

地盤不連続点に着目した橋梁の地震被害機構の推定

那須 誠¹

¹フェロ会員 博士(工学) 前・前橋工科大学教授 (〒359-0021 埼玉県所沢市東所沢2-34-8)

1. まえがき

これまでに、地震被害の事例調査から橋梁等の構造物の地震被害は地盤の不連続点で多いことを明らかにするとともに、それらの地盤・橋梁において実施した常時微動測定や地震応答解析等の結果を本シンポジウム等で既に発表してきている^{1), 2)}。今回は地盤の不連続点に着目して再度橋梁の被害機構の推定を試みたので発表する。地盤の不連続点は不同変位(不同沈下や水平変位差)が大きく発生し、せん断歪や垂直歪が集中して発生するところであり、それらの地盤変位による被害機構として3つを考えた。即ち、鉛直断面内の不同沈下量や、水平面内の面外方向と面内方向の水平変位差による橋梁の被害であり、それぞれに該当する実際の橋梁の被害事例も併せて示す。

2. 橋梁の地震被害と地盤状態の関係のまとめ

1) 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-1～2に示す³⁾。なお、図-1の基礎は杭のほかにケーソン等の場合も含み、土層が傾斜している場合もある。

橋梁の軸方向にみると、図-1(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-1(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

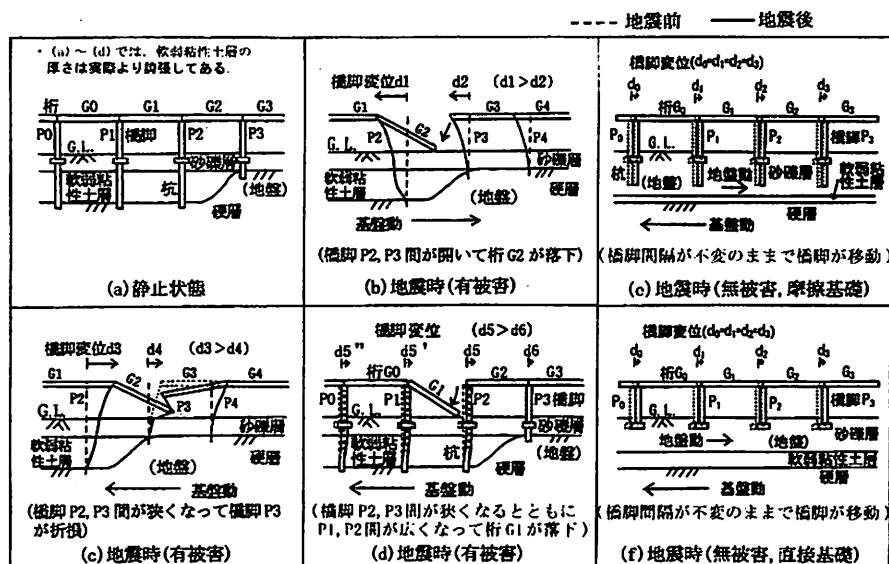


図-1 橋梁の地震被害機構の推定例(軸方向)³⁾

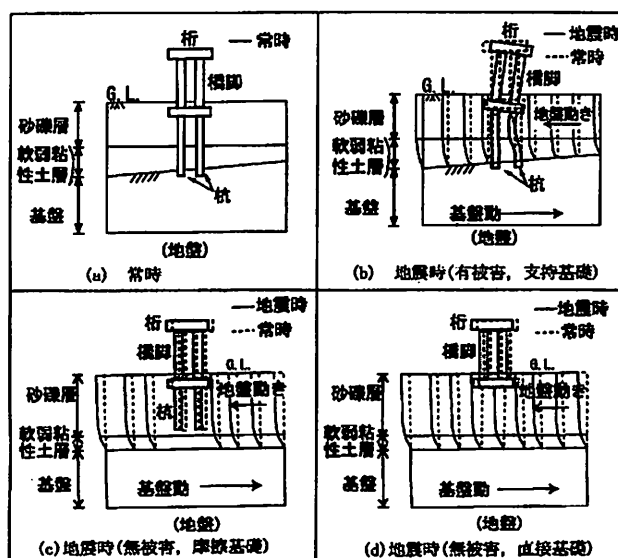


図-2 橋梁の地震被害機構の推定例(軸直角方向)³⁾

れる。なお、図-1(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-1のように異種支持地盤状態にある場合の外に、図-2(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-2(b)のように基礎に拘束された杭群が不動点となって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-1～2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)の境界部で生じており、地盤変位差(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-1(e)、(f)や図-2(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随し地盤から力を受け

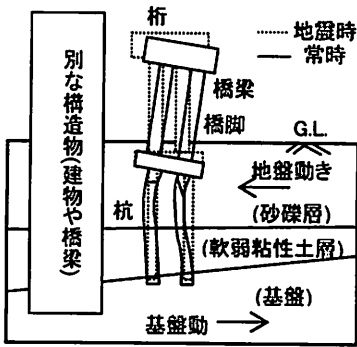


図-3 脇に別な構造物がある橋梁の地震被害⁴⁾

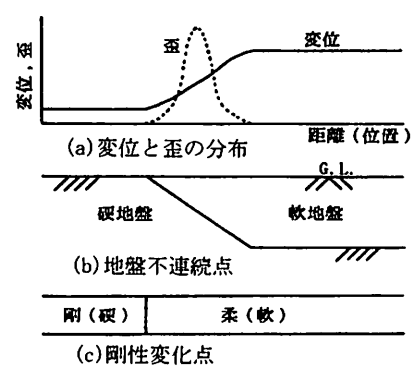


図-4 剛性変化点の変位と歪の分布⁵⁾

ないため被害が出難いと考えられる。
 2) 図-3のように、橋梁の脇に基礎のしっかりした別な橋梁や建物等の構造物があるといっそう著しい被害が生じるのは、しっかりした基礎を持つ橋梁自身が地盤に作った不動点の機能を脇の構造物がさらに強めるためと考えられる⁴⁾。
 3) 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を持つ橋梁は地盤の動きに追随して地盤から力(偏土圧力等)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く地盤から基礎が受ける

地盤の歪と橋梁の変形の関係			
地盤変位と歪	面内方向 (鉛直変位)	面外方向 (紙面垂直方向水平変位)	面内方向 (紙面平行方向水平変位)
	(a)せん断歪	(b)せん断歪	(c)垂直歪
地盤変位と歪の求め方	鉛直変位差(不同沈下) $\Delta V=V_2-V_1$	水平変位差 $\Delta H_T=(HT_2-HT_1)$	水平変位差 $\Delta H_L=(HL_2-HL_1)$
	せん断歪 $\gamma_v=(V_2-V_1)/L$	せん断歪 $\gamma_T=(HT_2-HT_1)/L$	垂直歪 $\epsilon_L=(HL_2-HL_1)/L$
	ここで、 V1,V2:鉛直変位 HT1,HT2:紙面垂直方向水平変位 HL1,HL2:紙面平行方向水平変位 V1,V2:地盤時鉛直変位 L:水平距離 (断面図) HT1,HT2:地盤時水平変位 L:水平距離 (平面図) ◎:紙面垂直方向水平変位 HT1,HT2 (断面図,) HL1,HL2:地盤時水平変位 L:水平距離 (平面図) (断面図)	作用地震力 不同沈下 せん断力	(紙面垂直方向の水平変位の場合) せん断力
橋梁の変形	不陸等(せん断変形)	捩れ変形(せん断変形)	橋脚間隔変化、橋脚折損等 (せん断変形)

図-5 地盤の不連続点と橋梁の地震時変形の関係(文献5)を修正)

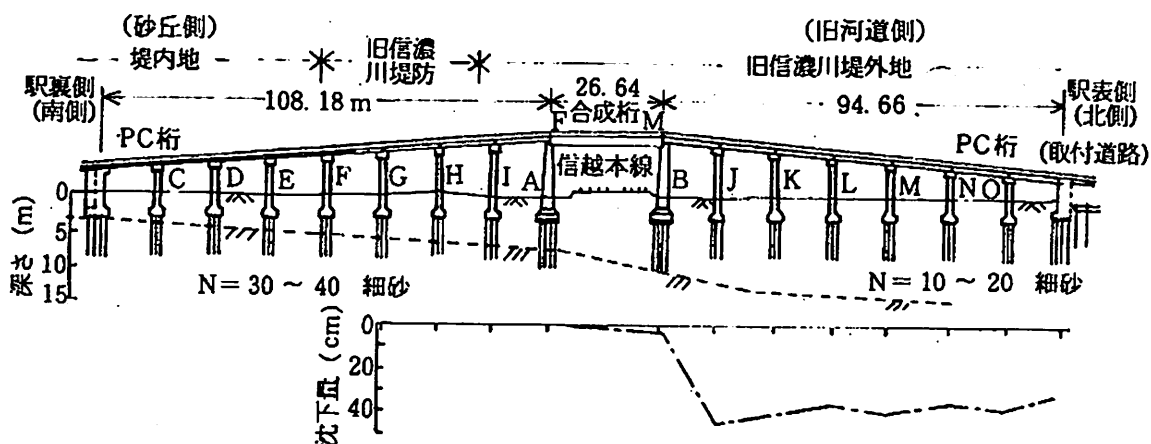


図-6 東跨線橋(笹口跨線橋)⁶⁾

力(偏土圧力等)が小さいためと考えられる。

3. 橋梁の地震被害機構の推定

地盤の不連続点では図-4⁶⁾に示すように地震時の変位変化(不同沈下や水平変位差からなる不同変位)が大きく、その変位勾配(微分値)の歪も大きく集中する。この歪には次に示すようにせん断歪 γ と垂直歪 ε がある。

図-5(文献 5)を修正)に示すように、鉛直断面内(面内方向)の不同沈下量を水平距離で除すればせん断歪 γ_v が求まり(図-5(a)、紙面垂直方向面外方向)の水平変位差を水平距離で除すればせん断歪 γ_r が求まる(図-5(b))。さらに、紙面平行方向(面内方向)の水平変位差を水平距離で除すれば垂直歪 ε_L が求められる(図-5(c))。なお、図-5(b)、(c)では水平変位が逆方向に発生する場合も考えられる。

従って、地震時の地盤変位による橋梁の被害機構として図-5に示すように3つが考えられる。即ち、地盤のせん断歪が関係する地盤の不同沈下で強制的に橋梁がせん断変形させられたり(図-5(a))、あるいは地盤のせん断歪が関係する地盤の水平変位差で橋梁が捩れ変形(せん断変形)させられたりして(図-5(b))、被害が発生することが考えられる。また、垂直歪が関係する地盤の水平変位差で発生する、大きい偏土圧(特に圧縮側の受働土圧)が基礎等に作用することによって、基礎あるいは上部工が大きい損傷を受けたり、橋脚間距離の変化による桁落下等が発生したりすることが考えられる(図-5(c))。

なお、以上のせん断歪(ずれや、捩れ)と圧縮・引っ張り歪からなる3つの歪と変形の考え方は部材(コンクリートやスチール製の橋脚や桁等)にも当てはまるようである。

4. 各被害機構毎の橋梁の被害例

図-5の各作用力は実際には単独でなく複合して作用することが多いと考えられるが、図-5(a)の場合には橋梁の不陸被害、図-5(b)の場合には橋梁の捩れ被害、図-5(c)の場合には軸方向や軸直角方向の橋脚損傷や橋脚間距離の変化、落橋被害等が相当するものと考えられる。各作用力による被害の主な例と図-3の被害例を次にあげる。

(1) 鉛直断面内(面内方向)の不同沈下によるせん断歪被害の不陸被害(図-5(a))

この被害には1964年新潟地震での東跨線橋(笹口跨線橋)や1989年ロムプリータ地震でのサンフランシスコ・オークランドベイブリッジの落橋被害等⁶⁾が該当すると考えられる。

その内、東跨線橋(笹口跨線橋)は1964年新潟地震で図-6に示す線路を跨ぐ合成桁の両端側の橋脚(完全支持杭)間の拡大と可動端M側の落下や可動端側取付桁の橋脚(摩擦杭)の沈下等が生じて落橋した⁶⁾。古い地形図や土質調査結果等を見ると、図-6に示すように東跨線橋の固定端F側(左側)の砂丘(自然堤防)と可動端M側(右側)の旧信濃川河道の境界部につくられており、基盤表面(埋没砂丘表面)は前者側から後者に傾斜した状態を示し、その上の軟らかい砂質土層(N値=10~20)は砂丘側から旧河道側に厚くなっている。地震時にその緩詰の砂質土層に動的、静的変位が相対的に大きく生じたため合成桁が落下したことが考えられる。

(2) 紙面垂直方向(面外方向)の水平変位差によるせん断歪被害の捩れ被害(図-5(b))

この被害には、1968年十勝沖地震での姉沼高架橋の被害等が該当する。図-7に示すように姉沼高架橋

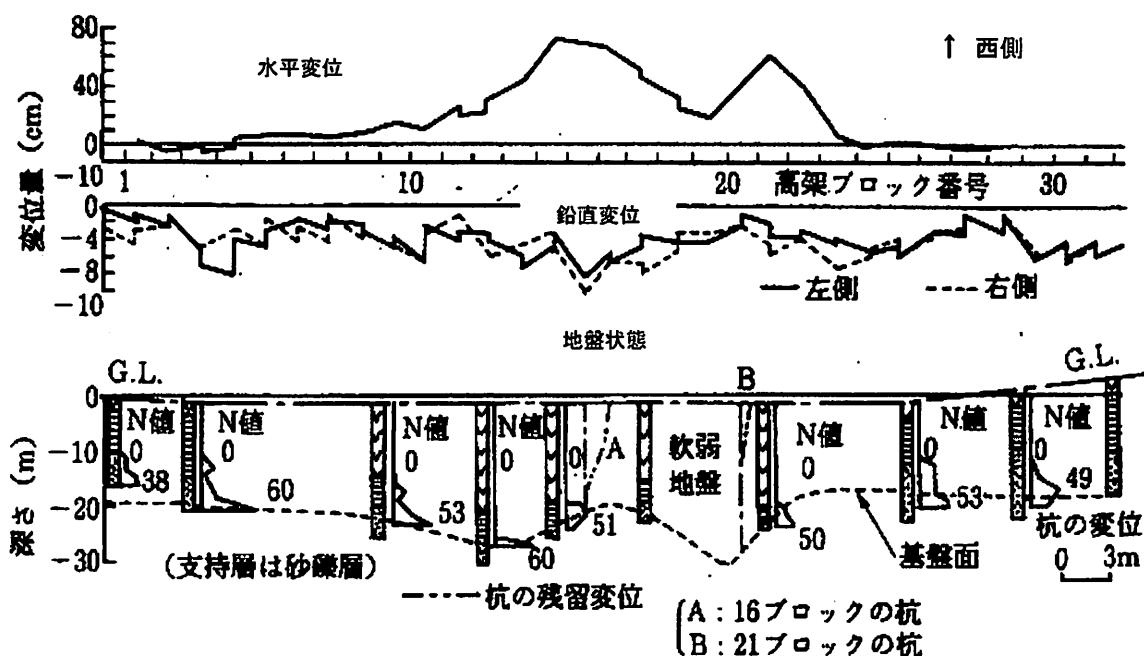


図-7 姉沼高架橋⁷⁾

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。地盤内に12～25mの厚い軟弱ピート層(腐植土層)があり、その下の基盤表面がW形に窪んで軟弱層の厚いところで水平変位が特に大きく生じた⁷⁾。基盤の窪みの最深部とその斜面法肩付近の深度差(軟弱層厚さの差)が約7～12mと大きい。そのため、地震時に両位置の軟弱地盤に不同変位(伸張や短縮や食い違い等)が大きく生じて高架橋ブロック間に変位差が生じたことが考えられる。1994年三陸はるか沖地震のときこの高架橋のNo. 21, No. 22ブロック境界において、両ブロックの杭長差が約12mもあるところで、地盤に不同変位が大きく生じてブロック間が開いてバラスト碎石が落下したことからも確認できる。このとき十勝沖地震後施工のアンダーピニング横梁脇の盛土が20～40cm沈下した場所はピート層存在区間のみで、上記の残留水平変位発生箇所とほぼ一致し、その沈下量はピート層厚にほぼ比例する。No. 24ブロック付近より北側のほぼ一定厚さで薄く堆積するN値約0の腐植土層の下にN値約0の軟弱粘性土層が比較的厚く堆積する北部で生じていない。

高架橋の西側への大きい残留水平変位が高架橋から東側に約30m離れた線路盛土の沈下が大きい位置の脇で生じたのは、同盛土の沈下に伴う軟弱地盤の側方流動で杭が軟弱地盤底から同盛土と反対側の西側に凸型に曲げられたためと推定された。ここで図-7をみると杭(No. 16, 21ブロック)は橋軸直角方向に、軟弱地盤底でなくそれより上方の位置から西

側に凹型に湾曲している。このような杭の大きい湾曲位置や曲がり方等は、阪神高速湾岸線の南港中央公園付近の高架橋の杭が近接盛土の施工で変形したのと似ている。なお高架橋と線路盛土の間の地盤は最上層の埋立土層や基礎周囲の盛土が比較的硬く、その下のピート層が極軟弱で、地震被害が多くみられる上下逆転型の互層地盤である。また残留水平変位のピーク値がW形窪みの最深部で無く、その急な方の斜面部で生じたのは地震被害が一般に硬軟地盤境界部の軟地盤側(剛性変化点の軟質側)で生じるのと似ている。

(3) 紙面平行方向(面内方向)の水平変位差による垂直歪被害の偏土圧被害(図-5(c))

この被害例は(a)軸方向被害と(b)軸直角方向の被害に分けて示す。

(a)軸方向被害には、1964年新潟地震での昭和大橋⁸⁾や、1995年兵庫県南部地震での札幌地区高架橋⁹⁾の落橋、1993年釧路沖地震による利別川橋梁被害⁵⁾、2008年汶川地震での百花大橋(橋長約500m)¹⁰⁾の落橋被害等が該当する。そのうち、代表例として昭和大橋の被害例を次に示す。

1964年新潟地震で落橋した昭和大橋(杭基礎)は図-8に示すように、橋軸方向に軟らかい砂質土層(河成層)の薄い所(右岸側、牡丹山砂丘)と厚い所(左岸側～右岸側)の境界部に存在する⁸⁾。落橋は同図のA～C点の腐植土層、軟弱粘性土層の存在範囲で起き

た。P4 橋脚の杭の湾曲方向が軟らかい砂質土層底面傾斜方向（右側へ）と一致するため、地震で河成層が右岸方向へ大きく変位して落橋が生じたことが考えられる。(b)軸直角方向被害には、1989 年ロマブリータ地震でのエンバカデロ高架橋¹¹⁾やサイプレス高架橋¹¹⁾、ストラブスルー橋等の被害^{4), 11)}、1987 年千葉県東方沖地震での水深第 1 高架橋の被害¹³⁾や、1995 年兵庫県南部地震での新幹線高架橋の下食満高架橋等¹²⁾や阪神高速道路の深江地区高架橋等⁹⁾の落橋被害等が該当する。そのうち、代表例として 1987 年千葉県東方沖地震での水深第 1 高架橋の被害を次に示す。

水深第 1 高架橋は埋没枝谷を谷底平野の出口付近で横断しており、図-9 に示すようにその基礎構造も支持杭等でしっかりしていて、表層地盤は砂質土層に軟弱粘性土層が挟在する上

下逆転型地盤構造である。1987 年千葉県東方沖地震のときにほぼ軸直角方向（埋没谷筋方向）に大きい地震力が作用して、橋脚上部にせん断亀裂が発生した¹³⁾。この被害は図-9 に示すように、埋没谷が特に深い位置で N 値が大きくて厚い砂層の下の極軟弱粘性土層が厚いところほど酷く生じている。これは埋没谷内堆積土層の下流側への強い動きによって発生したことが考えられる。

(4) 脇に基礎のしっかりした別な橋梁や建物等の構

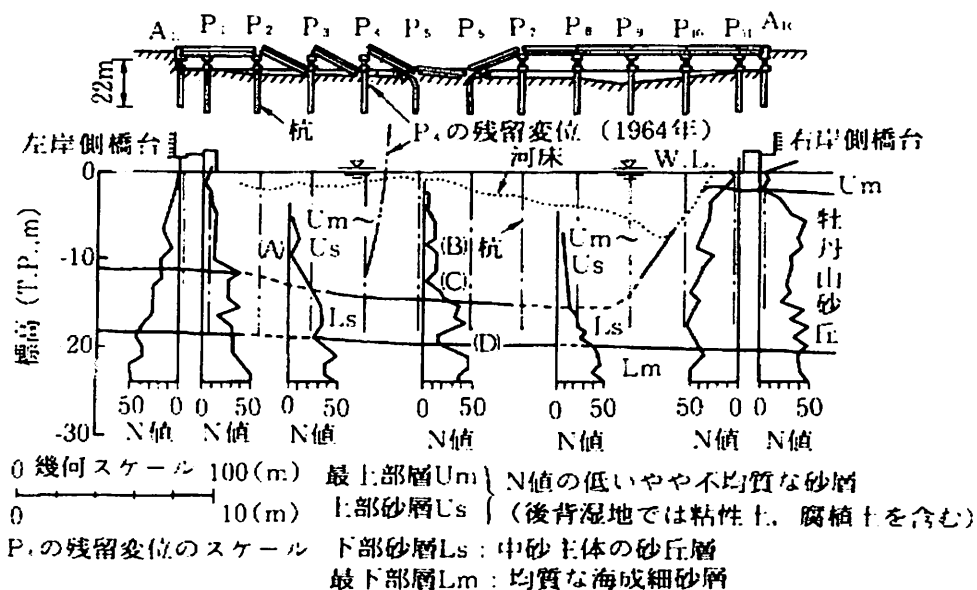


図-8 昭和大橋の被害と地盤状態⁸⁾

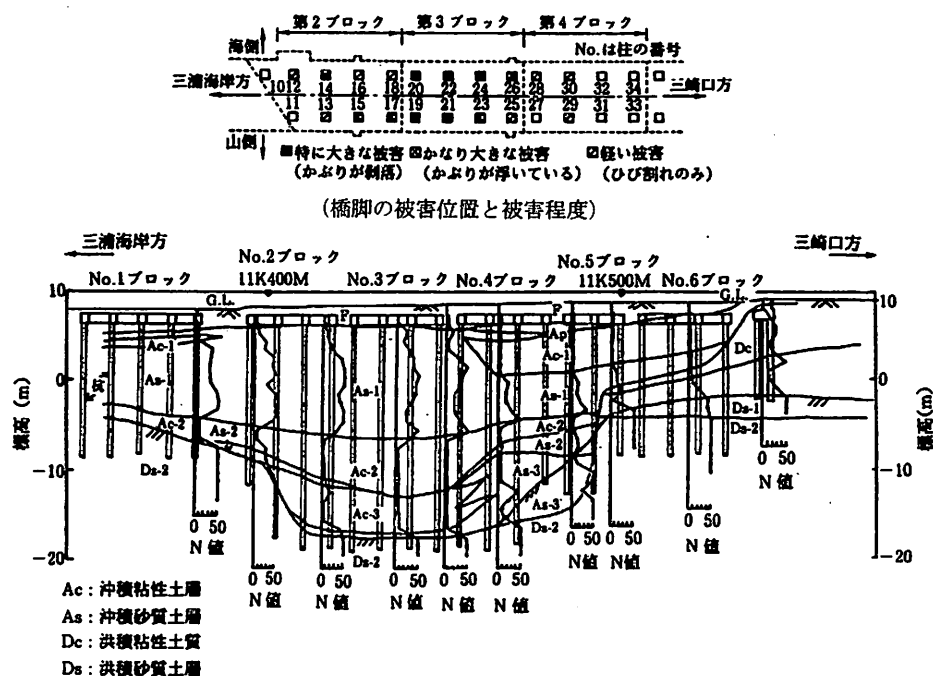


図-9 水深第 1 高架橋の被害と地盤状態¹³⁾

造物があっていっそう著しい被害が生じた橋梁の例(図-3)

(a) 西宮高架橋

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⁴⁾。図-10 に示すように地震で南北に 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、北側橋脚(上り線用)の被害程度は南側橋脚より酷い。ここは夙川沿いの自然堤防の

東側にある埋没谷部で洪積層と沖積層の境界部である。ここでは南脇に比較的大きい建物のあるところで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。地震で埋没谷地盤内の表層地盤が谷筋方向に動いたときに、それがしっかりした自身の杭基礎に止められたため、橋梁基礎に強い偏土圧が作用して被害が発生し、さらに南側の橋脚・基礎も地盤の動きを止める機能を発揮して、被害が生じたことが考えられ、その上で脇の建物・基礎も地盤の動きを止める作用を発揮したため、その脇の橋脚が顕著に破壊して桁が地表に落下したことが推定される。

(b) 六甲道駅高架橋

六甲道駅高架橋(杭基礎)では図-11 に示すように、地震で橋脚等が破壊し、その上の桁とホームが蛇行状に変形して崩壊が生じた⁴⁾。ここは花崗岩からなる玉石地帯とまさ土層(この層は軟弱粘土層を挟む上下逆転方地盤)の境界部であり、六甲道高架橋はその境界線(略南北方向)とほぼ直角に交わって走っており、後者側の地盤で被害が生じている。

なお、高架橋の桁の横移動は図-11 に示すように、線路脇の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)が地震で高架橋の方向に動くが、高架橋のしっかりした杭基礎に止められて強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。そのときその建物直下の地盤は建物自体の基礎で動きを抑制されていて、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。

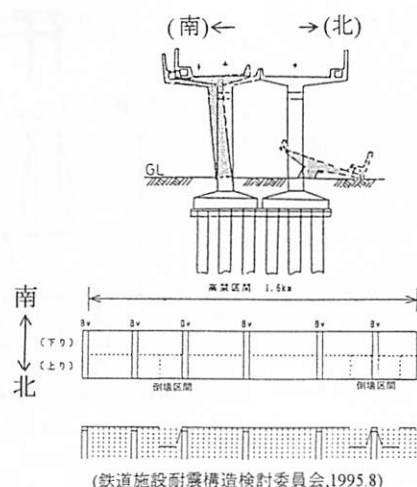


図-10 西宮高架橋の被害状況⁴⁾

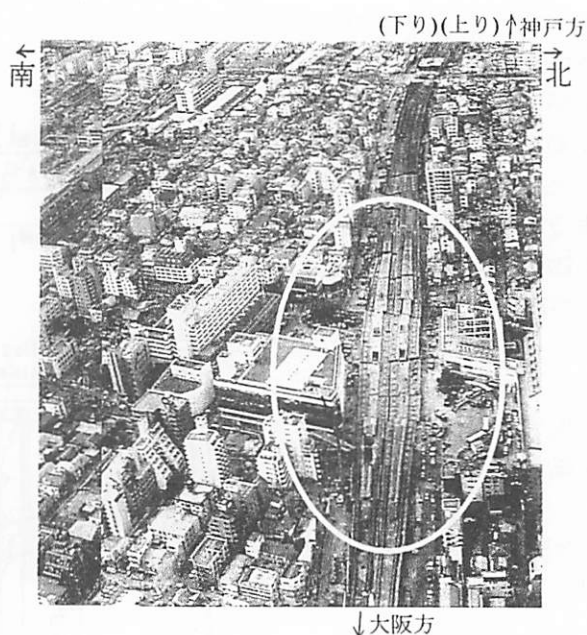


図-11 六甲道駅高架橋(円内は被害範囲)⁴⁾

5. 地盤の不連続点につくられて異種支持地盤状態にあると考えられる橋梁の例

最近つくられた橋梁で異種支持地盤状態にあると考えられる橋梁の例を次に示す。

(a) 千歳大橋

千歳大橋は信濃川に架かる橋梁で1985年(下流側2車線)、1994年(上流側2車線)が完成した。図-12は明治44年発行の旧地形図に千歳大橋等の構造物と現在の川岸を黒太実線で加筆したもので、この図によると、異種支持地盤状態にあることが推察される¹⁴⁾。

(b) 米ノ津川橋梁

米ノ津川橋梁は米ノ津川に架かる2径間連続T型ラーメン箱桁2連構造の橋梁である¹⁵⁾。

図-13の全体図が示すように、基礎構造が杭

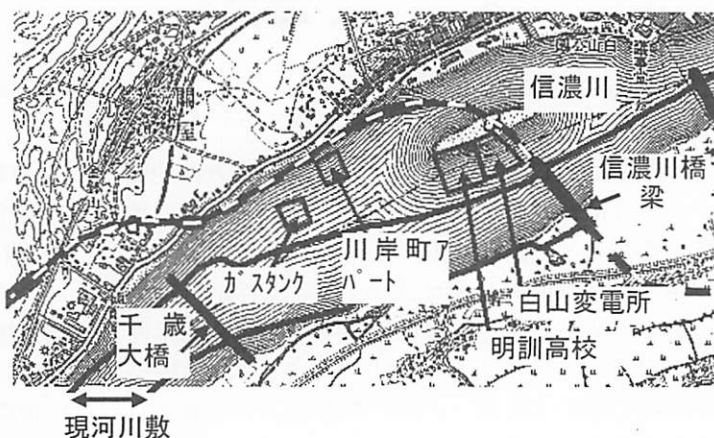


図-12 千歳大橋と旧地形図¹⁴⁾

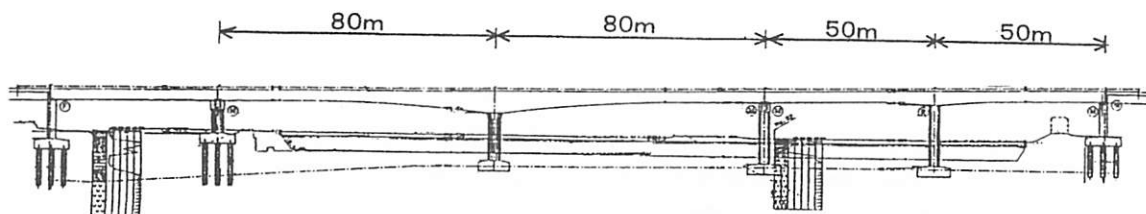


図-13 米ノ津川橋梁¹⁵⁾

基礎と直接基礎からなる。地盤の上層に米ノ津川による低位段丘堆積物の玉石砂礫層が広く分布し、下層には支持層の右岸側に安山岩、左岸側に凝灰角礫岩が分布している。

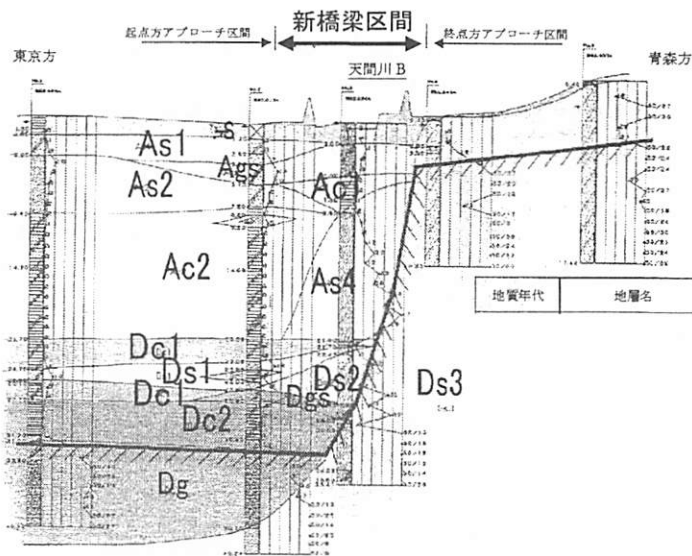
(c) 天間川橋梁

天間川橋梁は七戸川に架かる3径間連続PRCアーチ構造で2006年に完成した¹⁶⁾。その地盤状態は図-14に示すように、七戸川を挟んで東京方と青森方とで大きく異なる。第四紀の粘土、砂、礫からなり、N値が小さい未固結の軟弱地盤である沖積層の下には第四紀層の洪積砂質土層および洪積砂礫層で形成される基盤がある。基礎構造は青森方の橋台の基盤が浅くて直接基礎である外は基盤が深くて杭基礎となっている。基盤深さの急変箇所は青森方から東京方へ約20度で傾斜している¹⁷⁾。

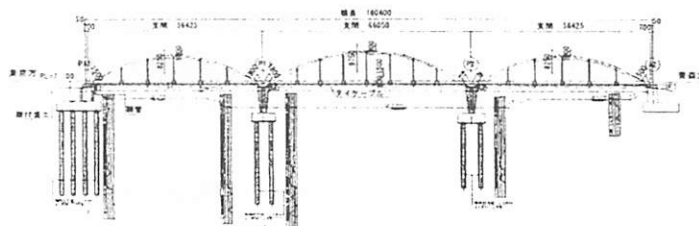
(d) 東京ゲートブリッジ

東京ゲートブリッジはトラス橋であり、2011年2月27日に中央径間で最後の橋桁架設が行なわれた¹⁸⁾。

図-15に示すように、航路両脇の主橋脚MP2とMP3の長さに21mの差があり、地震で大きい変位差が発生することも推察されたが、今回の3月の東日本大震災ではそれによる変形等が報告されていないので、設計や施工の適切さが現れたものと考え



(a) 地質縦断面図¹⁷⁾



(b) 橋梁一般図¹⁶⁾

図-14 天間川橋梁

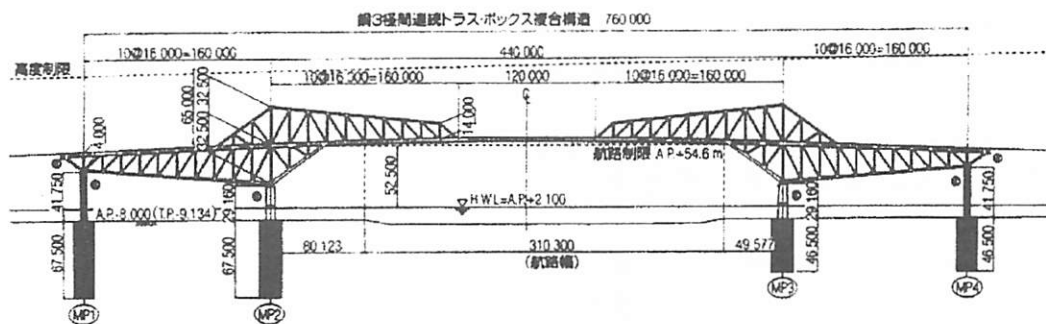


図-15 東京ゲートブリッジ¹⁸⁾

られる。

5. おわりに

以上のように地盤の不連続点とそこに発生する歪に主眼をおいて橋梁の地震被害機構の推察を行った。その結果、地震被害は地盤の不連続点で地盤変位に抵抗する橋梁(地盤変位抵抗型橋梁)に生じ易く、均質地盤での地盤変位に追随する橋梁(地盤変位追随型橋梁)に生じ難いといえることができる。しかし4. (d)の事例が示すように、前者のタイプの橋梁でも地盤条件にあった設計・施工を適切に行なえば被害は防ぐことが出来ると考えられる。なお、今後とも橋梁の安全性・経済性確保のための調査を継続したいと考えている。

終わりに、以上の調査に当たって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

- 1) 例えば、那須誠：構造物の地震被害と地盤と常時微動の関係、第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 89-96, 2008. 1.
- 2) 例えば、那須誠：構造物の地震被害と地盤と地震応答解析結果の関係、第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集(2009年1月), B2-1, p. 143-150, 2009. 1.
- 3) 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論文集, pp. 299-306, 2003. 7.
- 4) 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.
- 5) 那須誠：橋梁の地震被害機構と地盤の関係、2011(平成23)年度全国大会第66回年次学術講演会講演概要集CD-ROM, I-416, 2011. 9.
- 6) 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.
- 7) 那須誠：地震被害を受けた橋梁と地盤、第54回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-B512, pp. 1020-1021, 1999. 9.
- 8) 那須誠：東北地方における地震被害と地盤の関係、平成21年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, I-18, 2010. 3.
- 9) 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.
- 10) 高橋良和, 川島一彦, 吳智深外：中国四川地震による百花大橋及び回欄立交橋の被害、第30回土木学会地震工学委員会論文集CD-ROM, No. 5-0005, 2009. 5.
- 11) 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, A34, pp. 68-69, 1992. 11.
- 12) 那須誠：構造物の地震被害と地盤と常時微動の関係、第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 89-96, 2008. 1.
- 13) 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, 2002. 1.
- 14) 那須誠：地震被害箇所の地盤変位と旧地形図の関係、第44回地盤工学研究発表会発表講演集CD-ROM, No. 820, 2009. 8.
- 15) 竹下昭博：米ノ津川橋りょうの設計・施工—九州新幹線(鹿児島ルート)—、日本鉄道施設協会誌, pp. 61-63, 2001. 8.
- 16) 日時政紀, 鎌田卓朗：東北線上北町-乙供間天間川橋梁改築工事の計画—3径間連続PRCアーチ橋—、日本鉄道施設協会誌, 42-12, pp. 48-50, 2004. 12.
- 17) 中津晃一：新構造形式・3径間連続アーチ橋の設計施工—東北本線天間川橋梁—、第21回総合技術講演会概要集(土木工事施工)、日本鉄道施設協会, 2006. 10.
- 18) (独) 港湾空港技術研究所編：沿岸域の開発プロジェクトと新しい技術の発展に関する国際シンポジウム配布資料, 2010. 12.