

論文 液状化を生じる地盤における RC 杭基礎の非線形応答に関する実験的研究

鍋島 信幸^{*1}・牧 剛史^{*2}・半井 健一郎^{*3}・平野 勝識^{*4}

要旨：RC 構造物全体系の精緻な耐震性能評価を目指し，地盤の非線形性を考慮した基礎の塑性応答挙動に関する実験的検討を行った。RC 単杭および 4 本杭試験体を作製し，地盤は液状化を生じるような非線形性の極めて強い地盤条件として，せん断土槽を用いた RC 杭基礎の振動台実験を実施し，地震時における杭基礎の挙動を明らかにした。

キーワード：液状化，杭基礎，せん断土槽，相互作用，非線形応答

1. はじめに

数多くの RC 構造物に多大な被害を与えた兵庫県南部地震から 9 年が経過した。これらの被害報告とその後の検討に基づき，近年，橋脚躯体に高い靱性能を付与する目的で耐震補強が大規模に施されてきた。しかし，補強後の構造系の応答特性についての詳細な検討がまだ十分ではないのが現状であり，橋脚躯体のみ耐震補強を施すことによって，杭基礎など別の部位に損傷が移行する可能性は否定できない。また，橋脚躯体に比べれば杭基礎の損傷は小さかったと言えるが，中には液状化に伴う側方流動などの地盤特性により杭基礎が重度に損傷し，構造物が倒壊・傾倒したものも存在した。

近年，従来の限界状態設計法から性能照査型設計法に移行しつつある。平成 14 年に改訂された土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編¹⁾では，構造物を支持する基礎と周辺地盤とを一体としてモデル化し，工学的基盤から照査用地震動を入力する応答解析によって耐震性能照査を行うことが規定された。基礎の応答特性が上部構造の応答に影響を及ぼすことから，このような手法により構造物の耐震性能を精緻に照査するためには，基礎 - 地盤系の非線形応答性状を明らかにする必要がある^{2), 3)}。

以上の背景をふまえ，地盤の非線形性を考慮した RC 構造物全体系の耐震性能評価手法を確立するために，特に地盤の非線形挙動である液状化を生じる地盤のケースを含めた杭基礎の塑性応答挙動を明らかにすることを目的として，RC 杭を用いて実験的研究を行った。

2. 実験概要

単杭および群杭（4 本杭）を用いた実験モデルの概要図を図 - 1 に，全実験ケースを表 - 1 に示す。せん断土槽は幅 0.8m，奥行き 1m，高さ 1m である。Case0N および 0L は地盤の振動特性を把握する目的で行ったケースであり，非液状化地盤における 4 本杭のケースでは，上載重量が杭へ及ぼす影響を把握するために，Case4N0 として錘を載せないケースを実施した。

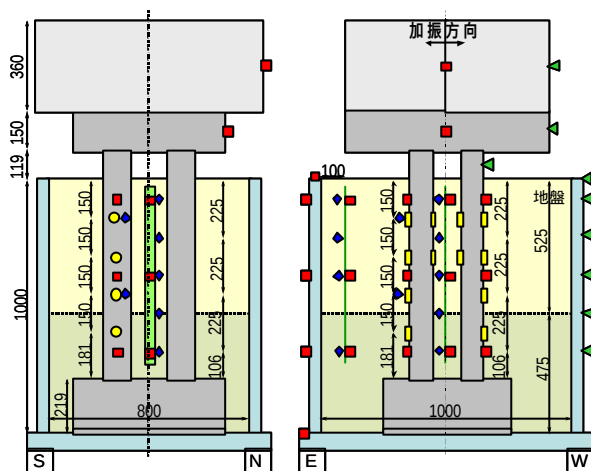
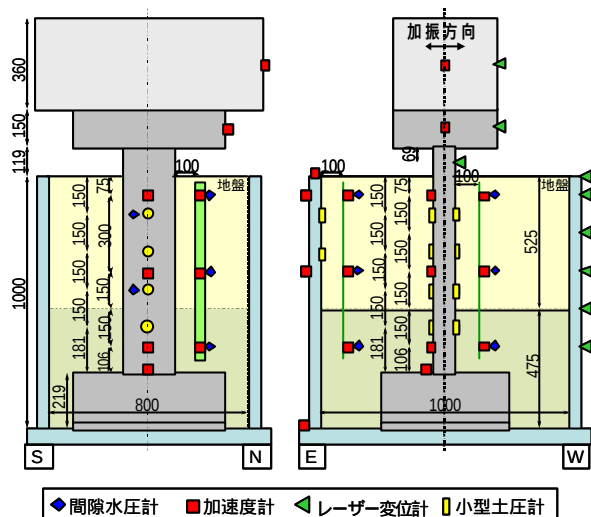
地盤材料として浜岡砂を用い，せん断土槽内を 3 層に分けて，振動締固めにより乾燥砂地盤を作成した後，土槽底面より模型地盤表面まで水を低速で注入することによって飽和地盤を作製した。非液状化地盤のケースは相対密度 $Dr=80\%$ の 1 層モデル，液状化を生じる地盤のケースは，土槽の底面から高さ 475mm までの下層が $Dr=80\%$ ，その上面から地表面までの上層 525mm が $Dr=40\%$ の 2 層モデルとした。

*1 埼玉大学 工学部 建設工学科 (正会員)

*2 埼玉大学 工学部 建設工学科 助手 工博 (正会員)

*3 東京大学大学院 社会基盤工学専攻 助手 工修 (正会員)

*4 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 工修 (正会員)



上：1本杭モデル/下：4本杭モデル

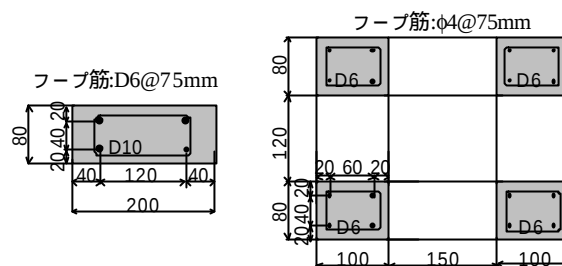
図 - 1 実験モデルと杭の断面図

杭試験体の断面は数値解析による取り扱いを念頭に置いて、杭体 - 地盤間の力の伝達経路が明確な矩形断面にし、寸法は、1本杭が 200×80 mm、4本杭は1本当たり 100×80 mm とし、高さ 900 mm、4本杭の杭間は加振方向を 120 mm、加振方向と直交する方向を 150 mm として、杭間が杭径の 1.5 倍となるように作製した。また、上部スタブと杭頭部、および下部スタブと杭下端部は剛結合とした。上載重量は 1本杭試験体で 13.7kN、4本杭試験体で 27.4kN とした。これによって杭断面に生じる軸圧縮応力は、いずれのケースも約 0.85MPa となっている。杭試験体の断面図を図 - 2 に示す。

入力波は振動数 5Hz の正弦波 10 波とし、そのうち所定の最大加速度の波を 4 波入力した。前後各 3 波で増幅と減衰を行った。ケース毎に

表 - 1 実験ケース

	非液状化地盤	液状化地盤
杭なし	Case 0N	Case 0L
1本杭	Case 1N	Case 1L
4本杭	Case 4N (錘あり)	Case 4N0 (錘なし)
		Case 4L



(1) 1本杭

(2) 4本杭

図 - 2 試験体断面 (上下方向に加振)

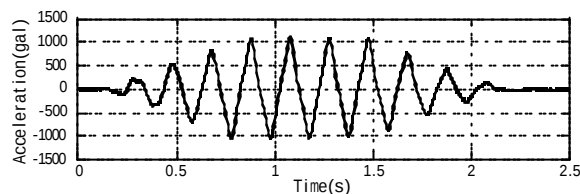


図 - 3 入力波形の例 (最大加速度 1000gal)

1000gal と 1500gal の 2 種類とした。本実験で用いた入力波の一例を図 - 3 に示す。

3. 実験結果

3.1 杭の応答が近傍地盤に及ぼす影響

まず、杭 - 地盤系で表れる杭近傍地盤の非線形挙動について検討するため、杭を設置していない Case0N と 1本杭を設置した Case1N の結果について比較する。

Case0N のせん断土槽中心 G.L.-75mm における加速度応答と、Case1N の加振方向杭近傍 100mm 位置の G.L.-75mm における加速度応答の時刻歴を図 - 4 に示す。各加速度応答は点線で、各々の入力波形は実線で示してある。いずれの加速度応答もパルス状の波として現れており、これはサイクリックモビリティと呼ばれる間隙水圧の上昇を伴う繰り返しせん断変形の影響と考えられる⁴⁾。Case0N の場合、加振の初期の段階で、入力波の加速度に比べて G.L.-75mm の加速度が遅れるために位相がずれるが、その後は正負逆

の加速度ではあるが、同じ周期で振幅している。しかし Case1N の杭近傍地盤の加速度は、加速度振幅の増大に伴ってパルス状の波が出現すると共に、応答加速度振幅が変化し、さらに、加速度が極大値の時は入力波が先にピークに達し、加速度が極小値の時は G.L.-75mm の加速度が先にピークをむかえている。これは、地盤中における他の加速度応答測定点では測定されなかった加速度振幅であり、加振方向の杭近傍地盤に特有な現象である。

図 - 4 の各加速度波形のフーリエスペクトルを図 - 5 に示す⁵⁾。入力波については、代表として Case1N 入力波を載せる。Case0N のせん断土槽中心 G.L.-75mm における加速度スペクトルは、5Hz から 15Hz、25Hz と 10Hz おきに大きなピークが見られる。しかし、入力波の加速度スペクトルにも、5Hz 以外に 15Hz、25Hz と小さなピークがあり、Case0N の加速度スペクトルは入力波の 5Hz 以外の成分を一様に増幅した形となる。しかし、Case1N の加振方向杭近傍 100mm の G.L.-75mm における加速度スペクトルは 10Hz の振動数が他の振動数に比べて大きく増幅され、さらに 10Hz 毎に 20Hz、30Hz と増幅されていることがわかる。この 10Hz の倍数の振動数における増幅が見られるのは、図 - 4 の加速度のピークと同様、加振方向の杭近傍地盤のみであった。

また、Case1N における加振方向杭近傍 100mm の G.L.-75mm における加速度時刻歴と、杭体西側の G.L.-150mm の土圧との関係を図 - 6 に示す。図から、杭近傍地盤の加速度が負になる時に土圧計の容量 20kPa を超えるほどの大きな土圧が生じていることがわかる。このことより、杭の西側の地盤が負の加速度を示す時に、杭体西側で杭と地盤が衝突しているものと考えられる。この衝突現象については、Case1N と Case4N の比較を行う 3.2 で後述する。杭 - 地盤間におけるこの関係を図 - 5 に当てはめると、地盤が杭に衝突する時、つまり、加速度が負の時には、入力波よりも G.L.-75mm における加速度応答の方が先にピークをむかえるということとなる。

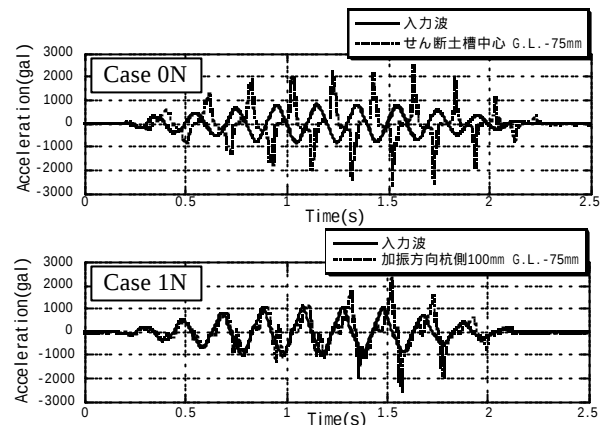


図 - 4 G.L.-75mm における加速度応答時刻歴

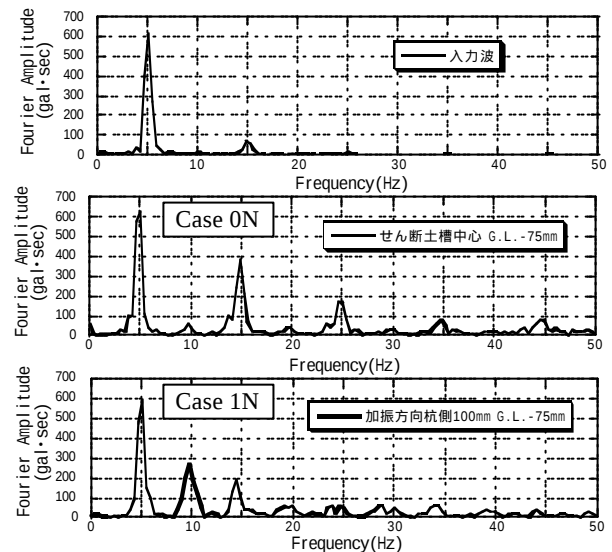


図 - 5 土槽中心部の加速度スペクトル

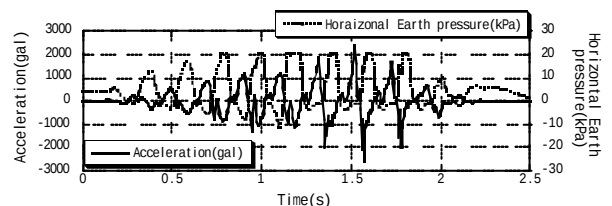


図 - 6 加速度と土圧の関係

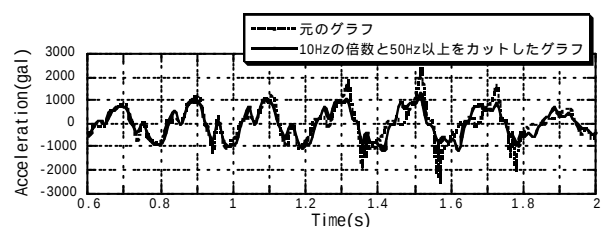


図 - 7 10Hz の倍数振動数の影響

つまり、この杭 - 地盤間の衝突現象が、図 - 5 において他の計測点では測定されない 10Hz 毎の増幅となって現れているものと考えられる。

その確認として，Case1N の加振方向杭近傍 100mm の G.L.-75 mm における加速度から，10Hz の倍数成分と 50Hz 以上の高周波成分をカットした時刻歴波形を図 - 7 に示す。これより，10Hz の倍数振動数成分は，杭 - 地盤間の衝突によって生じた成分と言える。

3.2 単杭と群杭の応答挙動の比較

次に，単杭と群杭の挙動の相違について検討するために，Case1N と Case4N を比較する。各ケースの変位と土圧の時刻歴曲線を図 - 8 に示す。図には Case4N0 も併せて示しているが，これについては 3.3 で述べる。Case1N の変位時刻歴は，Case4N の時刻歴とは異なり，せん断土槽が 1/4 周期ほど先行して動き，杭がせん断土槽を追いかける関係となっている。Case1N の場合，せん断土槽の側面に作用する土圧が常に 0kPa 付近であることから，せん断土槽は地盤と共に動いており，地盤の挙動を阻害していないと言える。図 - 9 に Case1N の杭と地盤の相対変位を示す。ここで相対変位とは，地盤がせん断土槽と同じ運動をするものと仮定し，せん断土槽の水平変位から，杭体の曲率を積分して求めた変位を引いた値である。相対変位が負の値から正の値に変わる時刻に，図 - 8 では杭体の G.L.-150 mm における土圧が小さなピークを示している。これは，3.1 で示したように，10Hz の倍数振動数成分の原因と想定された杭体 - 地盤間の衝突が生じている時刻である。この衝突は地盤の最大変形の後に生じていることから，杭が地盤に追いついた時に生じた衝突ではなく，杭と地盤が逆方向に向かっている時に互いに正面から衝突したと考えられる。

変位時刻歴より，Case4N では杭とせん断土槽が同じ位相で振幅していることがわかる。また，Case4N では加振方向に対して 4 本杭の内側における土圧がほぼ一定値を示していることから，4 本杭に囲まれた地盤は杭と共に動いており，4 本杭と杭に囲まれた部分の地盤は 1 つのケーソンのような挙動をしている。また，Case4N の土圧は，杭 - 地盤の相対変位が負のピーク時に土圧

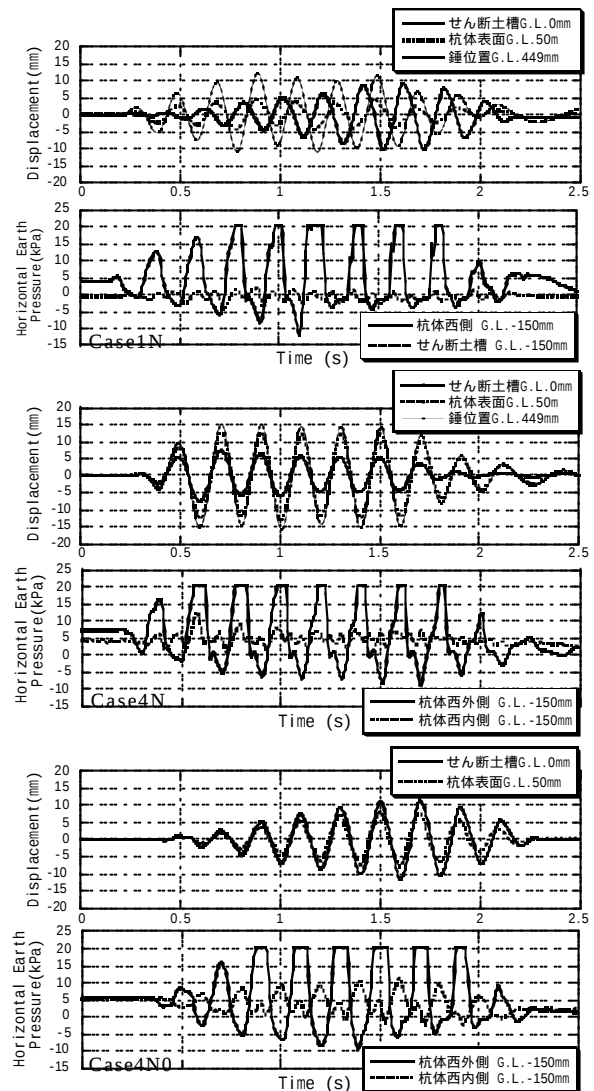


図 - 8 変位および土圧の時刻歴曲線

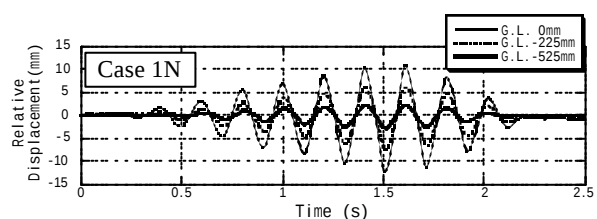


図 - 9 杭と地盤の相対変位時刻歴

計容量 20kPa を超える正土圧が発生し，相対変位が正のピーク時に負土圧のピークに達している。この土圧計は杭の西側に貼られており，負の杭体変位が生じる時，すなわち西方向に変位する時には，4 本杭のうち前方杭に土圧を受けていることになる。これは基礎-地盤系の非線形応答性状において，杭基礎の応答性状が支配的であると言える。

3.3 上載重量による影響

次に，上載重量の有無が杭の挙動に及ぼす影響を検討するために，Case4N と Case4N0 を比較する。図 - 8 に示した Case4N0 の変位と土圧の応答時刻歴より，正の変位が生じている時，杭体の西側で大きな正の土圧が発生している。これは Case4N の土圧と変位の関係とは全く逆の挙動を示していることになる。つまり Case4N では前節で述べたように，杭が地盤を押すことにより，地盤が杭に対して抵抗側となる杭主体の挙動を示しているのに対し，Case4N0 は地盤が杭を押すことによって，地盤が杭に対して加力側となる地盤主体の挙動となっている。

この違いは入力波に用いた 5Hz の sin 波が，杭と地盤のどちらの固有振動数に近いかによって生じたものと思われる。本実験と同じ浜岡砂およびせん断土槽を用いた実験⁶⁾において，実験装置を含めた地盤の固有振動数が約 10Hz であったことから，本実験における模型地盤の固有振動数も 10Hz 程度であると考えられる。また，Case4N の錘を載せた 4 本杭の固有振動数は約 7Hz 程度であり，地盤よりも杭の固有振動数の方が入力波である 5Hz に近い。逆に，Case4N0 の錘を載せない杭の固有振動数は約 40Hz であり，地盤の固有振動数の方が 5Hz に近い。つまり，今回の実験で入力波に用いた 5Hz の振動数により近い方が，基礎 - 地盤系の非線形応答性状を支配していると言える。

図 - 10 に Case4N と Case4N0 のひび割れ図を示す。Case4N では杭全体にひび割れを生じているが，個々のひび割れ幅は非常に小さい。これに対し，Case4N0 ではひび割れ本数は少ないが，杭下端に発生したひび割れは非常に大きく，コンクリートが剥落した部分もある。最下端ではひずみを計測していないが，杭頭部および杭下端部には非常に大きな曲率が発生したものと考えられる。これは，基礎 - 地盤系の非線形応答性状において，杭と地盤のどちらが主体かによる違いと言える。杭が全体の応答を支配する Case4N では，杭前面地盤が杭に対して抵抗側と

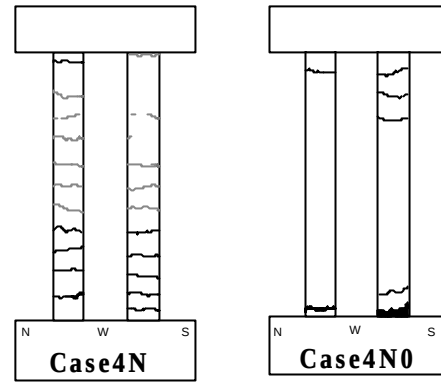


図 - 10 Case 4N と Case 4N0 のひび割れ性状

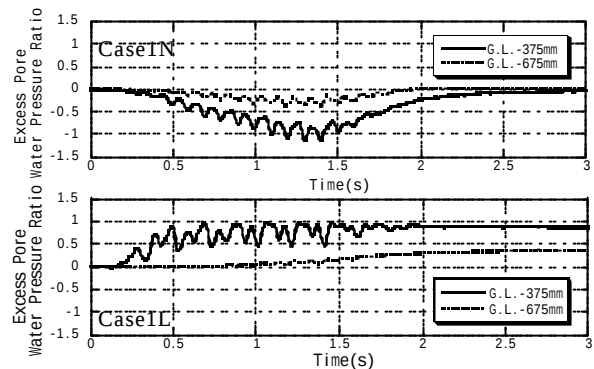


図 - 11 過剰間隙水圧比の時刻歴曲線

なり，その抵抗力は深さ方向に分布荷重として作用するため，ひび割れが分散する。一方，地盤が全体の応答を支配する Case4N0 では，杭背面地盤が杭に対して加力側となり，杭前面には地盤との間に隙間が生じる。その結果，気中のラーメン構造と同様のひび割れ性状となるものと考えられる。

3.4 周辺地盤の液状化が杭の応答に及ぼす影響

ここまでは非液状化地盤における実験ケースの検討を行ってきたが，本節では液状化を生じる地盤と生じない地盤における，杭応答の相違について検討を行う。

Case1N，Case1L の過剰間隙水圧比の変化を図 - 11 に示す。この図を見ると，非液状化地盤のケースでは，過剰間隙水圧比が負になっている。これは，初期状態の地盤が非常に密なため，加振時に正のダイレタンシーが発生し，有効応力の増加に伴う負の間隙水圧が生じていると考えられる。逆に，液状化を生じるケースでは負のダイレタンシーが発生し，過剰間隙水圧比の上昇がみられる。相対密度 $Dr=40\%$ である G.L.-375

mm では過剰間隙水圧比がほぼ 1.0 となり、液状化を生じていることがわかる。

Case4N と Case4L の 4 本杭に囲まれた地盤の加速度と西側にある杭の加速度の時刻歴を図 - 12 に示す。Case4N では杭の加速度と 4 本杭に囲まれた部分の加速度はほぼ同じで、3.2 でもすでに述べたように、4 本杭とその間に囲まれた地盤が、1 つのケーソンのような挙動をしている。しかし Case4L では地盤が液状化を生じたことにより、杭に囲まれた地盤が杭とは異なる挙動を示している。また、4 本杭のケースでの杭の損傷状況は、Case4N は前節で述べたように杭全体に小さなひび割れが生じているのに対し、Case4L ではひび割れが杭端と杭頭に集中してひび割れ数は少ないが、各々のひび割れ幅が大きくなった。

最後に、1 本杭の液状化を生じない地盤の Case1N と生じる地盤の Case1L の曲率分布を図 - 13 に示す。図より、液状化を生じると最大曲率を生じる深さが変化することが分かる。Case1N では地表面付近に最大曲率を生じ、深い位置ほど曲率が小さくなっているのに対し、Case1L では液状化地盤と非液状化地盤の境界の G.L.-525 mm より若干上の G.L.-375mm で最大曲率が生じている。よって、抵抗力を維持している下層地盤との境界付近に損傷が集中したものと考えられる。

4. まとめ

今回の実験で以下のことが明らかとなった。

- (1) 地盤に設置された杭の挙動は杭近傍の地盤の挙動にも影響を与え、その影響により、杭近傍地盤は瞬間的に大きな加速度を生じる。
- (2) 振動が杭の固有振動数と地盤の固有振動数のどちらに近いより、地盤の位置付けは異なる。振動が杭の固有振動数に近ければ杭主体で地盤は抵抗側に作用し、地盤の固有振動数に近ければ、地盤主体となり地盤は加力側に作用する。
- (3) 1 本杭の場合、地盤が液状化を生じることにより、杭に生じる曲率分布が変化し、最大曲

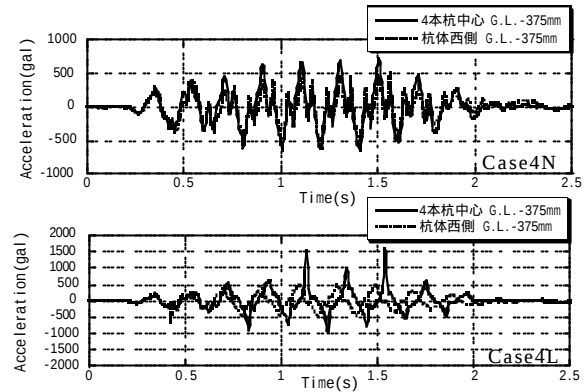


図 - 12 群杭部の加速度時刻歴

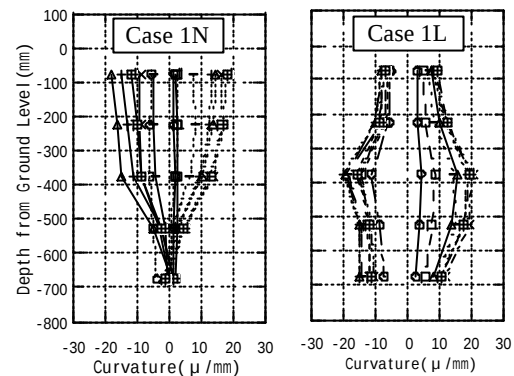


図 - 13 1 本杭の曲率分布

率が非液状化地盤と液状化地盤の境界付近に生じる。

謝辞

本実験の計画段階では、東京大学 前川宏一教授に貴重な御助言を頂いた。また、実験の遂行にあたり、(株)フジタの笹谷輝勝氏、岸下崇裕氏、藤倉裕介氏に多大な御協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震性能照査編，2002.12
- 2) 牧 剛史，睦好宏史：鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性と変形状に関する研究，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.103-118，2001.8
- 3) 白戸真大，木村嘉富，福井次郎：鉄筋のはらみ出しを考慮した場所打ち杭のモデルと地盤振動が杭基礎に与える影響評価への適用，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.153-172，2001.10
- 4) 吉見吉昭：土質基礎シリーズ 第二版 砂地盤の液状化，技報堂出版，pp.14-15，1991
- 5) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版社，pp.25-79，1994
- 6) 独立行政法人土木研究所：既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書(その 3)，pp.38-39，2002.9