される。

なお、阪神高速道路の橋梁が建石交差点で崩壊しているが<sup>18)19)</sup>、左右両側のRC橋脚と桁は可動シュウで結合され、真ん中の鋼製T型橋脚と桁とフーチングは剛結状態であった。そのような状態であったため、真ん中の鋼製橋脚に大きいせん断力が作用して圧潰したことが考えられるが、その構造と応力状態等が大開トンネルの中柱の崩壊と似ているようである。即ち、両者で真ん中の柱の上端と下端が桁や天井とフーチングや床スラブが剛結状態にあって、しかもトップヘビー状態で両側の橋脚や側壁とはフリーあるいは変形(はらみ出し、ずれ、可動等)になっていて、地盤の水平力を受けたと思われるし、トップヘビー状態になっている真ん中の鋼製橋脚がまた横断方向に並んだ3本脚のうち圧潰した橋脚の後ろ側の橋脚が不動点の作用をしたことも考えられる。ここの鋼製T型橋脚は柱脚部の補剛材端部の剛性変化点から崩壊しているが、この部位は地震等で損傷を受けやすいところである<sup>19)</sup>。

#### (8) 神戸高速鉄道大開駅・高速長田駅間トンネル

大開駅・高速長田駅間の線路部トンネルの中柱に斜め亀裂等の被害が発生した。大開駅寄りにある中柱の損傷度が高く、上スラブが南側により大きく相対変位した形跡がある<sup>10)</sup>。高速長田駅の東50m地点の中柱下端の被害箇所<sup>8)</sup>の北側には図3の旧版地形図をみると元溜池があり、ここは現在は埋立地となっている。ほぼ東西方向に走るトンネルの南側の側壁下部ハンチと側壁間のコンクリート打ち継ぎ目部に水平ずれが生じ、側壁

下端が内空側(北側)に押し出された。それは大開駅寄りの全長の約半分の長い区間で断続的に発生した(延長495m)。北側の側壁上部ハンチに沿ってトンネル軸方向の小さな亀裂も発生した<sup>10)</sup>。ここで上スラブの南側への変位と側壁下端の内空側への変位が対応していることが分かるし、それは地震で側壁下半部付近の土層が北側に動いたときに、トンネル基礎の下スラブ(底版)がしっかりした地盤に据え付けられていて側壁脇の地盤と一緒に動くことが出来なかったため、側壁に強く(地震時の動きのため)衝撃的な偏土圧が作用して発生したことが推定される。図2の地盤標高線をみるとこれらの被害区間は大開駅と同じ尾根状地形内にある。

#### (9) 高速長田駅

高速長田駅構内の東側(大開駅寄り)の区間で、中柱に北上から南に下がる斜め亀裂が発生した<sup>10)</sup>。図1, 3をみると、この地盤は新湊川沿いにあり、駅の西側半分が南北方向に長い元溜池の埋立て地を東西方向に横断している。大開駅寄りの東側半分の北側には元溜池の埋立て地があり、この区間で中柱に被害が発生した。

この駅の東側の区間の地盤と被害状況の関係が後述の山陽電鉄西代地下駅の地盤と被害状況の関係と似ており、この駅が被害を受けたことに対して後述の西代地下駅と同様の地盤の影響が推察される。

#### (10) 高速長田駅・西代駅間トンネル

高速長田駅西端より西側100mの区間のトンネルの中柱に被害が発生した<sup>10)</sup>。図3の旧版地形図をみると、この区間は高速長田駅と新湊川駅間の元溜池の現埋立地、及び新湊川の右岸側の旧河道部埋立地を通過している。(9)の地下駅と(10)のトンネルでは、埋立土層(あるいはその下の特異な構成土層、たぶん砂礫層の下に粘性土層がある上下逆転型地盤の土層構成が考えられる)の動きが被害発生に関係していることが推定される。

#### (11) 山陽電鉄西代地下駅

山陽電鉄西代地下駅(位置は図1参照)は地上駅の前地下に構築中に地震に遭遇し、軌道階の中柱に北上から南に下がる斜め亀裂が発生した<sup>10)</sup>。図3の旧版地形図と図5(b)をみるとこの地下駅の北側に大きい元溜池があり、ここは現在は埋立地になっているが、地名として元の池の名残りの蓮池と付いている。ここでは駅の北側に線路を跨ぐ立体交差道路があり、この重量のある道路が不動点の機能を発揮したため、南側の地盤から強い衝撃的な力を受けて地下駅の中柱が北上から南に下がる斜め亀裂等の被害を受けたこと等が推定される。

あるいは、ほぼ東西方向に長い元溜池(現埋立地)の形をみると、その南北方向の幅は西側部分が東側部分より狭い。この南北方向の幅の狭い西側部分の埋立地の南端沿いに地下駅のトンネルが平行して存在している。西側部分の埋立地の元溜池は浅く、その下の北側の山から続く硬い地盤がトンネルのすぐ近くの北側にあるため、中柱に南下がりの斜め亀裂が出たことが考えられる。即ち、トンネル下部の北側の地盤が良くて、あるいはトンネル底版部が良い地盤に据え付けられていたために、このトンネル躯体が不動点のようになり、地震で地盤が北側に動いたときにトンネルが南側の地盤から(押し潰されるような)荷重即ち強い偏土圧を受けて、

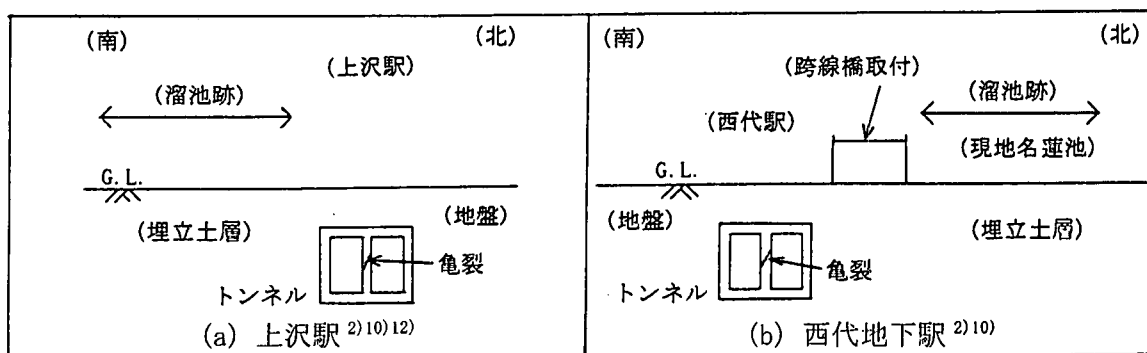


図5 上沢駅と西台地下駅の変形模式図と地盤(文献2)10)12)をもとに作成<sup>3)</sup>

中柱に南下がりの斜め亀裂が発生したとも推定される。

なお、このような地盤の影響を考えたのは、明治時代作成の旧版地形図をみると、元溜池の輪郭が比較的単純な直線や曲線で出来ているが、これはもともと複雑な形状の輪郭をもっていた溜池の周囲が人工的に埋め立てられて、このような形になったものと考えられるし、被害を受けたトンネルにはその埋立地に作られているものがあると考えられるためである。

#### (12) 阪神電鉄岩屋駅・春日野道駅間トンネル

阪神本線岩屋駅・春日野道駅間の線路部トンネルの内、岩屋駅付近で入り口から約 400m にわたり、上部ハンチのコンクリートが剥落し、上下線間のコンクリート製中柱も損傷した<sup>10)</sup>。この付近は図 1 に示すように東側の玉石地帯 ST と西側のまさ土層 S(軟弱粘土層を挟む)の境界部に位置し、線路はその境界線(ほぼ南北方向)にほぼ直角に走っている。しかも西側の軟弱粘土層を挟む S 層の方で被害が多く生じており<sup>12)</sup>、ここの被害状況と地盤の関係が JR 六甲道駅高架橋の被害状況と地盤の関係<sup>1)</sup>と似ている。

ここの現地を直接観察したところ、トンネル入り口手前にある北側の切取土留擁壁が線路側の南側に僅かに傾斜するとともに、その北側脇の道路が沈下しており、このような地盤の変形状態からここでは地盤が傾斜方向の南側、即ち六甲山の斜面の傾斜方向に塑性的に動いたことが分かる。その地盤の動きはこの切り取りに接するトンネル部でも生じたことが考えられるし、そのような地盤の動きによってトンネルに変状が生じたことが考えられる。

#### 4. まとめ

以上のように、地下鉄の駅部と駅間のトンネルの被害は三宮駅や新長田駅等を除くと埋立地等で多くみられる。ここで、三宮駅付近は河道跡の自然堆積土層で一種の埋立地であり、新長田駅は粘土多質地 CL 層と砂州 S' 層の境界部の前者側に作られていて地盤の不同変位で被害を受けたことが考えられる。特に顕著な被害箇所ではその脇に比較的大きく、かつしっかりした地下室や杭基礎等をもつ建物あるいは地上に山(山は地盤が良い)等があり、それらが地盤の不動点の効果を高めたこと等が推定される。以下にこれまでに調べたトンネルの地震被害と基礎と地盤の関係をまとめる。

(1) 地下鉄トンネルの地震被害は元溜池跡の埋立地等の特異な地盤で、硬軟地盤境界部等の地盤条件の不連続点で多いことや、砂・礫層の下に軟弱な粘性土層がある上下逆転型地盤で多いこと、六甲山斜面の傾斜方向の南北方向の力を受けたトンネルが多いこと<sup>6)</sup>、さらにトンネル躯体の亀裂や傾斜の発生状態、移動方向等が地盤の傾斜等と密接に関係していること等が分かった。

(2) このような地盤で地震被害が生じる理由の 1 つとして、トンネル躯体が地盤の動きに追従して動くことが出来ないためと考えられる。即ち、地盤中に作られたトンネル躯体の下部や底部が比較的良好な地盤に設置されているため、トンネル躯体それ自身が地盤中に地盤条件の不連続点を作って不動点のようになり、そのため地震時に不動点になったトンネルと脇の地盤(埋立土層等)の間に不同変位が生じて偏土圧がトンネルに作用し、即ち地震で動いてきた地盤(埋立土層等)に強く押されて地震時の急激な偏土圧が作用して被害を受けたことが推定される。なお、地盤は構造物を押すことは出来るが引っ張ることが出来ないため、動いてきた地盤に不動点のようになっているトンネル躯体は片側から押し潰されるように変形し、トンネルの左右側壁の変形は異なった形状となることが推定される。

(3) また、砂・礫層の下に軟弱な粘性土層がある上下逆転型地盤では、地震時に軟弱な粘性土層が迂り面のようになってその上の砂・礫層が比較的大きく動くことと、地盤反力係数の大きい砂礫層がトンネル躯体を押す力が大きいため、トンネルに被害が発生することが考えられる。

このようにトンネルの地震被害に地盤変位が大きく関係しており、その被害機構には 2. で述べた橋梁や建物等の地震被害機構<sup>7)20)</sup>と同様に、地盤の不同変位に基づく偏土圧が関係したことが考えられる。

なお、新開地駅・湊川駅間の地下鉄トンネルの被害が報告されていないようであるが、それは新開地駅・湊川

駅間の全区間が玉石層 ST の一様地盤中に入っていたため、地震のときに地盤が一様に動きトンネルも地盤と一緒に動いて、地盤から偏土圧等の大きい荷重を受けなかったからではないかと推定される。また、地下鉄トンネルの被害箇所の深さは3~5mに集中しており、地下8mにある湊川駅など、より深い区間では被害はなかったという報告もある(交通新聞による)。地中のより深いところで被害が生じない理由の1つとして、地中深いところでは地盤変位が小さいことや、そこにある軟弱粘性土層の強度がある程度強くなっていてそこを境に迂りのような地盤変位が生ぜず、強い偏土圧が生じないこと等が考えられる。

## 5. あとがき

以上に述べたように、トンネル等の地下構造物は地上構造物(建物、橋梁等)と同様に地盤変位(不同変位)で地震被害が発生し、両構造物とも同様の被害機構で被害を受けていることが考えられる。なお、今後ともトンネルの構造や被害状態や地盤の詳細なデータを集めて深度化を行う予定である。おわりに、以上の調査でお世話になった吉村亘前佐藤工業(株)常務取締役、梅原俊夫鉄道公団設計技術室長、佐俣千載神戸市交通局計画課長、中村晋前佐藤工業(株)主任研究員(現日本大学工学部教授)他多数の方々に、厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 那須誠: 阪神・淡路大震災による構造物被害と地盤の関係, 第4回耐震補強・補修, 耐震診断に関するシンポジウム講演論文集, pp. 123-130, 2000. 7.
- 2) 那須誠: 兵庫県南部地震被害と地盤の関係, 第15回日本自然災害学会学術講演会, 1-7, pp. 13-14, 1996. 11.
- 3) 那須誠: 兵庫県南部地震による構造物の被害と地盤の関係(その2)-地下鉄トンネル-, 第24回土木学会関東支部技術研究発表会, 1-9, pp. 18-19, 1997. 3.
- 4) 那須誠: 兵庫県南部地震による建物被害と地盤の関係-三宮付近-, 第16回日本自然災害学会学術講演会, No. 1-3, pp. 5-6, 1997. 10.
- 5) 那須誠: 兵庫県南部地震による構造物の被害と地盤の関係, 第23回土木学会関東支部技術研究発表会, 1-46, pp. 88-89, 1996. 3.
- 6) 那須誠: 阪神・淡路大震災への地盤の影響と被害機構の推定(その2)-土構造物と地下トンネル-, 第31回地盤工学研究発表会, No. 618, pp. 1235-1236, 1996. 7.
- 7) 那須誠: 阪神・淡路大震災への地盤の影響と被害機構の推定, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp. 271-278, 1996. 1.
- 8) 佐俣千載, 水口和彦, 杉山郁夫, 川満逸雄: 神戸市営地下鉄三宮駅の被災原因の検討, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会, pp. 227-230, 1996. 1.
- 9) 地形図, 1:2万, M18年測量神戸.
- 10) 地盤工学会阪神大震災調査委員会編: 構造物基礎・道路関係, 阪神・淡路大震災調査報告書(解説編), pp. 453-464, 1996. 3.
- 11) 西山誠治, 小長井一男, 西村昭彦: 兵庫県南部地震による地表面残留変位と地下鉄構造物の被害との関係, 平成11年鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL'99)論文集, pp. 333-336, 1999. 12.
- 12) 佐俣千載, 長光弘司, 山本一敏, 森伸治: 非線形応答変位法による地下鉄駅舎の被災メカニズムの考察, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会, pp. 231-238, 1996. 1.
- 13) 地形図, 1:2万, 1885年測量, 須磨村, 1886年測量, 兵庫.
- 14) 那須誠: 地震による構造物変形への地盤の影響, 第30回土質工学研究発表会, pp. 75-78, 1995. 7.
- 15) 神戸高速鉄道(株)・佐藤工業(株): 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道東西線大開駅の被害状況報告書, 1995.
- 16) 中村晋, 末富岩尾, 吉田望: 地震被害に基づく神戸高速鉄道・大開駅周辺地盤の変形推定, 第31回地盤工学研究発表会, pp. 1275-1276, 1996. 7.
- 17) パシフィックコンサルタンツ(株)総合研究所編: 平成7年阪神大震災(兵庫県南部地震)被害調査報告書, 1995. 1.
- 18) 三木千壽: 溶接, 疲労, 破壊, 土木学会平成7年度全国大会研究討論会資料-鋼構造物の震災被害-, pp. 18-21, 1995. 9.
- 19) 那須誠: 地震による構造物変形への地盤の影響(その2), 土木学会第50回年次学術講演会講演概要, 1-472, pp. 944-945, 1995. 9.
- 20) 那須: 阪神・淡路大震災への地盤の影響と被害機構の推定(その2), 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp. 185-192, 1997. 1.