

液状化地盤における中間部免震杭基礎の耐震性に関する振動台実験及び有効応力解析

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) 技術研究所耐震構造チーム (〒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)

E-mail:Kunihiko.Uno@mail.penta-ocean.co.jp

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)

E-mail:otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

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)

E-mail:Masaaki.Mitou@mail.penta-ocean.co.jp

液状化が発生する地盤において、杭基礎構造物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部で大きな断面力が発生し、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。このことは過去の被災事例からも明らかとなっている。著者らは、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実施した、無対策の杭の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を確認している。これを受けて、本研究では、地震時に大きな断面力の発生する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。さらに免震ゴムをモデル化した杭基礎の、有効応力解析による再現性を確認するため、模型振動実験の再現解析を実施した。

Key Words : pile foundation, soil liquefaction, seismic isolation rubber, shaking table test, effective stress analysis

1. はじめに

近年、国土利用の過密化に伴い、臨海部や埋立地のような地盤条件の悪いところにまで都市圏が拡大していることから、臨港道路等の橋梁構造物を建設する際には軟弱地盤に建設せざるを得ない場合が多く、このような地盤では一般に支持層が深くなるために、杭基礎構造物は多用化される傾向にある。したがって、このような地盤条件における杭基礎構造物の耐震性向上が重要な課題となっている。

液状化が発生する地盤において、杭基礎構造物が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記されている。

1995年の兵庫県南部地震においては、地震時の液状化によって杭基礎が損傷した。液状化によって杭頭部および杭中間部に損傷が見られること、また側方流動が生

じることで、杭中間部の損傷がさらに大きくなっていることが、数多くの研究^{例えば 2)~4)}から明らかとなっている。被災調査等の研究では、液状化段階では水平方向の地盤反力が低下するため、構造物の慣性力によって杭頭部と杭中間部に大きな断面力が発生し被害が生じていることを示している^{2)~4)}。このことに関しては、著者らも以前に1G場の中振動台実験を行うことで、これらの箇所

に大きな断面力が発生することを明らかにしている⁵⁾。また、側方流動が発生すると、地盤変位の影響を受け、さらに杭中間部での損傷が大きくなることが文献²³⁾では述べられている。

また解析的にも、三輪ら⁴⁾は、液状化および液状化に伴う地盤の流動による杭の被害過程を検討している。それによると、主要動の早い段階では杭頭部に慣性力が作用し損傷の危険性があるが、地盤の液状化に至る水圧上昇過程で、液状化層上下端部で大きく変位し、そのような層境界部において杭が損傷し、さらに液状化後の護岸方向への地盤の流動変位で損傷部分に残留変形が生じたものと推定している。

以上のことに関しては、2003年に発生した十勝沖地

震においても報告されている(例えば7)。

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、造成宅地に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がある⁸⁾。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可能性がある。

液状化地盤における杭基礎の研究としては、谷本ら⁹⁾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。

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、宮坂ら^{10,11)}、泉ら^{12,13)}が高い靱性を持つ継手構造の開発を行い、層境界部における断面力発生に対する対策を提案しているが、主に静的な範囲における研究である。他にも増し杭^{例えば14)}や鋼矢板を用いるもの^{例えば15)}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^{5,6)}。

これを受けて、地震時の断面力が大きな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確認する。さらに免震ゴムをモデル化した杭基礎の有効応力解析の妥当性を確認するため、模型振動実験の再現解析を実施した。

2. 実験概要

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^{5,6)}。本論文では、前回実験の結果を用いて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ため、無対策杭の実験における概要も合わせて記載する。

(1) 実物大の杭基礎構造物⁶⁾

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¹⁶⁾

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。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¹⁶⁾の地盤物性は採用していない。

(2) 縮尺と相似則

実験模型の断面図を図-2に示す。なお、以前著者らが実施した無対策杭を用いた実験^{5,6)}は、中間部の免震ゴムがない構造で、それ以外の杭の物性や地盤構成、地盤作成方法、計測位置および計測方法等は、以下に述べるものと全く同じである。杭基礎のサイズ等、模型の縮尺は、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¹⁷⁾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¹⁸⁾、国生¹⁹⁾の示した結果に一致している。

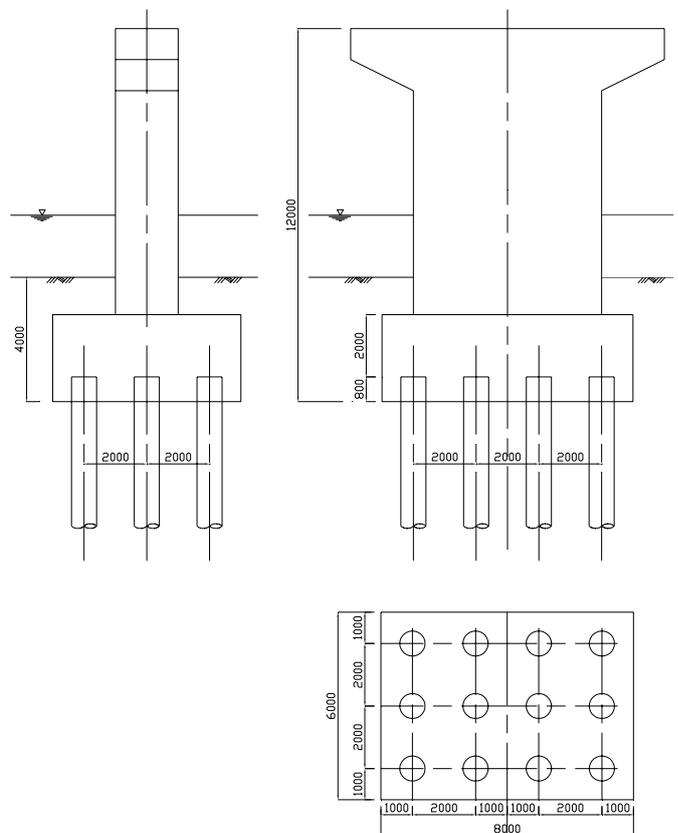


図-1 杭基礎の諸元 (単位: mm)

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

表-2 相似則

パラメータ	$\lambda = \text{実物/模型}$	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

- Acceleration gauge (horizontal)
- ▲ Acceleration gauge (vertical)
- Pore water pressure gauge
- Displacement gauge
- Strain gauge

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ついて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ため、実験では水を使用した。

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2×2の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、橋梁上下部工の質量が杭1本当りにかかる割合を考慮して、今回の杭基礎構造物が負担すべき質量を計算し、錘として設置した。錘質量は25kgである。

(3) 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。さらに、杭基礎は図-2に示すように境界から約1m程度離して設置することで、境界条件の影響を受けないようにしている。

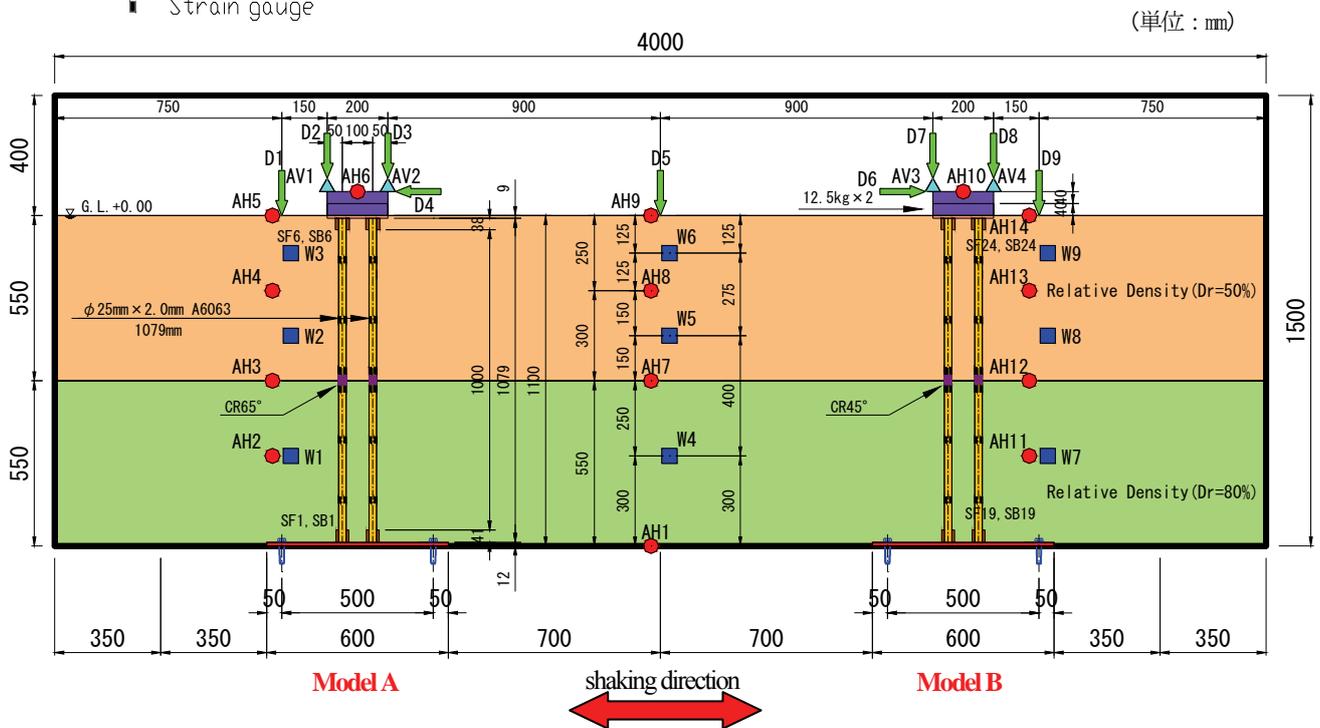


図-2 実験模型断面図

(4) 模型製作

まず土槽内に杭基礎を取り付けるプレート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。これは無対策杭実験においても同様である。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)

次に相馬硅砂5号にて、非液化化地盤と液化化地盤を作製する。まず非液化化層は相対密度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、無対策杭の実験において79.8%、免震杭の実験で79.6%であった。なお非液化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。液化化層は水中落下法により砂を静かに投入する。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、無対策杭の実験において46.6%、免震杭の実験で49.0%であった。なお液化化地盤作製に際しては地盤の脱気は行っていない。これに関しては、6章において実験結果と解析結果の比較を行い、解析モデルの設定において三軸試験のデータを使用することから、実験結果と解析結果の過剰間隙水圧の上昇過程がほぼ一致していると思えば、脱気をすることなくほぼ完全飽和地盤となっていると示すことができる。また、杭基礎および埋土の使用材料の一覧を表-3に、杭基礎の模型寸法を表-4にそれぞれ示す。なお表-3、表-4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。

(5) 免震ゴム

図-2にあるように層境界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。ゴムと杭は差し込み部分において接着剤により接着されており、この接着が剥れないことを動的な水平載荷試験により確認している。以降、CR65°を用いた杭をModel A、CR45°を用いた杭をModel Bと呼ぶ。

表-3 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-4 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
		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
		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

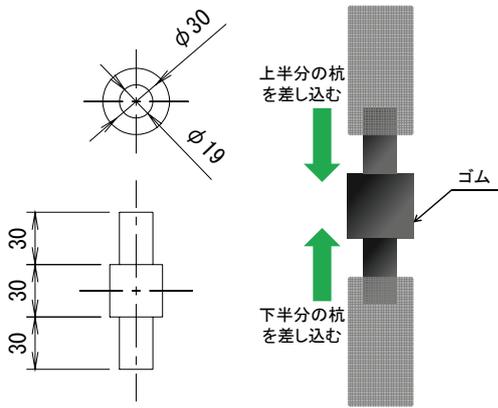


図-3 ゴム形状と取付イメージ (単位: mm)

(6) 加振波

加振波には、振動数 10Hz、波数 20 波の正弦波を使用した。振動数は、次節に示す杭基礎の固有振動数を考慮して設定した。加振ケースは、無対策杭の実験および免震杭の実験のいずれにおいても、最大加速度を 100 Gal としたケース (以降、Case1) と、350 Gal としたケース (以降、Case2) の計 2 ケースを実施した。図-4 に最大加速度 100 Gal の加振波を示す。

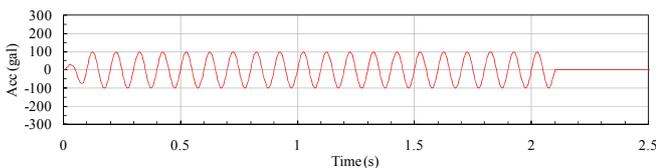


図-4 加振波 (最大加速度100Gal)

(7) 計測項目

計測項目の一覧を表-5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、ひずみゲージは、無対策杭の実験で20箇所×2枚、免震杭の実験で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、無対策杭の実験では1本当り5箇所、免

震杭の実験では1本当り6箇所となっているが、これは無対策杭の実験では層境界部に貼付していたひずみゲージが、免震杭の実験ではこの位置に免震ゴムが設置されることで、この免震ゴムの上下に2箇所貼付するかたちになったためである。また、貼付している杭の最上部の箇所に関しては軸ひずみと曲げひずみを、それ以外は曲げひずみを計測する。なお、ひずみゲージの貼付箇所に関して、本実験では杭中間部の断面力がどのように変化するののかについて着目しているため、杭頭部や杭先端部には貼付していない。さらに、図-2の地盤物性や構造条件から考えると、 3β (β : 杭の特性値) よりも杭中間免震部から杭先端部までの杭長が長く、林-Changの方法から半無限長の杭と見なせるため、杭先端部のひずみを計測する必要がないものと判断している。

3. 固有振動数試験

加振実験に先立って、杭基礎単体の固有振動数を計測した。参考とした杭基礎構造物の剛性および質量や、兵庫県南部地震において卓越周波数が 1Hz 前後で構造物に影響を及ぼしたことを考慮し、固有振動数を実スケールで 1Hz 程度とし、相似則の適用から模型スケールにおいて約 10Hz 程度の固有振動数となるよう、無対策の杭において剛性や質量を設定した。ただし剛性に関しては、今回主に着目する曲げ剛性 EI が相似則の適用から外れないようにする必要があるので、質量での調整を行っている。

試験方法は、杭基礎の上部工を手で水平方向に押した状態から一気に手を離し外力を解放する方法、木槌を用いて上部工を打撃する方法、振動台にパルス波を入力する方法、振動台にスイープ波を入力する方法の全 4 種類にて行い、全ての結果を平均化した。なおそれぞれの試験は 3 回ずつ実施している。平均化した結果、平均値に対して $\pm 0.5\text{Hz}$ 以上の差が生じているものはなかった。

固有振動数試験の結果を表-6に示す。この試験結果を踏まえた上で、正弦波の周波数を10Hzと設定した。また免震ゴムを用いたModel AおよびModel Bにおいては、

表-5 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

無対策時の杭に比べ長周期化できていることが試験により確認できた。

表-6 固有振動数試験結果

	Natural Frequency (Hz)
Normal Pile	9.8
Model A	2.5
Model B	2.4

4. 実験結果

(1) 杭頭部の応答加速度と液状化地盤の過剰間隙水圧による比較

図-5, 図-6 に Case1, Case2 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、無対策の杭と比較して、加振開始0.5秒以降において応答が低減していることが分かる。これは、液状化が発生したことで免震ゴムが機能し、それにより杭頭部の応答低減に至っていると考えられる。このことを地盤の間隙水圧との関係から示す。図-7に、Case1における間隙水圧計(W5)で得られた過剰間隙水圧を有効上載圧で除した過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。この図から、加振開始0.5秒経過した頃には水圧比1.0となっていることから、地盤が液状化したことによって地盤抵抗力が喪失し、それによって免震ゴムが変形して、杭頭部の応答が低減したと言える。

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。これも地盤の過剰間隙水圧との関係から考える。図-8にCase2におけるW5地点の過剰間隙水圧比

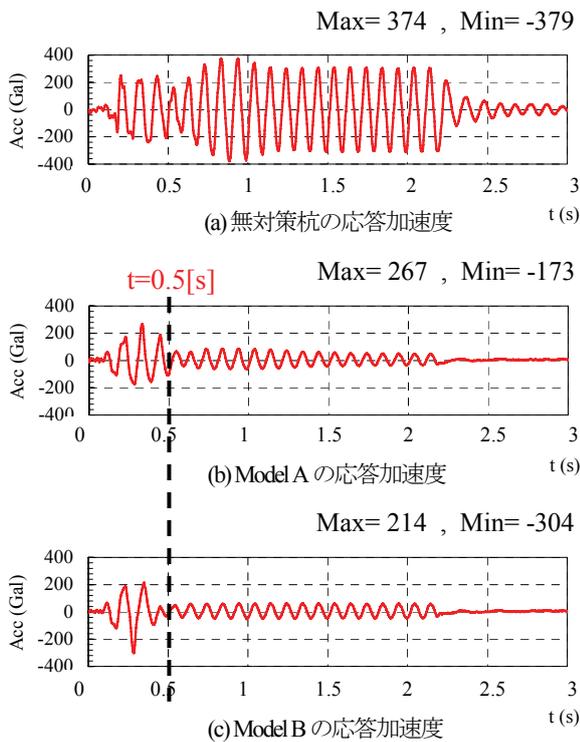


図-5 杭頭部の応答加速度時刻歴 (Case1)

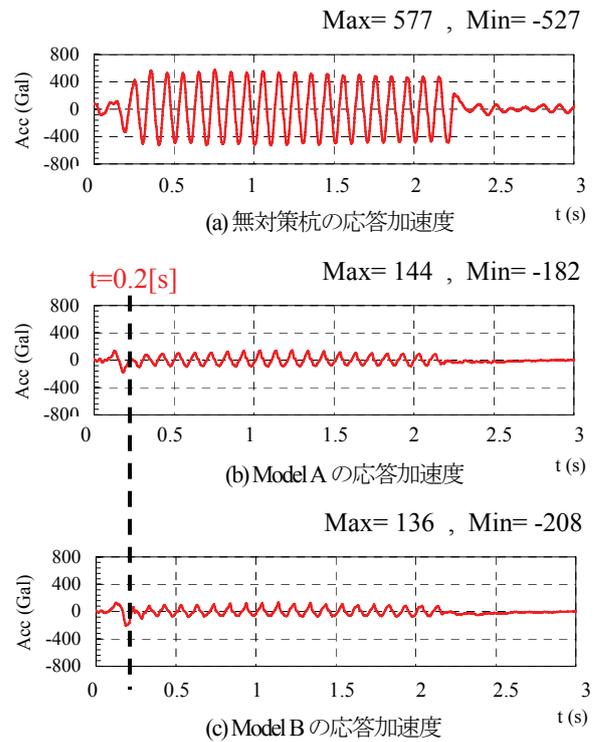


図-6 杭頭部の応答加速度時刻歴 (Case2)

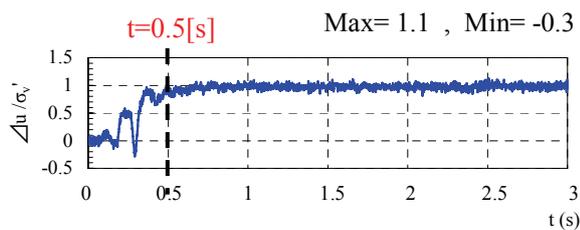


図-7 W5の過剰間隙水圧比時刻歴 (Case1)

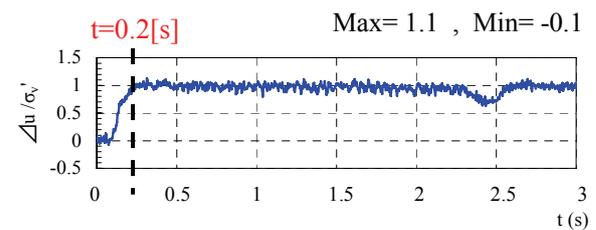


図-8 W5の過剰間隙水圧比時刻歴 (Case2)

の時刻歴を示す. この図より, Case2においては, 加振開始0.2秒後に水圧比がほぼ1.0に達しており, Case1に比べて早く液状化したと言える. このことからCase1よりも早い段階から免震ゴムが機能して, 応答の低減につながったものと考えられる. この結果から, Case2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^{20,21)}.

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. Case2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) 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. ゴムの最大変形量は

直接計測できないため, 今回はゴムにとって最も危険な状態を想定して, 杭頭部で水平変位の最大値を計測した時刻に, 杭が全体的に曲げ1次モードの変形をしたと仮定し, 杭頭最大変位発生時刻における杭のひずみ量から杭(アルミ部)の水平変位量を計算し, 杭頭最大変位と杭(アルミ部)の水平変位の差がゴムの変形量として発生しているものとした. 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^{20,21)}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

表-7 免震ゴムの変形量 ※ゴムの最大変形量は目安値

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

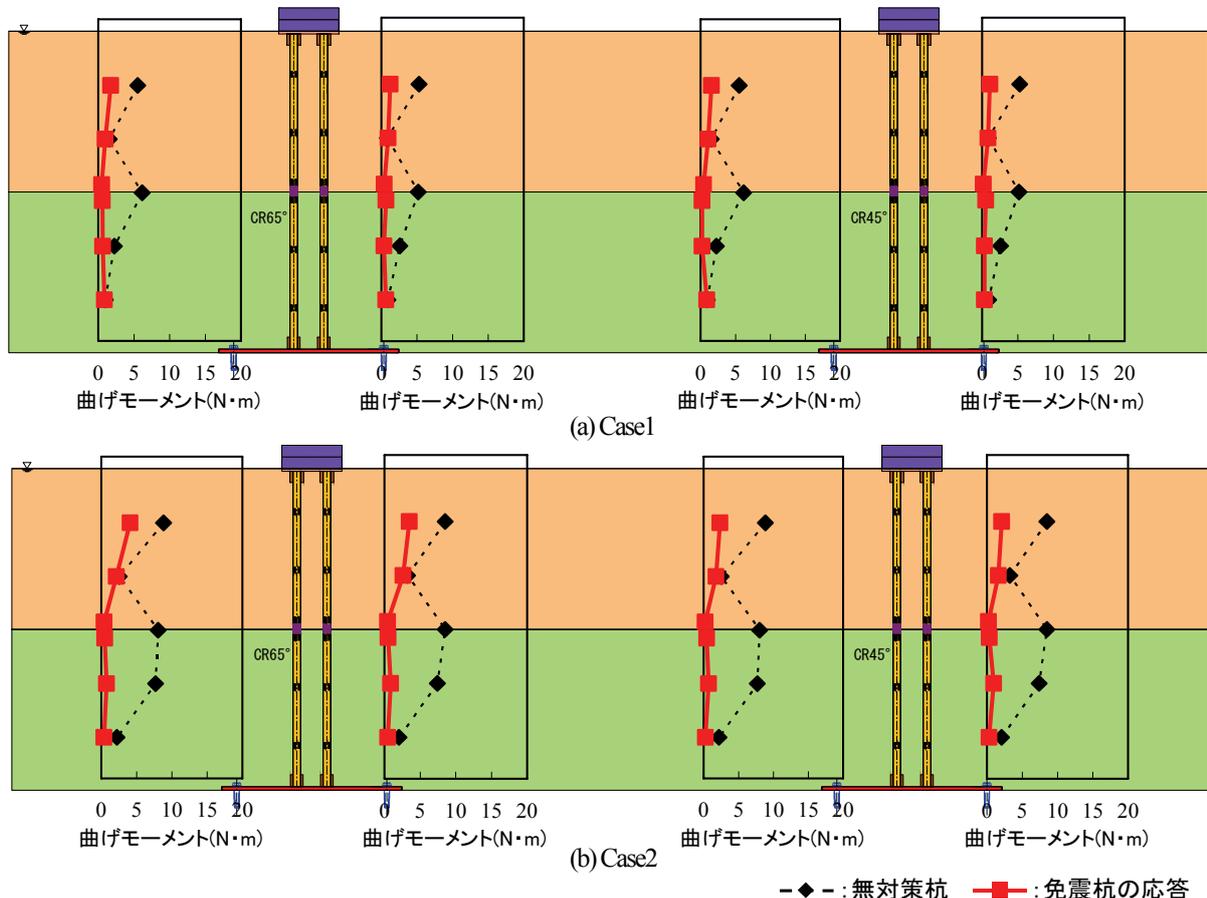


図-9 杭基礎の最大曲げモーメント分布 (無対策杭と免震杭との比較)

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。有効平面積は、通常積層ゴム構造において文献²¹⁾によって算出するものであり、今回のような単体構造に適用して評価をするものではないが、加振中に鉛直支持が確保できるかどうかの目安として算出している。結果から、Case2程度の地震動までは平面積の約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²¹⁾²²⁾。

(3) 杭頭部の変位量

杭頭部の変位量に関しては、Case1においてはModel A, Model Bともに最大で2mm程度であった。相似則を適用すると実スケールで約20cm弱である。地震時の落橋を防ぐために、この変位量に対応できる桁かかり長の確保が必要である。またCase2においてはModel Aで最大約9mm, Model Bで最大約10mmであった。しかしこれは、今回のような加振終了時にテーパ波を設けていない正弦波において、加振が急に停止した際にその反動で現れた応答値である。実際の地震では、地震波形は終了時に漸減していくため、このような応答は現れにくいと考えられる。したがって加振中における最大変位に着目した。その結果は、Model Aでは最大3.6mm, Model Bでは最大4.8mmであった。相似則から実スケールではModel Aで約32cm, Model Bで約43cmとなり、この変位量に対応できる構造とする必要がある。実際には地震時に上部工も変位するため、極力杭の変位量を抑える必要がある。

(4) 杭基礎の曲げモーメント分布

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、図には無対策杭の実験における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、杭中間部より上方の断面力も低減していることがわかる。

今回はCase1およびCase2のような地震動レベル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。さらに、非常に大きな地震動が発生する場合は、非液状化層と考えられる地盤でも液状化すると考えられるため、液状化層と非液状化層との層境界部が下方へ推移する。そのような地震動を想定して、杭中間部に免震ゴムを設置し耐震設計する場合には、層境界部が下方へ推移することを考慮してゴムを配置することで要求する耐震性能は満足できるものと考えられる。

5. 模型振動実験の再現解析概要

(1) 有効応力解析コードFLIP

模型振動実験を再現するための有効応力解析は、解析コードFLIP²³⁾により行った。FLIPは、1998年に運輸省港湾技術研究所（現在：独立行政法人港湾空港技術研究所）において開発された有効応力法に基づく解析プログラムである。特に液状化現象による地盤破壊現象を予測できるプログラムとして、港湾施設の解析を中心に多くの解析事例が論文等^{例えは24)}で発表されている。FLIPによる杭式構造物への適用に関しても、検討・改善が行われており、被災事例等の再現性が確認されている^{例えは25)26)}。

(2) 相互作用ばねについて

2次元動的有効応力解析による一体解析では、特に液状化による残留変位が発生するようところで杭と地盤で節点を共有すると、杭は壁状にモデル化されてしまうため適当でない。今回の検討対象としている模型地盤は、加振時に液状化を伴い、地盤ひずみが大きくなることから、地盤が杭間をすり抜けるような状況を表現する必要がある。そこで2次元一体解析を行うことを前提に、杭と地盤を結ぶ非線形ばね（以下、相互作用ばねと呼ぶ）に必要な特性がFLIP研究会において検討されている。ここで地盤と杭の節点と相互作用ばね要素の概念図を図-10に示す。相互作用ばねの設定にあたっては、砂質土および粘性土地盤における実物大単杭の静的載荷実験の解析²⁷⁾や、大型振動台による液状化地盤に設置された群杭模型の動的載荷実験の解析²⁸⁾²⁹⁾、また地盤-杭の剥離の解析³⁰⁾等により検討されている。以上の実験および解析から、種々の検討^{例えは31)~33)}を行って相互作用ばねがFLIPに設定されており、今回の解析検討においても、上記の内容を踏まえて杭と地盤の間に相互作用ばねを使用した。具体的には、杭の変位と杭間における地盤変位との相対変位が表現されるようにはばね剛性が設定され、振動時に水圧の上昇等によって地盤剛性が変化することを相互作用ばねにおいても表現できるようになっている。

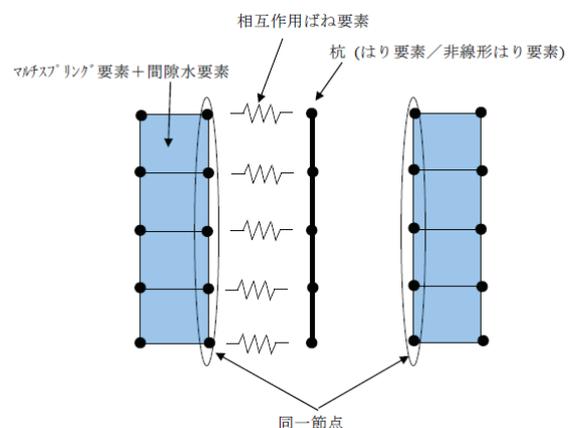


図-10 地盤と杭の節点と相互作用ばね要素の概念図

(3) 解析内容

今回の解析における有限要素分割を図-11に示す。要素の大きさは、既往の文献³⁴⁾を参考に解析で対象とする波長の1/5以下に設定した。要素の大きさの上限 H は以下の式(1)により算出した。

$$H = \frac{Vs}{5f} \quad (1)$$

ここで、 H : 伝播方向における要素の長さの上限 (m)

Vs : 地盤のせん断波速度 (m/s)

f : 解析する振動数の上限 (Hz)

実験前にパルス波による加振を行い、液状化層および非液状化層の Vs を算出している。 Vs はそれぞれおよそ 70m/s, 80m/s であった。液状化層に関しては $\sqrt{50}$ で除し³⁴⁾、液状化後の Vs を 9.9m/s と仮定した。また実物スケールでの f はそれぞれ 2Hz, 5Hz と仮定し、時間の相似則に従って模型スケールに換算した値はそれぞれ 19Hz, 47Hz と

なる。以上より、液状化層および非液状化層の要素の長さの上限 H は、それぞれ 0.10m, 0.34m となった。

解析に使用したパラメータを表-8, 表-9に示す。液状化層や非液状化層の地盤は、マルチスプリング要素でモデル化した。杭および上部工は線形はり要素でモデル化した。なお上部工の断面剛性や密度は、錘を含めて考慮している。免震ゴムは線形ばね要素でモデル化した。免震ゴムのモデル化に関しては、次節で詳述する。その他のパラメータはFLIPにおける標準的な方法に基づき設定した³⁴⁾。境界条件は、実験土槽が剛土槽であることを考慮し、側面は鉛直ローラー、底面は固定境界でモデル化した。またFLIPでは計算安定化のためRayleigh減衰を剛性比例型として、剛性比例係数 β を適用しており、その設定法として1次元非線形地盤の最大応答変位収斂時の β とする方法が提案されている³⁵⁾。本解析でも同様の手法を用い、 β の値を 0.001 に設定した。

解析方法は、初期応力状態を再現するため、自重解析を行った後に動的応答解析を実施した。入力波は、模型振動実験の土槽底版(AH1)で計測された加速度時刻歴を使用した。

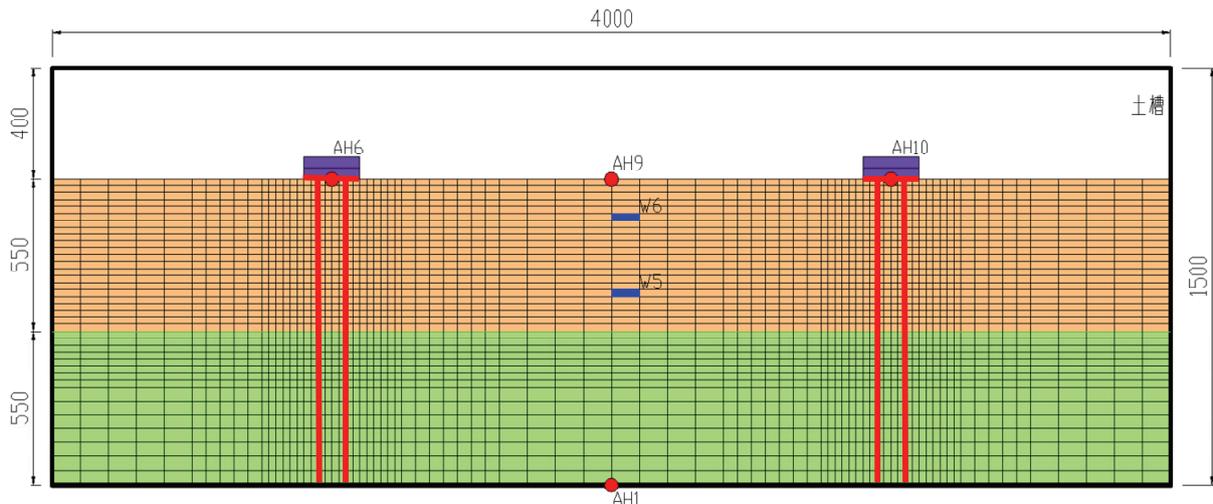


図-11 解析モデル

表-8 地盤パラメータ

区分	動的変形特性パラメータ										
	密度 ρ (t/m^3)	基準拘束圧 σ_{ma}' (kN/m^2)	せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m^2)	体積弾性係数 K_{ma} (kN/m^2)	m_G	m_K	ポアソン比 ν	間隙率 n	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ_f ($^\circ$)	最大減衰定数 h_{max}
液状化層	1.88	1.61	9,212	24,023	0.5	0.5	0.33	0.467	0	36.7	0.24
非液状化層	1.94	4.95	12,416	32,379	0.5	0.5	0.33	0.426	0	42.1	0.24

区分	液状化特性パラメータ					
	変相角 ϕ_p ($^\circ$)	S1	W1	P1	P2	C1
液状化層	28	0.005	2.244	0.5	1.07	1.815
非液状化層	—	—	—	—	—	—

表-9 杭基礎パラメータ

構造部材	ヤング係数 E (kN/m ²)	せん断剛性 G (kN/m ²)	ポアソン比 ν	断面積 A (m ²)	断面二次モーメント I (m ⁴)	有効せん断面積率 ef
杭	7.17×10 ⁷	2.76×10 ⁷	0.3	1.45×10 ⁻⁴	9.6×10 ⁻⁹	0.5

(4) 免震ゴムのモデル化

本解析において、免震ゴムを線形ばね要素を用いてモデル化するために、以下の方法によって、そのばね定数を算出した。

ゴムのばね定数 K は以下の式(2)で与えられる。

$$K = \frac{W}{\delta} = \frac{E_{ap} \times A_L}{h} \quad (2)$$

ここで、 W : 荷重(N)

δ : たわみ量(cm)

E_{ap} : 見かけのヤング係数(MPa)

A_L : 受圧面積(cm²)

h : ゴムの高さ(cm)

ここで見かけのヤング係数 E_{ap} は、ゴム形状の影響を受けて値が変わるものであり、今回円柱形を使用していることから以下の式(3)で求められる。

$$E_{ap} = G_s (3 + 4.94S^2) \quad (3)$$

ここで、 G_s : せん断弾性率(MPa)

S : 形状率

また式(3)にある形状率は、円柱の場合以下の式(4)から求められる。

$$S = d/4h \quad (4)$$

ここで、 d : 直径、 h : 高さ

せん断弾性率はゴムの種類・硬さと相関があり、

CR65°では約1.25MPa、CR45°では約0.60MPaである。

以上より、ゴムのばね定数を求めると、CR65°、CR45°ではそれぞれ、36.9kN/m、17.7kN/mとなった。なお今回は、ゴムのロッキング挙動は想定しないものとし、鉛直および回転方向には、剛性の大きなばね定数を設定した。

6. 解析結果

(1) 杭頭部の応答加速度と液状化地盤の過剰間隙水圧による比較

図-12～図-15に、無対策杭の実験および免震杭を用いた実験における、杭頭部の応答加速度と液状化地盤(W5)の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。

まず無対策杭での実験に関して、Case1では、実験と解析で応答加速度の振幅が異なり、解析の方が小さくなっている。このことは過剰間隙水圧比を見た場合、実験では $t=0.5$ [s]で水圧比が0.7まで上昇後、ゆっくりと完全液状化に向かっているが、解析では $t=0.2$ [s]で1.0となっており、解析の方が液状化に至る時間が短かったことから、加速度の応答値が小さくなっているものと推察される。さらに実験では、水圧比0.7から1.0まで徐々に上がったことにより、地盤状況がゆっくりと変化するため、杭頭部の加速度応答レベルが $t=0.7$ [s]以降乱れている。

一方でCase2に着目すると、応答加速度および過剰間

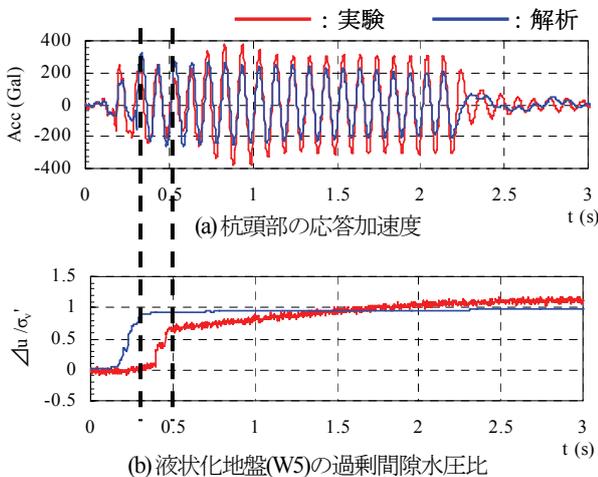


図-12 無対策実験Case1の実験および解析結果

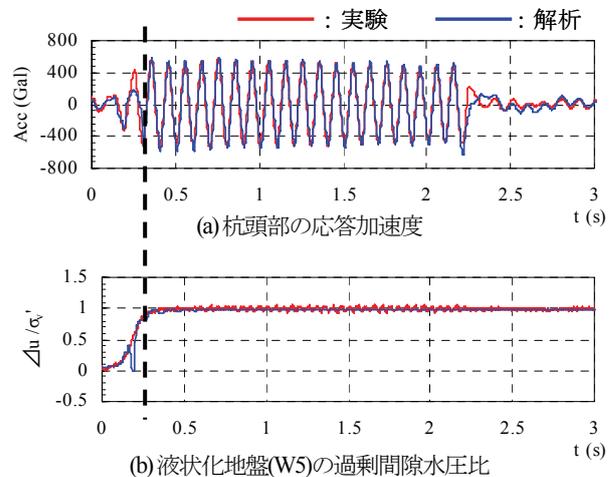


図-13 無対策実験Case2の実験および解析結果

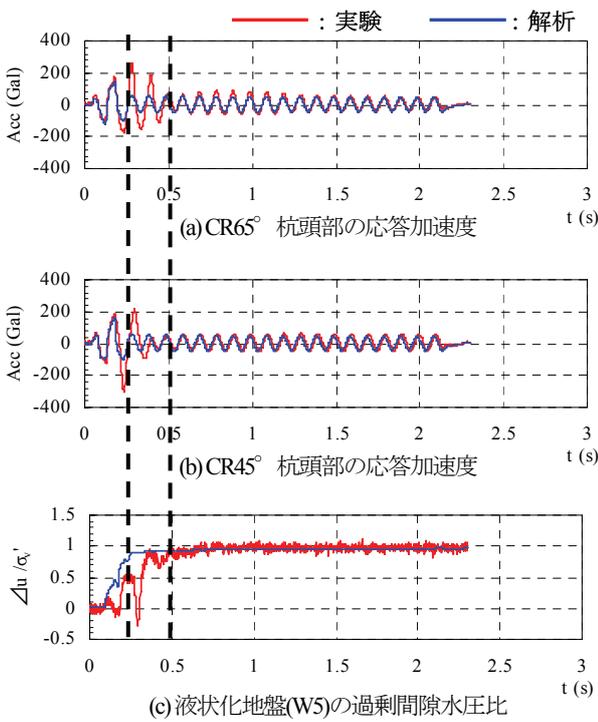


図-14 対策実験Case1の実験および解析結果

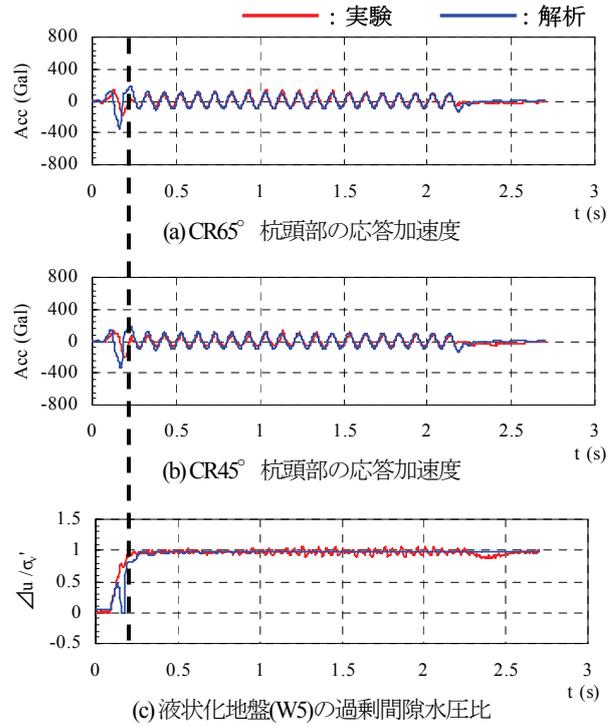


図-15 対策実験Case2の実験および解析結果

隙水圧比のいずれも実験と解析ではほぼ一致している。このことから解析のモデル化が適切に行われ、本解析手法により液状化地盤における杭基礎の耐震性能を概ね検証できたと言える。

次に免震杭を用いた実験に関して、Case1では無対策杭の実験と同様に水圧上昇の時間に若干の違いがあるものの、完全液状化後に免震ゴムが作用してからの挙動においては、実験を再現できていることが分かる。Case2では、水圧上昇のタイミングに若干の違いがあり、そこまでの加速度応答は実験と解析で若干異なるが、完全液状化後は、ほとんど一致しており、本解析手法により実験をほぼ再現できていることが分かる。

(2) 杭基礎の曲げモーメント分布

図-16～図-18に、無対策杭での実験および免震杭の実験における杭基礎の最大曲げモーメント分布を示す。

無対策杭での実験に関しては、Case1, Case2ともに杭頭部や杭中間部に発生する大きな断面力の傾向や値を解析において概ね表現できていることが分かる。

一方、免震杭の結果に関しては、発生する曲げモーメントの分布や、杭中間部において応答が低減できることは概ね再現できている。しかし解析においては、免震ゴムを取り付けた箇所のみ局所的に低減され、ゴムの直上や直下の断面力は実験結果よりも大きくなっている。これは、免震ゴムのモデル化において、ゴムのせん断変形に着目するため、回転ばねに関しては大きな剛性値で設定しているが、実際には、ゴムに回転変形が生じている

と推察されるために、実験結果と解析結果に差異が生じているのではないかと考えられる。それに伴って杭全体が負担するモーメントバランスが実験と解析で異なり、免震ゴム部から杭頭部にかけての分布も若干異なっていると思われる。回転ばねに関しては、今後性能試験等を実施して適切な値を設定する必要がある。

7. まとめ

橋梁杭基礎の損傷メカニズムと、地盤の液状化および慣性力の杭に対する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を行ったところ、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。そこで、

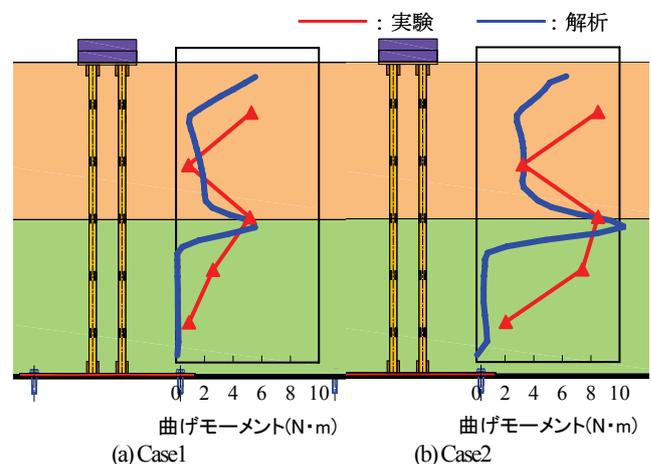


図-16 杭基礎の最大曲げモーメント(無対策実験)

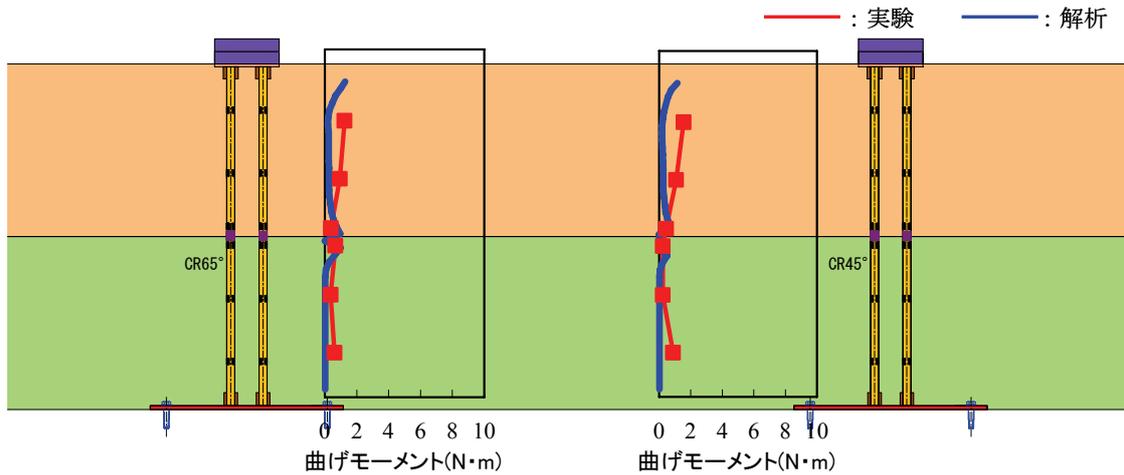


図-17 杭基礎の最大曲げモーメント (免震杭実験 Case1)

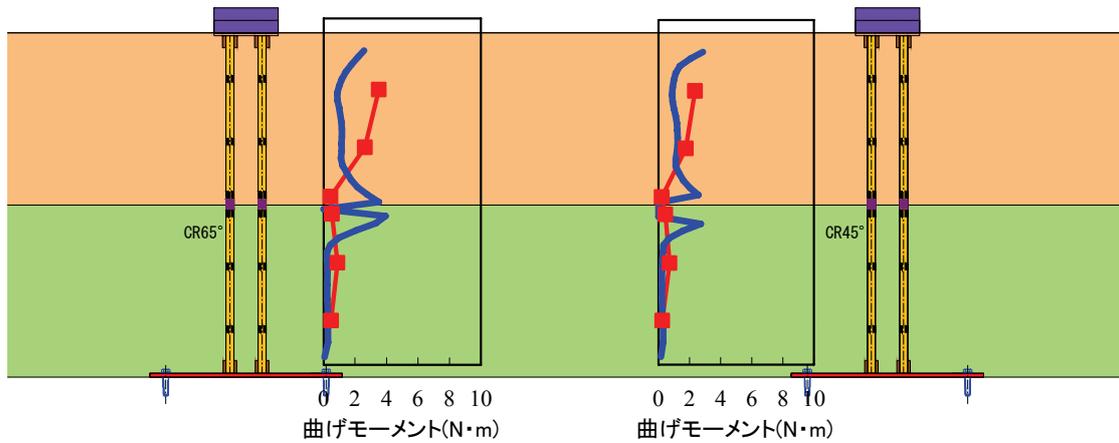


図-18 杭基礎の最大曲げモーメント (免震杭実験 Case2)

地震時に大きな断面力の発生する杭中間部に免震ゴムを取り付けて振動台実験を行い、当該箇所の断面力が減少することを確認した。さらに杭基礎の有効応力解析における免震ゴムのモデル化の妥当性を確認するため、模型振動実験の再現解析を実施した。

以上の検討内容より得られた知見を以下に示す。

- 1) 免震ゴムの設置により層境界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。
- 2) 加速度応答の時刻歴と過剰間隙水圧比の時刻歴から、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。
- 3) 模型振動実験の再現解析を実施した結果、無対策杭での実験および免震杭での実験のいずれにおいても本解析手法により杭基礎の地震時挙動や免震効果等を概ね再現できた。これにより、この解析手法を用いて、今後詳細な検証やより効果的な耐震性向上策を検討できるものと考えられる。

今後は、この免震杭基礎構造が側方流動対策としても有効であるか、実験および解析で検討していく予定である。

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および FLIP を用いた有効応力解析に関しては、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。

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, pp.1005-1006, 2011.

- 2) (社)コンクリートパイル建設技術協会, (社)コンクリートポール・パイル協会: 兵庫県南部地震被害調査報告書(その2), 1995.
- 3) 社本康広, 佐藤正義, 桂豊, 田地洋一, 堀田洋之, 石川裕, 玉置克之: 兵庫県南部地震における液状化に伴う地盤被害と杭基礎被害の原因分析, 清水建設研究報告, 第 62 号, pp.75-84, 1995.
- 4) 三輪滋, 池田隆明, 大岡弘: 1995 年兵庫県南部地震で液状化した埋立て地盤に建つ鋼管杭基礎構造物の被害原因と被害過程の検討, 日本地震工学会論文集, 第 4 巻, 第 1 号, pp.5-22, 2004.
- 5) 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.
- 6) 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, pp.1561-1562, 2011.
- 7) 富澤幸一, 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 宮坂享明, 三浦房紀, 平田大三: 高靱性能耐震ジョイント杭の開発とその側方流動する液状化地盤に対する応答, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.201-211, 1995.
- 11) 宮坂享明, 三浦房紀, 平田大三: 改良型高靱性能耐震ジョイント杭の液状化による地盤の側方流動に対する応答, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.287-298, 1995.
- 12) 泉博允, 三浦房紀, 宮坂享明, 福嶋研一: 高靱性能耐震ジョイント杭の地震時有効性について, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.191-203, 1997.
- 13) 泉博允, 三浦房紀, 宮坂享明, 福嶋研一: 高靱性能耐震ジョイント杭の繰り返し曲げ特性とそのモデル化について, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.109-127, 1999.
- 14) 高耐力マイクロパイル研究会: 高耐力マイクロパイル工法, http://jamp-hmp.jp/mp_sum.html, 1997.
- 15) 地盤・基礎 21 研究会: In-Cap 工法, <http://www.jiban-kiso21.gr.jp/>, 2002.
- 16) 鋼管杭協会: 鋼管杭 - その設計と施工 -, pp.242-253, 1994.
- 17) Iai, S. : 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.
- 18) 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, 第 275 号, pp.69-77, 1978.
- 19) 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.
- 20) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp.249-273, 1976.
- 21) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, pp.119-140, 2004.
- 22) 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.
- 23) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Analysis of Undrained Cyclic Behavior of Sand under Anisotropic Consolidation, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.
- 24) 沢田俊一, 小堤治, 井合進: 護岸構造物の残留変形解析 - FLIP による解析 -, 地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム発表論文集, pp.247-256, 1998.
- 25) 塩崎禎郎, 長尾毅, 小堤治, 宮下健一郎: 二次元有効応力解析による直杭式横棧橋の被災事例の再現計算, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.881-891, 2009.
- 26) 小堤治: 液状化地盤上の地盤・構造物系の地震被害推定に関する数値解析法の研究, 京都大学学位論文, 2003.
- 27) 佐藤博, 大矢孝, 高橋秀明, 松島学: 水平力を受ける杭の前面地盤挙動, 土と基礎, Vol.50, No.8 (No.535), pp.27-28, 2002.
- 28) 安田進, 田村修次, 高木正榮, 森本徹: 液状化地盤中の杭の動的相互作用に関する実大振動実験, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.2029-2030, 1999.
- 29) 溜幸生, 小堤治, 井合進, 芥川博昭: 液状化地盤と杭の相互作用を考慮した大型振動台実験の 2 次元有効応力解析, 第 42 回地盤工学研究発表会, pp.1665-1666, 2007.
- 30) Hussien, M.N., Tobita, T., Iai S. and Rollins, K.M. : "Soil-pile separation effect on the performance of a pile group under static and dynamic lateral load", *Canadian Geotechnical Journal*, 47(11), pp.1234-1246, 2010.
- 31) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 一井康二, 井合進, 梅木康之: 2 次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1899-1900, 2003.
- 32) 寿楽和也, 一井康二, 篠崎晴彦, 井合進, 田河祥一: 2 次元解析における杭-地盤相互作用ばねを用いた群杭効果の評価手法の検討, 第 58 回土木学会年次学術講演概要集, 第 3 部, pp.615-616, 2003.
- 33) 岡由剛, 佐藤靖彦, 河辺知之, 塩崎禎郎, 井合進: 杭近傍地盤の応力-歪関係に依存する相互作用ばねを用いた杭基礎の 2 次元有効応力解析, 第 58 回土木学会年次学術講演講演概要集, 第 3 部, pp.561-562, 2003.

- 34) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997.
- 35) 小堤治, 井合進, 岡由剛: 1次元有効応力解析のパラメタ感度解析, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.337-340, 1999.

(2011.12.17 受付, 2012.3.9 修正, 2012.3.14 受理)

SHAKING TABLE TEST AND EFFECTIVE STRESS ANALYSIS ON SEISMIC PERFORMANCE WITH SEISMIC ISOLATION RUBBER TO THE INTERMEDIATE PART OF PILE FOUNDATION IN LIQUEFACTION

Kunihiko UNO, Hisanori OTSUKA and Masaaki MITOU

The pile foundation is heavily damaged at the boundary division of the ground types, liquefied ground and non-liquefied ground, during an earthquake and there is a possibility of the collapse of the piles. In this study, we conduct a shaking table test and effective stress analysis of the influence of soil liquefaction and the seismic inertial force exerted on the pile foundation. When the intermediate part of the pile, there is at the boundary division, is subjected to section force, this part increases in size as compared to the pile head in certain instances. Further, we develop a seismic resistance method for a pile foundation in liquefaction using seismic isolation rubber and it is shown the middle part seismic isolation system is very effective.