

橋梁の軸方向と軸直角方向の地震被害への地盤の影響の違い

那須 誠¹

¹フェロー会員 博士(工学) 前橋工科大学教授 工学部建設工学科(〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1)

1. まえがき

現在、各種構造物の地震被害が地盤条件の変化点や砂・礫層の下に軟弱な粘性土層等がある地盤(上下逆転方地盤)で多いことを明らかにするとともに、地盤変位や偏土圧で地震被害が発生しやすいこと、さらに地盤構造のほかに基礎の状態にも大きく影響されること等を推定している。地震被害で軸方向に被害を受けた橋梁と軸直角方向に被害を受けた橋梁に分けて、被害機構を地盤に着目して推察した結果の一部を既に本シンポジウムで発表しているので¹⁾、今回はその後調べた橋梁の地震被害の事例と地盤の関係について発表する。

2. 橋梁の軸方向の地震被害と地盤状態

(1)被害橋梁と地盤状態

a) 姉沼高架橋

東北本線の姉沼高架橋(杭基礎)において、図-1に示すように1968年十勝沖地震で水平・鉛直両方向の残留変位が生じた²⁾。地盤内に12～25mの厚い軟弱腐植土層があり、その下の基盤表面のW形に窪んで軟弱層の厚い所で水平変位が特に大きく生じた。この腐植土層は同図の右側では薄くなり左側に厚く堆積する。水平変位の大きい所の杭頭部に曲げひび割れが生じた(図のA,B杭参照)。杭は橋軸方向に腐植土層の薄くなる右側(その底面の緩く傾く方向)に湾曲した。基盤の窪みの深さが約7～12mと大きいため、地震時に軟弱地盤に不同変位(水平、鉛直方向)が大きく生じて高架橋ブロック間に変位差が生じ、橋

梁がバックリングしたように変形したことが考えられる。この周辺の地盤では比較的硬い埋立土層の下に極軟弱腐植土層があり、地震被害が多くみられる上下逆転型の互層地盤になっている。姉沼高架橋と昭和大橋¹⁾の変形と地盤を比べると杭の変形方向と地盤等が似ており、両者の被害機構も似ていることが推定される²⁾。

b) 桜沢川橋梁

図-2に示すように、奥羽本線の桜沢川橋梁(杭基礎)の左側は山に続き、地盤の軟弱層が左側から右側にかけて厚くなり、橋梁は異種支持地盤状態になっている³⁾。1983年日本海中部地震のときに橋台裏の盛土の沈下が薄い軟弱層上の橋台1Aよりも厚い軟弱層上の橋台2Aの裏側で大きく発生した。沈下量はそれぞれ20cmと75cmである。しかも、両橋台間が狭くなるとともに、2A橋台は左側に押されるとともに2A橋台上のパラペットやシュー、2P橋脚と1P橋脚上の架違い部に破壊等が発生している³⁾。ここでは、地震のときに右側の軟弱地盤が橋軸方向の左側に比較的大きく動いて被害が発生したことが考えられる。

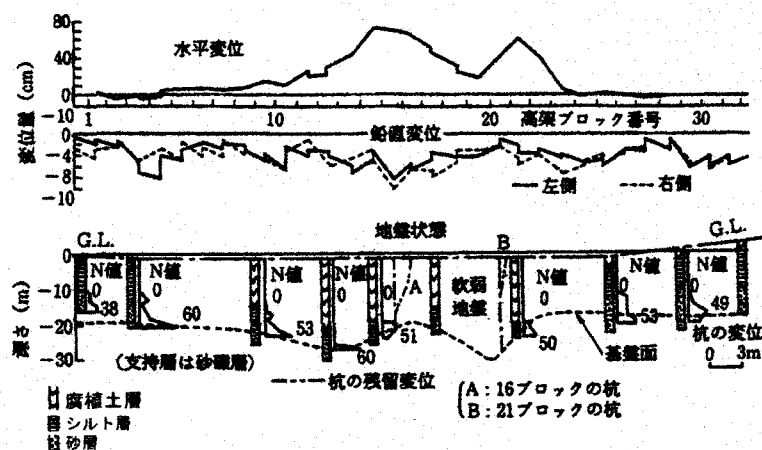


図-1 姉沼高架橋の被害と地盤断面図²⁾

なお、この川は地盤の良い山際に流れている。

c) サンフランシスコ・オークランドベイブリッジ

サンフランシスコ湾を横断しているサンフランシスコ・オークランドベイブリッジ(杭基礎)の橋梁全体は、図-3 に示すように左端側の地盤の良い岩盤部分と右側の悪い堆積土層部分に跨って作られて

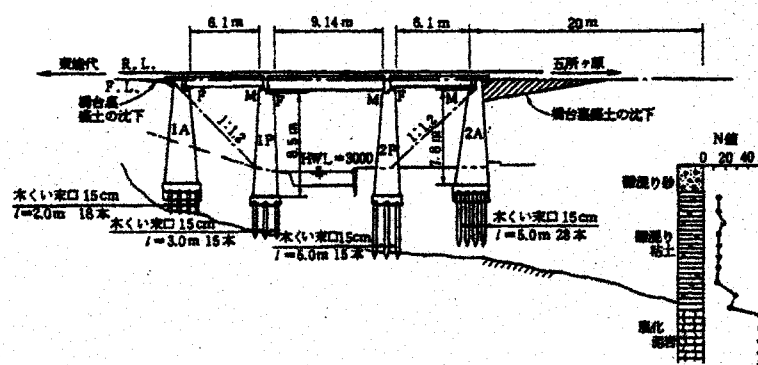


図-2 桜沢川橋梁の被害と地盤断面図⁵⁾

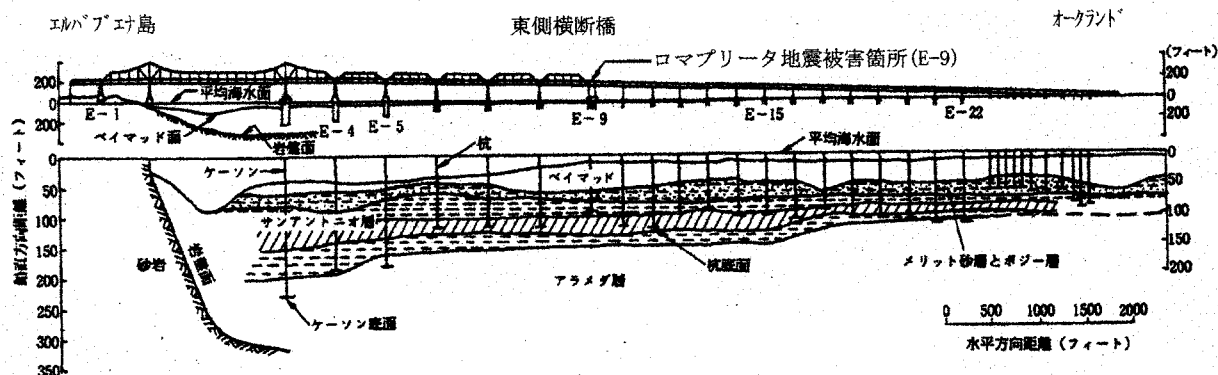


図-3 サンフランシスコ・オークランドベイブリッジの被害と地盤断面図³⁾

いる³⁾。1989年ロマプリータ地震のとき軟弱なベイマッド層厚さの変化点付近のE-9橋脚上で桁が崩落した³⁾。ここではベイマッド層に橋軸方向の不同変位が発生して被害が発生したことが考えられる。このサンフランシスコ湾の水深の最も深い部分は左側の地盤の良い岩盤近くにある。

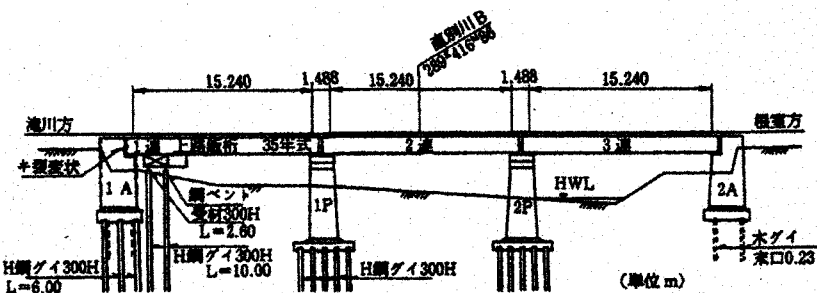


図-4 直別川橋梁の被害と地盤状態⁴⁾

d) 直別川橋梁

根室本線の直別川橋梁(杭基礎)では、図-4 に示すように1993年釧路沖地震のときに1A橋台に亀裂と右側への傾斜が発生した⁴⁾。橋梁下の地表面を見ると左側から右側にかけて低くなっており、また杭は右側の2A橋台よりも左側の1A橋台の方で長い。地盤は右側よりも左側の方が悪いと考えられる。ここでは橋梁下の地盤面が左側から右側へ傾斜しており、地盤が1A橋台の左側から右側方向へ動いたため1A橋台が地盤に押されてその被害が発生したことが考えられる。なお、この川筋も地盤が良いと考えられる右側にある。

e) 下頃辺川橋梁

根室本線の下頃辺川橋梁(杭基礎)では、図-5 に示すように1993年釧路沖地震のとき、A部で橋脚の掛け違い部のコンクリートに亀裂や剥落が生じた⁵⁾。1A橋台よりも2A橋台の方の堤防天端面の高さが低く、後者に近い方の橋脚のA部で被害が生じている。ここで杭とケーソン基礎の底面深さをみると右側から左側へ深くなっており、地震のときに地盤がその方向に動いたために被害が発生したことが考えられる。

f) 姫新得川橋梁

根室本線の姫新得川橋梁(杭基礎)では、図-6 に示すように地盤面が 2A 橋台の方より 1A 橋台の方が低い⁵⁾。1993 年釧路沖地震のときに地盤面が低く、地盤が相対的に悪いと考えられる方にたっている橋脚に亀裂が発生した⁵⁾。ここでは橋台、橋脚は 1A から 3P にかけて地表面が傾斜しており、地震のときにその方向に地盤が動いて被害が発生したことが考えられる。この川は地盤が良いと考えられる 2A 橋台の方にある 3P 橋脚の近くを流れている。

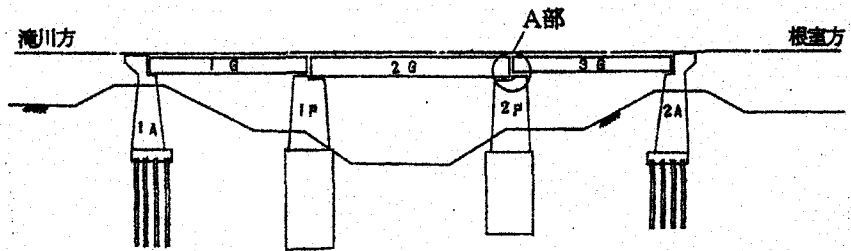


図-5 下頃辺川橋梁の被害と地盤状態⁵⁾

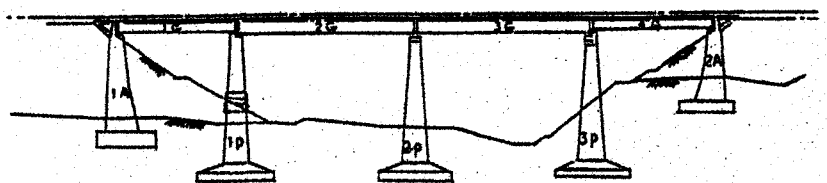


図-6 姫新得川橋梁の被害と地盤状態⁵⁾

g) その他の被害橋梁

以上に述べた橋梁以外にも軸方向の地震被害を受けた例が多く見られる。例えば、昭和大橋(杭基礎)や利別川橋梁(井筒基礎)等¹⁾も軸方向に被害を受けているが、いずれも異種支持地盤状態で被害を受けており、被害原因として地盤に生じた不同変位が考えられる¹⁾。

h) 無被害橋梁の例

例えば、1964 年新潟地震のとき信濃川にかかっている万代橋(ケーソン基礎)は殆ど無被害であったが、図-7 に示すようにここの地盤⁶⁾は互層をなしているが水平方向にほぼ一様な成層構造を示し、強度も深さ方向にほぼ比例する分布を示している⁷⁾。

(2) 橋梁の軸方向変形と地盤の関係のまとめ

以上に述べた橋梁の軸方向の変形と地盤の関係の模式図の 1 例を図-8 に示す⁷⁾。この図では右側の軟質層が薄く左側の軟質層が左側から右側にかけて厚くなっている。このような良い地盤と悪い地盤に跨っている橋梁では、軸方向(図では左右方向)の地震動と残留変位の大きさと方向は地盤構造に対応して発生する。即ち、それらの地盤変位は右側で小さく左側で大きく生じて不同変位が生じるし、橋台裏の盛土荷重は偏載荷重として作用するので、左右の盛土の変位 D_R と D_L はともに橋梁側と反対側よりも橋梁側により大きく生じるが、薄い軟質層上の盛土変位

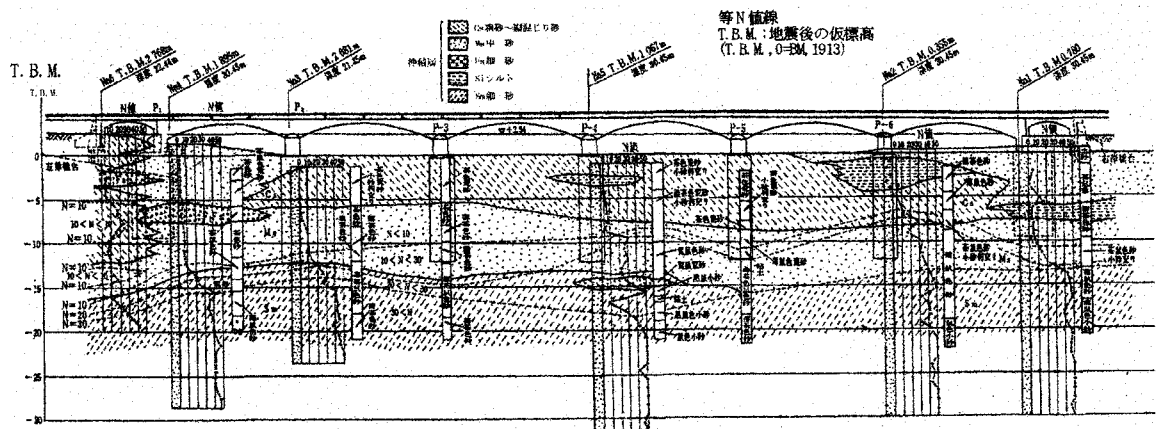


図-7 万代橋と地盤断面図⁶⁾

D_R よりも厚い軟質層上の盛土変位 D_L が大きく生じる。また、盛土変位 D_L がその下の軟質層の緩傾斜底面の傾斜方向の右側に特に大きく生じるのに伴って、左側の A_L 橋台が大きく右側に押し出されるとともにその裏側の盛土が大きく沈下し、さらにその左側の A_L 橋台に図に示すような斜め亀裂が生じることが多く、その上にそれに隣接する P_1 橋脚にも右側への大きい地盤変位に伴う偏土圧が作用して亀裂等の各種被害が生じることが考えられる。

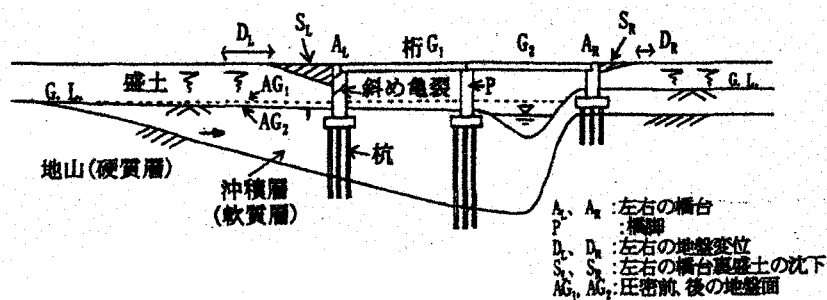


図-8 地震時の橋梁の軸方向の変形と地盤の関係⁷⁾

なお、阪神・淡路大震災で阪神高速道路の札幌地区高架橋の落橋が硬軟地盤境界部(地盤の良い砂堆と地盤の悪い盛土地の境界部)で生じており、その被害は図-8 のような地盤で橋脚間隔(支間)に伸張や短縮が発生して生じたことが考えられる⁷⁾。以上の構造物は地盤変位に抵抗したため被害が発生したと考えられるので地盤変位抵抗型構造物といえる。

万代橋に地震被害が発生しなかったのは地盤が極軟弱層を挟んでいなかったか、あるいは摩擦基礎状態になっていたためと考えられる¹⁾。前者の場合は地盤の動きが弾性的に生じて被害を発生させるような大きい偏土圧が発生せず、後者の場合は地盤とともに橋梁が動いたため(地盤変位に追随したため)、地盤から偏土圧を受けず被害が発生しなかったことが考えられる。

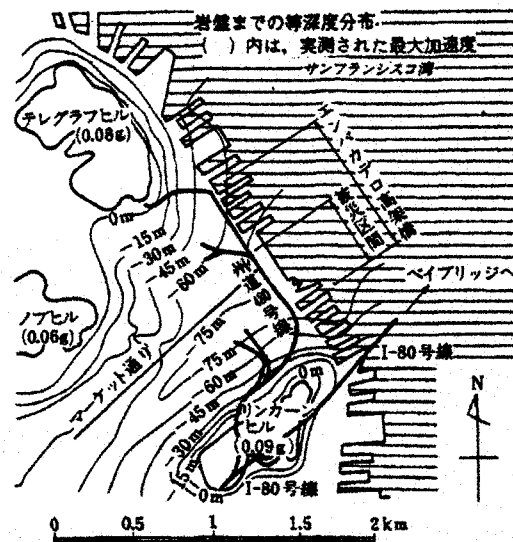


図-9 エンバカデロ高架橋の被害箇所と地盤状態⁸⁾

3. 橋梁の軸直角方向の地震被害と地盤

(1) 被害橋梁と地盤状態

a) エンバカデロ高架橋

サンフランシスコ市のエンバカデロ高架橋(杭基礎)は、図-9⁸⁾に示すようにサンフランシスコ(SF)市街地にくい込んでいる埋没谷のサンフランシスコ湾への出口付近を横断するように北西-南東方向(NW-SE)方向に走っている³⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。1989年ロマプリータ地震で橋軸と略直角方向の谷筋方向に大きい地震力が作用して、橋軸直角方向と平行な橋脚の面に斜め亀裂(せん断亀裂)が発生している⁸⁾¹⁰⁾。その埋没谷には軟弱なベイマッドが堆積し、その被害区間はこの埋没谷内の岩盤面までの深さが75m以上の区間とほぼ一致している。

b) サイプレス高架橋

オークランド市のサイプレス高架橋(杭基礎)は1989年ロマプリータ地震のときに橋軸直角方向に崩壊した。この高架橋は図-10¹⁰⁾に示すように、扇型に近い埋没谷のサンフランシスコ湾への出口付近を横断するように走っている³⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。特に崩壊の著しい区間(約1.2km)は湿地の軟弱地盤の埋め立て地であるが、大部分が旧河道あるいは潟湖跡と思われるところにあり、地盤内には非常に軟弱な粘土層あるいは軟弱なシルト質粘土層等が存在している。しかも、図-11⁸⁾に示すように、中程のNo.74~80橋脚のブロックは他のブロックの被害形態と異なり、東側(山側、同図の右側)の上層階の橋脚は東側に折れ、その付け根に東(右)下がりの斜め破壊面が生じたのは、東側の地盤から強い力を受けたためと推定されるが、この位置は基盤(南側にある大変よく締まった砂層と北側にある固い砂質粘土層)の深さの急変箇所、即



図-10 サypress高架橋周辺の地盤状態⁸⁾⁹⁾

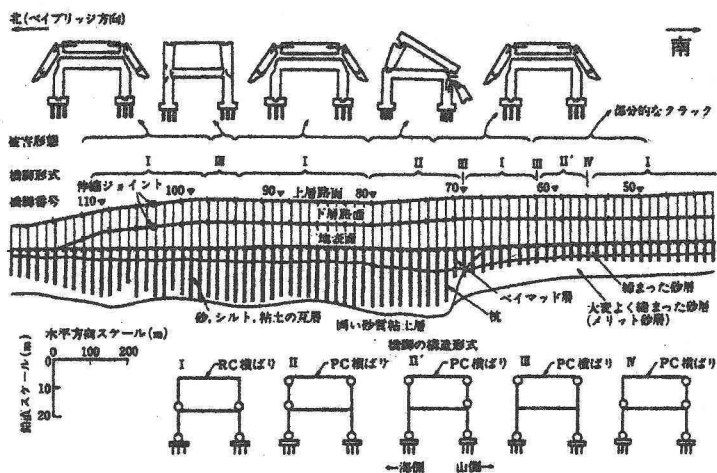


図-11 サypress高架橋の被害状態と地盤状態の関係⁸⁾⁹⁾

ちその上の軟弱層厚さの急変個所に位置しており、いわゆる硬軟地盤境界部即ち地盤条件の不連続点に当たる。また、高架橋の構造形式毎に破壊形態は完全に一致せず、構造形式が異なっても被害形式が同じものがある。ここの地震力はほぼ谷軸方向に大きく作用しており、被害の発生に地盤が大きく影響したことが考えられる。

c) ストラブスルー橋

ワトソンビル市にあるストラブスルー橋(杭基礎、パイルベント方式)では南行車線(西側)と北行車線(東側)の橋梁が並列につくられており、谷間を渡っている³⁾⁹⁾¹⁰⁾。図-12¹⁴⁾に示すように前後両端の橋台が良好地盤上に、その間の橋脚が埋没谷地形内の有機質土からなる湿地帯に存在している¹⁰⁾。

1989年ロムプリータ地震のときに橋軸直角方向(谷軸方向)に大きく変位して南行車線橋梁の中央部分が落橋した¹⁰⁾。橋梁の変形は西側にある南行車線橋梁が東側にある北行車線橋梁よりも極めて大きく、南行車線の桁が東に杭が西に即ちともに橋軸直角方向に大きく変位して桁が落下するとともに、橋脚を構成するコンクリート杭4本が床版を貫通して頭部が突出した。その杭の変形は西側ほど大きい。

図-12よりその南行車線橋梁の桁の落下個所と北行車線橋梁との間に雑木が繁茂していることが分かり、その地盤には砂礫等からなる比較的良好な土層があると考えられる。従って、変形状態と地盤状態から、地震のときに雑木の繁茂する砂礫地盤と東側の北行車線橋梁で地盤の動きが止められたため、即ち両者が不動点のようになったため南行車線橋梁が西

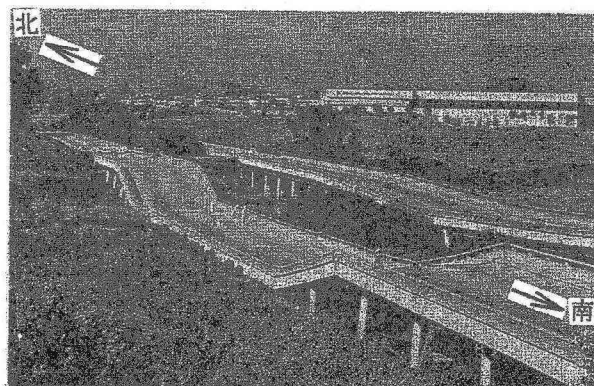


図-12 ストラブスルー橋の被害状態⁹⁾¹⁰⁾

側から強く地盤に押された上に圧縮されたようになってその西側の杭の上部の橋脚が西側に大きく曲がるとともに、東側の杭と橋脚も西側に変位し、さらに桁が相対的に東側に移動したこと等が考えられる。このように東側の北行車線橋梁が基礎がしっかりしていたので、地盤の動きを止める機能を発揮したことが考えられる。このような変形状態は昭和大桥¹⁾の杭と橋脚の地震時の変形状態と似ている。

d) 阪急西宮高架橋

阪急西宮高架橋(杭基礎)では上り線用と下り線用の高架橋が各1本の橋脚(1線1柱式高架橋)で北側と南側に並んでつくられていた。図-13¹¹⁾に示すように1995年阪神・淡路大震災のときに南北に2つ並んだ橋脚の内、北側の上り線用橋脚がせん断破壊し、その上の桁は北側に移動や傾斜、沈下したが、南側橋脚

(下り線用)の被害程度は北側橋脚より軽い¹²⁾¹³⁾。南脇にビルのあるところでは北側高架橋の被害程度が酷くて桁は地表まで落下している。南側の橋脚はその南脇のビルと同様に地盤の動きを止める機能を発揮して、深江地区高架橋のように被害が生じたことが考えられる¹¹⁾。

ここの被害箇所は夙川沿いにある自然堤防の東側にある埋没谷部で洪積層と沖積層の境界部である(図-14¹¹⁾)。この他にこの埋没谷では北側から南側にマンションNや阪神高速道路建石交差点等に顕著な北側への崩壊が生じているが、それは埋没谷の堆積地盤が北側から南側に動いてそれらの構造物の基礎に止められたため、急激な土圧(偏土圧)が、構造物基礎に作用したため生じたことが推定される¹⁾。

図-14において
A: 阪急西宮高架橋
B: 札幌地区高架橋

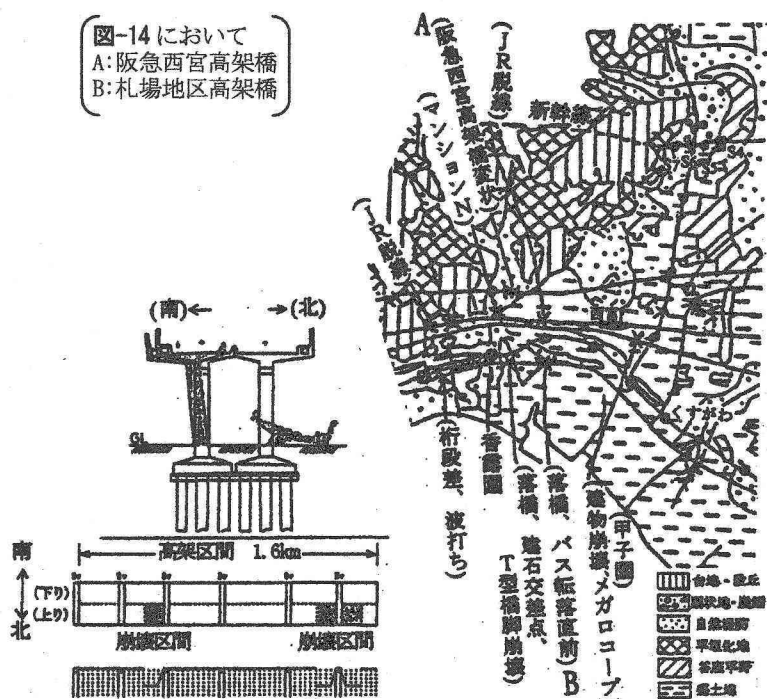


図-13 西宮高架橋の被害状態¹¹⁾¹²⁾ 図-14 西宮高架橋周辺の地盤状態¹¹⁾

e) 六甲道駅高架橋

東海道本線の六甲道駅高架橋(杭基礎)では1995年阪神・淡路大震災のときに橋脚等が破壊し、その上の桁とホームが蛇行状に変形して崩壊が生じた¹²⁾¹³⁾。図-15¹¹⁾¹²⁾に示すように、ここの地盤は花崗岩でできた玉石地帯とまき土

層(この層は軟弱粘土層を挟む)の境界部であり、六甲道高架橋はその境界線(ほぼ南北方向)とほぼ直角に交わって走っている。

高架橋の桁の横方向の移動は図-16¹¹⁾¹²⁾に示すように、線路脇にある大きい建物の存在の有無と対応しており、桁はその建物と反対側の建物の無い方向

- 駅
- 主な被害地点No
- 山地・市街地境界
- 古海岸線(縄文)
- C—— 沖積粘土(2m以上)
- (~20m) 沖積粘土底高
- Pa 古生層
- Rg 花崗岩
- K 神戸層群
- O 大阪層群
- ST 玉石地帯
- S' 砂州
- CL 粘土多質地
- S まき土
- SC 砂、粘土
- F 埋立地
- 河川、旧河川
- 断層、推定断層

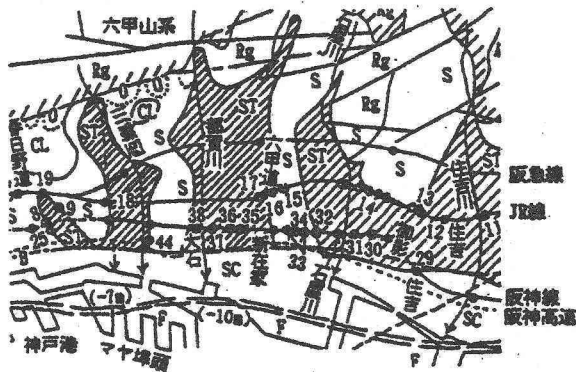


図-15 六甲道駅高架橋周辺の地盤状態¹¹⁾¹²⁾

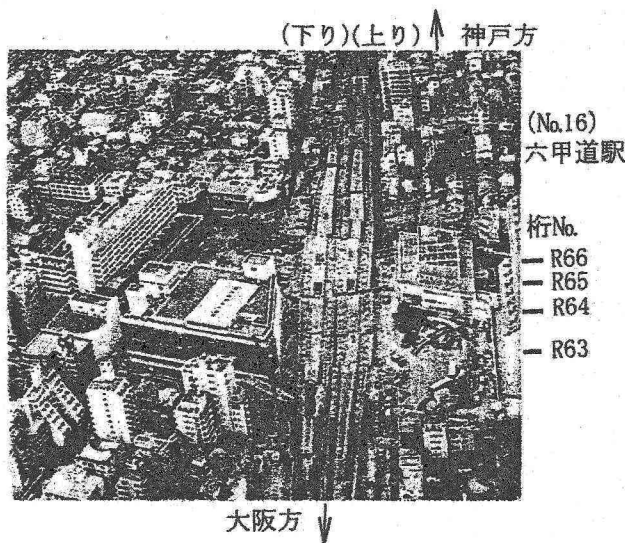


図-16 六甲道駅高架橋の被害状態¹¹⁾¹²⁾

に移動している。このような変状は建物の無い方にある地盤(まさ土層)が高架橋の方に向かって動くが、高架橋と建物のしっかりした杭基礎に止められて急激な大きい偏土圧が基礎に作用したため生じたことが考えられる¹¹⁾。

そのとき建物直下の地盤はその基礎で動きを抑制されているため、その建物と基礎が地盤の動きを止める不動点の役割を発揮したことが考えられる。この被害発生状況は前述の阪急西宮高架橋の被害発生状況と似ている。

f) その他の被害橋梁

以上に述べた橋梁以外にも軸直角方向に地震被害を受けた例として、水深第1高架橋や下食満高架橋、深江地区高架橋(東灘高架橋)等¹⁾があるが、いずれも河道部や埋没谷部を横断しており、その基礎構造も支持杭等であり、表層地盤は砂質土層に軟弱粘性土層が挟在する上下逆転型地盤構造からなることが多い。

g) 無被害橋梁の例

例えば、前述の被害を受けた水深第1高架橋のすぐ近くにあり殆ど無被害の水深第2高架橋(杭基礎)は、第1高架橋と同様に埋没枝谷を横断しているが、図-17に示すようにこの枝谷の堆積土層は極軟弱な粘性土層と腐植土層から構成されている¹⁾。また、1982年浦河沖地震のとき被害を受けた国道静内橋の近くにあつて被害を受けなかったJR静内川橋梁(直接基礎)は、図-18⁶⁾に示すように砂質土層(砂州)に直接基礎を置いている¹⁴⁾。地震のときに前者では極軟弱粘性土層や腐植土層が圧縮性が大きくて基礎に作用する土圧が小さく、後者では基礎と地盤が一緒に動いて地盤から基礎が大きい土圧を受けないため被害が生じないことが推定される。

(2) 橋梁の軸直角方向の地震被害と地盤の関係のま

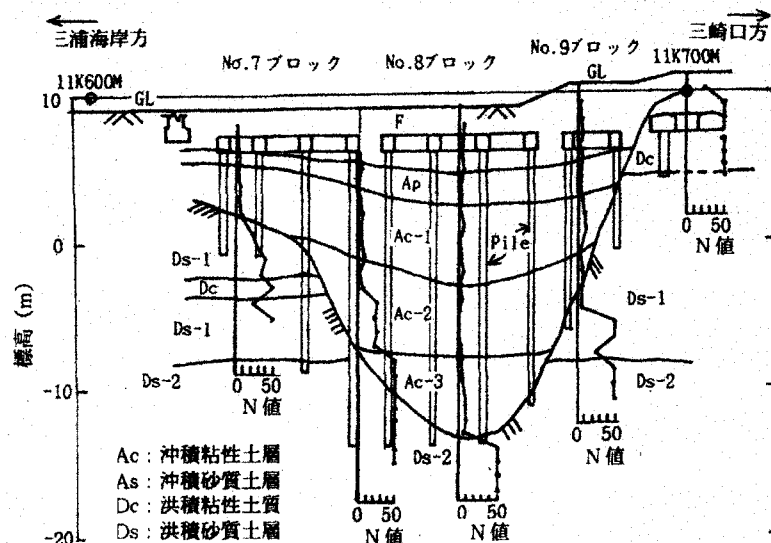


図-17 水深第2高架橋と地盤断面図⁷⁾

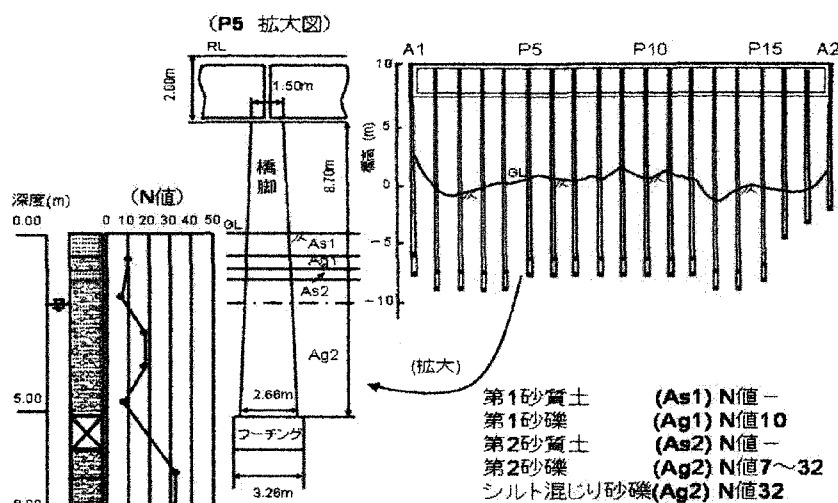


図-18 JR静内川橋梁の全体図と地盤断面図⁶⁾

とめ

以上に述べた軸直角方向に地震被害を受けた橋梁の変形と地盤の関係を次にまとめるとともに、被害原因を推定する。

- エンバカデロ高架橋やサイプレス高架橋等の亀裂等の被害形式(単純な斜め亀裂、タスキ掛の亀裂、ハの字型の亀裂その他)がお互いに似ている。
- エンバカデロ高架橋等は埋没谷の堆積地盤が上下逆転型地盤で谷軸方向に動いて被害が生じたが、堆積地盤が極軟弱層からなるときは無被害である。このような例は他の地震被害でもみられる。それは上層の比較的硬い砂・礫質土層の地盤反力係数が極軟

弱層より大きく基礎に与える力(偏土圧)が大きく作用するためと考えられる¹¹⁾¹²⁾。

c) いずれの橋梁も支持杭状態で被害を受けており、その被害は図-19 に示すように、基盤に拘束された杭が表層地盤の動きに抵抗して地盤の動きを止めて、杭や基礎に急激な大きい偏土圧が作用して生じたこと等が考えられる¹¹⁾¹²⁾。それは、JR 静内川橋梁のように地盤の動きに抵抗しないと考えられる摩擦杭や直接基礎をもつ構造物に被害がみられないこと等からも分かる³⁾。前者の被害構造物は地盤変位抵抗型構造物、後者の構造物は地盤変位追従型構造物と言える。

d) 上下逆転型の互層地盤が杭等によって言わば釘付けにされて人工的にできた硬軟地盤境界部(地盤条件の不連続点)で発生する不同変位に伴って、大きい偏土圧が発生して被害が生じたことが考えられる。

4. 結論

以上の橋梁の軸方向と軸直角方向の地震被害と地盤の関係をまとめると、次のように橋梁被害と地盤との関係に共通性が見られる。

地震時の橋梁の軸方向の変形が異種支持地盤状態で発生した例が多いが、その変形は地盤構造(形状と土層構成)に対応して発生する地盤の動的変位(不同変位)あるいは残留変位(大きさと方向)に対応して生じていることが推定される。

橋梁の軸直角方向の被害も、自然に出来た地盤条件の変化点にあつて異種支持地盤状態にある橋梁が軸方向に地震被害を受ける場合と同様に、人工的にできた地盤条件の不連続点で発生する地盤変位(不同変位)によって生じることが考えられる。即ち、いずれの場合も比較的大きく動く地盤と動かない(動きの小さい)地盤の境界部で被害が発生しており、地盤変位抵抗型の橋梁で被害が発生しやすく、地盤変位追従型の橋梁で被害が発生しにくいことが推定される。

終わりに、以上の調査に当たってお世話になった方々と、引用させていただいた文献の著者に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 那須誠：橋梁の地震被害への地盤変位の影響の考察，第 5 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 189-196，土木学会，2002. 1.
- 2) 那須誠：地震被害を受けた橋梁と地盤，第 54 回土木学

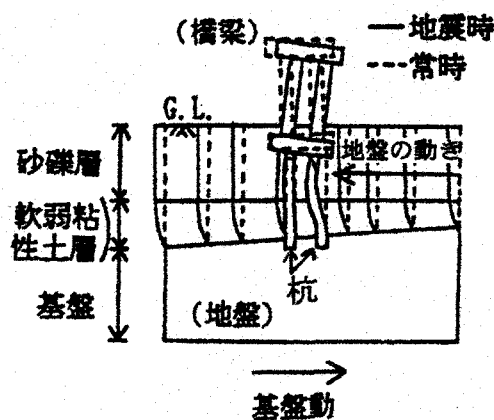


図-19 橋梁の軸直角方向の被害機構の推定図⁷⁾

- 会年次学術講演会講演概要集，I-B512，pp. 1020-1021，1999. 9.
- 3) 那須誠：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.
- 4) 西村昭彦，那須誠，渡辺忠朋：釧路沖地震および北海道南西沖地震の被害報告，鉄道総研報告，Vol. 8，No. 5，pp. 7-12，1994. 5.
- 5) 北海道旅客鉄道株式会社編：1993 年釧路沖地震被害調査資料(1993)。
- 6) 土木学会新潟震災調査委員会編：昭和 39 年新潟地震震害調査報告，(社)土木学会，1966. 6.
- 7) 那須誠：地震による被害構造物と無被害構造物の地盤の違い，土木建設技術シンポジウム 2003 講演論文集，pp. 299-306，2003. 7.
- 8) 耐震工学委員会編：ロマプリータ地震震害調査報告，土木学会論文集，No. 422/ I-14. 1990. 10.
- 9) 那須誠：地震被害と地盤条件(その 13)，第 11 回日本自然災害学会学術講演会要旨集，pp. 68-69，1992. 11.
- 10) 1989 年ロマプリータ地震によるサンフランシスコ湾岸地域等の被害に関する調査研究，文部省科学研究費(No. 01102044)報告書，No. B-1-3，p. 163(1990)。
- 11) 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，土木学会，pp. 123-130，2000. 7.
- 12) 那須誠：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，土木学会，C-8，pp. 271-278，1996. 1.
- 13) 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)，第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，C-7，pp. 185-192，1997. 1.
- 14) 鈴木秀晴，那須誠：橋梁の地震被害箇所と無被害箇所の地盤，第 23 回日本自然災害学会学術講演会要旨集，No. I-1-3，pp. 5-6，2004. 9.