

阪神・淡路大震災への地盤の影響と被害機構の推定

(財)鉄道総合技術研究所 那須 誠*

過去の地震被害例の調査から、盛土や建物、橋梁等の構造物被害は地盤構造即ち地盤の形状と土層構成が関係し、地盤条件の変化点や砂・礫層の下に粘性土層がある上下逆転型地盤が多く、地盤の不同変位や滑り、埋没谷における振動の増幅等によって発生しやすいことを推定し既に発表している。今回、阪神・淡路大震災被害も地盤に焦点をあてて調べた結果、それは同様の地盤条件の箇所が多いことと、上下逆転型地盤の粘性土層に生じる横ずれ振動が橋脚に斜め亀裂を発生させる可能性等を見出した結果等について述べる。

1. まえがき

過去の地震被害例調査から、盛土や建物、橋梁等の構造物被害は地盤構造即ち地盤の形状と土層構成が関係し地盤条件の変化点や砂・礫層の下に粘性土層がある上下逆転型地盤が多く、地盤構造に基づく地盤の不同変位や滑り、埋没谷における振動の増幅等によって発生することを推定し既に発表している¹⁾。今回、阪神・淡路大震災の被害も地盤に着目して調べるとともに、橋脚等の被害機構等を地盤変位から推定したので、その結果を以下に報告する。

2. 被害と地盤の関係

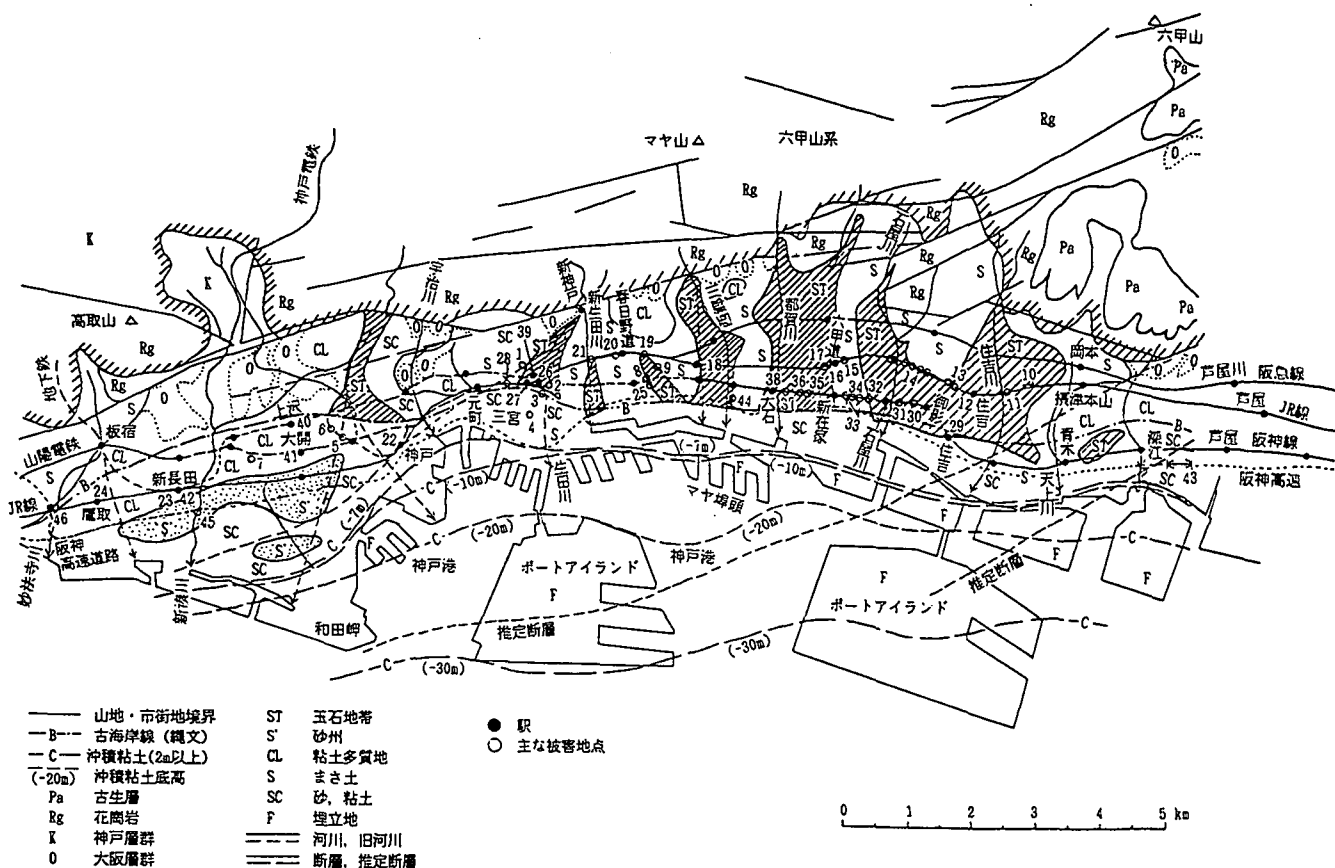
(1) 図-1に須磨から灘付近にかけての地盤状態²⁾と主な被害構造物の位置を示す。それによると被害は地盤条件の変化点等で多くみられる。即ち生田神社(No. 1, 拜殿倒壊)は玉石地帯ST層と砂、粘土SC層の境界部にあり、旧版地形図³⁾によると昔は山裾に作られて池があった。地下鉄三宮駅(No. 39, 地下1階のRC支柱に南上より北に下がる斜め亀裂あり)と阪急三宮駅(No. 27, 建物の壁面に南上より北に下がる斜め亀裂あり)はST層とまさ土S層の境界部、神戸新聞社(No. 2, 建物に沿う道路面の高い北半分と比べて道路面が低くなる南半分の変状が甚だしく異種支持地盤状態と思われる)とそごう(No. 3)はST層

とSC層の境界部に作られ、三菱銀行兵庫支店(No. 5, 南東部が甚だしく崩壊)と兵庫警察署(No. 6, 1階が潰れる)はST層と粘土多質地CL層の境界部に作られている。高速大開駅(No. 41, 地盤は南に動きRC支柱に南上から北に下がる斜め亀裂が生じて崩壊し天井も崩落)はCL層の中に作られているが、旧版地形図³⁾の地表面標高GLの等高線をみると地表面が尾根状である。地下鉄新長田駅(No. 42)は砂州S'とCL層の境界部に作られている。高速道路(No. 44~46)の落橋や変状は砂州S'とSC層あるいはS層とCL層、ST層とS層の境界部等で生じた。旧版地形図³⁾によると、神戸市役所2号館(No. 4, 柱工法変化階の6階が潰れて上層階が北側と東側に移動)は、南北に細長い地形の自然堤防(比高約5m)と埋没谷の境界部に斜交して作られてその細長い方向に埋没谷が動いて変形し、甲子園球場は地山と元川³⁾の埋立地に跨がって作られていて沈下、亀裂等の被害が生じたが、西宮球場は広い田んぼの真ん中に作られていて無被害である。余震で異常な震動増幅が観測された東灘区福池小⁴⁾は元池³⁾の埋立地に作られている。今回学校や工場等に多くの被害が生じたが、旧版地形図³⁾によると元池の埋立地に作られたものが多い。

(2) 図-2⁵⁾の阪神高速道路の落橋(西宮市, バス転落直前)は図-3⁶⁾のA地点で、それによると自然堤防と埋没谷の境界部で両者に跨った部分で発生し、前者は地盤がよく後者の地盤は砂礫層の下に粘性土層がある上下逆転型地盤である⁷⁾。図-4⁸⁾²¹⁾の阪神高速深江出入口付近(図-1のNo. 43)の北側への倒壊は芦屋川沿いの自然堤防³⁾⁻⁶⁾に接する埋没谷で発生し(図-3のB地点)、埋没谷の東端の

キーワード：阪神・淡路大震災，地盤条件変化点，上下逆転型地盤

* 鉄道総合技術研究所環境防災技術開発推進部，
T. 0425-73-7298



○ 主な被害地点No.

1. 生田神社 (拝殿南側に倒壊)
2. 神戸新聞社 (異種支持地盤状態で変状)
3. そごうデパート (変状)
4. 神戸市役所 (2号館の途中階の6階崩壊)
5. 三菱銀行兵庫支店 (崩壊)
6. 兵庫警察署 (1階崩壊)
7. 西市民病院 (途中階の5階崩壊)
8. 住友ゴム (変状, このST層南端沿いのナポコ敷地に亀裂発生)
9. 神戸製鋼所 (変状)
10. 民家が西側へ将棋倒しに傾斜 (本山第2小南側)
11. JR線拱津本山・住吉間の山側切取り法面崩壊
12. 住吉駅高架変状 (南側)
13. 住吉・六甲道間高架橋変状, 桁に横ずれ, 段差
14. 住吉・六甲道間高架橋変状, 桁落下
15. 六甲道駅の東側高架橋変状, 桁落下 (駅東側の高架橋が南側に曲がる)
16. 六甲道駅高架橋変状, 路盤変状 (ラーメン橋脚折損, ホーム屋根中央部が湾曲)
17. 六甲道駅の西側高架橋変状, 桁落下
18. 灘駅構内に通り狂い
19. 灘・三宮間列車停車
20. 灘・三宮間列車停車
21. 灘・三宮間列車停車
22. 神戸駅構内通り狂い。列車停車
23. 新長田駅盛土・土留変状, ホーム変状, 線路浮き
24. 鷹取駅構内本線の列車停車。留置線で車両傾斜 (地名に大池あり)。
25. 東灘 (信)・神戸港間阪神架道橋変状 (貨物線, 桁が東に移動)
26. 阪急線春日野道・三宮間電車停車 (JR三宮駅手前)
27. 阪急三宮駅建物変状, 駅手前の跨道橋上の桁移動と鋼製柱傾斜 (JR三宮駅のホーム屋根の終点方 (跨道橋上) が北側に屈曲)
28. 神戸高速三宮・花隈間高架橋変状, 落橋 (28の生田架道橋の鋼管柱頭部に水平亀裂, 28の矢印は生田架道橋を示す)
29. 阪神線住吉駅路盤変状
30. 阪神御影・石屋川間電車停車
31. 阪神御影・石屋川間御影留置線, 路盤変状, 電車停車, 石屋川駅東側の路盤変状。北側の留置線の土留擁壁が北側へ大きく傾斜。留置線の電車が北側へ傾斜・転倒。上り電車が停車, 傾斜
32. 石屋川・新在家間路盤変状, 電車傾斜
33. 石屋川・新在家間石屋川車両基地前後高架橋変状, 桁落下数ヶ所, 電車停車
34. 石屋川・新在家間石屋川車両基地高架橋変状, 橋脚折損。車両傾斜。北側の架線送電電柱が北側へ傾斜。留置線では南端の車両が北側に傾き, 北端の車両が南側に傾斜
35. 新在家・大石間高架橋変状, 桁落下
36. 新在家・大石間電車停車
37. 新在家・大石間高架橋変状, 桁落下
38. 大石駅構内高架橋変状, レール 変状
39. 地下鉄三宮駅 (中柱せん断斜め亀裂)
40. 地下鉄上沢駅 (上沢・新長田間Tも変状)
41. 高速大開駅 (中柱せん断斜め亀裂, 天井スラブ落下し, 道路陥没。側壁下端に水平亀裂)
42. 地下鉄新長田駅 (中柱せん断斜め亀裂)
43. 阪高深江出入口付近倒壊 (ビルツ橋, 北側に倒壊, RC橋脚の鉄筋段落し部に斜め亀裂)
44. 国道43号岩屋高架橋落橋 (鋼製T型橋脚崩壊。西郷川を挟む。北側橋梁の変状大)
45. 阪高落橋 (自然堤防の旧集落の端部で発生)
46. 阪高変状 (東脇に元溜め池あり。脇に建物もある。)

図-1 神戸地区の地盤状態²⁾と主な地震被害箇所

橋脚 (図-4のB) が最も顕著に破壊し鉄筋段落とし部に南上より北に下がる斜め亀裂が生じており, ここでは地盤が北から南に動いたことが推定される。なお変形形態が浦河沖地震の国道静内橋等⁷⁾のものと似ており, 両者とも上下逆転型地盤である。

(3) 崩壊した阪急伊丹駅高架橋は洪積層の段丘堆積物と沖積層⁶⁾を跨いで作られ, 桁等は東側に移動, 傾斜し, 沖積層上の北部の被害程度が著しい。旧版地形図³⁾によると, 駅は旧集落 (自然堤防) の西端に接する埋没谷に作られているので, 埋没谷の表層

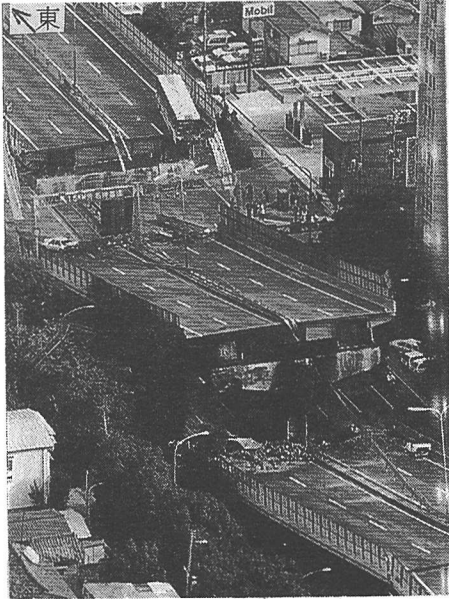


図-2 高速道路の落橋（西宮市，バス転落直前）⁵⁾

- 台地上位面
- " 下位面
- " 低位面
- 盛土地
- 自然堤防
- 砂丘・砂州・砂堆
- 平坦化地・改変中の区域
- 扇状地

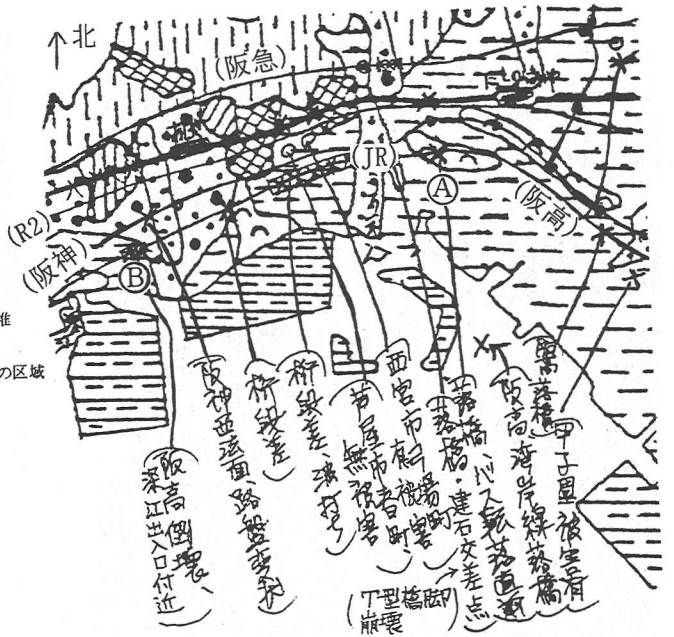


図-3 地盤状態と地震被害箇所⁶⁾

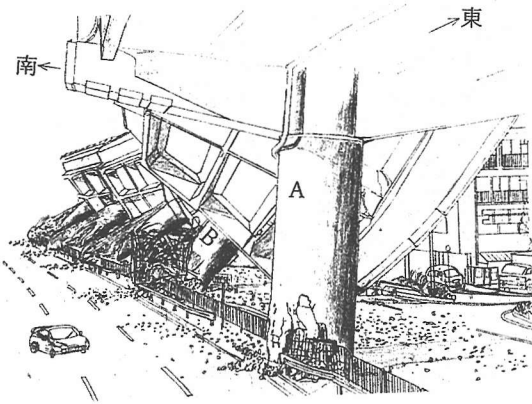


図-4 高速道路の倒壊¹⁰⁾
(写真⁸⁾よりスケッチ)

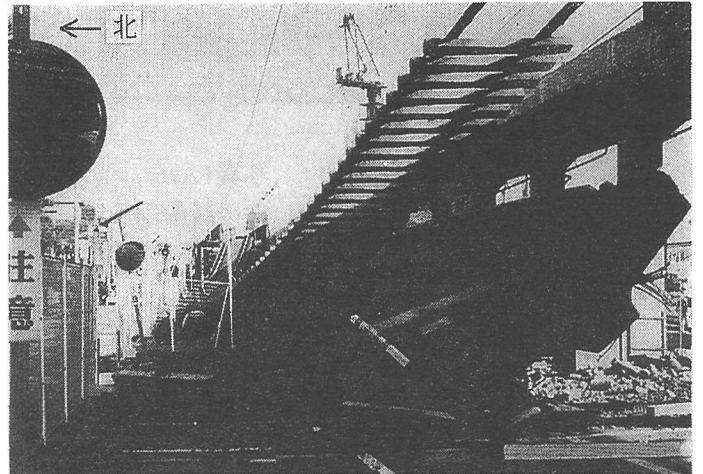


図-5 西宮高架橋の倒壊⁹⁾

堆積層が埋没自然堤防表面の傾斜方向の東から西に動いたことが推定される。

阪急西宮高架橋（若松町）では図-5⁹⁾に示すように、北側の高架橋の橋脚がせん断破壊し桁は北側に移動や傾斜、沈下したが、南側高架橋の被害程度は北側高架橋より軽く、かつ南側にビルのある所では北側高架橋の被害程度がひどくて桁は地表まで落下した。被害箇所は夙川沿いの自然堤防の東側の埋没谷部で洪積層と沖積層の境界部⁶⁾であり、北側と南側で民家等の被害が酷く生じており、地盤が北側から南側に激しく動いたことが推定される。夙川の東側の自然堤防沿いの埋没谷¹⁰⁾では、北から南に

阪急西宮高架橋，マンションN（安井町），阪神高速建石交差点等と顕著な被害が生じている。

(4) 図-6¹¹⁾において新幹線高架橋が左下部のS1aで橋軸直角方向に変形し、図-7¹²⁾に示すように橋脚に左上から右下に下がる斜め亀裂が生じて、上部の橋脚は右側に落下し桁は右側に傾斜、移動した。右上部のS1bの手前側の部分も橋軸直角方向に変形¹³⁾し、橋脚には右上から左に下がる斜め亀裂が生じて、上部の橋脚は左側に落下し桁も左側に傾斜、移動した。右上部の奥の桁S1b'は手前側の端が橋軸方向に落下した¹³⁾¹⁴⁾。

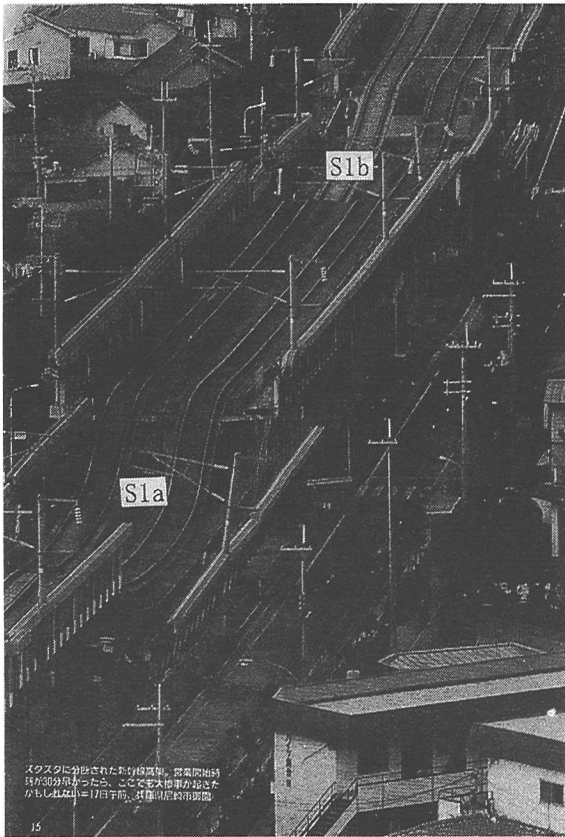
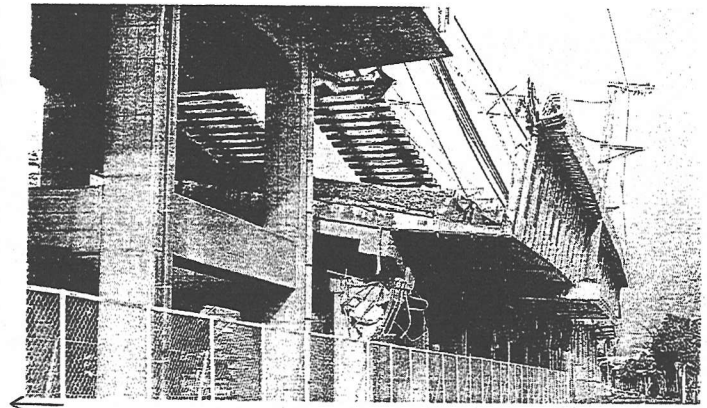


図-6 新幹線高架橋の落橋¹⁾



南東

図-7 新幹線高架橋S1aの落橋¹²⁾

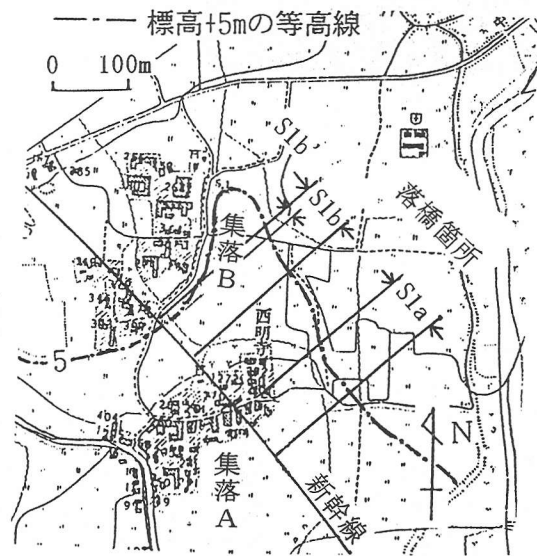


図-8 旧版地形図¹⁵⁾

図-8の旧版地形図¹⁵⁾によると、落橋は2ヶ所とも埋没谷の田圃で発生し、S1aは集落S(自然堤防)の右下側(南西側)の埋没谷、S1bは集落Sと集落N(ともに自然堤防)の間の埋没谷の田圃である。しかも、S1a及びS1bの手前側の部分では地盤面標高(GL)OP+5mの等高線に直角方向で、前者は北東側(右側)から南西側(左側)にGLが低くなる方向に、後者は南西側(左側)から北東側(右側)に水路の水が流れる方向(埋没谷軸の方向)で前者と反対方向に地盤が地震時に動いたことが推定される。後者の水の流れる方向に昔はGLが低くなっていたものと考えられる。

桁S1b'は埋没谷軸に直角に埋没谷の北側の縁に沿うOP+5mのGL等高線に直角に変形した。この奥の方の橋台は自然堤防の集落Nの端に、手前の橋台(高架橋)は埋没谷にあるので、地震時に後者の地盤変位が前者より大きく生じて両橋台の間隔が開いたため桁S1b'が落下したこと、あるいは手前の橋台(高架橋)に発生した手前への変位と沈下でS1b'が落下したこと等も考えられる。

(5) 六甲道駅高架橋では橋脚等が破壊し図-9¹³⁾に示すように桁、ホームが蛇行状に変形して崩壊した。図-1によると玉石地帯STとまさ土層Sの境界部で高架橋はその境界線とほぼ直角に交わっている。図-9を詳しくみると、高架橋の桁の横移動は線路脇の大きい建物の有無に対応しており、桁は建物と反対側の建物の無い方に移動しているので、建物の無い方の地盤が高架橋の方に向かって強く動いたため被害が発生したものと考えられ、図-5の阪急西宮高架橋の被害状況と似ている。

3. 橋梁等の被害機構の推定

(1) 橋梁の橋軸方向の被害機構

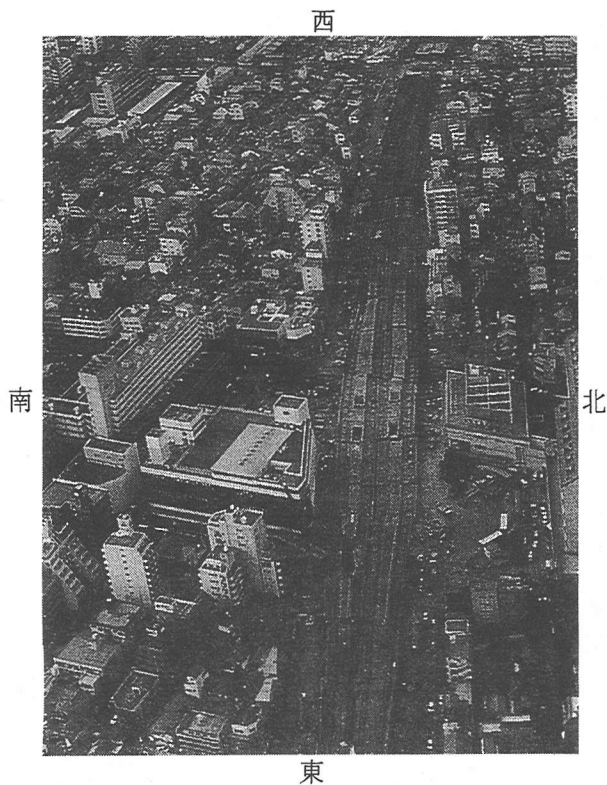


図-9 六甲道駅高架橋の崩壊¹³⁾

橋梁の橋軸方向の被害機構として過去の類似の被害、地盤構造及び解析や地盤振動測定結果等^{16) 17)}も参考にすると、例えば図-10のように考えられる。即ち、地盤条件の不連続なところでは軟弱粘性土層の地震時の変位は砂礫層よりも大きいので、(b)図のように橋梁が左側に動くときは地盤に伸びが生じてP2、P3橋脚間が開いて桁G2の可動端側が落下し、次に(c)図のように橋梁が反対方向に動くときは同橋脚間に縮みが発生する。その短縮量が大きいときは落下桁の端部がその前にある橋脚P3に当たってそれを

折損し、橋脚が落下桁のほうに押むように折れ曲がること等も推察される。また、橋脚間の開きが小さくて桁が落下せずに縮みが発生したときは桁同士が衝突してせりあがることも考えられる。

(2) 橋軸直角方向の変状機構

図-11は六甲山の南麓斜面でみられた高架橋変状の模式図であり、平行に並んだ2本の高架橋のうち山側(北側)の橋脚に南上から北に下がる斜め亀裂が生じてその上の橋脚が北側にずれて落下し、桁も北側に傾斜したが、南側の橋脚の変状程度が北側と比べてはるかに軽い状態を示す。付近の斜面上の建物が北側に傾くとともに、その建物の東西の壁面に南上から北に下がる斜め亀裂が発生している。図-12¹⁸⁾に示す作用荷重と斜め亀裂発生の関係から分かるように、このような橋脚や建物の斜め亀裂や橋脚、桁等の傾斜は、ここの地盤が北側から南側に動いて生じたものであり、しかも北側から橋脚基礎部に衝撃のような力が作用して発生したと考えられる傾斜等の変形状態が生じている。他にも複数並んだ高架橋のうち片側の端の1部だけが酷く被害を受けた例が、今回の地震で斜面上だけでなくほぼ水平とみなされる地盤(例えば、図-5)でも多くみられること等からも、今回の地震で構造物の被害に強く影響した地震動は鉛直動よりも水平動の方であったと考えられる。

さらに、山陽新幹線の高架橋被害は図-13¹⁹⁾の左側半分に示すような砂・礫のみからなる地盤でなく、図-2、4の被害箇所と同様に右側半分のような上下逆転型地盤で生じている。後者のような地盤

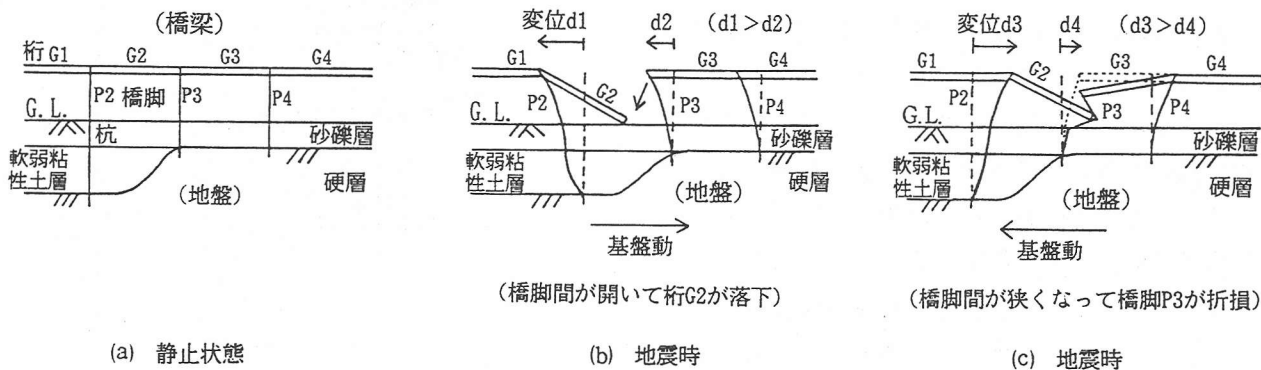


図-10 橋梁の橋軸方向の被害機構推定図
(粘性土層は分かりやすくするため厚く示してある)

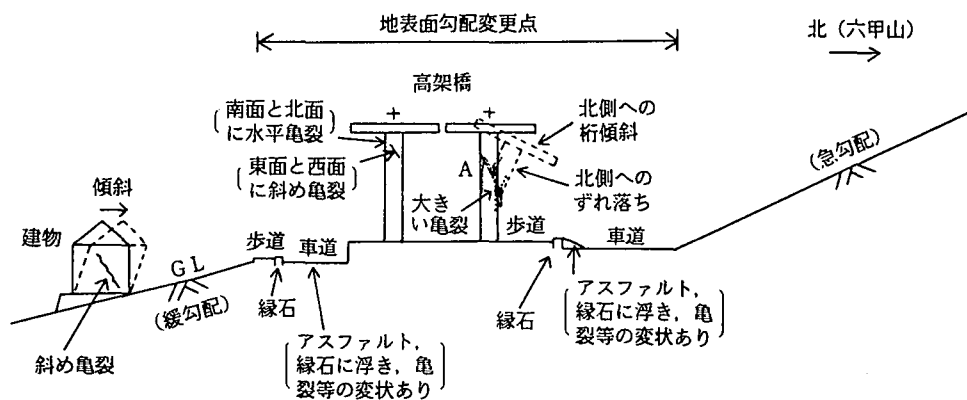


図-11 六甲山南麓斜面での高架橋変状の模式図

内の軟弱粘性土層には横ずれ振動が生じ、かつ地表で地震動の変位や加速度が大きく出る主要動発生時に速度が大きく生じる場合があることが調べられている¹⁸⁾²⁰⁾。従って、軟弱粘性土層に生じた横ずれ振動がその上部の砂・礫層に伝わって、その砂・礫層は圧縮性が比較的小さく横方向地盤反力係数が大きいので、しっかりした支持杭等で強く地盤に拘束された高架橋等の基礎が大きい横方向の荷重（地震動の場合は衝撃的になる）を受けることが考えられる²⁰⁾。図-14はそのような荷重の作用と被害発生関係の推定例を示す。土は構造物（基礎や杭）を押すことはできるが引っ張ることはできないので、この場合右側の杭は地盤から押されて左側に湾曲し左側の杭は湾曲が小さく、結果的に右側の杭長が左側の杭長より短くなって、構造物上部は右側に傾斜することになる。しかも砂礫層と粘性土層、粘性土層と基礎との境界部で杭の曲がりが大きいため、その部分に亀裂が発生¹⁴⁾することも考えられる。なお、地震のとき地盤は反対側にも動くので、構造物には図に示すほど傾斜が残らないこともあるし、桁橋の場合は図に示すように右側から基礎が急激に押されると、桁が右側に移動すること考えられる。

以上のように、高架橋の橋軸直角方向の変状はその基礎が橋軸直角方向に地盤から大きい衝撃的な力を受けて、またこの衝撃的な力は桁橋の基礎にも作用して橋脚の傾斜や桁の移動が発生していることが推定される。これは構造物基礎自体が地盤条件の不連続性を作ったために、即ち埋没谷等で平面的に比較的一様な地盤中の構造物基礎自体が不動点のようになって、地震で急激に動いた地盤を止めたため構

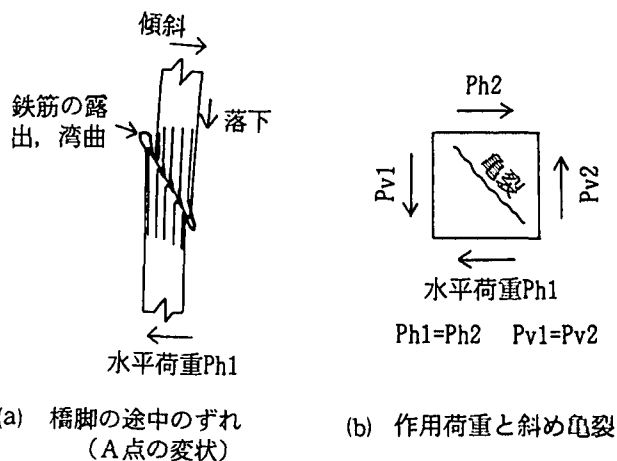


図-12 水平荷重の作用と斜め亀裂発生関係¹⁸⁾

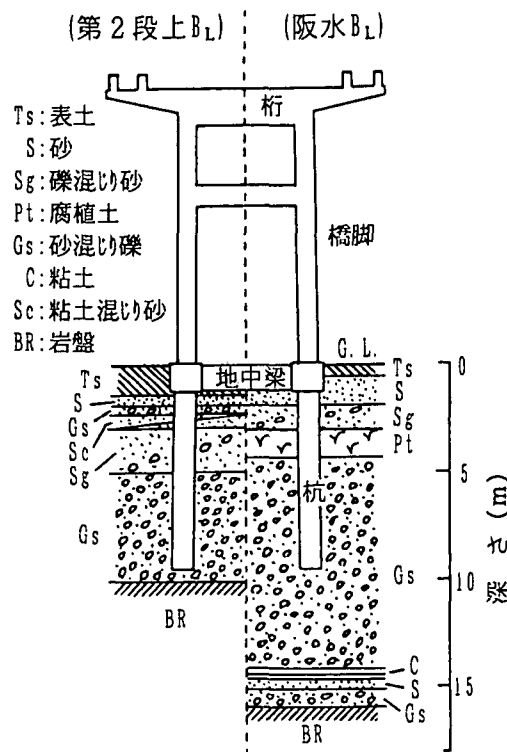


図-13 山陽新幹線高架橋の地盤状態¹⁸⁾

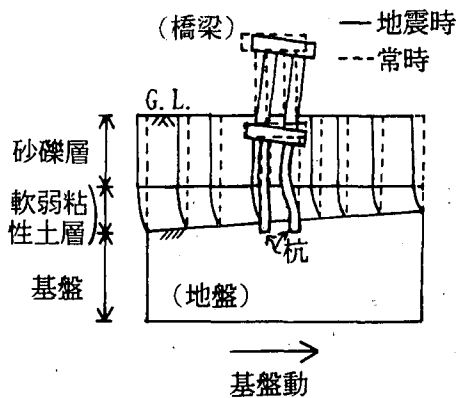


図-14 水平荷重の作用と被害発生の関係の推定例

造物に衝撃的な力が作用したことが考えられる。

4. 被害と地盤の関係と被害機構のまとめ

以上に述べた地震被害への地盤の影響と、地震被害機構を次にまとめる。

(1) 今回の地震被害も過去の被害¹⁾と同様に地盤条件の不連続点や埋没谷で多く、さらに砂・礫土層の下に比較的軟弱な粘性土層(腐植土層も含む)がある上下逆転型地盤が多い。主としてその粘性土層に生じた不同変位や滑りで被害が発生したことが考えられる。なお、過去に地震被害が多い地盤条件の不連続点の硬い地盤は自然にできたものが多かったが、今回の地震では平面的に一様と考えられる埋没谷でも被害が発生しており、それは構造物のしっかりした支持基礎に地盤の動きを抑制する機能があつたためと推定される。その構造物には高架橋、橋梁だけでなく建物や地下トンネル等も含まれるし、さらにトップヘビー状態で継ぎ手剛性の大きい構造物はせん断変形を受けやすい構造と考えられる。

(2) 橋梁の橋軸方向の落橋等の被害は、主として砂礫層の下の厚さの不均等な軟弱粘性土層に地震時に不同変位が発生したためと推察される。

(3) 高架橋等の斜め亀裂は上下逆転型地盤の軟弱粘性土層に生じた横ずれで生じたことが考えられる。今回1方向の橋脚の斜め亀裂が多いのは、直下型地震で地震動が強く亀裂発生後ずれが生じて剛性が低下したためと考えられる。構造物の継ぎ手部や剛性変化点に被害が発生しやすく²⁾、ここが大きく破

壊して剛性が低下すると再度被害を受けにくくなると考えられるからである。

(4) 高架橋等は軸直角方向には片側への傾斜や落下、移動等の変形、複数並列の場合は片方の高架橋の変形が顕著で、しかも橋脚の1方向の斜め亀裂とその傾斜方向への変形が多いため、地震動は上下動よりも水平動の方が構造物の被害発生に影響したことが考えられる。上下動が顕著に効いたとすれば高架橋等は片側でなく両側或いは真下への変形が多く生じると考えられるからである。また、橋脚の斜め亀裂と地盤の動きは対応しており、被害高架橋等の脇の地盤上で建物等の被害が多数みられ、その変形方向からも地盤の動きが推定できるようである。

なお、今回の地震で震災の帯が六甲山の南側では縄文海岸線(図-1参照)を挟むように発生した。過去の地震でも地盤の硬いところでは被害は極めて少ないが、均質で厚い軟弱地盤でも被害は殆どみられず、被害は硬軟地盤境界部で軟らかい地盤の比較的薄いところで多く生じていること²⁾と似ている。硬い地盤では元々被害が少なく、軟弱地盤の厚いところでは軟弱地盤厚さの不均質性(不整形性)が地表面に現れにくく¹⁾、しかも支持層に根入れされてしっかりした杭等の基礎でもそれが長くなると柔構造のようになり地盤の動きを抑制する機能が小さくなること、硬軟地盤の境界部の軟弱地盤の比較的薄いところでは地盤の不整形性が地盤動に大きく現れて不同変位(変位差)が大きく現れること、軟弱地盤の比較的薄いところほどしっかりした基礎は剛性が大きいため地盤の動きを抑制して不動点のようになること等が、顕著な災害が帯状に発生した理由として考えられる。

5. あとがき

以上に述べたように今回の地震被害に対しても地盤それも地盤変位が大きく影響したことが推定されるが、今後とも事例の分析並びに解析等を続けて検証する必要があるものと考えられる。なお以上の調査結果は運輸省鉄道施設耐震構造検討委員会で検討されたものではありません。おわりに以上の調査に当たってJR西日本、天国邦博パブリックコンサルタンツ(株)総合研究所主任研究員、福武毅芳清水建設(株)和泉研究

室研究員ほか多数の建設会社、コンサルタント会社等の関係者、並びに地震応答解析等の実施に当たって土岐憲三京都大学工学部土木工学科教授、沢田俊一・久保嘉章応用地質(株)社員、大場恒彦日本物理探査(株)物探部長にお世話になりました。ここに記して厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 那須誠：地震被害と地盤構造の関係に関する研究，博士論文，長岡技術科学大学，1993.12.
- 2) 藤田和夫・笠間太郎：神戸地域の地質，地質調査所，1983.
- 3) 地形図，1:2万，M17年測量今津村，M18年測量伊丹町，同年測量西宮町，同年測量神戸，同年測量須磨村，M19年測量兵庫.
- 4) 入倉孝次郎：読売新聞，1995.2.14.
- 5) 神戸新聞社：阪神大震災全記録，p.63，1995.3.
- 6) 土地条件調査報告書（大阪地区），建設省国土地理院，1983.3.
- 7) 神戸市企画局編：神戸の地盤，1980.3.
- 8) 平成7年兵庫県南部地震，サンデー毎日，臨時増刊，Vol.74，No.5，1995.2.4.
- 9) 平成7年阪神大震災被害調査報告書，パンフィックコンサルタンツ(株)総合研究所，p.109，1995.1.
- 10) 1:2.5万地形図，西宮，1977第2回改測.
- 11) 緊急増刊，神戸大震災，産経新聞社，1995.1.27.
- 12) 毎日新聞，1995.2.7.
- 13) 1995年兵庫県南部地震調査報告書，清水建設(株)技術研究所，1995.2.28.
- 14) 毎日新聞，1995.3.16.
- 15) 地形図，1:1万，尼崎東北部，1923年測量，1952年第2回測量，1956.3発行
- 16) 那須誠，及川浩，久保嘉章，沢田俊一：被害形態と地盤構造からみた橋梁の地震被害発生機構(その2) — 地震応答解析 — ，第29回土質工学研究発表会，pp.1073-1076，1994.6.
- 17) 那須誠，及川浩，梅原寿義，久保嘉章，沢田俊一：被害形態と地盤構造からみた橋梁の地震被害発生機構(その4) — 常時微動測定結果 — ，第30回土質工学研究発表会，pp.1041-1042，1995.7.
- 18) 那須誠：地震被害への地盤の影響と地震応答解析，第23回地震工学研究発表会，pp.85-88，1995.7.
- 19) 朝日新聞，1995.4.7.
- 20) 那須誠：地震被害への地盤の影響と地震応答解析(その2) ，第14回日本自然災害学会学術講演会，pp.30-31，1995.10.
- 21) 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集，pp.944-945，1995.9.
- 22) 例えば，橋梁の地震被害と地盤構造，鉄道総研報告，Vol.5，No.11，pp.27-36，1991.11.

A study on effect of ground on the 1995 Hanshin-Awaji great earthquake damage

Makoto Nasu

This paper describes that in the 1995 Hanshin-Awaji great earthquake various objects have been damaged on changing sites of ground condition and/or upside-down type grounds. Such grounds had often induced serious damage in past earthquakes. Also, it has been presumed that inclined cracks in piers will be induced by swaying movements which occur in soft clayey or peaty layers under sandy and/or gravelly layers.