

地震による杭基礎構造物の 損傷部位と地盤の関係の研究

那須 誠¹・金野 寿哉²

¹前橋工科大学大学院教授 工学研究科建設工学専攻 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

E-mail:nasu@maebashi-it.ac.jp

²前・前橋工科大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

E-mail:m0516006@maebashi-it.ac.jp

1995年兵庫県南部地震では地盤変位などによる杭基礎構造物の被害が数多く報告された。しかし、それらの報告においては、地震波の影響や構造物自体の構造の問題に着目したものがほとんどであり、地盤構造に着目したものはあまり見られない。そこで本研究では、地盤構造が杭基礎構造物の損傷に影響を与えている一要因と考え、杭基礎構造物の損傷部位と地盤構造の相互関係を文献調査とラーメン高架橋を解析モデルとした2次元FEM地震応答解析を行って検討した。その結果、砂・礫層等が主体の良好な地盤に、腐植土層をはじめとする軟弱粘性土層を薄く挟む地盤構造上に立地するものでは橋脚柱が、厚い軟弱粘性土層の埋立地盤上に立地するものでは杭頭部や地層境界部の杭が損傷する可能性が高いことが推察された。

Key Words : *pile foundationed structure, earthquake damaging part, ground, case study, earthquake response analysis*

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、杭基礎構造物において、地盤変位などによる杭頭部や地層境界部の杭の損傷の事例が数多く報告されている。また、これと相反するかたちで杭には損傷がなく橋脚柱をはじめとする地表面より上部の構造が損傷しているケースも顕著であった。このような被害事例は、1964年新潟地震や1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震でも報告されている。

本研究では、このような杭基礎構造物の損傷部位と地盤構造に着目し、それらの相互関係を検討するために地震応答解析を行った。そして、その解析結果と実事例を比較検討することで被害発生メカニズムを推定した。なお、地震応答解析の対象構造物としてRCラーメン高架橋の橋軸直角方向をモデル化し、地盤モデルについては橋脚・杭への地盤構造の影響を調べるために、全部で7通りの地盤構造をモデル化して解析を行った。

杭基礎構造物が主流となった今、その損傷部位と地盤構造の相互関係を検討することは、低いライフサイクルコストで、いかに効率よく耐震設計・耐震補強を実施していくかという課題を議論する上で、非常に有意義なものになると考えている。

2. 地震被害事例

調査対象事例を表-1¹⁰⁾に示す。表-1は、橋梁と建物等の杭基礎構造物において、最も損傷が多く見られる杭頭部および杭の地層境界部、橋梁・高架橋の橋脚柱に着目し、その構造物が立地する地盤の構造を簡潔にまとめたものである。表-1を見ると明らかであるように、軟弱地盤の埋立地では、杭頭部や杭の地層境界部が損傷するケースが多く見られる。また、砂礫層などが主体の良好地盤中に薄く軟弱粘性土層を挟む地盤では、橋梁・高架橋において橋脚柱を損傷するケースが多く見られる。このように、地震時における杭基礎構造物の損傷部位と地盤構造は、ある程度関係付けることが可能であると考えられる。以上をまとめると次のようになる¹⁰⁾。

(a)比較的に厚い軟弱粘性土層で構成する軟弱地盤の埋立地では、杭頭部や杭の地層境界部が損傷するケースが多い。

(b)比較的良好な地盤中に薄く軟弱粘性土層を挟む地盤では、橋脚柱が損傷するケースが多い。

被害発生メカニズムを推定すると¹⁰⁾、(a)の場合は、比較的に厚く堆積した軟弱粘性土層の圧密沈下が生じることが予測され、フーチング底面とその直下の地盤面との間に空隙が発生し、突出杭のような状態になる。そうする

表-1 調査対象事例のまとめ¹⁾

建物名	地震名	地盤構造	損傷部位
神戸商船大学建物	1995年兵庫県南部地震	軟弱地盤の埋立地	杭頭部、杭(地層境界部)
東灘区深江工場建物	1995年兵庫県南部地震	軟弱地盤の埋立地	杭頭部、杭(地層境界部)
長町郡山団地	1978年宮城県沖地震	軟弱地盤の埋立地	杭頭部、杭(地層境界部)
東灘処理場・水処理施設	1995年兵庫県南部地震	軟弱地盤の埋立地	杭頭部、杭(地層境界部)
阪神高速道路5号湾岸線の高架橋	1995年兵庫県南部地震	軟弱地盤の埋立地	杭頭部、杭(地層境界部)
ポートアイランドの高架橋	1995年兵庫県南部地震	軟弱地盤の埋立地	杭頭部、杭(地層境界部)
ハーバーハイウェイ	1995年兵庫県南部地震	軟弱地盤の埋立地	杭頭部、杭(地層境界部)
姉沼高架橋	1968年十勝沖地震	軟弱地盤の埋立地	杭頭部、杭(地層境界部)
新潟RC造建物	1964年新潟地震	主に砂質土層	杭(地層境界部)
阪神高速道路3号神戸線高潮町地区高架橋	1995年兵庫県南部地震	砂礫層主体(薄い軟弱粘性土層を挟む)	橋脚柱(主鉄筋段落とし部)
阪神高速道路3号神戸線札幌地区高架橋	1995年兵庫県南部地震	砂礫層主体(薄い軟弱粘性土層を挟む)	橋脚柱(主鉄筋段落とし部)
阪神高速道路3号神戸線深江本町地区高架橋	1995年兵庫県南部地震	砂礫層主体(薄い軟弱粘性土層を挟む)	橋脚柱(主鉄筋段落とし部)
山陽新幹線下食満高架橋	1995年兵庫県南部地震	砂礫層主体(薄い軟弱粘性土層を挟む)	橋脚柱上部、落橋
山陽新幹線 阪水高架橋	1995年兵庫県南部地震	砂礫層主体(薄い軟弱粘性土層を挟む)	橋脚柱上部、落橋

表-2 橋脚・基礎の材料特性¹²⁾

	ポアソン比 ν	単位体積重量 $\gamma_t(\text{tf/m}^3)$	初期せん断弾性係数 $G_0(\text{tf/m}^2)$	減衰定数 $h(\%)$
上層梁	0.2	2.5	1174895	3
柱(上部)	0.2	2.5	1041888	3
柱(下部)	0.2	2.5	1174895	3
フーチング	0.2	2.5	1108391	3
場所打ち杭	0.2	2.5	1108391	3

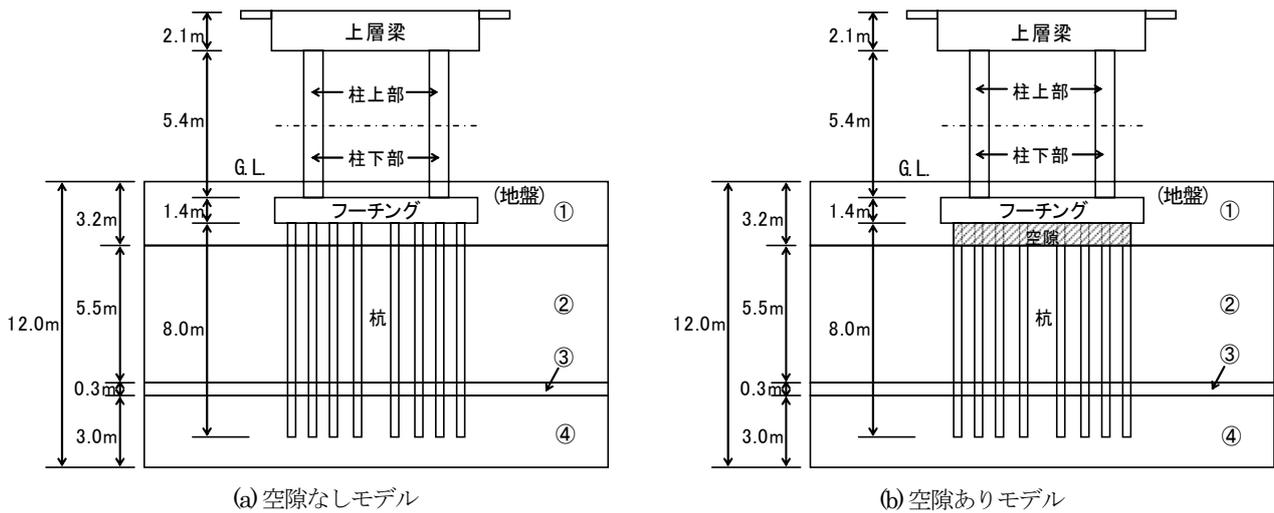


図-1 橋梁と地盤の解析モデル(①-④は土層番号、表-3参照)

表-3 地盤モデル(①-④は土層番号、各土層の特性は表-4参照)

	case-1	case-2	case-3	case-4
①	砂質土	埋戻し土	埋戻し土	埋戻し土
②		粘性土	砂質土	軟弱粘性土
③		軟弱粘性土	軟弱粘性土	
④		基盤	基盤	基盤

表-4 地盤材料特性

土質名	N値	ポアソン比 ν	単位体積重量 $\gamma_t(\text{tf/m}^3)$	せん断波速度 $V_s(\text{m/s})$	初期せん断弾性係数 $G_0(\text{tf/m}^2)$	初期減衰定数 $h_0(\%)$	$G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 曲線*
埋戻し土	12	0.49	1.9	183	6488	5	SAND-40(kPa)
砂質土	10	0.49	1.9	172	5732	5	SAND-150(kPa)
粘性土	4	0.49	1.8	159	4640	5	CLAY-150(kPa)
軟弱粘性土	2	0.49	1.4	50	357	10	CLAY-200(kPa)
基盤	50	0.45	2	295	17748	3	一定

* 例えば、40(kPa)は拘束圧であり、図-2参照。

と、地震時に地盤変位に伴う偏土圧が杭に大きく作用した時、杭の周囲が地盤で拘束されていない杭頭部に応力が集中することによって、杭頭部が損傷するものと推定される。また、杭の地層境界部の損傷は、軟弱粘性土層が比較的N値の大きい地層の中間部に存在する場合、水平地盤変位量の極端な違いによって、地層境界部に位置する杭にせん断応力が大きく生じて損傷するものと考えられる。

また、(b)の場合は比較的良好な地盤に建設されたしっかりした支持杭基礎構造物で、その一体となったフーチング・杭・地盤系の地震時の動きは周辺地盤よりも小さいため、系が周辺地盤の動きに抵抗することが考えられる。その際に薄い軟弱粘性土層を滑り面として動いた、その上部の比較的N値の大きい周辺地盤から、地震時の急激で大きい土圧(即ち偏土圧)が系に作用することにより、反作用として例えばだるま落としのようなかたちで橋脚柱が損傷するものと考えられる。

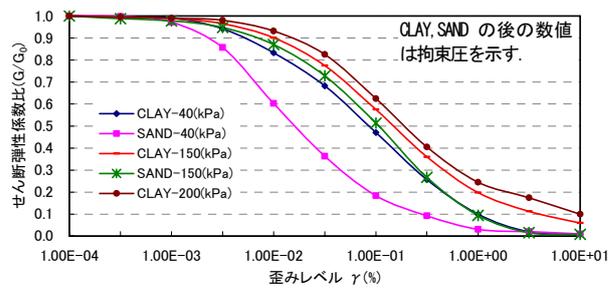
3. 地震応答解析

表-1には橋梁の他に建物の事例も含まれているが、ここでは代表例として、高架橋をとりあげて地震応答解析を行うことにする。

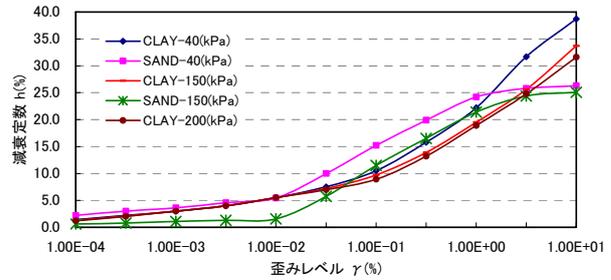
(1) 橋脚モデル

橋脚モデルは、RCラーメン橋脚の桁受部(橋軸直角方向)である。ラーメン橋脚とした理由は、近年、高架橋などではラーメン構造が増加傾向にあり、それに伴って地震被害も目立ち始めているからである。RCラーメン橋脚の寸法は、フーチングが幅8.4m、奥行き2.8m、高さ1.4m、橋脚柱が断面0.85m×0.85m、高さ5.4m、上層梁が幅12.2m、奥行き3.44m、高さ2.1mで左右に2.875mの張り出し部を有している(図-1参照)。基礎形式は杭基礎構造であり、RC杭(直径φ350mm)、杭長8m、杭の配列は線路方向3列×線路直角方向4列となっている。さらにこの橋脚上には、桁や床版などの上部構造物が載り、それらの上部構造重量については、上層梁の天端にトータルで266tfの荷重¹⁾を載荷した。

橋脚・基礎の材料特性値を表-2に示す。初期せん断弾性係数 G_0 については、コンクリートの設計基準強度をもとにして求め、それ以外の特性値(ポアソン比： ν 、単位体積重量： γ 、減衰定数： h)については、各種地震応答解析で用いられている一般的な値²⁾を用いた。ここで、橋脚柱上部の初期せん断弾性係数 G_0 を下部のそれよりも12%小さく設定しているが、これは鉄筋の段落とし部での剛性の変化を考慮し、橋脚柱の軸方向断面の



(a) せん断弾性係数比 G/G_0 ～せん断歪み γ 曲線



(b) 減衰定数 h ～せん断歪み γ 曲線

図-2 地盤材料のせん断歪み非線形特性曲線¹⁴⁾

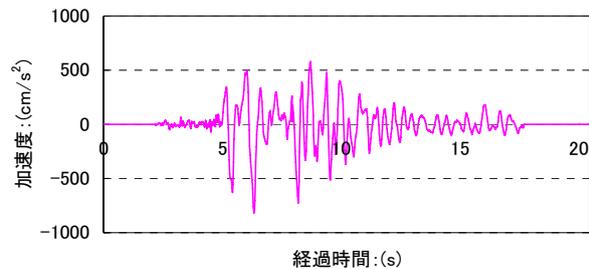


図-3 入力地震波形(神戸海洋気象台, NS成分)

鉄筋とコンクリートの面積比と剛性から換算して求めたものである。

本解析では、構造物に関しては、地盤材料に比べて剛性が極めて高いものとみなし、非線形性を考慮するモデルは用いず、線形材料と仮定して解析を行った。なお、本解析モデルの奥行きは単位幅とした。

(2) 地盤モデルと材料特性値

地盤モデルと材料特性値は、2.で述べた(a)、(b)の関係を考慮して図-1、表-3～4のように設定した。

地盤の大きさは、幅20m、高さ12m、奥行きは単位幅とした。全部で7通りの地盤構造をモデル化しており、case-1は表層地盤が砂質土のみの一様地盤、case-2～case-4については表層地盤が互層地盤であり、土層の①層の埋戻し土が3.2mの厚さで全ケースで共通、②層が5.5mの厚さであり、この層はcase-2では粘性土でN値4、case-3では砂質土でN値10、case-2とcase-3の③層の軟弱粘性土は0.3mの厚さでN値2、case-4では②層と③層の軟弱粘性土が計5.8mの厚さでN値2、④層の基盤は3mの厚さで全ケース共通とした。ここで、case-2～case-4に

において、②層に対し、それぞれ異なる地盤材料を設定したのは、薄い軟弱粘性土層上の地盤の硬軟による地盤挙動の変化、またそれに伴う橋脚および杭の変位やそれらに生じる応力にどの程度の影響を及ぼすか検討するためである。case-3において薄い軟弱粘性土層の上に比較的厚い砂質土層が存在するモデルとしたのは、橋梁の地震被害発生箇所においてN値の極めて低い薄い軟弱粘性土層がある同様の地盤構造も認められるからである。

なお、case-2～case-4では、粘性土や軟弱粘性土の圧密沈下を想定して、フーチングとフーチング直下の地盤面との間に空隙を考慮したモデルでも解析を行った。

以上に述べた土層の土質定数を表-4に示す。この土質定数は文献14)に示されているN値とせん断波速度 V_s の関係式を使って求めたものである。但し、③層の V_s の値等は試算を行った結果、同関係式で求めた値より小さい値が示されている。

また、図-2に示す地盤の変形特性の歪み依存性は、文献14)に示す既往の研究で得られたせん断弾性係数比 G/G_0 ～せん断歪み γ 曲線（但し、 G_0 :任意ひずみ時のせん断弾性係数、 G_0 :微小ひずみ時のせん断弾性係数）および減衰定数 h ～せん断歪み γ 曲線を参照して作成したものである。

(3) 入力地震波

入力地震波形を図-3に示す。この入力地震波は、1995年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された地震波のNS成分加速度波形である。この地震波の最大加速度は818galであるが、本解析では最大加速度を100galに調整して、解析モデルの基盤底面から水平方向に加振し、鉛直上昇波として入力した。

(4) 解析手法

本解析では、2次元FEM地震応答解析プログラム「micro FLUSH」¹³⁾を用いる。このプログラムは、周波数領域における複素応答法によるもので、本質的には非線形な地盤材料の応力～ひずみ関係を、それと等価な効果を表す複素剛性で表現し、かつ反復法によって複素剛性パラメーター（せん断弾性係数 G 、減衰定数 h ）のひずみ依存性を考慮する等価線形法を用いるものである。

境界条件は、地盤モデルの左右端にエネルギー伝達境界、底面に剛体基盤を用いた。

4. 地震応答解析結果と考察

ここでは、地震応答解析で得られた変位やせん断応力の結果とその考察結果について述べる。

(1) 地盤構造の影響

a) メッシュ変位図による比較

図-4に空隙なしモデルのメッシュ変位図を示す。図-4を見るとcase-1, 2, 4のモデルでは、橋脚は単調に変形しているが、case-3（空隙なし）のモデルにおいて、橋脚柱の中間部の主鉄筋段落とし部(剛性変化点)が特に大きく変形しているのが確認できる。case-3（空隙なし）のモデルは、良好な地盤に薄く軟弱粘性土層を挟む地盤構造を想定したものであり、全部で7通りある地盤構造の中では最も良好な地盤に見える。実事例においても、表-1に示されているように砂礫層主体地盤に薄く軟弱粘性土層を挟む地盤構造に立地する構造物が、橋脚柱の主鉄筋段落とし部を損傷しているケースが数多く見られることから、解析結果と実事例とが比較的良好に一致したと言える。

b) 相対変位による比較

地盤構造の影響が杭の変形にどのように表れるかを見るために、図-5に、case-1～case-4の相対変位（水平成分）を基準点からの高さで整理したものを示す。大きな変形が見られたのは、case-2（空隙なし）モデル、case-2（空隙あり）モデル、case-3（空隙あり）モデルの比較的良好な地盤構造であり、いずれも杭の中間部でそれが生じている。

一方、case-4のモデルでは、③層の軟弱粘性土層中で杭の変形量が極めて大きくなっており、地層境界において変形量の急変が見られる。このことから、地盤の硬軟の急変による水平地盤変位量の差が、地層境界部の杭の損傷に大きく影響していることをうかがうことができる。

c) せん断応力による比較

図-6に、橋脚や杭に生じるせん断応力を基準点からの高さで整理したものを示す。図-6から、case-1～case-3モデルの比較的良好な地盤構造では、フーチングより上の構造にせん断応力が大きく生じているのがわかる。特に、断面形状の極端に異なる上層梁と橋脚柱の境界部や橋脚柱とフーチングの境界部、さらに橋脚柱での卓越がみられる。一方、軟弱地盤の埋立地を想定したcase-4の地盤構造では、フーチングより下の杭にせん断応力が大きく生じており、特に杭頭部で卓越している。これらのことから、実事例において、良好地盤に軟弱粘性土層を薄く挟む地盤構造で橋脚柱の損傷が多く見られ、軟弱地盤の埋立地で杭の損傷が多く見られる理由が説明できることが考えられる。

(2) フーチング直下の地盤と間の空隙の影響

a) 相対変位による比較

フーチング直下の地盤と間の空隙の有無によって、

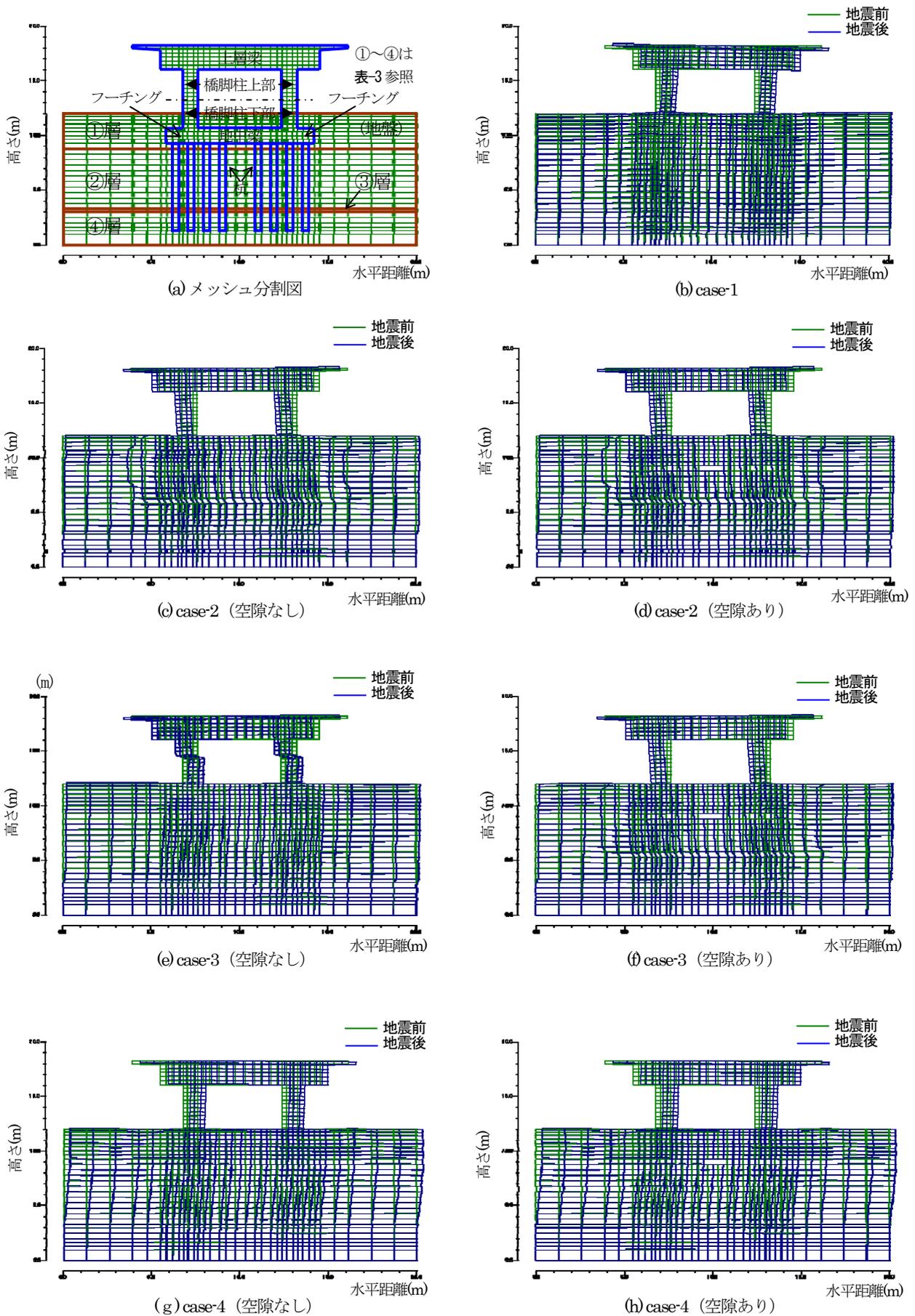


図-4 メッシュ変位図(変位量は図-5, 図-7 参照)

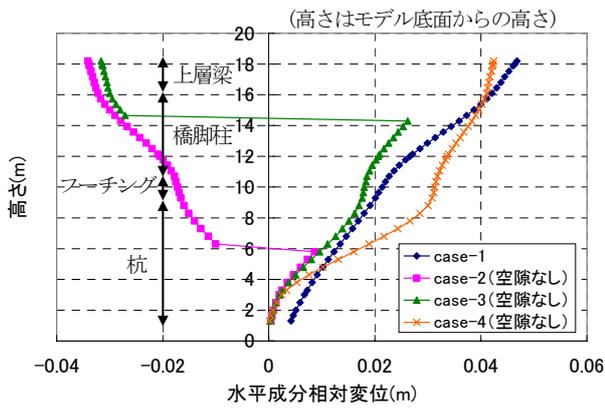


図-5 水平成分相対変位の鉛直方向分布

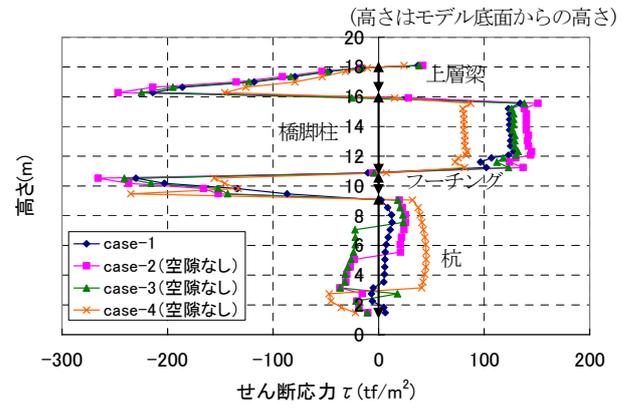
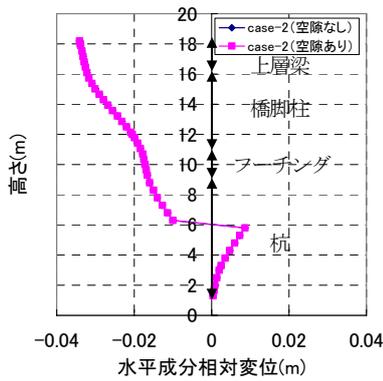
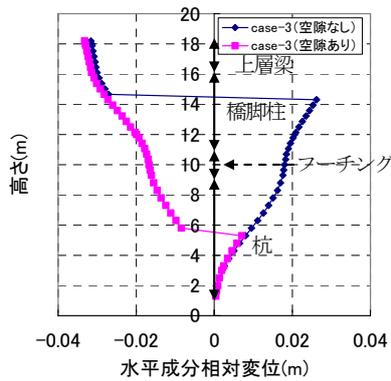


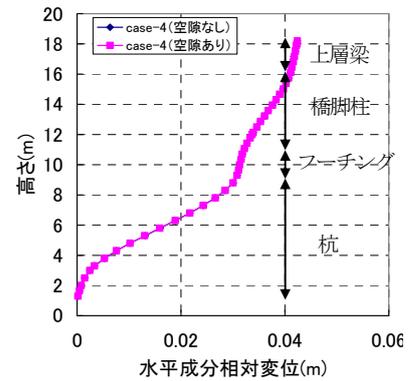
図-6 せん断応力の鉛直方向分布



(a) case-2

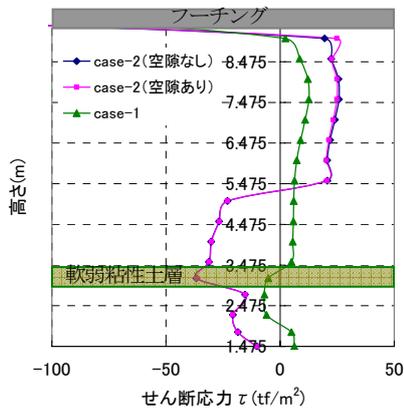


(b) case-3

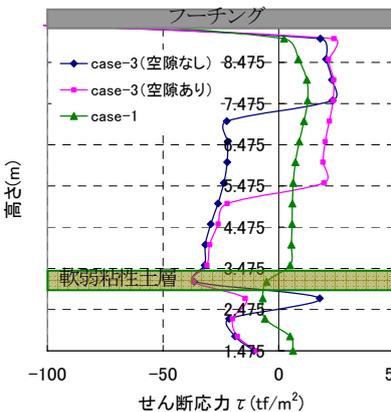


(c) case-4

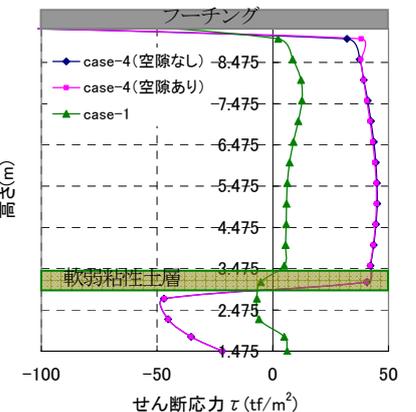
図-7 空隙の有無による水平成分相対変位の比較(高さはモデル底面からの高さ)



(a) case-2



(b) case-3



(c) case-4

図-8 空隙の有無による杭に生じるせん断応力の比較(高さはモデル底面からの高さ)

表-5 杭頭せん断応力の比較(図-8の最上部の◆, ■, ▲印の値の比較)

case No.	1	2	3	4			
空隙	無	無	有	無	有	無	有
せん断応力 τ (tf/m ²)	2.31	19.5	24.8	18.1	23.9	32.1	38.2
せん断応力比(空隙有/空隙無)	—	1.27	1.32	1.19			

杭頭部の変位にどのような違いが表れるのかをみるために、図-7に case-2~case-4 モデルの空隙のあるものとならないもので、相対変位（水平成分）を比較したものを示す。case-2と case-4の空隙のあるものとならないものでは相対変位のグラフ曲線が重なっていて違いが殆ど見られず、明らかに違いが見られるものは case-3 のモデルである。これは、case-3（空隙なし）モデルにおいて、橋脚柱の中間部（主鉄筋段落とし部）に大きなずれ変形が表れたが、同（空隙あり）モデルにそのような変形が表れなかったことによる応答の違いと考えられる。それ以外のモデルでは空隙の有無による杭頭部の相対変位の違いが、それほど大きく認められなかったが、それには地震応答解析の入力が 100gal と小さかったこと等が理由の 1 つに考えられる。

b) せん断応力による比較

フーチング直下の空隙の影響が杭頭部の相対変位に対してはそれほど大きく表れなかったことから、次にせん断応力の比較を行った。図-8に杭に生じるせん断応力を基準点からの高さで整理し、フーチング直下に空隙のあるものとならないもので比較した結果を示す。この図-8をみると、埋戻し土や軟弱粘性土の挟み層が無く砂質土のみからなる表層地盤でできている case-1 のモデルのせん断応力が他のモデルと比べて最も小さい。また、図-8 から分かるように、空隙のないものに比べて空隙のあるものの方が杭頭部のせん断応力が大きい。その杭頭部のせん断応力が、空隙のある方がない方よりどの位大きいかまとめたものを表-5に示す。この表によると杭頭部のせん断応力が空隙のある方がない方より、case-2 モデルでは 27%、case-3 モデルでは 32%、case-4 モデルでは 19%ほど大きく発生している。このように、空隙の有無による杭頭部に生じるせん断応力の違いは、case-4→case-2→case-3 モデルというように、②層の剛性が大きいほど大きくなる傾向にあると言える。また、図-8 から、薄い軟弱粘性土層の存在が地層境界部の杭に生じるせん断応力を卓越させる原因となっていることが分かる。

c) case-1 モデルとその他モデルの比較

比較的良好な砂地盤一層のcase-1モデルの変位は、図-5をみると分かるように、杭下端部より上層梁にかけて単調に増加しており、その大きさは、杭の下端部と上層梁部ではcase-4モデルより大きく、その間ではcase-4モデルより小さい。

case-1モデルのせん断応力は、図-6をみると分かるように、杭部では全ケースで最も小さくなっており、フーチングより上部ではcase-4モデルより大きく、case-3モデルより小さい。

(3) 解析結果のまとめと考察

a) 橋脚柱の大きな変形は、地盤状態の良好なcase-3（空隙なし）のモデルで生じた。これは実事例において⁹⁾、比較的良好地盤に軟弱粘性土層を薄く挟む地盤構造で、橋脚柱の主鉄筋段落とし部の損傷が多いことと一致する。また、case-1~case-3モデルの比較的良好な地盤構造では、フーチングより上の構造部でせん断応力が大きく生じた。反対に、軟弱地盤の埋立地を想定したcase-4のモデルでは、杭に生じるせん断応力が大きくなり、特に杭頭部のせん断応力の卓越がみられた。

従って、被害事例と解析結果からその場合の被害機構は図-9の模式図のように考えられる¹⁰⁾。即ち、比較的良好

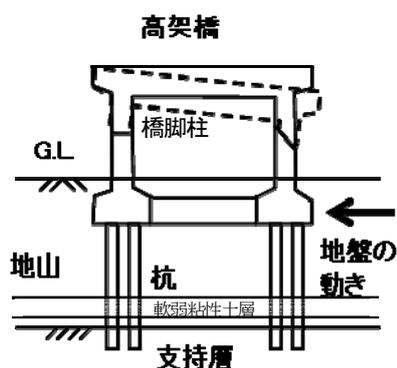


図-9 比較的良好な地盤上の高架橋の橋脚柱の被害

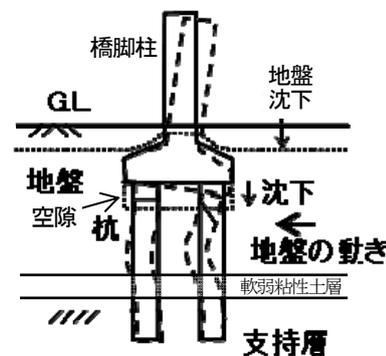


図-10 埋立地盤上の高架橋の杭頭部の被害

な砂・礫質地盤（軟弱腐植土や粘性土層を挟むことが多い）等の地山にフーチングが存在している場合、そこでは地盤沈下が発生せずフーチング直下に空隙ができないので、地震で地盤が動けばフーチング等に土圧（偏土圧）が大きく急激に作用して橋脚柱にせん断破壊等の損傷が発生することが考えられる。

b) フーチング直下の空隙の影響は、杭頭部のせん断応力に表れ、その大きさは埋戻し土層と軟弱粘性土層の間に挟む②層の剛性が大きいほど顕著であった。

従って、被害事例と解析結果からその場合の被害機構は図-10の模式図のように考えられる¹⁰⁾。即ち、腐植

土層等の上部に埋立土層が存在すると、地盤沈下が発生してフーチング直下に空隙ができて杭頭部は拘束のない突出状態になる。上部工（橋脚や建物躯体）が比較的トップヘビー状態のときに地震で地盤が動けば杭等に土圧（偏土圧）が大きく作用して、拘束のない杭頭部に応力が集中して損傷が発生することが考えられる。

5. 結論

地震時の杭基礎構造物の損傷部位と地盤構造の関係を、被害事例調査と地震応答解析によって検討した。その結果、次のようなことが分かった。

- 1) 杭基礎をもつ構造物である橋梁・高架橋の橋脚柱の損傷は、砂礫層などが主体の比較的良好な地盤に軟弱粘性土層を薄く挟んだ地盤構造において発生しやすいと考えられる。
- 2) 杭基礎をもつ構造物の杭の損傷は、杭頭部や地盤の剛性が大きく異なる地層境界部で発生しやすいと考えられる。これは、地盤等の剛性の大小による地震時の水平地盤変位量の違いが原因と推定される。
- 3) 杭頭部の損傷は、軟弱地盤の埋立地で発生しやすい。これは、フーチング直下の空隙の存在による杭頭部への応力集中が影響しているものと考えられる。なお、この場合は上記2)の極端なケースと考えられる。即ち、その空隙は剛性がゼロで杭に対する拘束がないため、この部分に応力が集中するため損傷が発生するものと推察される¹⁰⁾。

なお、今後は実際に地震被害を受けた構造物を対象にして、実際の大きさの地震動の入力で解析を継続して深度化を行う予定である。

謝辞

以上の調査を行うにあたり参考にさせていただいた多くの文献の著者と、お世話になった(株)地震工学研究所に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 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.

- 2) 岡弘，飯場正紀，阿部秋男，時松孝次：孔中内視カメラと弾性波非破壊試験を併用した建物杭基礎の震害調査，土と基礎，Vol.44，No.3，pp.28-30，1996.3.
- 3) 藤井俊二，長瀬慶明，チェプリノスキー・ミシュコ，船原英樹，山口順子：液状化で損傷した杭基礎構造の応答解析と耐震補強，土と基礎，Vol.44，No.3，pp.31-33，1996.3.
- 4) (株)奥村組編：神戸市東灘処理場災害復旧関連建設工事に伴う基礎杭被災に関する検討報告書，1998.7.
- 5) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会編：阪神・淡路大震災調査報告 2，土木構造物の被害 トンネル・地下構造物 土構造物 基礎構造物，第4章 基礎構造物，1998.7.
- 6) 杉村義広：建築基礎構造の震害と復旧，土と基礎，Vol.35，No.9，pp.55-59.1987.6.
- 7) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会編：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書，1995.12.
- 8) 阪神高速道路公団編：阪神高速道路地質資料，1997.3.
- 9) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会編：阪神・淡路大震災調査報告 1，土木構造物の被害(橋梁)，第1章 橋梁，1996.12.
- 10) 那須誠：地震時の杭あるいは上部工の損傷と地盤の関係，第41回地盤工学研究発表会発表講演集，No.960，pp.1919-1920，2006.7.
- 11) 土木学会コンクリート委員会編：コンクリートライブラリー114，2003年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害分析，2004.11.
- 12) 和田克哉他：橋梁下部構造の設計法と設計例，pp.15-16，近代図書，2004.2.
- 13) (株)地震工学研究所編：micro Flush マニュアル，1999.6.
- 14) 那須誠，羽矢洋：鉄道線路沿いの土の動的性質，鉄道総研報告，Vol.2，No.1，pp.45-51，1988.1.

(2007.4.6受付)

A STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN GROUND AND EARTHQUAKE-DAMAGED PART OF STRUCTURE WITH PILE FOUNDATION

Makoto NASU and Toshiya KINNO

In the 1995 Hyogoken-nambu earthquake and so on, many structures with pile foundation have received damage at upper part or soil layers boundary part of piles and at building columns or bridge piers of the superstructure. In these places, relationship between ground and earthquake-damaged parts of structures with pile foundation has been investigated in both the case study and the seismic response analysis. It has been found out that many damages of columns or piers had occurred at the gravelly and/or sandy ground with comparatively thin and soft soil layer, pile damage has occurred in the soil layers boundary part within its ground, and particularly upper part damage of piles has occurred in the reclaimed land on soft soil ground with void under the footing. It has been found out by seismic response analysis that their damage has been occurred at stress concentration part of structures.