

1. まえがき

阪神・淡路大震災で生じた多数の橋梁等の構造物の被害を地盤条件に着目して調べている。その結果、各種構造物の被害は硬軟地盤境界部等の地盤条件の不連続点で多く、さらに砂・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が分かった。今回は、構造物を新設するときの耐震設計や既設構造物の耐震補強・補修並びに耐震診断を行う際の参考に供するために、構造物の被害がどのような地盤で、地盤がどのように動いて生じたか推定した結果等について報告する。

2. 構造物の被害状態と地盤状態の関係

地形図や地盤条件図や土質調査結果等をもとにして構造物直下の地盤状態並びに周辺の地形を調べるとともに、被害構造物の変形状態と地盤及び基礎の関係を調べた。その主な例を次に示す¹⁾²⁾。

(1) 下食満高架橋では、2 箇所 S1a と S1b で橋軸直角方向に落橋が生じた(図 1)。前者の橋脚に左上から右下に下がる斜め亀裂が生じて、上部橋脚が右(北東)側に落下し桁も右側へ傾斜、移動した。後者も橋脚に右上から左に下がる斜め亀裂が生じて、上部橋脚が左側に落下し桁も左(南西)側に傾斜、移動した。旧版地形図によると、S1a は自然堤防 S の南東側の埋没谷に、S1b は自然堤防 S とその北西方向にある自然堤防 N の間の埋没谷の田圃に位置する。S1a 全体と S1b の起点寄りの部分ではともに地盤面(G. L.) 標高 0. P. +5m の等高線に直角方向で G. L. が低くなる方向に、地盤が地震時に急激に動いたため被害が生じたことが推定される³⁾。

(2) 落橋が生じた阪水高架橋～神呪高架(図

2) の内、阪水高架橋 S4 は扇状地・崖錐と盛土地や谷底平野・氾濫平野との境界部、松林寺高架橋 S5 は扇状地・崖錐と盛土地との境界部、今津線線路橋 S6 は扇状地・崖錐と盛土地と低地の微高地との境界部、神呪高架橋 S7 は扇状地・崖錐と低地の微高地との境界部である。S4 は道路の東側、S5 は比較的大きい道路の真上、S6 は地類境界(地質境界) 上、S7 は比較的大きい道路沿いの南東側にあり、これらは昔からの道路沿いや地質境界線沿いにあり、昔は道路が地質境界に作られることがあり、地質境界で被害が多く生じている³⁾。

(3) 桁落下や橋脚亀裂、破壊等が生じた伊川橋梁(図 3)は台地・段丘と谷底平野の境界部にあって異種支持地盤状態にあり、崩壊位置の起点方の地盤は深さ方向に強度が大きくなる地盤で、終点方の地盤は谷底平野でか

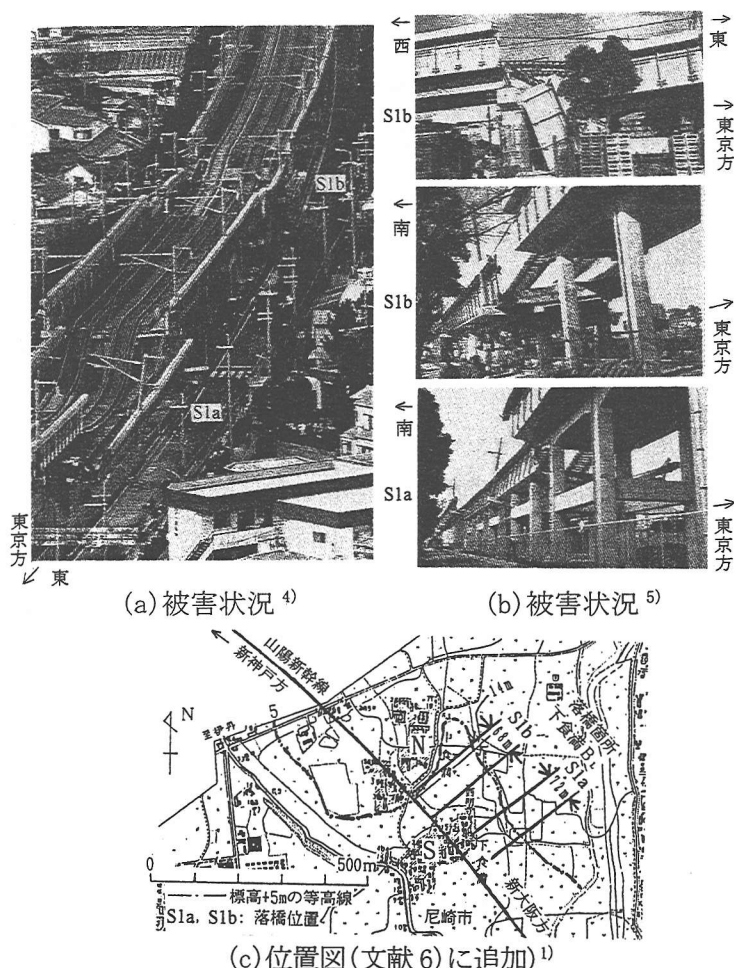


図 1 新幹線下食満高架橋の変状と地盤

キーワード：阪神・淡路大震災、構造物被害、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

つ上下逆転型地盤であるため、橋脚間が伸縮して被害が発生したことが考えられる³⁾。

(4) JR 六甲道駅高架橋では橋脚等が破壊し桁とホームが蛇行状に変形して崩壊した(図 4)。地盤は玉石地帯 ST 層とまさ土 S 層(軟弱粘土層を挟む)の境界部で高架橋はその境界線とほぼ直角に交わる。高架橋の桁の横移動は線路脇の大きい建物の有

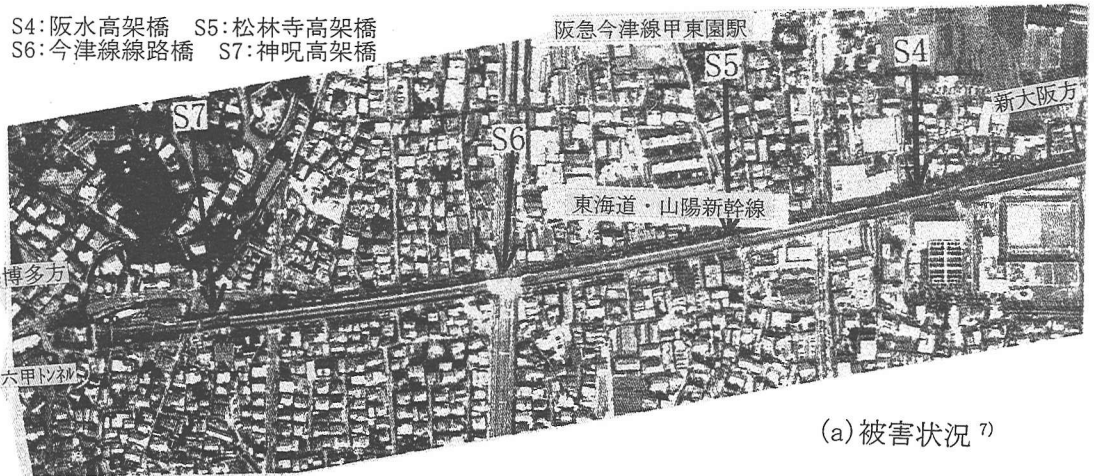
無に対応し、桁は建物と反対側の建物の無い方に移動しており、建物の無い方の地盤(まさ土層)が高架橋の方向に動いて杭基礎に急激に止められたため、基礎が地盤から強い力を受けて被害が生じたこと等が考えられる。

(5) 阪急西宮高架橋(図 5)では、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、かつ南側に建物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であり、地盤が北側から南側に急激に強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では、北側から南側に阪急西宮高架橋、マンション N(安井町)、阪神高速建石交差点等で顕著な被害が生じた。

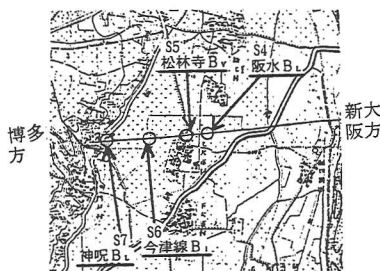
(6) 崩壊した阪急伊丹駅高架橋(図 6)は洪積層の段丘堆積物と沖積層に跨って作られており、桁等は東側に移動や傾斜し、沖積層上の北部(図 6(a)の C 点)の被害程度が著しい。旧版地形図¹⁶⁾によると、駅は旧集落(自然堤防)の西端に接する埋没谷に作られているので、埋没谷の表層堆積層が埋没自然堤防表面の傾斜方向の東から西方向に強く動いたことが推定される。

(7) 阪急宝塚・南宝塚間高架橋(図 7)で上り電車が脱線したが、その橋は武庫川の北東脇の自然堤防の縁にあり宝塚大劇場の北東脇を走る。橋梁側壁に食違ひ(図 7(a), (b)の D₁, D₂)があり、脇の平成 5 年完成の宝塚大劇場にも

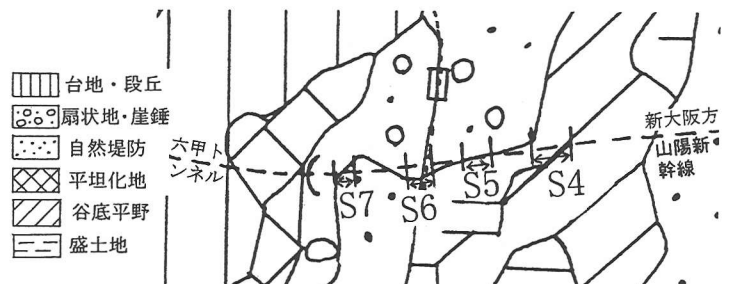
S4: 阪水高架橋 S5: 松林寺高架橋
S6: 今津線線路橋 S7: 神呪高架橋



(a) 被害状況⁷⁾

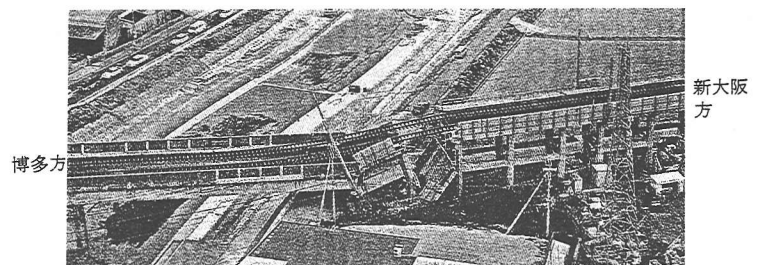


(b) 位置図(文献 16)に追加

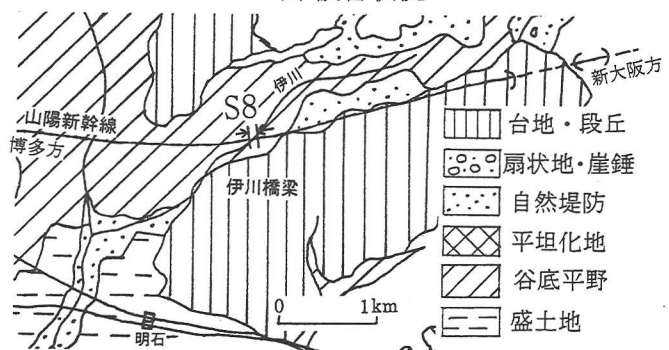


(c) 地盤状態図(文献 8)に追加

図 2 新幹線阪水高架橋～神呪高架橋の変状と地盤



(a) 被害状況⁹⁾



(b) 地盤状態図(文献 8)に追加

図 3 新幹線伊川橋梁の変状と地盤

各種被害が生じており、この付近の地盤が特異な動きをしたことが推定される¹⁷⁾。

(8) 図8の阪神高速札場高架橋の落橋は図5(e)のB地点で自然堤防と埋没谷の境界部で両者に跨った部分で生じ、前者は地盤がよく后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。異種支持地盤状態にあったため地盤に不同水平変位が生じて被害が生じたことが考えられる。

(9) 阪神高速東灘高架橋の北側への倒壊は芦屋川沿いの自然堤防と旧深江集落がある自然堤防の間の埋没谷部で生じた(図9)。埋没谷の東西両端の橋脚2本(図9(a), (b)のE, F点)が最も顕著にせん断破壊し、主鉄筋段落し部に南上から北

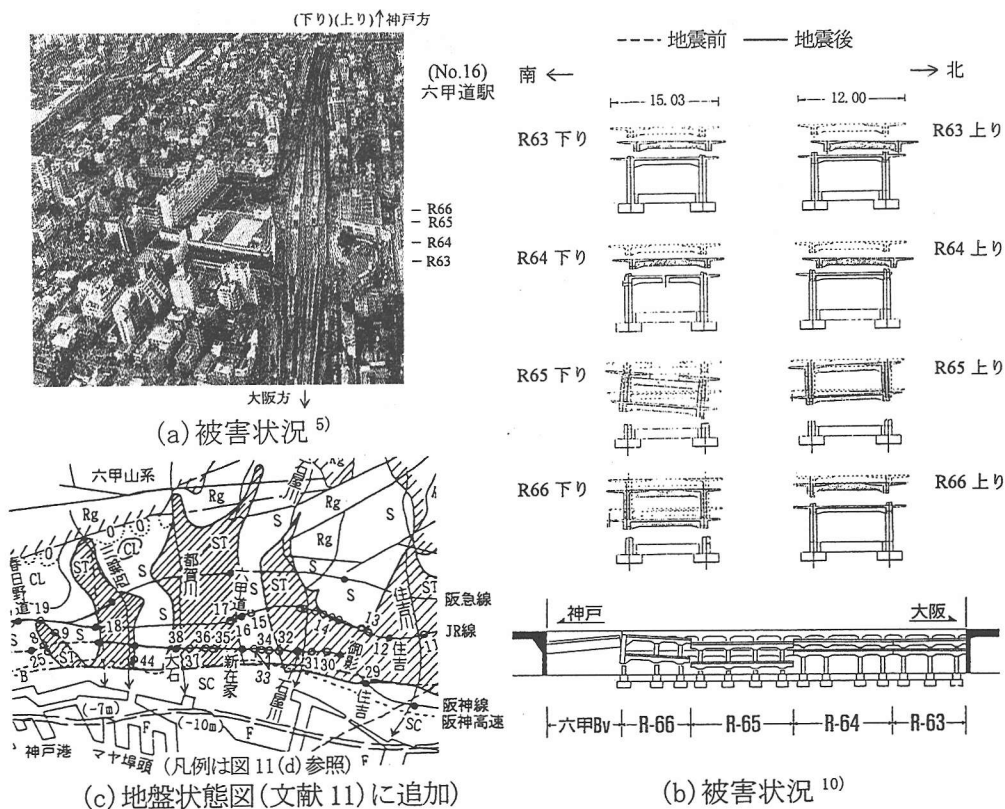


図4 JR六甲道駅高架橋の変状と地盤

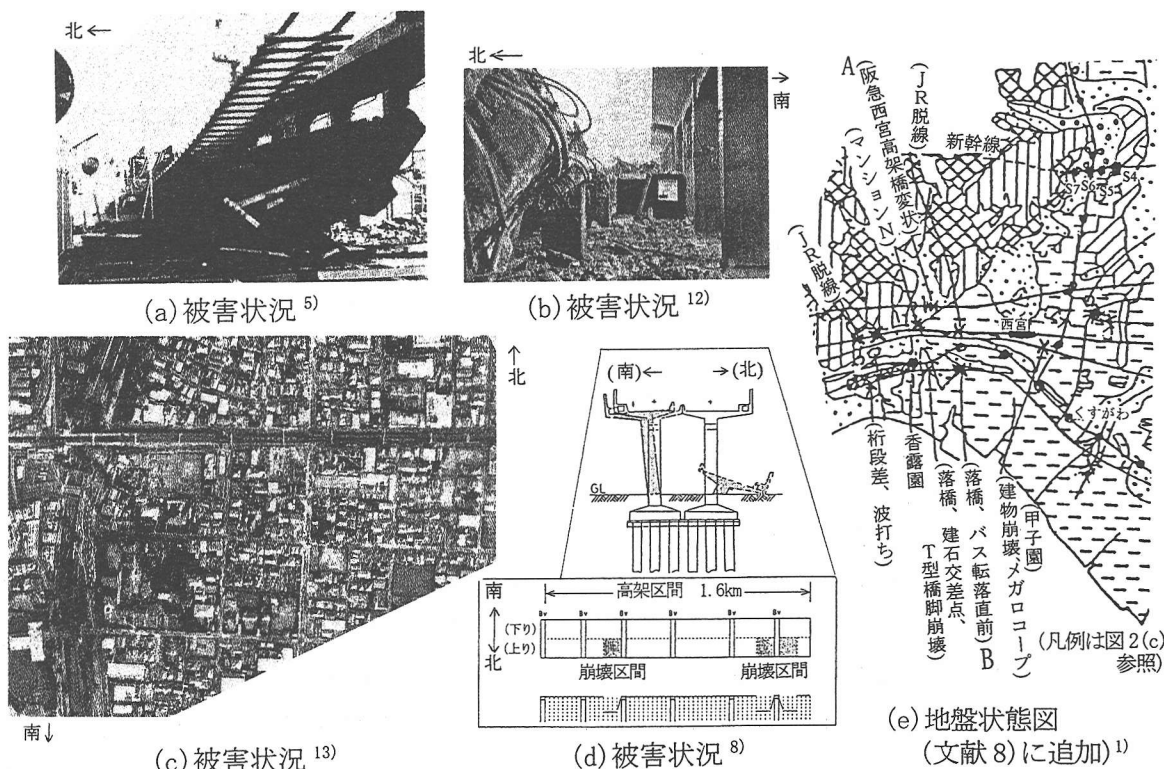
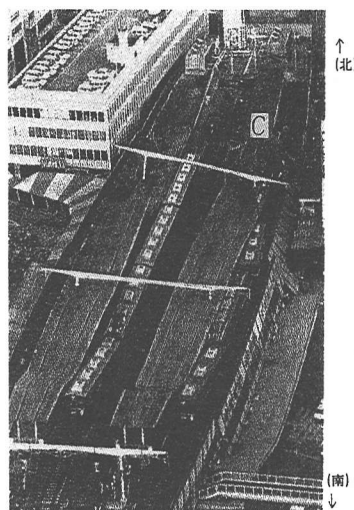


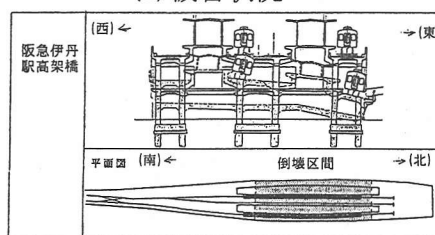
図5 阪急西宮高架橋の変状と地盤

に下がる斜め亀裂が生じた。その間の橋脚は両端の橋脚の倒壊に引きずられて屏風倒しのように倒壊したことが考えられる。ここでは谷筋方向に北側から南側に急激に動いた表層地盤が、その基礎に急激に止められて大きい偏土圧が基礎に作用したため北側に倒壊したことが推定される。埋没谷で被害を受けた阪神石屋川車両基地(図4(c)のNo.34地点)も埋没谷堆積層の谷軸方向の急激な動きで被害を受けたことが考えられる。

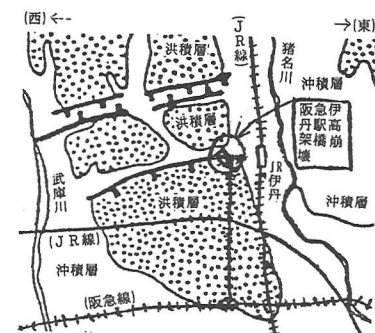
(10) 神戸市役所 2 号館(図 10)は柱工法変化階の 6 階が潰れて上層階が北側と東側に移動した。その建物は旧版地形図³⁾をみると南北に細長い自然堤防と埋没谷の境界部に斜交して造られていて異種支持地盤状態にあったため、その自然堤防の細長い方向と平行に南側に埋没谷堆積層が急激に強く動いて基礎に強い力が作用し、その反作用として建物の上層階が北と東の両方向に変形したことが考えられる。阪急三宮駅(図 10)の東側壁面に南上より北に下がる大きい斜め亀裂が生じた建物は ST 層と S 層の境界部に造られている。地震で北側の地盤が南側に動いたとき南側の線路構造物が不動点のようになり、基礎等が北側から地盤に強く押されて被害が生じたことが考えられる。JR 三宮駅(図 10)の西側壁に南上から西に下がる斜



(a) 被害状況¹⁴⁾



(b) 被害状況¹²⁾



(c) 地盤状態図(文献 15)に追加



(d) 位置図(文献 16)に追加

図 6 阪急伊丹駅高架橋の変状と地盤

め亀裂が生じた建物は ST 層の南端部の古海岸(縄文海岸)線付近にあり、南側の砂・粘土 SC 層との境界部に位置する。高架橋が北側にありその亀裂から南側の地盤と北側の地盤が建物の方へ強く動いたことが推定される。(11) 生田神社(図 11)で拝殿が南側に倒壊したが、ST 層(東側)と砂・粘土 SC 層(西側)と S 層(北側)の境界部にあり、旧版地形図³⁾によると山裾に作られて昔は池があった。地震で南側の動きやすい SC 層が北側に動いたとき、北側の比較的硬い S 層が不動点のようになって被害が生じたことが考えられる。南東部が甚だしく崩壊した三菱銀行兵庫支店と 1 階が潰れた兵庫警察署はともに硬い ST 層と動きやすい粘土多質地 CL 層の境界部に作られており、両者は生田神社と同様な地盤の動きで被害が生じたことが考えられる。

なお、地震でほぼ無被害の構造物の例として¹⁾²⁾、図 12 に示す神戸税関旧本館²⁷⁾がある。その地盤は砂・礫層の下に軟弱な粘性土層がある上下逆転型地盤であり、基礎は最上層の礫混じり粗砂層内の摩擦杭である。

3. 地震被害機構の推定

以上に述べたことと既存の調査結果¹⁾⁻³⁾²⁶⁾²⁸⁾から、次に構造物の地震被害機構等を推定する。

(1) 図 13 に構造物の地震被害の有無を地盤と基礎構造から分類して示す。a~c のように基盤上の表層地盤が一様なときは、直接基礎、摩擦杭、支持杭いずれの場合も被害が生じにくい。d~f の上下逆転型地盤のうち、直接基礎 a と摩擦杭 e の場合に被害は生じにくい、支持杭 f の場合には被害が出やすい。また、g~i の異種支持地盤ではいずれの基礎の場合でも被害が生じやすい。その被害機構は図 15~16 のように推定される。

(2) 地震被害は地盤強度の深度分布が図 14(a)のような場合に少なく、図 14(b)のような場合に多くみられる²⁾。

(3) 橋梁の橋軸方向の被害機構は図 15(1)のように考えられる。地盤条件の不連続なところでは地震時の地盤変位は砂礫層のみの所よりも軟弱粘性土層上の砂礫層の所の方が大きいので、例えば(d)のように橋梁が右側に動くときは P2, P3 橋脚間が縮み桁 G1 の端部が落下する。橋軸直角方向の被害機構は図 15(2)のように考えられる。基盤に拘束された支持杭では、地震時に軟弱粘性土層上の砂・礫層が右から左側に動くとき、右側の杭は地盤から強い力を受けて大きく押されて(せん断力と圧縮力が作用して)斜め亀裂が発生し、左側の杭は受け

る力が小さいので(せん断力と引張り力が作用して)水平亀裂が発生する。その杭の亀裂等はフーチングと杭の接続部あるいは土層境界部に発生する。なお、地盤からの強い力がフーチングに作用するときには、橋脚等の上部工に亀裂や破壊等の変状が発生する。図 15(2)の現象が生じるのは基盤に拘束された支持杭を持つ構造物基礎が地盤条件の不連続性を自ら作ったため、即ち構造物基礎自体が不動点のようになって地震時の急激な地盤の動きを止めるため構造物基礎に強い力が作用するためと考えられる¹⁾²⁾。

(4) 建物の地震被害と地盤と基礎構造の関係をみると、異種支持地盤状態では不同地盤変位で被害が生じることが考えられるが、それ以外のときの地震被害は図 16(a)のように杭が基盤に拘束されているときは地盤の動きを止めて大きい偏土圧が作用して被害が生じやすく、図 16(b)のように摩擦杭あるいは直接基礎のときは基礎が地盤と一緒に動くため地盤から力を受けず被害が生じないと考えられる²⁶⁾。

(5) 以上に述べたように地盤条件の不連続点で地震被害が生じやすいが、上部工では例えば図 17²⁷⁾のような各種の剛性変化点の部位等で地震被害が多く見られる²⁸⁾。

従って、地震被害を軽減するためには剛性変化点を無くするか、剛性変化度を低減することが必要と考えられる。

4. あとがき

以上に述べてきたことを次にまとめる。地震被害が多い地盤条件の不連続点には硬軟地盤境界部と構造物基礎が自ら作った不連続点があり、ここで発生する不同地盤変位による大きい偏土圧によって被害が発生すること、即ち地震被害は動く地盤と動かない地盤の境界部で発生しやすいと考えられる。従って、地震被害を軽減するためには地盤条件の不連続点をなくすることが必要であり、そのためには異種支持地盤は水平方向に一樣な地盤に改良して同種支持地盤にすること、上下逆転型地盤は上下方向に一樣な地盤に改良するか、基礎を摩擦杭や直接基礎、浮き基礎にすること等が必要と考えられる。終わりに、以上の調査でお世話になった多くの方々に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

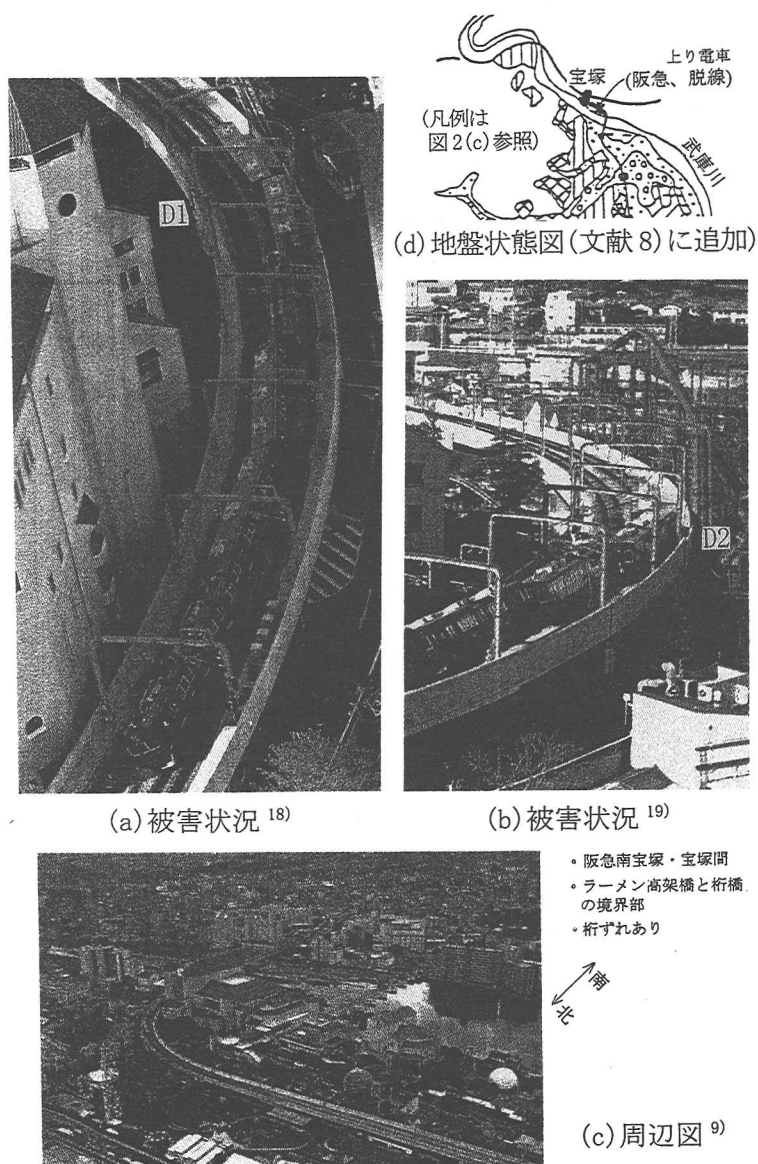
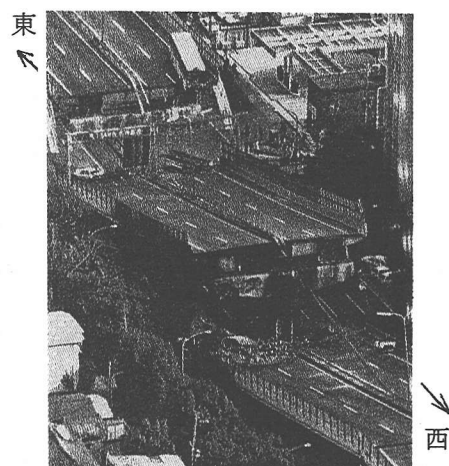


図 7 阪急宝塚・南宝塚間高架橋の変状と地盤



(位置と地盤は図 5(e)の B 地点参照)

図 8 阪神高速札幌高架橋の被害状況¹⁹⁾

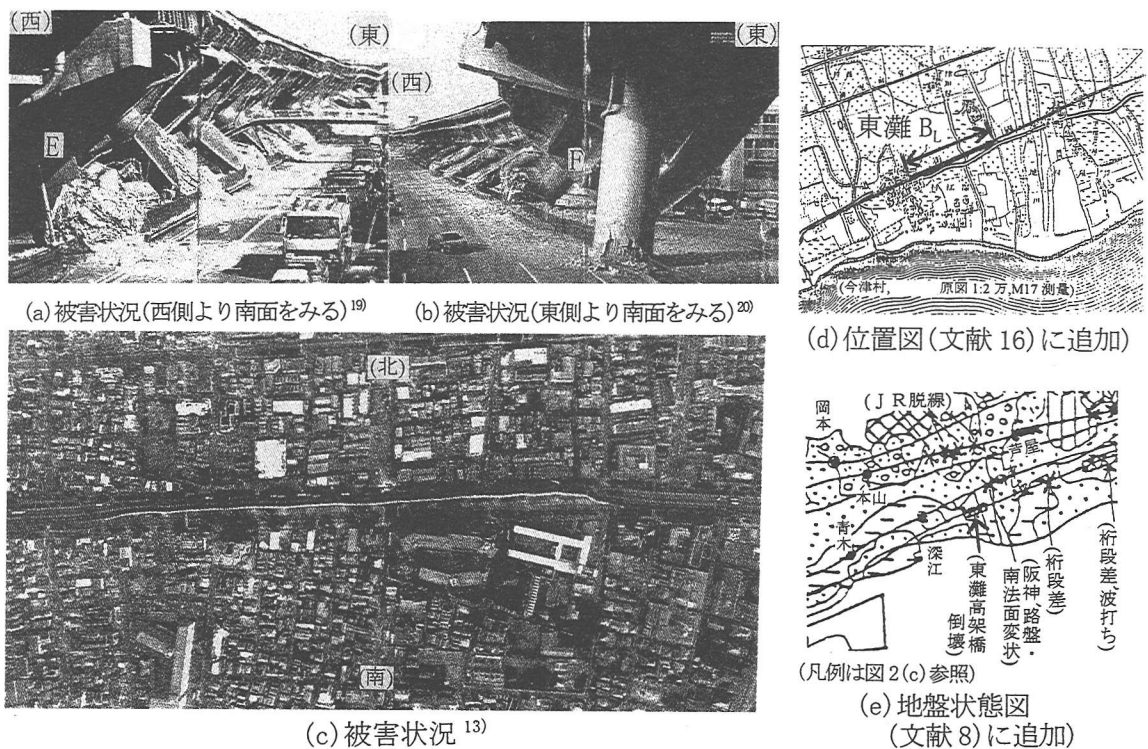


図 9 阪神高速東灘高架橋の変状と地盤

1) 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, pp. 271-278, 1996. 1. 2) 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, pp. 185-192, 1997. 1. 3) 那須誠, 北村直

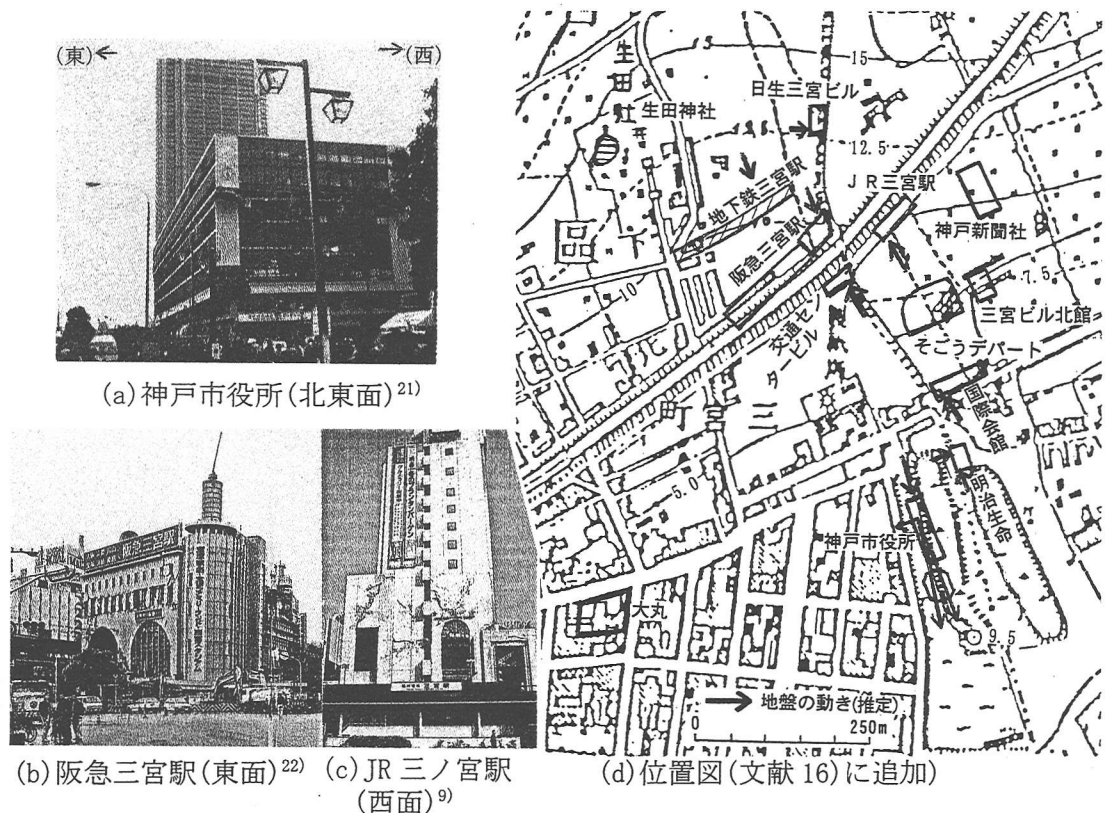
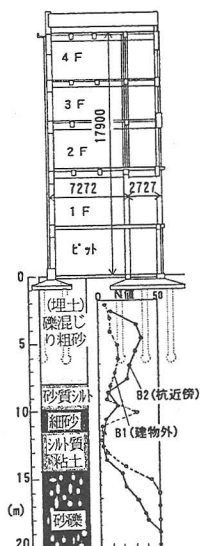


図 10 神戸市役所, 阪急三宮駅, JR 三宮駅の変状と地盤

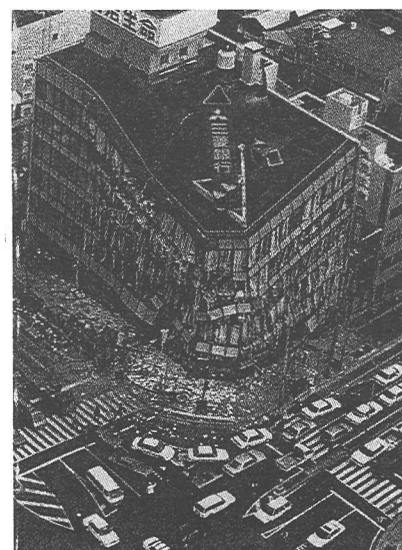
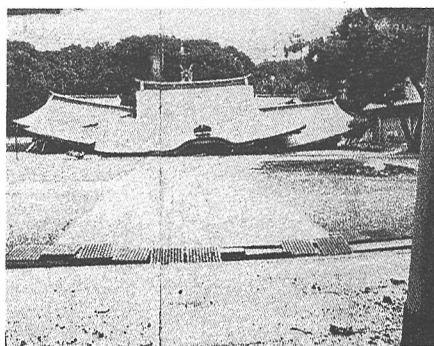
樹: 阪神・淡路大震災における高架橋の被害と地盤と基礎の関係, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 9-12, 1999. 7. 4) 緊急増刊, 神戸大震災, 産経新聞社, 1995. 1. 27. 5) 1995 年兵庫県南部地震調査報告書, 清水建設(株)技術研究所, 1995. 2. 6) 地形図, 1:1 万, 尼崎東北部, 1923 年測量, 1952 年第 2 回測量, 1956. 3. 7) 平成 7 年阪神大震災被害調査報告書, パシフィックコンサルタンツ(株)総合研究所, p. 109, 1995. 1. 8) 土地条件調査報告書付図(京都・播磨地域), 国土地理院, 1966. 9) 日経アーキテクチャ編: 阪神大震災の教訓, 日経 BP 社, 1995. 3. 10)

高瀬義夫・向田守・柳原純夫：RC
 構造物のジャッキアップ—阪神大震
 災・JR 六甲道駅復旧工事，第 8
 回土木技術セミナー，(株)奥村
 組，pp. 111-114，1995. 11. 11)
 藤田和夫・笠間太郎：神戸地域の
 地質，地質調査所，1983. 12)鉄
 道施設耐震構造検討委員会編：
 兵庫県南部地震による鉄道施設
 の被災に関する調査(中間整
 理)，1995. 8. 13)阪神・淡路大
 震災航空写真集，アシア航測
 (株)，1995. 6. 14)読売新聞社編，
 阪神大震災全記録，1995. 4.
 15)土地条件調査報告書(大阪地
 区)，国土地理院，1983. 3. 16)
 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. 17)那
 須誠，菊池保孝：阪神・淡路大震
 災における列車脱線への地盤と
 路盤の影響，鉄道力学論文集-シ
 ンポジウム発表論文，第 3 号，pp. 71-
 76，1999. 6. 18)週間読売，臨時
 増刊，神戸壊滅，1995. 2. 7. 19)
 神戸新聞社：阪神大震災全記
 録，1995. 3. 20)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. 21)
 日経アーキテクチャ編：
 阪神・淡路大震災
 の教訓(復興編)，
 地震に強い建築，
 日経 BP 社，pp. 12
 -13，1995. 5.
 22)アサヒグラフ，
 1995. 3. 3. 23)
 毎日ムックドキュメント
 阪神大震災全記
 録，1995. 4. 24)
 アサヒグラフ，1995.

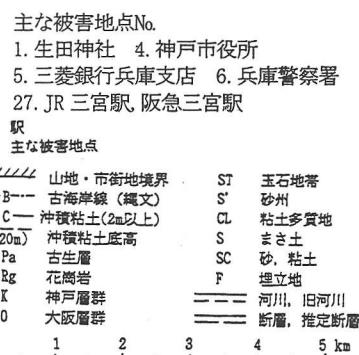
図 12 神戸税関旧本館
 の基礎と地盤²⁵⁾



(a) 生田神社の被害状況²³⁾



(c) 三菱銀行兵庫支店の被
 害状況(南東面)²⁴⁾



(d) 地盤状態図(文献 11)に追加¹⁾

図 11 生田神社と三菱銀行兵庫支店の変状と地盤

	基礎無し(直接基礎)	基礎有り(摩擦杭)	基礎有り(支持杭)
連続地盤	(a) 無被害 G.L. 構造物 硬地盤あるいは軟地盤 硬地盤	(b) 無被害 G.L. 構造物 杭 軟地盤 硬地盤	(c) 無被害 G.L. 構造物 軟地盤 杭 硬地盤
不連続地盤(互層地盤)	(d) 無被害 G.L. 構造物 GS SC 硬地盤	(e) 無被害 G.L. 構造物 GS 杭 SC 硬地盤	(f) 被害 G.L. 構造物 GS 杭 SC 硬地盤
不連続地盤(水平・鉛直方向)	(g) 被害 G.L. 構造物 GS SC 硬地盤	(h) 被害 G.L. 構造物 GS 杭 SC 硬地盤	(i) 被害 G.L. 構造物 GS 杭 SC 硬地盤

- (1) 構造物には盛土，建物，橋梁等を含む。但し，(f)の盛土は無被害。
- (2) 基礎には杭，井筒，地下室等を含む。
- (3) G.L.: 地盤面，GS: 砂，礫層，SC: 軟弱粘土，腐植土層
- (4) (g)~(i): 異種支持地盤
- (5) (g)~(i)において，GS+SC が軟地盤(SC)の単層の時も被害有り。

図 13 構造物に地震被害が発生しやすい地盤と
 基礎構造の関係

2.3. 25) 沼上清・川辺一洋・豊島光夫・佐々木幹雄・栗山秀彦:70 年前に施工されたペデスタル式コンクリート杭の調査(その1;神戸税関旧本館における鉛直載荷試験),第32回地盤工学研究発表会発表講演集, No. 829, pp. 161-1662, 1997. 7. 26) 那須誠:地震による建物被害への杭基礎の支持状態と地盤構造の影響,第17回日本自然災害学会学術講演会要旨集, pp. 63-64, 1998. 10. 27) 菊地春海:建設省における道路橋の震災後の取り組み,橋梁と基礎, Vol. 30, No. 8, pp. 29-31, 1996. 8. 28) 那須誠:各種構造物の問題発生と不連続点,土木学会第27回関東支部技術研究発表会講演概要集, I-1, pp. 1-2, 2000. 3.

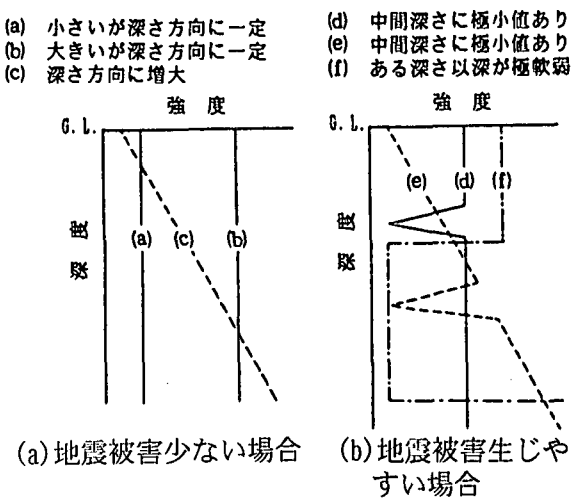
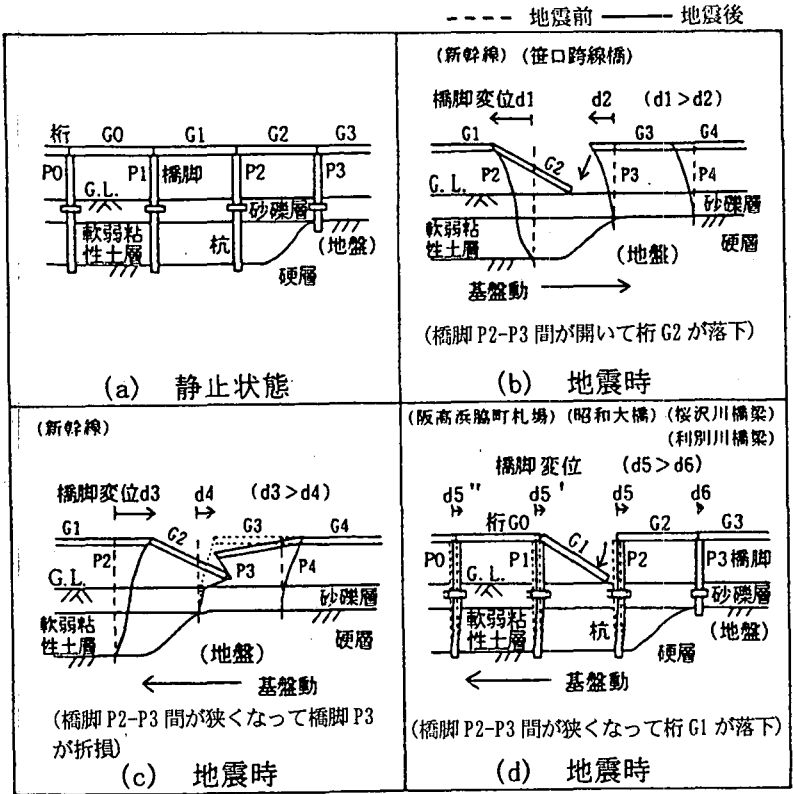


図 14 地盤強度の深度方向分布²⁾



(1) 橋軸方向²⁾

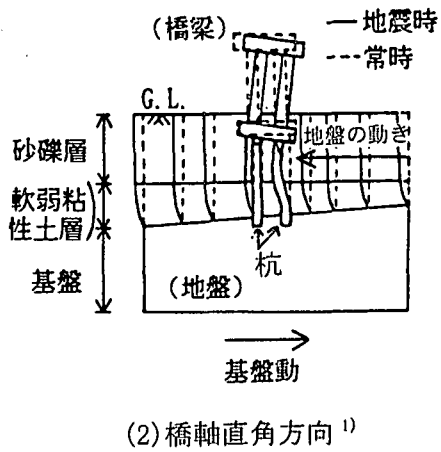


図 15 橋梁の地震被害機構の推定図

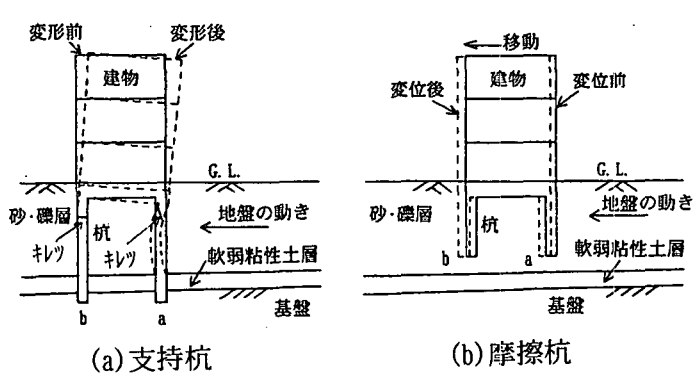


図 16 建物の地震被害への地盤と基礎構造の影響の推定図²⁶⁾

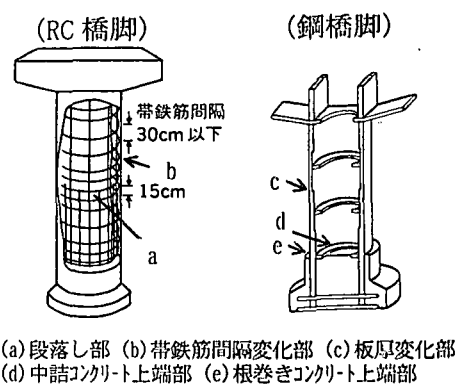


図 17 地震被害生じやすい部位の例(文献 27)に追加)