

免震装置を有する橋梁杭基礎の地盤液状化時における 耐震性向上に関する実験的研究

宇野州彦¹・大塚久哲²・三藤正明³

¹学生会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
(九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 博士後期課程)

²フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³正会員 工博 五洋建設(株) 技術研究所 技師長 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

1. はじめに

液状化が発生する地盤中の杭では、地震時慣性力と地盤の液状化や側方流動等で、液状化層と非液状化層の層境界、あるいは液状化層中で土質定数が大きく異なる箇所において、大きな断面力の発生する箇所が見られ、これらの箇所において杭の塑性化や損傷を招くと考えられる¹⁾。このことは、過去に発生した地震の被災調査からも示されている^{例え2)}。

また2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震においても、東京湾岸区域（千葉県浦安市周辺）の液状化被害をはじめ、利根川流域（茨城県・千葉県境）や宮城・福島・栃木においても造成宅地であるものの、液状化による構造物の被害が出ている。今後の詳細な調査を待つものもあるが、その中には明らかに液状化によって杭基礎に被害が生じていると思われるものも見受けられる³⁾。また、宮城県女川町ではRC建物が津波により杭基礎から引き抜かれた被害もあり、倒壊・転倒の主要因は津波ではあるものの、地震によって基礎が脆弱になっていたことが、後に来る津波に対して抵抗力不足に陥る要因となったかもしれない。

杭基礎の地震時特性に関しては、地盤－構造物系の動的相互作用に関する研究が数多く行われている。例えば、室野ら⁴⁾は、地盤－基礎－構造物系の動的な相互作用の影響から、地震時の地盤変位と慣性力の両者の影響を考慮した耐震設計法を提案している。

液状化地盤においては、谷本ら⁵⁾が橋梁基礎の耐震性能照査法として応答変位法を用いる場合における課題を挙げている。それによれば液状化地盤の変位推定、液状化時の上部工慣性力の評価、土質定

数の低減係数、地盤の水平抵抗、慣性力と地盤変位の組合せ等を課題としている。

しかしながら、現状の杭基礎液状化対策としては地盤改良が主流であり、また構造的対策としては、増し杭^{例え6)}や鋼矢板を用いるもの^{例え7)}等があるが、断面力の増大を踏まえた上で構造的に対策を講じるものは少ない。

したがって、橋梁杭基礎の損傷メカニズムと、杭に対する地盤の液状化および慣性力の影響を把握するために、著者らはまず無対策の杭を用いて模型振動実験を行い、層境界部において局所的な断面力が杭に発生することを確認した^{8),9)}。今回は、断面力の発生が大きい杭中間部に免震構造をイメージしたゴムを取り付けて振動台実験を行い、杭基礎の耐震性が向上することを確認する。

2. 参考とした橋梁杭基礎¹⁰⁾

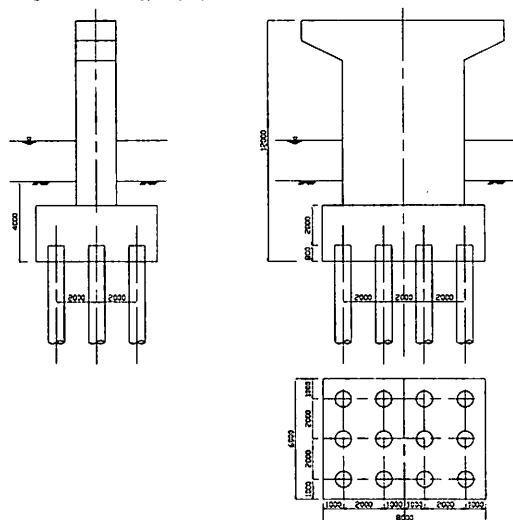


図-1 参考杭基礎の諸元（単位：mm）

著者らは、以前に無対策の杭を用いて実験を実施している^{8),9)}。本論文では、前回実験の結果も用いながら、無対策の杭と今回対策を行った杭に関しての比較検討を行うこととする。

本実験を行うにあたっては、より実物に近い杭基礎を対象に、そのスケールモデルを作製するために、文献¹⁰⁾に記載されている杭基礎を採用とした。図-1にそのモデルの橋脚および基礎の詳細図を示す。杭は鋼管杭で、表-1に鋼管杭1本の断面性能を示す。

地盤に関しては、液状化地盤を想定しているため、文献¹⁰⁾の地盤物性は採用していない。

表-1 鋼管杭1本当りの断面性能

外 径	(mm)	800	
肉 厚	(mm)	12	9
腐食代	(mm)	2.0	
断面積A	(cm ²)	246.9	173.5
断面二次モーメントI	(cm ⁴)	190000	135000
断面係数Z	(cm ³)	4790	3390

3. 実験概要

(1) 縮尺と相似則

実験モデルの断面図を図-2に示す。なお、前回実施した無対策杭を用いた実験^{8),9)}は、中間部の免震ゴムがない構造で、その他の物性等は、以下に述べるものと基本的には同じである。杭基礎のサイズ等、モデルの縮尺は、モデル化範囲と土槽の大きさを考慮して1/20とした。相似則は、表-2に示すように、井合により提案されている1G場における相似則¹¹⁾を適用した。この相似則は、現象を支配する方程式に基づいて求められている。方程式としては、飽和した地盤の方程式、杭や矢板などの構造物の方程式、および水の方程式に大別される。これらにより求められた相似則のうち、長さのパラメータを縮尺の基準として、加速度を縮尺比1、密度を縮尺比1、ひずみを縮尺比の0.5乗に比例するとして、他のパラメータの縮尺比を算出している。なお、この場合の地盤の土粒子骨格に対する相似則は、香川¹²⁾、国生¹³⁾の示した結果に一致している。

なおここで、相似則に従うと実スケールでの水は、実験において粘性流体を使用しなければならない。しかし地盤中の透水において水の粘度が影響するのは、加振後の間隙水圧の消散を時間経過との比較で着目するような場合であり、今回のような加振時の影響に主に着目するような実験では水の粘性はさほど影響しない。したがって今回は、実験においても水を使用した。

実験では、加振による杭の挙動を分かりやすくするため、杭本数を4本にしている。杭長は、実験設備の制約から相似則を満足する長さよりも若干短くなっている。杭基礎にはアルミパイプを用いた。

また地震時慣性力の影響をみるため、橋梁上下部工重量の杭負担率を考慮した錘を設置した。錘重量は25kgである。

表-2 相似則

パラメータ	λ =実物/模型	縮尺
長さ	λ	20
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	9.46
応力	λ	20
間隙水圧	λ	20
変位	$\lambda^{1.5}$	89.4
加速度	1	1
ひずみ	$\lambda^{0.5}$	4.47
透水係数	$\lambda^{0.75}$	9.46
曲げ剛性	$\lambda^{4.5}$	715,542
軸剛性	$\lambda^{2.5}$	1,789

(2) 実験装置

加振装置には振動台テーブルの直径 5.5m の大型水中振動台を使用した。実験土槽は長さ 4.0m、高さ 1.5m、奥行き 1.5m の箱型の鋼製枠である。土槽による水の反射を防ぐため、加振方向に直角な土槽の面にはエキスパンドメタルに不織布を貼付したものを土槽として使用し、土槽境界での水の流入出を可能にしている。

(3) 模型の製作

まず土槽内に杭基礎を取り付けるプレートを振動台とボルトにて固定し、杭基礎をそのプレートに溶接してあるリングに差し込み、ボルトにて2方向から挟み込んで固定する。またリングとパイプのすき間にエポキシ樹脂を注入して剛結状態としている。杭基礎の設置状況を写真-1に示す。

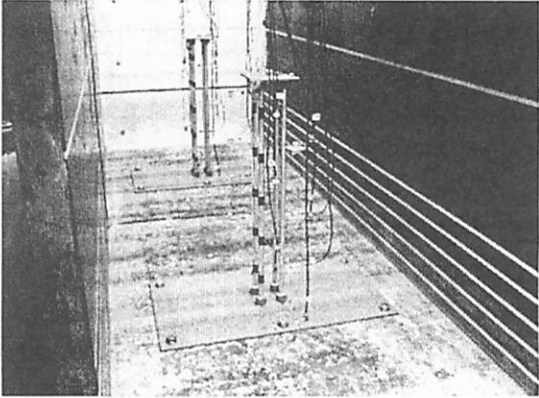


写真-1 杭基礎設置状況（錘設置前）

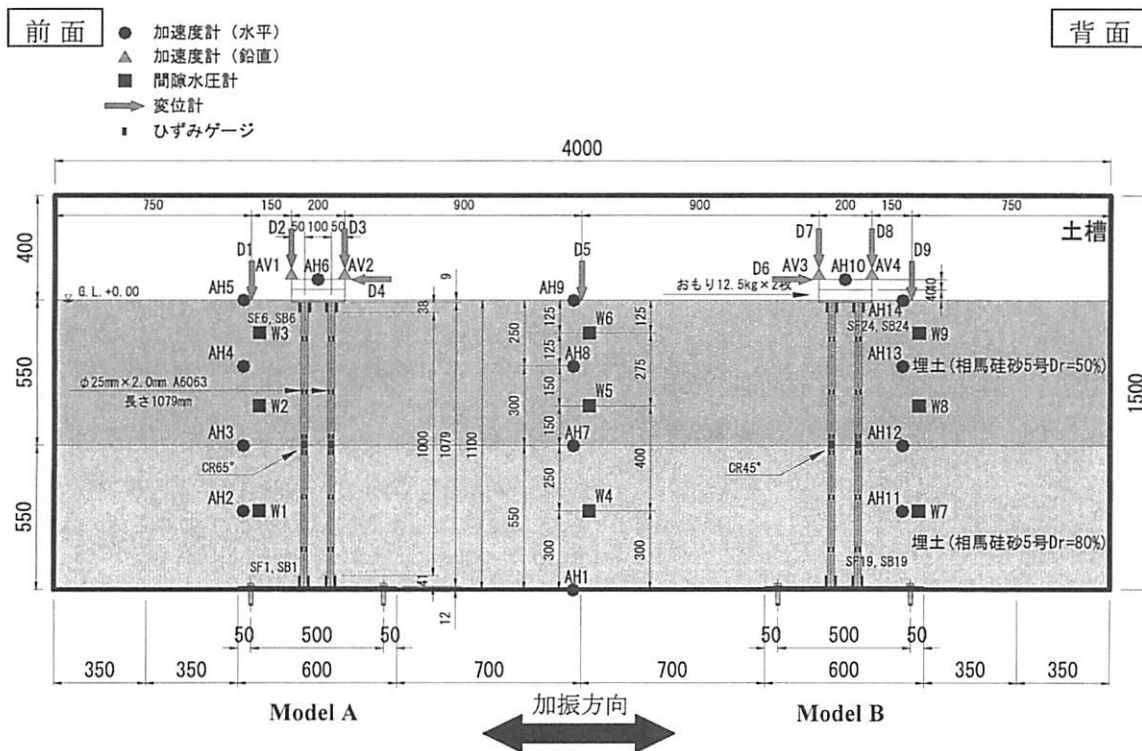


図-2 実験模型断面図

次に相馬硅砂5号にて、非液状化地盤と液状化地盤を作製する。まず非液状化層は相対密度80%を管理しながら所定の高さまで、投入・締め固め・均しを行う。密度管理は、層厚100mm毎に砂投入重量と地盤高さを計測して行った。完成地盤の相対密度の実測値は79.8%であった。なお非液状化層は気中にて作製した。その後注水を行い、液状化層の作製となる。液状化層は水中落下法により砂を投入する。ここでは設計密度50%に対して、完成地盤の相対密度の実測値は46.6%であった。また、杭基礎および埋土の使用材料の一覧を表-4に、杭基礎の模型寸法を表-5にそれぞれ示す。なお表-4、表-5では、杭の上端と連結している鋼板（通常、橋梁であればフーチング部にあたる箇所）を上部工、杭の下端と振動台を固定している鋼板を下部工と表現している。

表-4 使用材料一覧

項目	材料	備考
埋土	相馬硅砂5号 (水中落下法)	Dr≒50%
埋土	相馬硅砂5号 (気中落下法)	Dr≒80%
杭基礎	上部工	鋼板 t=9mm
	下部工	鋼板 t=12mm
	杭	アルミ管 φ=25mm, t=2.0mm

表-5 模型寸法一覧

構造部材	細目	形状	材質	寸法
杭基礎	上部工	プレート	鉄	PL-200×200×9
	上部工	リング	鉄	外径42×肉厚8×高さ38(内径26mm)
	下部工	プレート	鉄	PL-1100×600×12
	下部工	リング	鉄	外径46×肉厚10×高さ41(内径26mm)
杭	杭	アルミ		外径25×肉厚2.0×長さ1079(内径21mm)
おもり	上下部工	プレート	鉄	PL-200×200×4

(4) 免震ゴムについて

図-2にあるように杭の中間部に免震ゴムを取り付けている。免震ゴムの形状と杭への取付方法は、図-3に示す。免震ゴムは積層構造ではなく単体であり、それぞれ2種類の硬度(CR65°, CR45°)を杭中間の層境界部に配置した。また杭とゴムは接着剤を用いて固定した。以降、CR65°を用いた杭をModel A、CR45°を用いた杭をModel Bと呼ぶ。

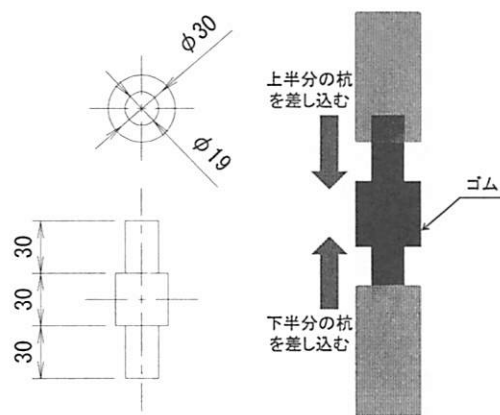


図-3 ゴム形状と取付イメージ

(5) 加振波

加振波には、周波数 10Hz、波数 20 波の正弦波を使用した。周波数は杭基礎の固有周期を考慮して設定した。

加振ケースは、最大加速度を100Galとしたケース（以降、Case1）と、350Galとしたケース（以降、Case2）、700Gal（以降、Case3）の計3ケースを実

施した。図-3に最大加速度100Galの加振波を示す。正弦波100Galおよび350Galの入力レベルについては、それぞれレベル1、レベル2地震動相当のエネルギーと考えている¹⁴⁾。最大加速度700Galのケースについては極大地震動を想定している。いずれの加振波にも最初の1波分にテーパーを設けている。なお、ここで示している横軸の時間は「加振開始からの時間」である。図-4以降にも時刻歴データを掲載するが、こちらは全て収録装置による「計測開始からの時間」となる。計測を開始する時間は、加振を始める時間よりも約3～3.5秒程早く設定してある。そのため、図-4より後に掲載される時刻歴データについては、計測開始から3秒経過したところからの表示としている。

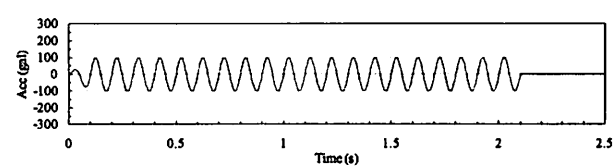


図-4 加振波（最大加速度100Gal）

(6) 計測項目

計測項目の一覧を表-6 に示す。図-2 に示す配置で加速度計 18 台（水平 14 台、鉛直 4 台）、水圧計 9 台、変位計 9 台、ひずみゲージ 24 箇所×2 枚を使用し、杭基礎の変位・加速度・ひずみ、地盤の加速度・水圧、地表面の変位の時刻歴データを計測機器により測定した。なお、変位計については、杭基礎が対象の場合には、インダクタンス型変位計、地盤が対象の場合には、レーザー変位計を用いた。ひずみゲージは、貼付している杭の最上部の箇所に関しては軸力を計測するために 1 ゲージ法、それ以外は 2 ゲージ法とした。1 ゲージ法では杭に発生する曲げひずみと軸ひずみを計測することができる。2 ゲージ法では今回の場合、曲げひずみを計測することができる。使用できる ch 数が限られるため、上記のように 1 ゲージ法と 2 ゲージ法を使い分けた。また、地表面の残留変形は、実験前後におけるターゲット座標の計測結果から求めた。

表-6 計測項目一覧

計測項目	計測対象	計測機器
水平変位	杭基礎上部工	変位計
鉛直変位	杭基礎上部工、地表面	変位計
水平応答加速度	杭基礎上部工、地盤	加速度計
鉛直応答加速度	杭基礎上部工	加速度計
過剰間隙水圧	地盤	間隙水圧計
ひずみ	杭	ひずみゲージ
残留水平・鉛直変位	地表面	地表面ターゲット

4. 実験結果

(1) 加速度

図-5～図-7 に Case1～Case3 の杭頭部における加速度応答の時刻歴をそれぞれ示す。ここでは無対策杭の実験における杭頭部の応答加速度時刻歴との比較により、免震ゴムの効果を検証する。まず Case1 の結果に着目すると、免震ゴムにより長周期化したことや応答が低減することにより、上部工の加速度応答が低減している。ただし Case1 では液状化に至るまでの時間が Case2 や Case3 に比べて長いこともあり、応答が急激に低減するまでには少し時間がある。これは、液状化に至る前の地盤では、層境界部よりも杭頭部に大きな断面力が働いているため、免震ゴムの効果がまだ発揮されにくい状態であるためと考えられる。次に Case2 について、無対策の杭基礎では当然 Case1 よりも応答が大きくなっているが、対策を講じた Model A や Model B では Case1 よりも応答が小さくなっている。これは Case1 に比べ液状化に至るまでの時間が短かったこと、またそのためにゴムの効果がすぐに発揮されたことが考えられる。この結果から、レベル 2 規模の地震動を考慮して設計する場合には、今回提案する免震ゴムは非常に効果が高いものであると言える。次に Case3 に関しては、対策杭においてテーパー波後の最初の 1 波目において無対策杭よりも大きな加速度を記録している。この理由については解析により検討する必要があると考えているが、その後すぐに応答が低減しており、全体のエネルギーを考えると、大幅に低減していることがわかる。ただし、最初の 1 波目の振幅によって構造物全体に損傷が生じないかに関しては、今後検証が必要である。

以上の結果より、杭頭部においては、全てのケースについて地震エネルギーが低減したと言える。レベル2地震動規模の入力に対して大幅に低減できたこと、特に液状化が発生したことで免震ゴムの効果が発揮され応答が低減できたことが、液状化地盤を対象とした杭基礎の耐震性向上策として非常に有効であるということを示す結果となった。

(2) ひずみ

杭基礎に発生するひずみの時刻歴を図-8 に示す。凡例にあるように Case1～Case3 までの結果を重ねて表示している。図の左側が無対策の杭、中央が Model A、右側が Model B の結果である。なお、無対策の杭においては杭中間部に 1 箇所のみひずみゲージを貼付したため、ひずみ結果の数が計 6 箇所（Model A、Model B は計 7 箇所）となっている。また、前章でひずみゲージの 1 ゲージ法と 2 ゲージ法にふれたが、2 ゲージ法は前面側のひずみゲージ

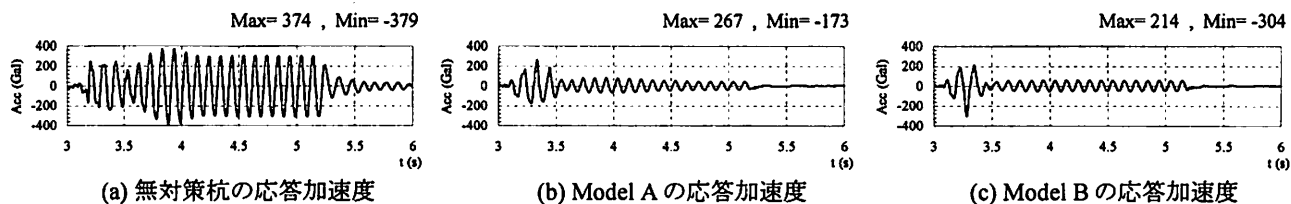


図-5 杭頭部の応答加速度時刻歴 (Case1)

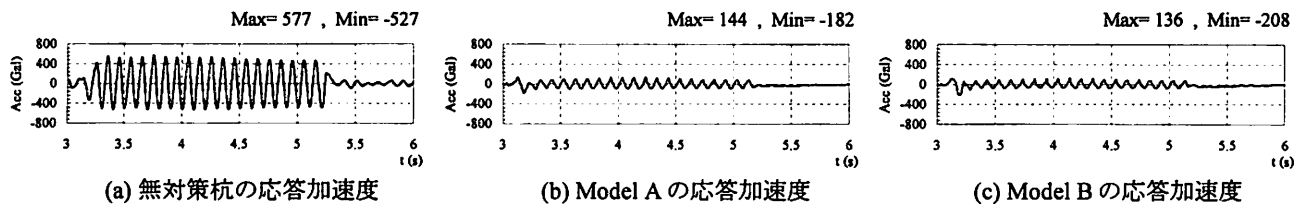


図-6 杭頭部の応答加速度時刻歴 (Case2)

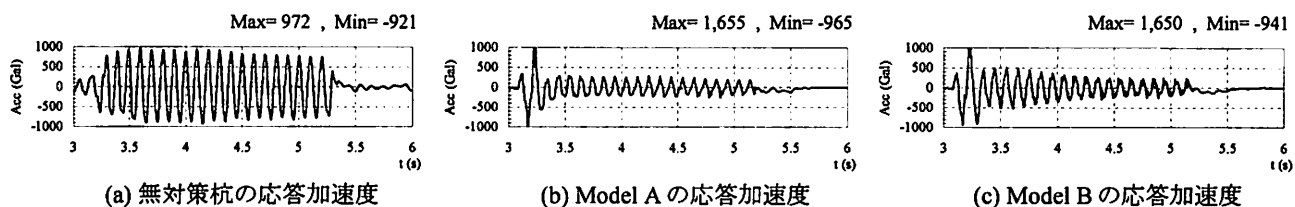


図-7 杭頭部の応答加速度時刻歴 (Case3)

(例えば SF1) と背面側 (SB1) から求めているので、この場合は SFB1 の結果として表示している。

まず無対策の杭に着目すると、杭頭部の SF5、SB5 と杭中間部の SFB3 で大きなひずみが発生している。特に、上層液化発生後の計測開始 3.5 秒後にひずみの最大値を迎えている。これは上部工慣性力が液化発生後に層境界の杭中間部に作用したため、応答が大きくなるものと推察される。

Case1 では、杭のほとんど全ての箇所においてひずみが発生していない。無対策の杭では、杭頭部や杭中間部でひずみが発生していたが、今回の Model A および Model B に関しては、ほとんどひずみが発生しなかったことが分かる。

Case2 になると、対策杭は杭頭部で若干のひずみが発生しているものの、無対策杭に比べれば低減していることが分かる。また杭中間部や杭下端においてはひずみがほとんど発生していない。

Case3 においては、杭頭部で若干のひずみが発生しているが無対策杭の結果に比べると大きく低減できている。また杭下端付近では比較的大きなひずみが発生しているが、これは先述したように加振波が大きいために加振前に層境界部であった箇所も液化化したことで、層境界部が下方へ移動したと考えられる。したがって、このような極大地震動を想定するのであれば、免震ゴムの取付位置を下方へずらすことも対策となるものと推察される。

(3) 免震ゴムの変形量

表-7 に加振時に発生した免震ゴムの最大変形量、せん断ひずみおよび有効平面積を示す。最大変形量およびせん断ひずみに着目すると、いずれのケースにおいても一般的に使用される免震支承に比べ、せん断ひずみが小さいことから破断等に対しては問題ないものと思われる。一般の免震支承ではレベル 2 地震動に対して 250%以下となるように設計することを考えれば、免震ゴムの変形だけに着目するとまだ余裕のある状態であると言える。

しかし杭の中間部に免震ゴムを設置したことにより、たとえせん断ひずみが小さくても加振時の杭の支持力不足（免震ゴムの曲げ変形等による不安定状態）となることが考えられる。そこで表-7には免震ゴムの加振時の有効平面積を合わせて表示している。有効平面積とは地震時の免震ゴムの移動量を控除した平面積であり、鉛直支持に期待できる免震ゴム面積は加振前と比較してどれほど残っているのかを示しているものである。結果から、Case2までは平面積の約6割以上残っており、安定した支持機能を保持できるものと考えられる^{15),16)}。しかしCase3になると約3~4割程度となり、実験中には特に曲げ変形に至るような現象は発生しなかったものの注意が必要である。したがってこのような場合は、例えば免震ゴムを複数配置してそれぞれの有効平面積を確保する等の対策が必要であると推察される。

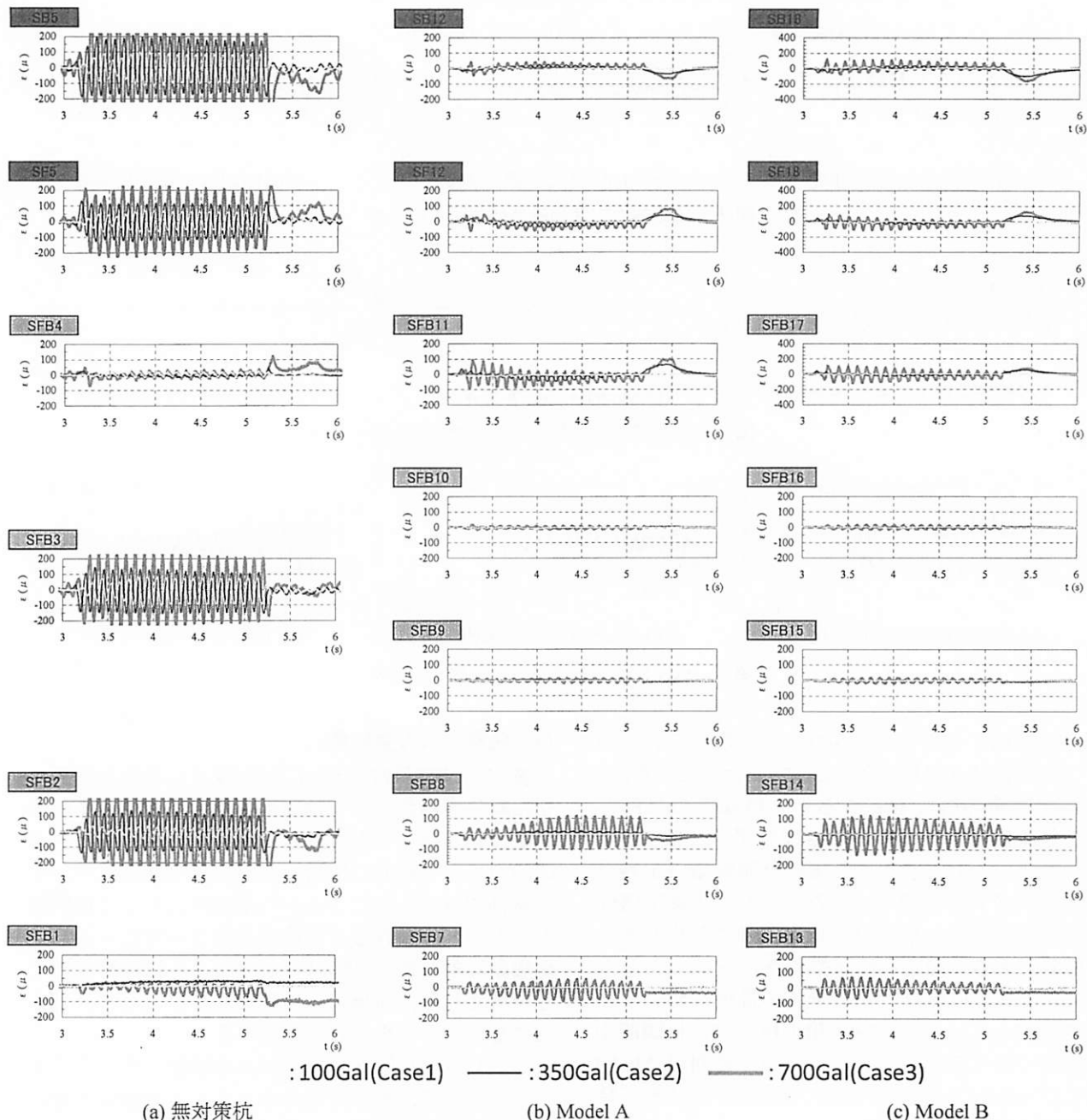


図-8 杭基礎のひずみ時刻歴

表-7 免震ゴムの変形量

	Case1 (100Gal)		Case2 (350Gal)		Case3 (700Gal)	
	CR65°	CR45°	CR65°	CR45°	CR65°	CR45°
ゴムの最大変形量(mm)	1.1	1.4	7.6	9.8	14.3	16.8
せん断ひずみ(%)	3.7	4.7	25	33	48	56
有効平面積(%)	95	94	68	60	42	33

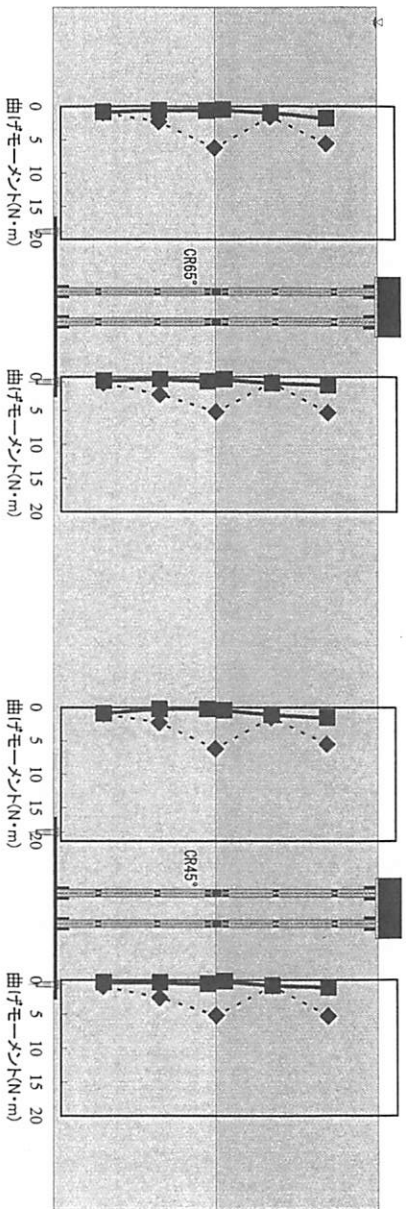
(4) 曲げモーメント

図-9 に各ケースにおける杭基礎の最大曲げモーメント分布を示す。なお比較のために、図には無対策杭の最大曲げモーメント分布を重ねて表示している。

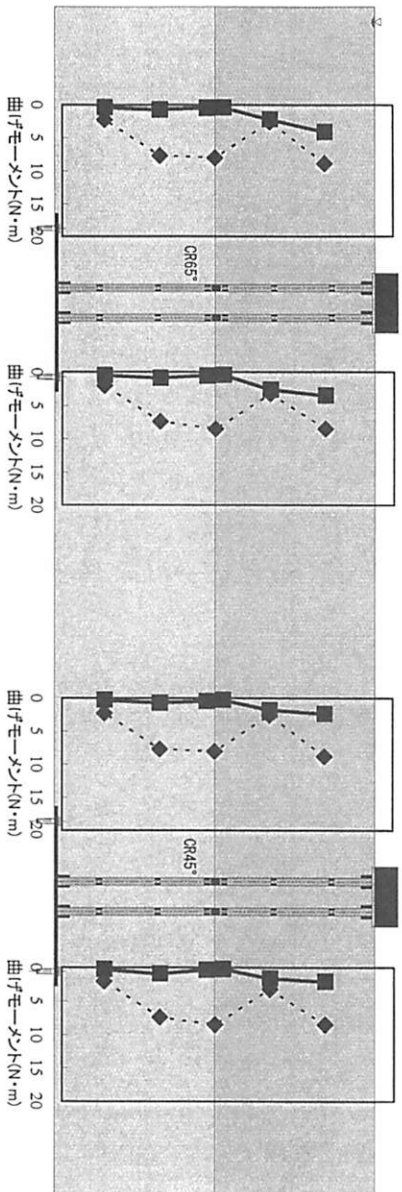
結果より、まず全てのケースにおいて断面力が低減していることが分かる。特にCase2までの地震動

レベルであれば大きく低減できていると言える。今回の免震装置は杭中間部の応答低減を目的に設置したものであるが、結果的に杭頭部の断面力の低減にもつながっている。

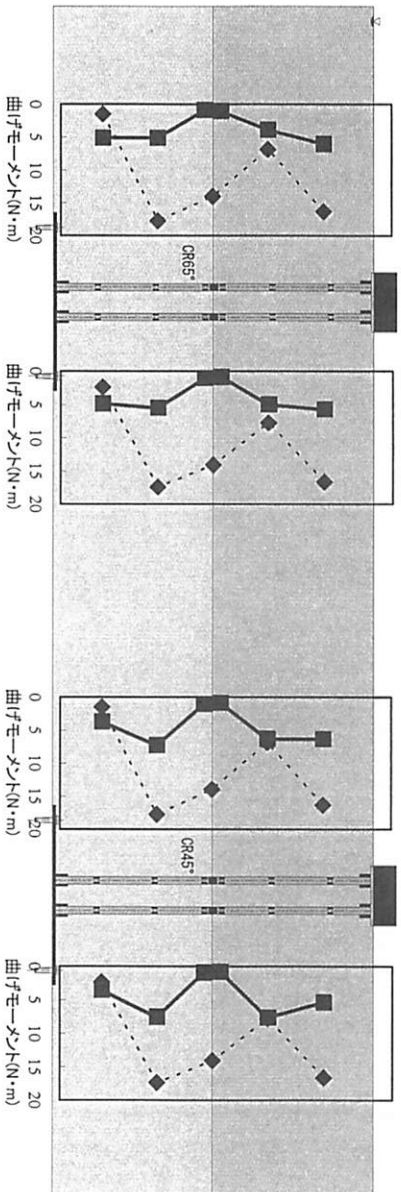
Case3 のような非常に大きな地震動の場合では、免震ゴムを用いた場合でも杭頭部や杭下端側で若干



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

—◆—: Model B —■—: 免震杭の応答
図-9 杭基礎の最大曲げモーメント分布 (無対策杭と免震杭との比較)

5. まとめ

橋梁杭基礎の損傷メカニズムと、杭に対する地盤の液化化および慣性力の影響を把握するために、無対策の杭を用いた模型振動実験において、層境界部で局所的な断面力が杭に発生することが確認されたことから、今回は断面力の発生が大きい杭中間部に免震ゴムを取り付けて振動台実験を行い、杭基礎の耐震性が向上することを示した。

の断面力が発生しているが、先述したように例えばゴムの設置箇所を少し下方へずらすことや、取付個数を増やすことで、より全体の応答低減が見込まれると考えられる。今回はレベル1およびレベル2地震動を対象とした場合において非常に効果のあることが示されたが、Case3のような地震動をも対象とする場合は、これらの結果を踏まえて実務者が適宜判断すれば、想定した地震動に対して、要求する耐震性能は満足できるものと考えられる。

以上の結果より得られた知見を以下に示す。

- ・無対策杭の実験から、地震時に液状化が発生すると橋梁の上下部工重量が杭頭部のみならず杭の中間部に慣性力として作用することにより、非常に大きな断面力が発生することが示された。
- ・免震ゴムの設置により杭中間部の応答や発生断面力が低減するが、全体が長周期化したことで杭頭部の断面力も低減させることができ、杭基礎全体にとって非常に効果のある対策であることが示された。
- ・加速度応答の時刻歴から、層境界部に設置した免震ゴムは、液状化が発生してから効果を発揮することが明らかとなった。
- ・加速度が非常に大きくなると当初想定していた液状化層と非液状化層の層境界部が下方へ移動するため、どの程度の地震動に対して設計するかによって免震ゴムの設置位置を考える必要がある。
- ・通常のように支承部に免震ゴムを設置するのではなく杭中間部に取り付けるため、免震ゴムが座屈しないように有効平面積等に着眼しながら挙動を把握する必要がある。必要に応じて取付個数や免震ゴムの剛性を変化させることで座屈させないよう留意すべきである。

今後の課題として、今回の免震装置は鉛直荷重を支持する構造である必要があるものの積層状態でなかったため、積層ゴムでの実験および解析が必要であると思われる。また今回は 1g 場での実験であるため、実物に比べ拘束圧が低いことから、拘束圧がより大きい場合においても効果があるのか検証が必要である。他に正弦波以外の地震動での検討、さらに液状化だけでなく側方流動等にも効果があるのか等を検討していく必要がある。

謝辞

今回の実験にあたり、免震ゴムの特性や試験法に関して、日本大学理工学部教授の塩尻弘雄博士にご指導を賜った。また、ゴムの製作や形状検討について、横浜ゴム MB ジャパン(株)の濱上保明氏、佐々木慎氏にご協力いただいた。さらに、液状化地盤の模型振動実験に関しては、五洋建設(株)の三好俊康氏、吉田誠氏、池野勝哉氏に貴重なご助言を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 宇野州彦, 大塚久哲, 三藤正明: 液状化地盤における橋梁杭基礎の免震構造を用いた耐震性向上策に関する一考察, 第 66 回土木学会年次学術講演会, I-503, 2011.9 (印刷中)
- 2) 冨澤幸一, 西本聡, 橋本至: 2003 十勝沖地震の液状化に伴う橋梁基礎杭の変状事例, 液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム, (社)地盤工学会, pp.217-220, 2004.12
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所, (独)建築研究所: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報) (東日本大震災), 2011.5
- 4) 室野剛隆, 西村昭彦, 永妻真治: 軟弱地盤中の杭基礎構造物の地震応答特性と耐震設計への応用, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.631-640, 1998.3
- 5) 谷本俊輔, 杉田秀樹, 高橋章浩, 林和幸: 液状化時の地盤変位を考慮した橋梁基礎の耐震性能照査法に関する試算検討, 液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム, (社)地盤工学会, pp.185-188, 2004.12
- 6) 高耐力マイクロパイル工法: 高耐力マイクロパイル研究会, http://jamp-hmp.jp/mp_sum.html
- 7) I n - C a p 工法: 地盤・基礎 21 研究会, <http://www.jiban-kiso21.gr.jp/>
- 8) 宇野州彦, 大塚久哲, 三藤正明: 橋梁杭基礎に対する地盤液状化と地震時慣性力の影響に関する実験的研究, 第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会, I-35, 2011.3
- 9) 宇野州彦, 大塚久哲, 三藤正明: 液状化地盤における橋梁杭基礎の杭中間部断面力に着目した振動台実験, 第 46 回地盤工学研究発表会, No.779, 2011.7
- 10) (社)鋼管杭・鋼矢板技術協会: 鋼管杭 ―その設計と施工―, 2009.
- 11) Susumu IAI: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.27, No.3, 1988.
- 12) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, 第 275 号, pp.69-77, 1978.7
- 13) 国生剛治: 低拘束圧下の砂の動的特性と模型振動実験に適用される相似則, 第 15 回地震工学研究発表会講演概要, pp.265-268, 1979.7
- 14) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1976.
- 15) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004.4
- 16) 鶴野禎史, 森重行雄, 今井隆, 竹之内勇: 天然ゴム系ゴム支承のせん断変形性能, 第 2 回免震制振コロキウム講演論文集, pp.143-148, 2000.10