

地震による被害構造物と無被害構造物の地盤の違い

那須 誠

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)

各種構造物の地震被害機構と対策工法を明らかにする資料を得るために、地震で被害を受けた盛土や建物や橋梁等の地盤と、無被害のそれらの構造物の地盤をまとめた結果、両地盤の違いがみられた。被害構造物は地盤条件の不連続点、即ち自然にできた硬軟地盤境界部や剛な基礎を持つ構造物自身が作った人工的な不連続点に作られており、無被害構造物は硬地盤や水平方向に一樣な地盤に作られている。砂・礫土層の下に軟弱な粘性土層等がある互層地盤で被害が多く生じ、直接基礎や摩擦杭基礎、浮き基礎等の地盤に追従して動く構造物に被害が少なく、地盤条件の不連続点に作られて地盤の動きに抵抗する構造物に地震被害が多いので、被害原因として地盤の不連続点に発生する不同変位やそれに伴う偏土圧が考えられる。

キーワード:地震, 被害構造物, 無被害構造物, 地盤構造, 地盤条件の不連続点, 地盤変位, 偏土圧

1. はじめに

現在、構造物の地震被害機構と対策工法を明らかにする資料を得るために、各種構造物の地震被害を地盤に着目して調べている^{1)~6)}。今回、地震で被害を受けた盛土や建物や橋梁等の地盤と、被害を受けていないそれらの構造物の地盤をまとめて、両構造物の地盤の違いがあることと、基礎構造と地盤の動きも地震被害に関係することが推定されたので、その結果と推定した被害機構について報告する。

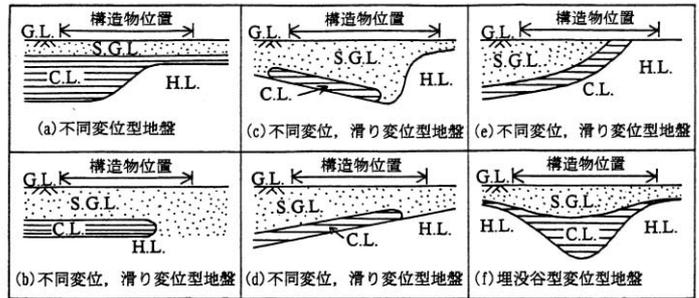
2. 構造物に地震被害が発生しやすい地盤構造と基礎構造のまとめ

盛土や建物、橋梁等の構造物の地震被害状態と地盤及び基礎構造の関係から、各種構造物に地震被害が発生しやすい地盤の構造(形状と土層構成)と基礎の関係等を図-1~4にまとめるとともに、以下にその概要を述べる^{1), 2), 4), 7)}。

1) 図-1に示すように、構造物の地震被害はその種類に関係なく主として地盤条件の変化点(力学的に不連続な所等)である硬軟地盤境界部や軟弱粘性土層厚さの急変部で生じやすく、さらに低強度の土層(粘土や腐植土等からなる軟弱粘性土層)を部分的に挟む地盤、例えば砂・礫層の下に軟弱粘性土層がある互層地盤(上下逆転型地盤)等で多く、水平・鉛直方向に不連続な(不均質な)地盤で生じやすい。被害発生の有無を基礎と地盤との関係でみると図-2のようになり、基礎の無い場合と有る場合(支持杭、摩擦杭等)に関係なく、硬軟土質を問わず表層の連続な地盤(均質な地

盤)では被害が少ない。

地盤強度の深度分布と各種構造物の地震被害発生の関係を見ると、被害は図-3(1)の場合に少なく、図-



S.G.L.: 砂・礫層 C.L.: 軟弱粘土, 腐植土層 H.L.: 硬層

図-1 地震被害が生じやすい地盤の土層構成⁷⁾

	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。
- (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-2 地震被害が生じやすい地盤と基礎構造の関係^{4), 7)}

3(2)の場合に多くみられる。図-3(2)は互層地盤(上下逆転型地盤)である。

2) 構造物の躯体や基礎の地震時の変形パターン即ち崩壊や傾斜方向、亀裂あるいは落橋等の発生状況も地盤構造に対応する 경우가多く、その例は後述する。

なお、建物や橋梁等の杭の亀裂等の損傷は埋立地盤等で地盤と杭やフーチングの間に空隙ができるようなところで多く、フーチングが自然堆積の比較的硬い砂礫層等に設置されている場合は杭よりも構造躯体に損傷が多くみられる。これは地盤状態によって地盤から受ける力の作用点が杭であるかフーチングであるか異なるためと推定される^{2),4)}。

3) 図-1(a)～(e)の軟弱な粘土層や腐植土層がほぼ一定な厚さで堆積している部分に建物や橋梁がしっかりした基礎(完全支持杭等)でつくられているときには、例えば図-2に示すようにそれらの構造物にも被害が発生しやすい。なお、図-2の基礎には杭や井筒、地下室等を含み、各土層は傾斜している場合もある。

4) 図-2(a)～(c)に示すように表層が水平・鉛直両方向に連続な(均質な)地盤では、構造物は基礎が無い場合(直接基礎等)と基礎がある場合(例えば支持杭や摩擦杭等)とにかかわらず地震被害を受けにくい。

5) 図-2(d)～(f)のように水平方向に連続で、鉛直方向に不連続な地盤では、例えば杭が無い場合(d)と摩擦杭の場合(e)は被害が生じにくく、(f)のように支持杭となっている場合は被害が生じやすい。

6) 水平方向に不連続な地盤では、例えば図-2(g)～(i)のように硬地盤の左側がGS(砂、礫層)の下にSC層(軟弱粘土、腐植土層)がある互層(以後、互層の軟地盤あるいは上下逆転型地盤と称する)になっている場合とそれが単層の軟地盤の場合、即ち水平方向に硬地盤と軟地盤(互層、単層)が接している場合には、その境界部にある構造物は杭が無い場合や支持杭、摩擦杭等の場合にかかわらず被害を受けやすい。

7) その他に、図-2(g)と(i)の場合には構造物が硬軟地盤境界部の軟地盤側に作られている場合も被害を受けやすい。なお、地震被害は硬軟地盤境界部(図-2(f))に示すようなしっかりした基礎によって作られる人工的な境界部も含む)で生じやすいが、硬軟地盤境界部で剛性変化点をもつ構造物に被害が発生しやすい。橋梁や建物等の構造物の剛性変化点には鉄筋の段落とし部や板厚変化点、隅角部、断面積変化点、溶接やボルトによる継ぎ手部等があり、これらの剛性変化点は上記の地盤条件の不連続点と同様に歪が集中するところである(図-4)。なお、以上の地盤構造は構造物に液状化被害が発生した砂質土地盤も含む。

8) 以上のように地震被害は水平・鉛直両方向に不連続な(不均質な)地盤で特に生じやすいが、その理由の1つに次のことが考えられる。軟弱土層厚さの変化点では地震時に不同変位が大きく発生するし、低強度土層は地震時に迂り面ようになって、その上の比較的硬い砂・礫層等の地盤が比較的大きく動くが、そのとき砂・礫地盤は圧縮性が比較的小さくて横方向地盤反力係数が大きいため、構造物基礎に大きい偏土圧を作用させて被害を発生させる。

9) また、図-2(f)のような砂・礫層の下に軟弱な粘性土層が存在する地盤で、しっかりした基礎を持つ構造物が地震被害を受けやすいが、それはその基礎・構造物系が不動点のようになってその周囲の地盤と一種の硬軟地盤境界部をつくるためと考えられる。さらにその脇に基礎のしっかりした別な構造物があるといっそう著しい被害が生じる場合が多いが、これは構造物自身が地盤に作った一種の不動点の機能を、脇の別な構造物がさら強めるためと考えられる。

10) 表層地盤が硬地盤あるいは軟弱層のみからなるとき被害が発生しないのは、前者の場合には直接基礎で構造物が支持されていて地盤の動きに構造物が追従して地盤から力(偏土圧力)を受けないためであり、後者の場合には軟弱層は地盤反力係数が小さかったり杭間を通過したりするので基礎に与える力(偏土圧力)が小さいためと考えられる。

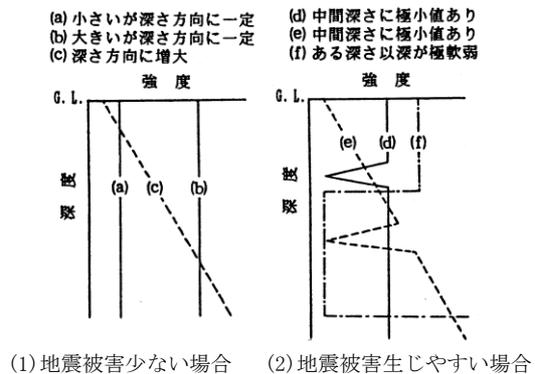


図-3 地盤強度の深度分布²⁾⁴⁾

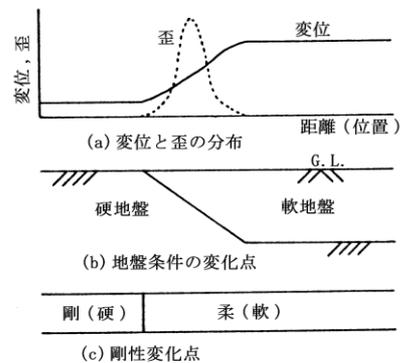


図-4 剛性変化点の変位と歪の分布⁴⁾

3. 構造物の地震被害と地盤の例

ここでは盛土と建物と橋梁の地震被害と地盤の関係と代表的な事例について述べる。

(1) 盛土の地震被害と地盤構造

まず、盛土に地震被害が発生しやすい地盤は図-5のようにまとめられる。盛土は地盤条件の不連続点の硬軟地盤境界部で発生しやすいが、この図に示すように盛土の迂り崩壊は軟弱地盤が盛土の外方まであるときに、軟弱地盤が法尻から盛土内部に入り込む距離が大きい程大きく生じる(図-5(a), (b), (e))。

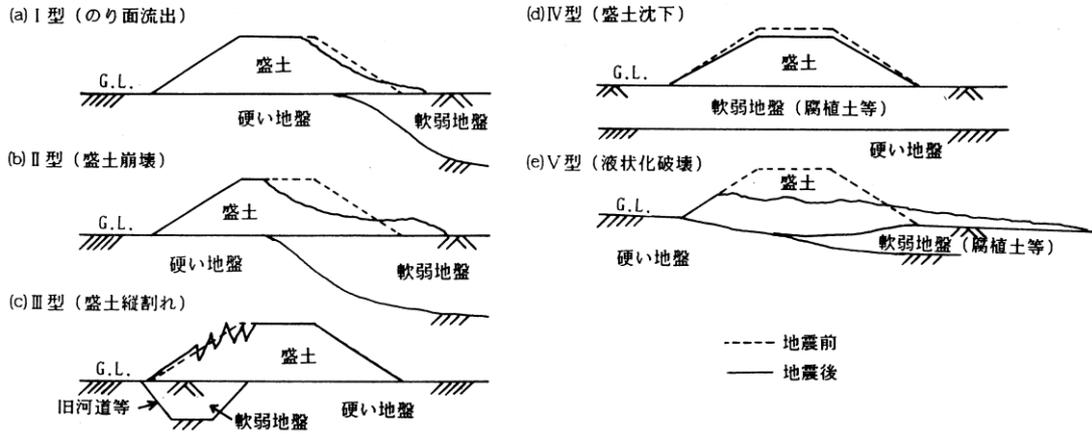


図-5 盛土の地震被害と地盤構造の関係⁸⁾

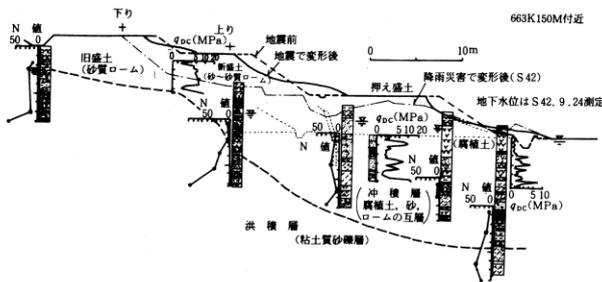


図-6 向山・三沢間盛土Aの地震被害と地盤⁹⁾

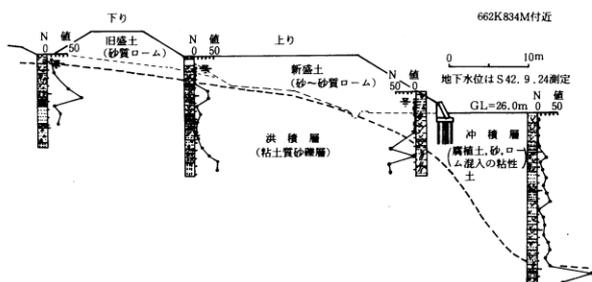


図-7 向山・三沢間盛土Bの地震被害と地盤⁹⁾

大きい亀裂は軟弱地盤が盛土の下に局部的にあるとき(図-5(c))に生じる。盛土は薄い軟弱土層のあるところとないところと跨るときにも被害を受けやすい(図-5(e))。また、盛土はその強度に関係なく図-5のような地盤で被害を受けており、盛土の地震被害発生には盛土強度よりも地盤構造が大きく関係する。

以上の地震時の崩壊等の盛土被害は地盤の不同変位で発生するが、図-5(a), (b), (e)は軟弱地盤の比較的大きい水平変位と沈下によって、図-5(c)は地盤に局部的に発生する水平変位と沈下によって発生することが考えられる^{8), 9)}。

次に、地震被害を受けた盛土とその付近にあって無被害の盛土の代表例について述べる。

a) 向山・三沢間盛土(1968年十勝沖地震)⁹⁾

崩壊した盛土A, Bは台地際の枝谷の出口にあって、図-6, 7のように台地の硬地盤と谷底平野の腐植土等からなる極軟弱地盤に跨っている。軌道まで及ぶような大崩壊が生じたA点の盛土は、図-6に示すように新盛土本体と押し盛土総てが軟弱層の上のっている。法面流失のみが生じたB点の盛土は図-

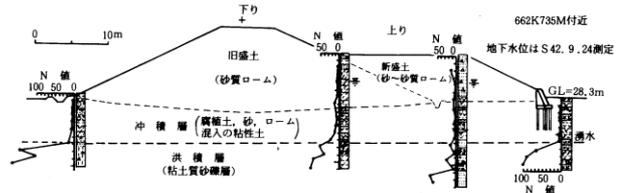


図-8 向山・三沢間盛土Cの地震被害と地盤⁹⁾

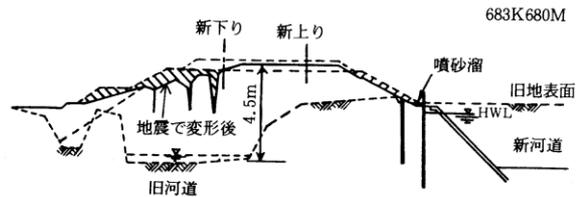


図-9 乙供・石文間盛土の地震被害と地盤⁹⁾

7に示すように新盛土の法面部分のみが軟弱層の上ののっている。両盛土の変形は基盤面の傾斜方向に生じた。何ら変形が生じなかったC点の盛土の下には図-8に示すように、腐植土等からなる軟弱地盤がほぼ水平に堆積している。以上の3つはそれぞれ図-5(b), (a), (d)に該当する。

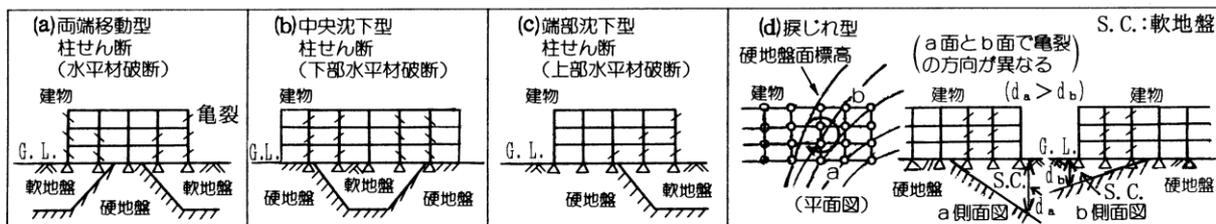
b) 乙供・石文間盛土(1968年十勝沖地震)⁹⁾

盛土に図-9に示すように、左側の法肩から法面にかけて大きい亀裂が発生した。この盛土は旧河道と地山に跨って作られており、盛土は旧河道側に転倒するような動きをして亀裂が生じており、図-5(c)に該当する。

c) 後志利別川盛土(1993年北海道南西沖地震)¹⁰⁾

後志利別川の被害堤防は旧河道部で縦断方向亀裂と天端部分の大きな沈下と陥没が生じ、しかも堤防法尻部で堤央から堤内地方向の水平変位等の被害が生じた。ここの地盤には図-1(e)のように被害の生じた堤防の片側に部分的に薄い軟弱粘性土層が堆積しており、ここに迂りが発生したことが考えられる。一方、付近のほぼ無被害堤防の地盤には軟弱な粘土層等が堆積しているが、堤防敷幅全体にわたって堆積している。

(2) 建物の地震被害と地盤構造の関係



・地盤は埋没丘や谷を含み、基礎は杭や井筒等を含む。a, b, c でも紙面に直角な方向に被害を受けることがある。

図-10 地震による建物の変形と地盤構造の関係⁷⁾

建物の地震被害は硬地盤では殆どみられず、地盤条件の不連続点の硬軟地盤境界部に作られた建物は地震で図-10のような被害を受けやすく、建物の変形や亀裂も地盤状態に対応して発生する。杭基礎やケーソ基礎等を持つ建物でも図-10と同様な被害が生じる。硬地盤と軟地盤の間に不同変位(沈下や水平変位)が発生して図-10(a)~(c)のように被害が発生し、軟地盤が硬地盤に対して比較的大きく地盤境界線に平行にずれる場合には図-10(d)の被害が発生することが考えられる⁷⁾。

また、支持杭基礎を持つ建物の場合には図-11のように建物と杭の被害が発生することが考えられる。この中で図-11(a)~(d)は梁間(短軸)方向、図-11(e)~(f)は桁行(長軸)方向の建物を示す¹¹⁾。

ここで、図-11(a)は常時の建物と杭の変形状態を示す。すぐ脇で施工された盛土荷重による軟弱地盤の沈下と側方移動で、a列杭に斜め亀裂と左側への大きい湾曲が生じ、b, c列杭の順に湾曲が小さくなり、b列杭には水平亀裂が生じるがc列杭には変位が生じない。その結果、杭の湾曲の大きい方の杭が短くなって建物が盛土側に傾斜する。図-11(b)~(f)は地震時の現象を示しており、地盤として砂・礫層 SG の下に粘土あるいは腐植土からなる軟弱粘性土層 SC がある互層地盤(以下これを軟地盤と称する)とその下の硬地盤(基盤等)を考える。前者では SC 層が逆り面等になり、その上の SG 層が比較的大きく動いて被害が生じるものと考えられる。

図-11(b), (d), (e)は水平方向に連続な軟地盤上の建物を示す。図-11(b)では、地盤の傾斜方向の左側に地盤表層部が動いて、右側の a 列杭が地盤から大きい力を受けて左側に湾曲するとともに左上から右下がる斜め亀裂が生じ、左側に行くほど杭が地盤から受ける力が小さくなるので b 列杭(水平亀裂)、c 列杭(亀裂無し)の順にその湾曲が小さくなり、結果的に杭の長さに差が生じて建物は右側に傾斜する。図-11(d)はフチク基礎や地下室等が地盤から大きい偏土圧を受けて1階あるいは中間階が層崩壊を起こす建物を示す。図-11(e)では地盤表層部が左側に動くとき図-11(b)同様な杭の変形が生じるが、左側に行くほど杭が地盤から受ける力が小さいので d~f 列杭は無被害であり、結果的に湾曲の大きいところほど杭は短くなって建物の中央部から右側の部分が右側に傾斜する。

図-11(c), (f)は水平方向に不連続な地盤で、前者では硬地盤(基盤)と軟地盤の境界部の軟地盤側にある建物を示す。この場合も図-11(b)と同様な被害が

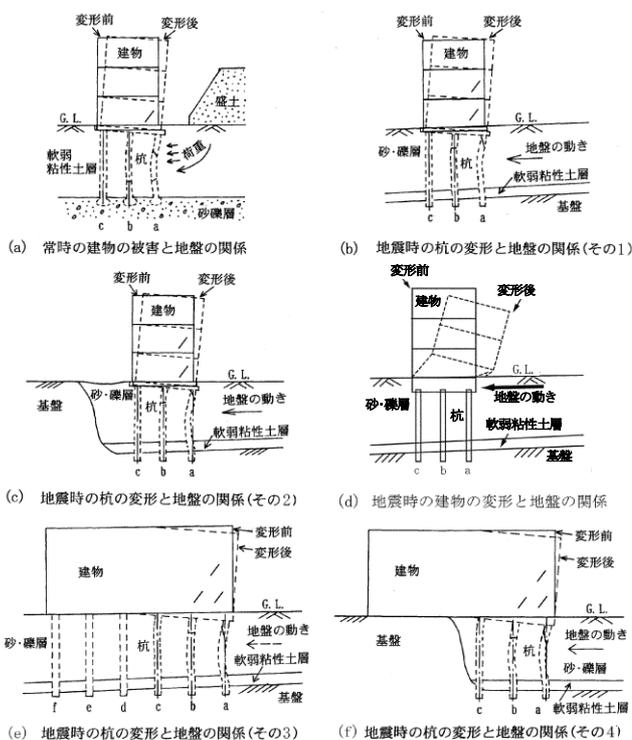


図-11 建物の地震被害と杭と地盤の関係¹¹⁾

生じるが、右側の基盤が地盤の動きを止める作用を発揮するので図-11(b)の場合よりも被害程度が大きくなる。図-11(f)では、硬地盤(基盤あるいは支持層)と軟地盤の両方に跨がって作られて異種基礎状態にある建物と杭の変形状態を示す。この場合も図-11(e)と同様な被害が生じる。

結局、図-11(a)~(c), (e), (f)から地震時に被害が出る場合と出ない場合について次のようにまとめられる。杭が基盤に根入れされた完全支持状態を考えると、荷重の種類が常時と地震時と異なっても、両方で建物と杭の変形状態と地盤の動きの関係が似ていて、杭が地盤に強く押されて偏土圧を受けて湾曲するとともに杭に亀裂等が発生するが、荷重の作用側の杭に湾曲や斜め亀裂が顕著に発生し、荷重の作用側と反対側あるいは離れた方の杭の亀裂や湾曲の被害程度が軽く、その結果建物も荷重の作用側に傾く。それは地震時には完全支持状態にある杭・構造物系が地盤の動きに追随して動くことができず、その系は地盤の動きに大きく抵抗するためと推定される。この場合は杭が基盤に固定されていないときと比べて地盤と杭の変位差が大きく、歪の集中度も大きいことが考えられる。

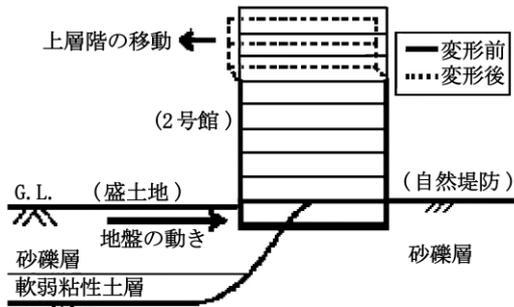


図-15 神戸市役所建物の地震被害と地盤と基礎と地盤の動きの関係模式図²⁾

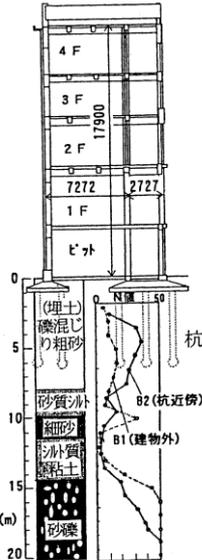


図-16 神戸税関旧本館の基礎と地盤²⁾

る。この校舎は台地(段丘堆積層)と埋没谷(N 値の比較的大きなローム層や凝灰質土層の下に腐植土層や腐植土混じり土層がある上下逆転型地盤)の境界部に作られていて振じれ被害が生じている¹⁾。

e) 神戸税関旧本館(1995 兵庫県南部地震)

神戸税関旧本館は地震で無被害であったが、その地盤と基礎は図-16 に示すように、砂・礫層の下に軟弱な粘性土層がある上下逆転型地盤であり、基礎は最上層の礫混じり粗砂層内の摩擦杭であり²⁾、図-12(b)に該当する。

その他に、図-12(b)に該当するものとして、旧帝国ホテルやメジロ市のランアメリカターがある。後者のターは深さ約 48m の極軟弱地盤に 1955 年頃に造られ、建設以来 3 回目の大地震(1985 年メジロ地震他)でも無被害である。ボックス型の基礎(浮き基礎)の下に、約 33m と長い軟弱地盤の下に固い基盤層まで届かない杭(不完全支持杭)が多数打ち込まれている¹³⁾。

(3) 橋梁の地震被害と地盤構造の関係

橋梁の地震被害は水平・鉛直方向に不連続な地盤で多く、その被害と地盤の関係を図-17~18 に示す。なお、図-17 の基礎は杭のほかにケツ等の場合も含み、土層が傾斜している場合もある^{2), 4), 5)}。

橋梁の軸方向にみると、図-17(a)のように橋梁が硬軟地盤境界部(地盤条件の変化点)等で軸方向に異種支持地盤状態にある場合は軸方向に被害を受け易く、その被害機構は例えば図-17(b)~(d)のように不同変位やそれに伴う偏土圧によるものと考えられる。なお、図-17(a)の場合に軟弱粘性土層の存在範囲で摩擦杭基礎や直接基礎のときも被害が出やすい。

橋梁の軸直角方向の地震被害は自然にできた地盤条件の変化点にあって図-17 のように異種支持地盤状態にある場合の外に、図-18(a)のように基礎がしっかりしているため人工的にできた地盤条件の不連続点でも発生しやすく、図-18(b)のように基礎に拘

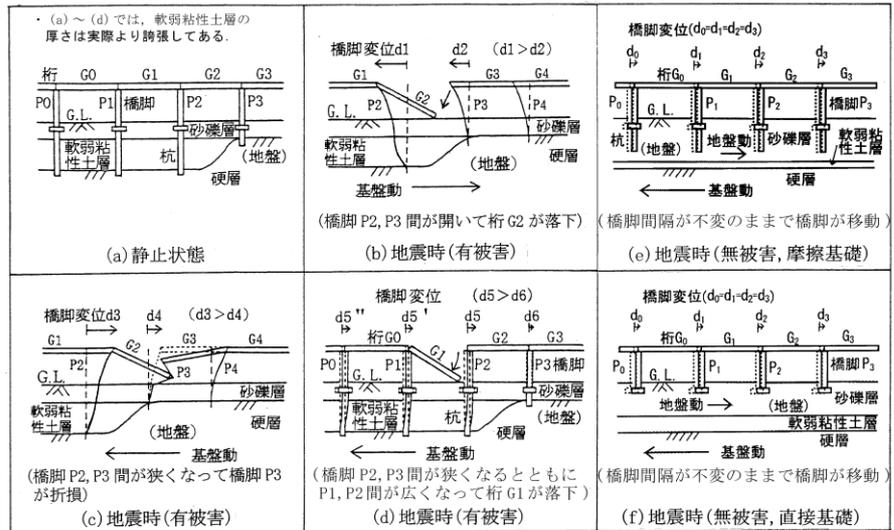


図-17 橋梁の地震被害機構の推定例(軸方向)⁴⁾

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被害が生じることが考えられる。いずれの場合も橋梁被害は図-17~18 に示すように、動く地盤(動きの大きい地盤)と動かない地盤(動きの小さい地盤)の境界部で被害が生じており、地盤変位差

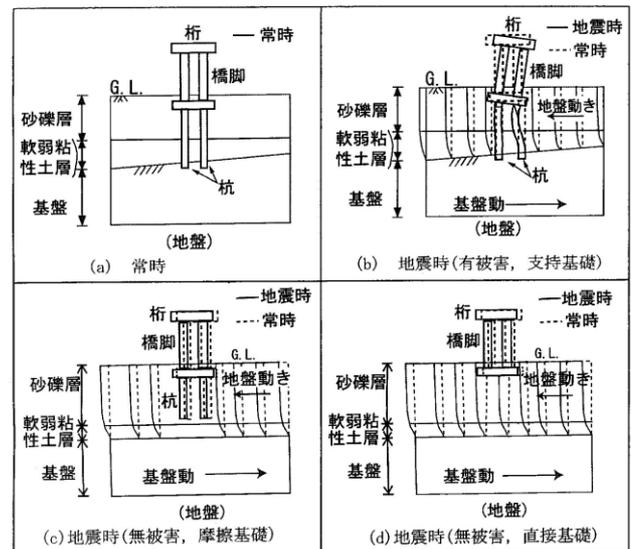


図-18 橋梁の地震被害機構の推定例(軸直角方向)⁴⁾

(不同変位)やそれに伴って生じる偏土圧によって被害が生じることが考えられる。なお上下逆転型地盤でも図-17(e), (f)や図-18(c), (d)のように水平方向に一樣な地盤に橋梁が摩擦基礎や直接基礎で作られている場合は地盤の動きに構造物が追従し地盤から力を受けないため被害が出難いと考えられる。

また、河川を横断する橋梁の、軸方向の地震時の変形と地盤の関係の模式図を図-19 に示す。この図では右岸橋台 A_R の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。このような硬地盤とそうでない地盤に跨っていて異種支持地盤状態にある橋梁では、軸方向(図の左右方向)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し、それらの地盤変位は右側で小さく左側で大きく生じ不同変位となるし、盛土変位も薄い軟質層上(D_R)よりも厚い軟質層上(D_L)で大きく生じる。盛土変位 D_L がその下の軟質層の底面の緩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力を受けるとともに、その裏側盛土が大きく沈下し、その A_L 橋台に図に示す斜め亀裂が生じる。さらに、軟質層がその底面の緩傾斜方向の右側に(図中の太矢印 GM 方向に)変位して P_1 橋脚に右側への大きい偏土圧を作用させて亀裂等の各種被害を発生させることも考えられる⁴⁾。

次に地震被害を受けた橋梁とそれに近いところであって無被害の橋梁と地盤の関係の代表例を示す。

a) 昭和大橋(1964年新潟地震)^{1), 4), 14)}

昭和大橋(支持杭基礎、パイルバント方式)は、図-20 に示すように牡丹山砂丘(右岸側)と河成層(左岸側～右岸側。Um 層あるいは Um~Us 層)に跨って作られている。その河成層は橋脚 P_7 付近を境にして右岸側は砂質土のみからなり、左岸側は中間部に N 値が 0 に近い極小値を示す A 点付近(粘性土)と B 点付近、C 点付近(腐植土)の極軟弱層を挟んでいる。地震のとき後者側で桁落下が発生した。その落橋範囲はそれらの極軟弱層の存在範囲と等しい。ここでは右岸側橋台 A_R と比べて左岸側橋台 A_L が河心側に大きく移動するとともに裏側盛土が大きく沈下した。図中の P_4 橋脚の鋼管杭は右岸側へ曲がっているが、その方向は河成層底面の緩傾斜方向と一致する。従って、ここでは地震時に河成層に右岸方向への大きい不同変位が生じて落橋が生じたことが考えられる。これは

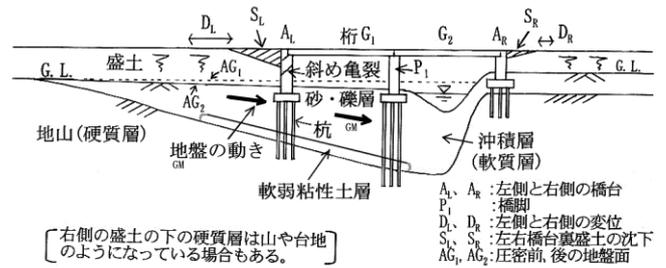


図-19 橋梁の軸方向の変形と地盤の関係⁴⁾

図-1(c)あるいは図-17(d), 図-19 に該当する。

なお、この新潟地震のとき信濃川にかかる万代橋(ケツ基礎)は殆ど無被害であったが、ここの地盤は図-21¹⁵⁾に示すように互層をなしているがほぼ水平方向に成層状態になっており⁴⁾、図-2(c), 図-3(1)(c)が該当する。

b) 水深第1高架橋(1987年千葉県東方沖地震)

橋軸直角方向に地震力が大きく作用して橋脚にせん断亀裂が生じた水深第1高架橋(支持杭基礎)は、埋没枝谷を斜めに横断している。図-22 によると、No. 2, No. 3 ブロックと No. 4 ブロックの左側半分の被害は埋没枝谷が特に深い所で、N 値が大きく厚い砂層の下に極軟弱粘性土層が厚く堆積する位置で生じた。被害はその極軟弱粘性土層の薄い所では軽く、厚い所で大きく生じ、被害程度が極軟弱粘性土層厚さに対応する。また、この高架橋基礎7-チク)と杭上部が埋立土と密な砂層内に作られており^{1), 4)}、ここは図-

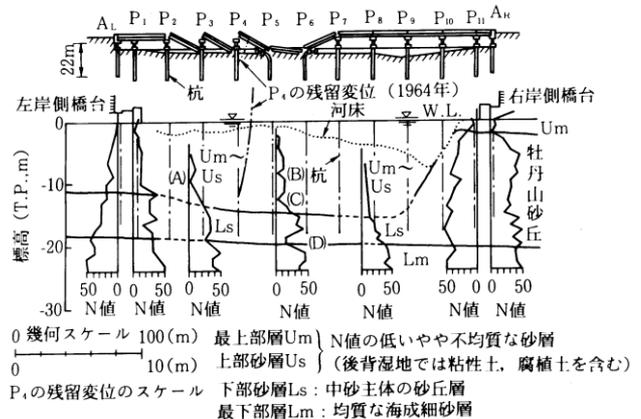


図-20 昭和大橋の地震被害と地盤¹⁾

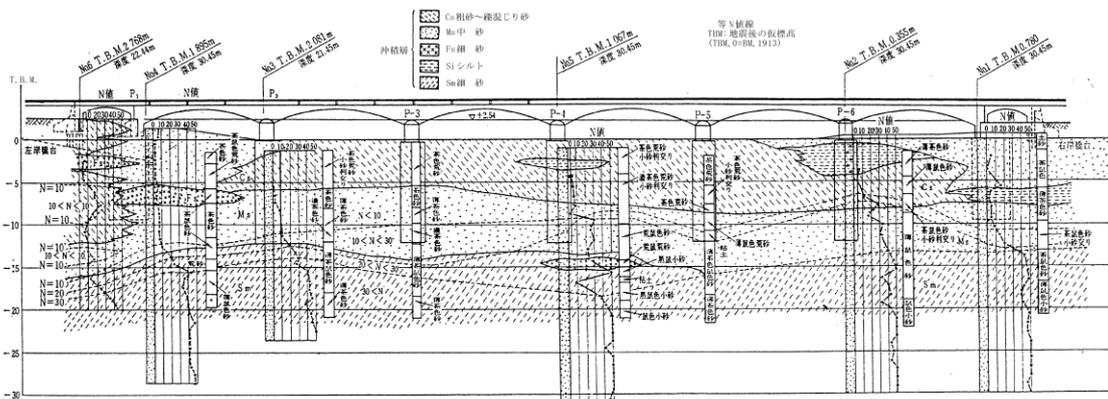


図-21 万代橋と地盤¹⁵⁾

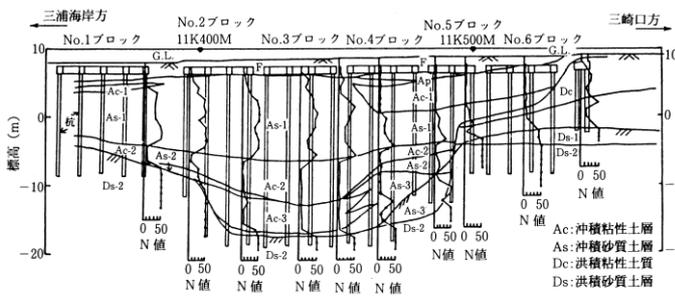


図-22 地震被害を受けた水深第1高架橋基礎と地盤¹⁾

1(f)と図-2(f)に該当する。

ここの隣の同様な埋没枝谷を横断している水深第2高架橋(支持杭基礎)は殆ど無被害であるが、図-23に示すようにこの谷を埋めた軟弱地盤は同第1高架橋の地盤と違って、全体が軟弱な粘性土と腐植土層から成り立っており^{1),4)}、ここは図-2(c)に該当する。軟弱な粘性土と腐植土層は圧縮性と地盤反力係数が小さいため地震時に基礎が地盤から受ける力が小さいので被害が生じなかったものと考えられる。

c) 国道静内橋(1982年蒲河沖地震)

国道静内橋(ケツの支持基礎)の橋脚に橋軸と斜めの方向(川の流下方向)に地震力が大きく作用して、橋脚にたすき掛けのせん断亀裂が発生している。この橋は静内川を強い斜角で横断しており³⁾、被害をうけた橋脚は砂州や中州等の縁や両者の中間部に位置する。その表層地盤中に軟らかく比較的薄い沖積粘性土層(Ac)がほぼ水平に堆積し、その粘性土層の左端の方で顕著な被害が発生している^{1),4)}。これは図-18(b)に該当する。

しかし、この橋より河口近くにあつて無被害のJR静内川橋梁は、砂州を支持層として杭を用いず直接基礎で作られており^{1),4)}、図-2(a)あるいは図-2(d)、図-18(d)に該当する。

4. あとがき

以上のように、地震で被害を受けた盛土や建物や橋梁と無被害のそれらの構造物の地盤に違いがみられた。その結果を以下にまとめる。

- (1) 地震で無被害の構造物は硬地盤や一様な表層地盤に作られている。
- (2) 地震被害を受けた構造物は地盤条件の不連続点に作られており、その不連続点には自然にできた硬軟地盤境界部や剛な基礎を持つ構造物自身が作った人工的な不連続点がある。
- (3) 砂・礫土層の下に軟弱な粘性土層等がある互層地盤(上下逆転型地盤)で被害が生じている。
- (4) 直接基礎や摩擦杭基礎、浮き基礎などの地盤に追従して動く構造物に被害が少なく、地盤条件の不連続点に作られて地盤の動きに抵抗する構造物に地震被害が多い。
- (5) 被害原因として、互層地盤(上下逆転型地盤)で地

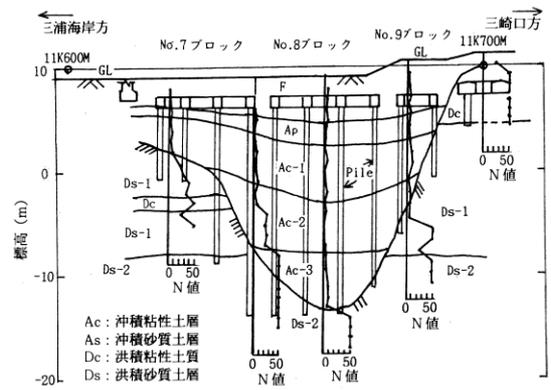


図-23 地震で無被害の水深第2高架橋基礎と地盤¹⁾

盤の不連続点に発生する不同変位やそれに伴う偏土圧が挙げられる。その偏土圧は上下逆転型地盤の軟弱粘性土層が地震時に迂り面となって、その上の地盤反力係数の大きい砂・礫層が比較的大きく動いて発生するものと考えられる。

今後とも地盤に着目して構造物の地震被害原因の究明を継続する予定である。おわりに、以上の調査でお世話になった関係者と、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: 地震被害形態と地盤形状および土質構成の関係, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 5, pp. 35-40, 1994. 5.
- 2) 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.
- 3) 那須誠: 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, 第5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. 117-124, 2001. 7.
- 4) 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, 2002. 1.
- 5) 那須誠: 阪神・淡路大震災による高速道路橋梁の被害と地盤の関係, 第6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. 73-80, 2002. 7.
- 6) 那須誠: 橋梁等構造物の地震被害への隣接構造物の影響の考察, 第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 273-280, 2003. 1.
- 7) 那須誠: 地震被害への地盤と基礎の影響, 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, No. 526, pp. 1057-1058, 1998. 7.
- 8) 那須誠: 盛土・建物・橋梁の地震被害と地盤構造との関係 1~2, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 30, No. 4, pp. 56-59; Vol. 30, No. 5, pp. 55-57, 1992. 4~5.
- 9) 那須誠: 盛土の地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 3, No. 8, pp. 50-57, 1989. 8.
- 10) 那須誠: 最近の地震被害盛土と地盤, 第34回地盤工学研究発表会発表講演集, No. 959, pp. 1919-1920, 1999. 7.
- 11) 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, No. 1-32, pp. 63-64, 1998. 10.
- 12) (株)奥村組: 神戸市東灘処理場災害復旧関連建設工事に伴う基礎杭災に関する検討報告書, 1998. 7.
- 13) 那須誠: 地震被害と地盤条件(その14), 土木学会第20回関東支部技術研究発表会講演概要集, III-15, pp. 208-209, 1993. 3.
- 14) 那須誠: 1964年新潟地震による橋梁の落下機構の考察, 第53回土木学会年次講演会講演概要集, I-B121, pp. 242-243, 1998. 10.
- 15) 昭和39年新潟地震震害調査報告, 土木学会新潟震災調査委員会, (社)土木学会, 1966. 6.