

液状化地盤内にある中間に免震ゴムを持つ 杭基礎の振動台実験

Shaking Table Test of Pile Foundation with Intermediate Seismic Isolated Rubber in Liquefied Ground

宇野 州彦*、大塚 久哲**、三藤 正明***

Kunihiko UNO, Hisanori OTSUKA and Masaaki MITOU

*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)
(九州大学大学院博士後期課程 工学府建設システム工学専攻)

**会員 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 福岡県福岡市西区元岡 744)

***非会員 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)

杭基礎の地震時特性に関しては、地盤一構造物系の動的相互作用に関する研究が多く、液状化が生じる地盤においても数多くの研究事例が報告されている。液状化地盤においては、杭基礎構造物は地震時慣性力に加え、地震時の液状化・側方流動等で大きな断面力の発生する箇所が液状化層・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見られ、これらの箇所において杭の塑性化や損傷を招くことが知られている。しかしながら、液状化地盤において杭中間部に発生する損傷メカニズムの解明や、それに基づいて杭中間部を具体的に補強するような事例はあまりない。そこで本研究では、まず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影響を把握するために、無対策の杭を用いて模型振動実験を行った。それを踏まえて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実験を行い、杭基礎の耐震性が向上することを確認した。

1. はじめに

我が国では、現在数多くの土木構造物が様々な地域に建設されており、それぞれの建設において地盤条件や構造条件を考慮し、合理的な基礎形式が選定されている。中でも杭基礎は多用化される傾向にあり、その背景として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が挙げられる。それに伴い、道路や鉄道においても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、杭基礎が使われている。したがって、杭基礎構造の耐震性向上が重要な課題となっている。

一方、杭基礎の設計に関しては、現行の道路橋示方書耐震設計編¹⁾では、L2地震動に対する橋脚基礎の応答の算定に地震時保有水平耐力法が用いられ、上部工からの慣性力に対して橋脚基礎が十分な水平耐力を有することが照査される。この考え方は液状化が生じる地盤においても適用されている。しかし、地盤の長周期化に伴って応答加速度は低減するが、逆に大きな応答変位が生じ、地盤変位が基礎の変形および断面力に及ぼす影響は小さくないことから、慣性力のみを主たる地震作用として考慮する現行の算定法は不十分であると考えられる。実際

に、杭頭部に慣性力を作用させただけでは説明できないような地中部での杭の損傷例も報告されており、これは地盤による強制変位が原因であると考えられる。また、液状化地盤における杭基礎の設計は、流動化が生じる場合について述べているものが多い^{例え ば 2)}が、これまでの基礎の被害を見ると流動化が発生しなくとも液状化による損傷が発生している。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。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 ば 3)}。

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⁴⁾。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^{5)~12)}。例えば、室野ら¹³⁾は、地盤－基礎－構造物系の動的な相互作用の影響を取り上げ、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¹⁴⁾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。一方、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、構造的な対策としては、宮坂ら^{15)、16)}、泉ら^{17)、18)}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。他には鋼矢板を用いるもの等、杭に直接対策を講じるものは少なく、特に杭中間部断面力の増大を踏まえた上で対策を講じるものはほとんどない。

したがって、本研究では液状化地盤における杭基礎の耐震性向上策となるものの開発を行うことを目的とする。

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、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する。その後、発生断面力の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。

2. 無対策杭での実験

この実験に関しては、著者らは文献¹⁹⁾で一例を述べているが、ここでは実験条件や実験結果の各ケースについて詳述する。

2.1 実験概要

(1) 参考とした杭基礎

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²⁰⁾に記載されている杭基礎を採用した。図-1にそのモデルの橋脚および基礎の詳細図を示す。杭は鋼管杭であり、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、文献の地盤物性²⁰⁾は採用していない。

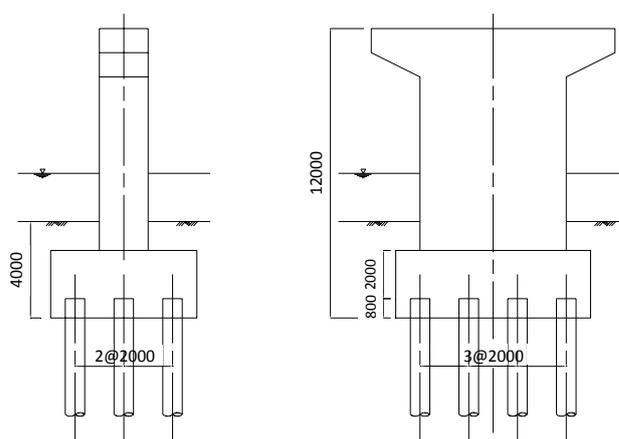


図-1 参考杭基礎の諸元 (単位: mm)

表-1 鋼管杭1本の断面性能

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

(2) 縮尺と相似則

実験模型の断面図を図-2に示す。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²¹⁾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²²⁾や、国生²³⁾の示した結果に一致している。

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

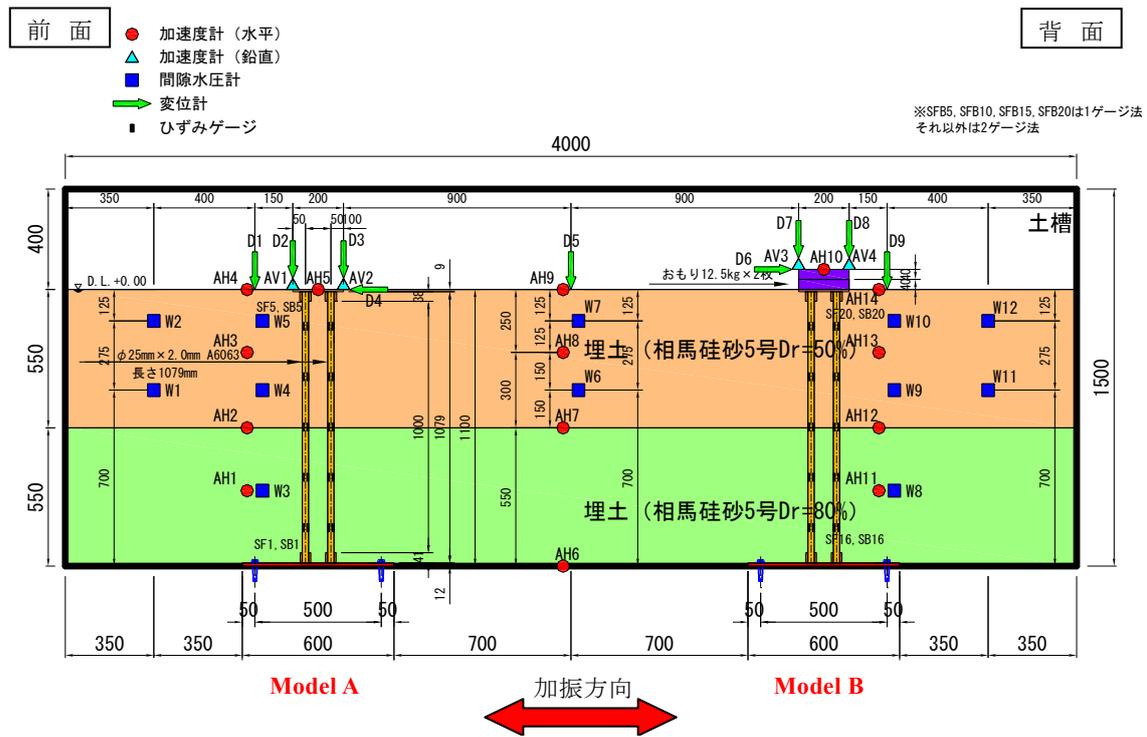


図-2 実験模型断面図（無対策実験）

表-3 実験ケース

Model A	錘なし
Model B	錘あり (25kg=12.5kg×2枚)

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。

今回の実験では、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。

実験は地震時慣性力の影響をみるため、錘のないモデル (Model A) と、錘のあるモデル (Model B) の2ケースを用意し、同一土槽内で加振を行った (表-3)。なお錘重量は、橋梁上下部工重量の杭負担率を考慮して設定している。

(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エクスパンダ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出入を可能にしている。

(4) 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）

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。なお本論文では、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呼ぶこととする。

表-4 使用材料一覧

項目	材料	備考
埋土	相馬珪砂5号 (水中落下法)	Dr≒50%
埋土	相馬珪砂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

モデル	構造形式	細目	形状	材質	寸法
Model A Model B	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)
Model B	おもり	上下部工	杭	アルミ	外径25×肉厚2.0×長さ1079(内径21mm)
Model B	おもり	上下部工	プレート	鉄	PL-200×200×4

(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振動数を考慮して設定した。固有振動数試験に関しては、次節で説明する。

加振ケースは、最大加速度を 100Gal としたケース（以降、Case1）と、350Gal（以降、Case2）としたケース、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²⁴⁾。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。

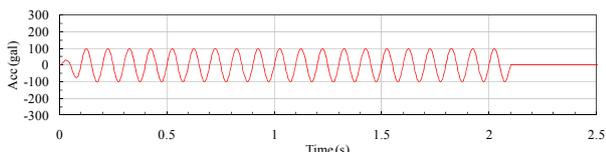


図-3 加振波（最大加速度 100Gal）

(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 12 台、変位計 9 台、ひずみゲージ 20 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

2.2 固有振動数試験

加振実験に先立って固有振動数試験を実施した。実験方法は、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 ±0.5Hz 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-7に示す。試験結果より入力する正弦波の周波数を 10Hz と設定した。

表-7 固有振動数試験結果

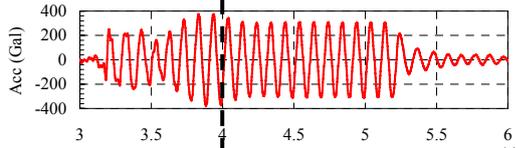
	固有振動数(Hz)
Model A	11.5
Model B	9.8

2.3 実験結果

(1) 水圧の上昇と加速度応答の関係

過剰間隙水圧の上昇に伴う、杭基礎および地盤の応答加速度の変化について検証する。ここでは Case1 の実験を例に述べる。図-4に水圧比と杭基礎応答の比較を示す。W10において水圧が計測開始 4 秒で完全に液状化しているが、応答加速度に着目すると、その時点から応答が安定している。これは、地盤が液状化するまでは、地盤と

AH10 上部工水平応答 Max= 374 , Min= -379



W10 水圧比 Max= 1.3 , Min= -0.1

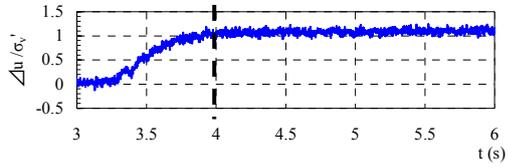


図-4 水圧比と杭の応答比較 (Case1)

構造物の相互作用が発生するために、挙動が複雑となり応答の増減が見られるが、完全液状化した後は、地盤の液状化により、土圧が低減したため杭基礎の応答が一定となっていると推察される。Case2 および Case3 に関しては、水圧の上昇が早いために加振直後に図-4のような乱れた挙動はほとんど現れない。

(2) 杭基礎ひずみ時刻歴

杭基礎に発生するひずみの時刻歴を図-5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 Model A、右側が Model Bの結果である。前節でひずみゲージの1ゲージ法と2ゲージ法に

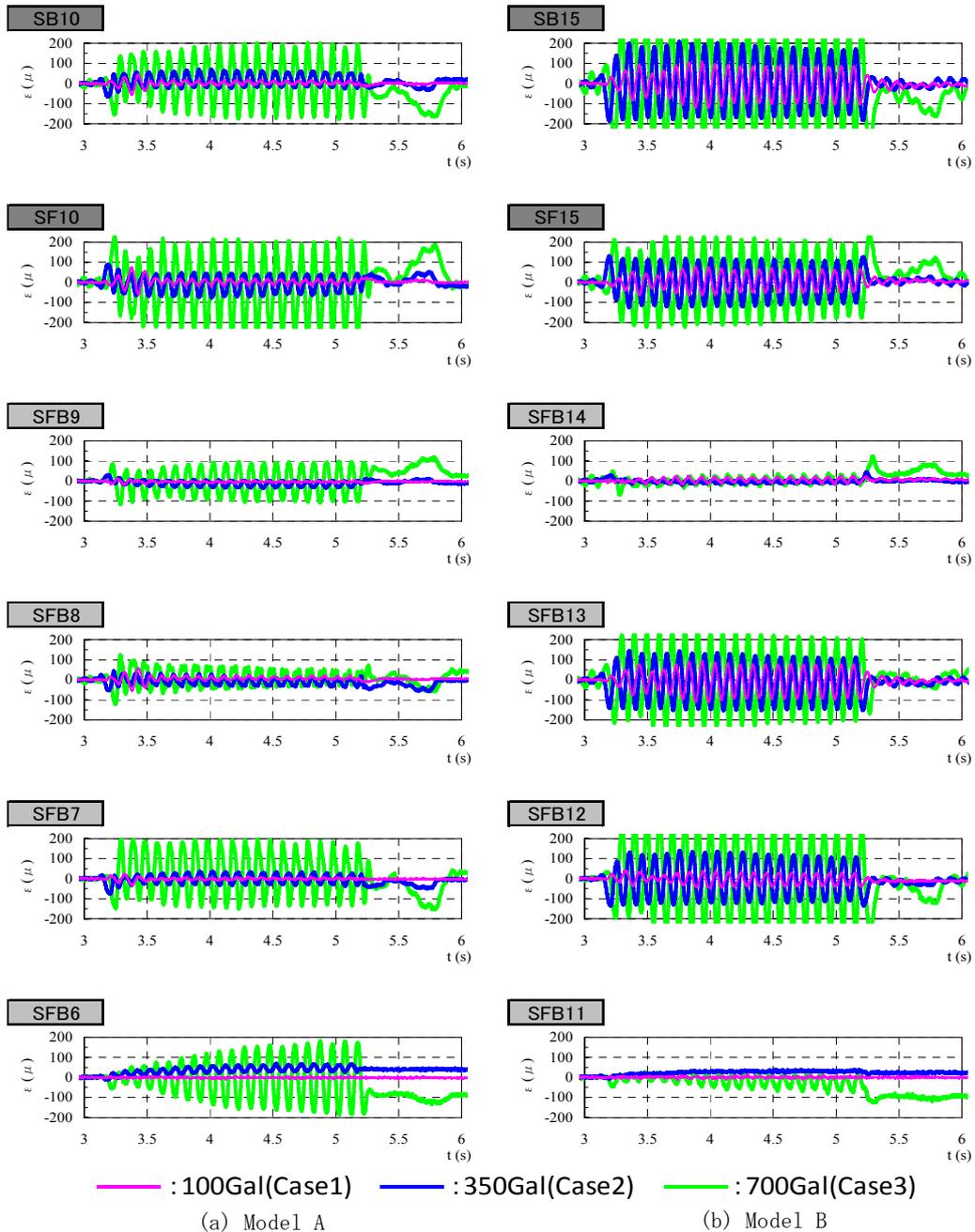


図-5 杭基礎ひずみ時刻歴

ふれたが、2 ゲージ法は前面側のひずみゲージ（例えば SF6）と背面側（SB6）から求めているので、この場合は SFB6 の結果として表示している。

Model B に着目すると、杭頭部の SF15、SB15 と杭中間部の SFB13 で大きなひずみが発生している。しかし Model A と異なり、上層液状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状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。一方、Model A は特に杭中間部の SFB8 において液状化が発生すると徐々に応答が低減している。杭の上部工重量による慣性力がほとんど働かないこと、また液状化によって土圧が低減したことが要因と考えられる。また Model A、Model B の両方を比較すると、Case1 に関しては、杭中間部である SFB8 および SFB13 において、液状化の発生する計測開始 3.5 秒程度までは両者の発生ひずみの違いは少ない。しかし、上方地盤が液状化した後は、Model B の方でひずみが大きく発生している。液状化が生じると層境界部には大きな断面力が発生するが、上部工の重量が大きな橋梁構造物では、それらの慣性力も層境界の杭部に発生するため、大地震時には杭中間部より損傷する危険性があることも実験より明らかとなった。Case2、Case3 に関しては、加振後すぐに液状化に至ることから、加振直後より杭中間部に発生する断面力が大きい。

(3) 杭基礎最大曲げモーメント

図-6 に杭基礎に発生する最大曲げモーメント分布を示す。Case1～Case3 の結果を重ねて表示している。Model A に着目すると、Case1 では杭頭部および杭中間部で比較的大きな断面力が発生しているが、Case2 および Case3 に関しては、杭頭部と杭の下端側で断面力が大きくなっている。杭中間部よりも下側で断面力が大きくなった理由としては、入力加速度が大きいため地盤の層境界部より若干下の部分まで液状化が発生しており、それによって液状化した地盤と液状化が発生しなかった地盤の層境界部が若干下方へ移動したためである。ただし、Model A に関しては、重量があまりないため慣性力が小さく、断

面力も杭にほぼ一様に作用した結果となっている。一方、Model B に着目すると、Case1 に関しては杭頭部と層境界部にあたる杭中間部で大きな断面力が発生している。Case2、Case3 と加速度が大きくなるに従って、杭中間部に発生する断面力が下方へ推移しているのがわかる。このことは上記で述べた層境界部の移動によるものと考えられる。また Model B のように上部工の重量を考える場合には、杭頭部および杭中間部に局所的に断面力が発生していることが明らかである。

以上のように、無対策杭の実験を行った結果、杭中間部に大きな断面力が発生し、地震時には杭中間部より損傷する危険性のあることが明らかとなった。

3. 対策杭を用いた実験の概要

ここでは前章の無対策杭の実験を踏まえ、杭中間部に対策を講じた振動台実験について述べる。なお概要は前章での説明と重複する箇所が多いため簡略化して述べる。

図-7 に実験模型の断面図を示す。今回は両モデルとも無対策実験の Model B のように橋梁の上下部工重量の杭負担率を考慮した錘 (25kg) を設置している。また杭の中間部には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-8 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 C、CR45°を用いた杭を Model D と呼ぶ。

相似則に関しては、前章と同じ表-2 に従うものとする。土槽の寸法、杭基礎の寸法も比較のため前章と同じとする。また検討する加振波も同様であり、模型地盤の作製方法も同様とする。

計測項目に関しては、まず前章の無対策実験では、土槽の境界条件の影響があるかどうかを確認するために水压計 W1、W2、W11、W12 を置いていたが、影響のないことが確認できたため、今回の実験では設置していない。また杭中間部にゴムを取り付けるため、無対策実験で杭中間部に貼付していたひずみゲージを、ゴムの上下端にそれぞれ貼付するようにし、杭 1 本あたりひずみゲージを

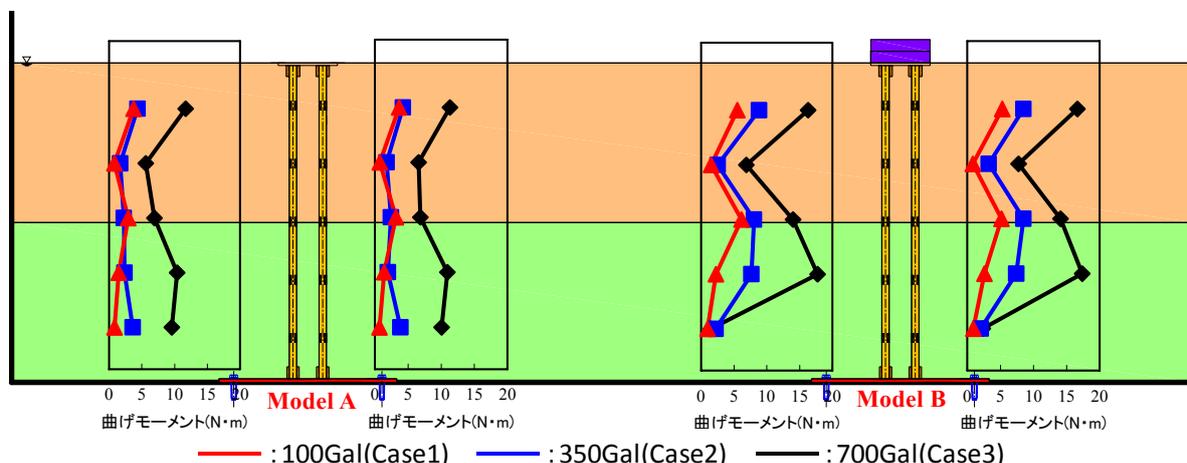


図-6 杭基礎の最大曲げモーメント分布

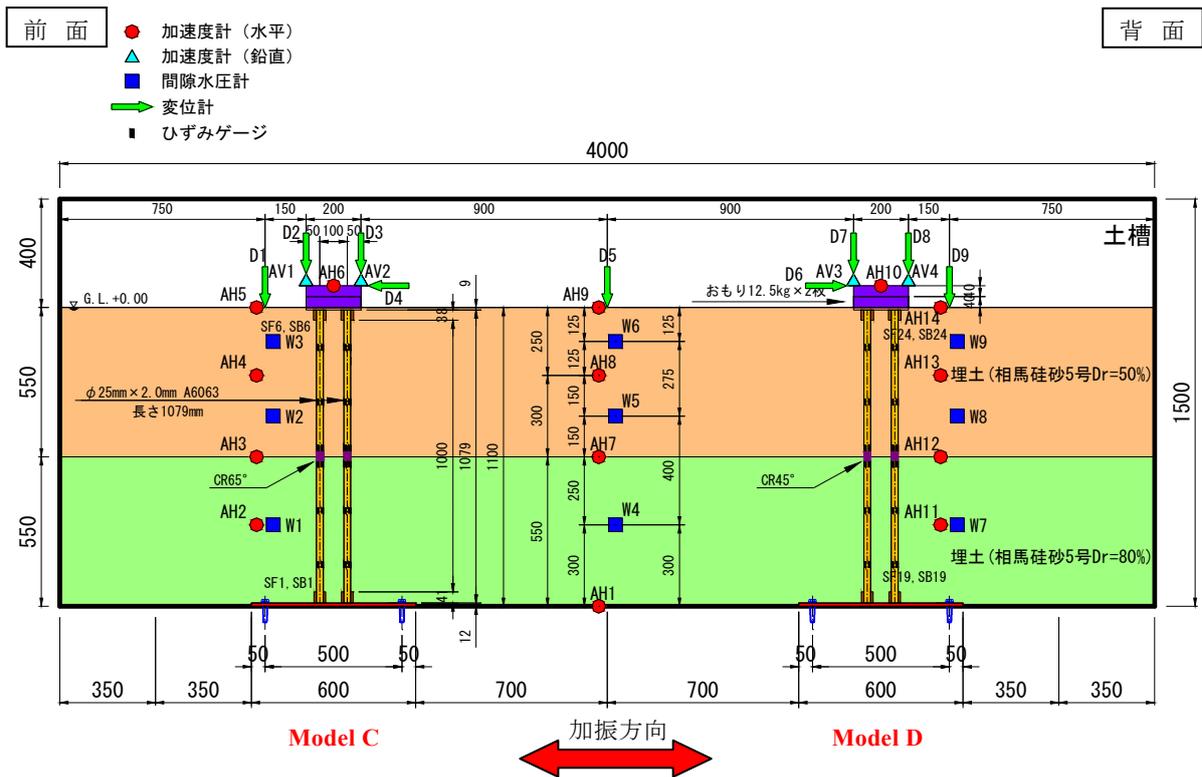


図-7 実験模型断面図 (対策実験)

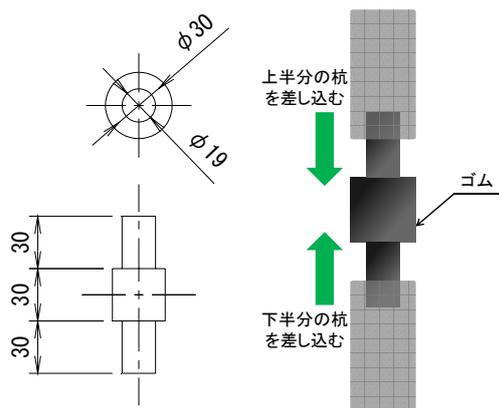


図-8 ゴム形状と取付イメージ

6箇所貼付することとした。なお、無対策実験と同様に、一番上のひずみゲージのみ1ゲージ法とした。以上より、ひずみゲージは24箇所×2枚使用することとなる。

4. 固有振動数試験結果

実験に先立ち、固有振動数試験を実施した。実験方法は、無対策実験時と同様である。

実験結果を表-8に示す。実験結果より、無対策時の杭基礎よりも長周期化できていることが確認できた。

表-8 固有振動数試験結果

	固有振動数(Hz)
CR65°	2.5
CR45°	2.4

5. 対策実験の結果

5.1 加速度

図-9～図-14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 CやModel D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規模の地震動を考えて設計する場合には、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

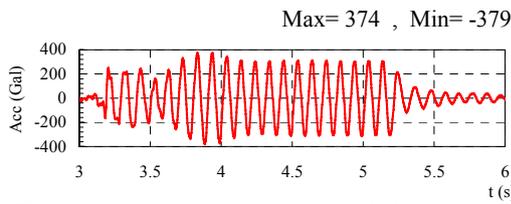
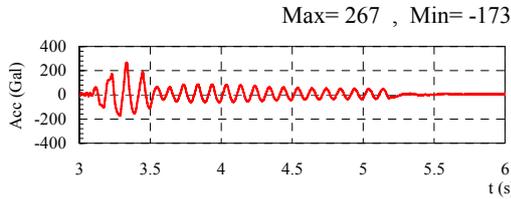
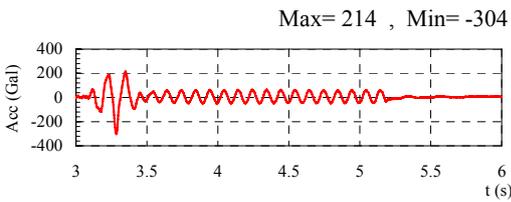


図-9 Model B の応答加速度時刻歴 (Case1)



(a) Model C の加速度応答(AH6)



(b) Model D の加速度応答(AH10)

図-10 免震杭の応答加速度時刻歴 (Case1)

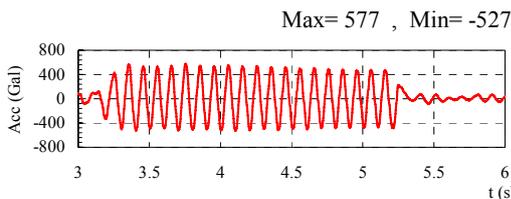
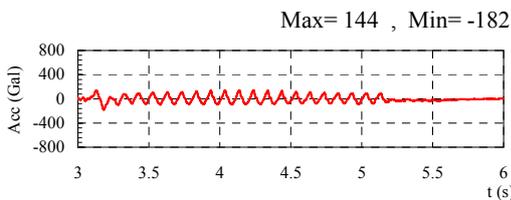
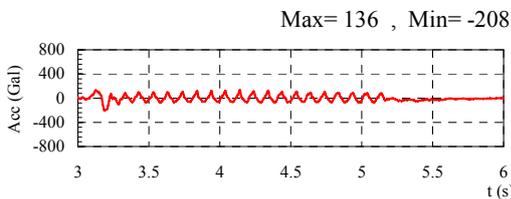


図-11 Model B の応答加速度時刻歴 (Case2)



(a) Model C の加速度応答(AH6)



(b) Model D の加速度応答(AH10)

図-12 免震杭の応答加速度時刻歴 (Case2)

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

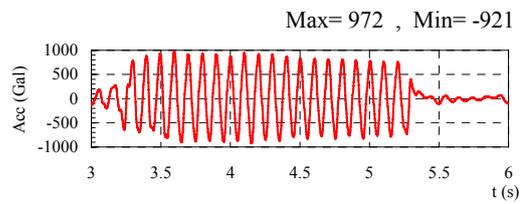
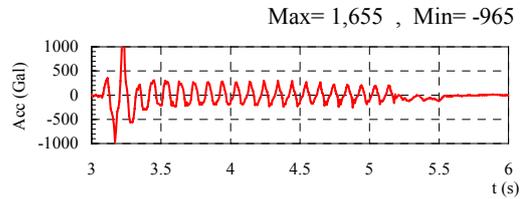
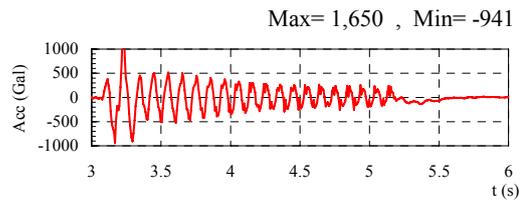


図-13 Model B の応答加速度時刻歴 (Case3)



(a) Model C の加速度応答(AH6)



(b) Model D の加速度応答(AH10)

図-14 免震杭の応答加速度時刻歴 (Case3)

震動規模の入力に対して大幅に低減できたこと、特に液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、液化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。

5.2 ひずみ

杭基礎に発生するひずみの時刻歴を図-15に示す。これも図-5と同様にCase1~Case3までの結果を重ねて表示している。図の左側がModel C、右側がModel Dの結果である。

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。図-5のModel Bと比較すると、杭頭部や杭中間部で若干ひずみが発生していたが、今回のModel CおよびModel D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、杭頭部で若干のひずみが発生しているものの、Model B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Model B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。

5.3 免震ゴムの変形量

表-9 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-9 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

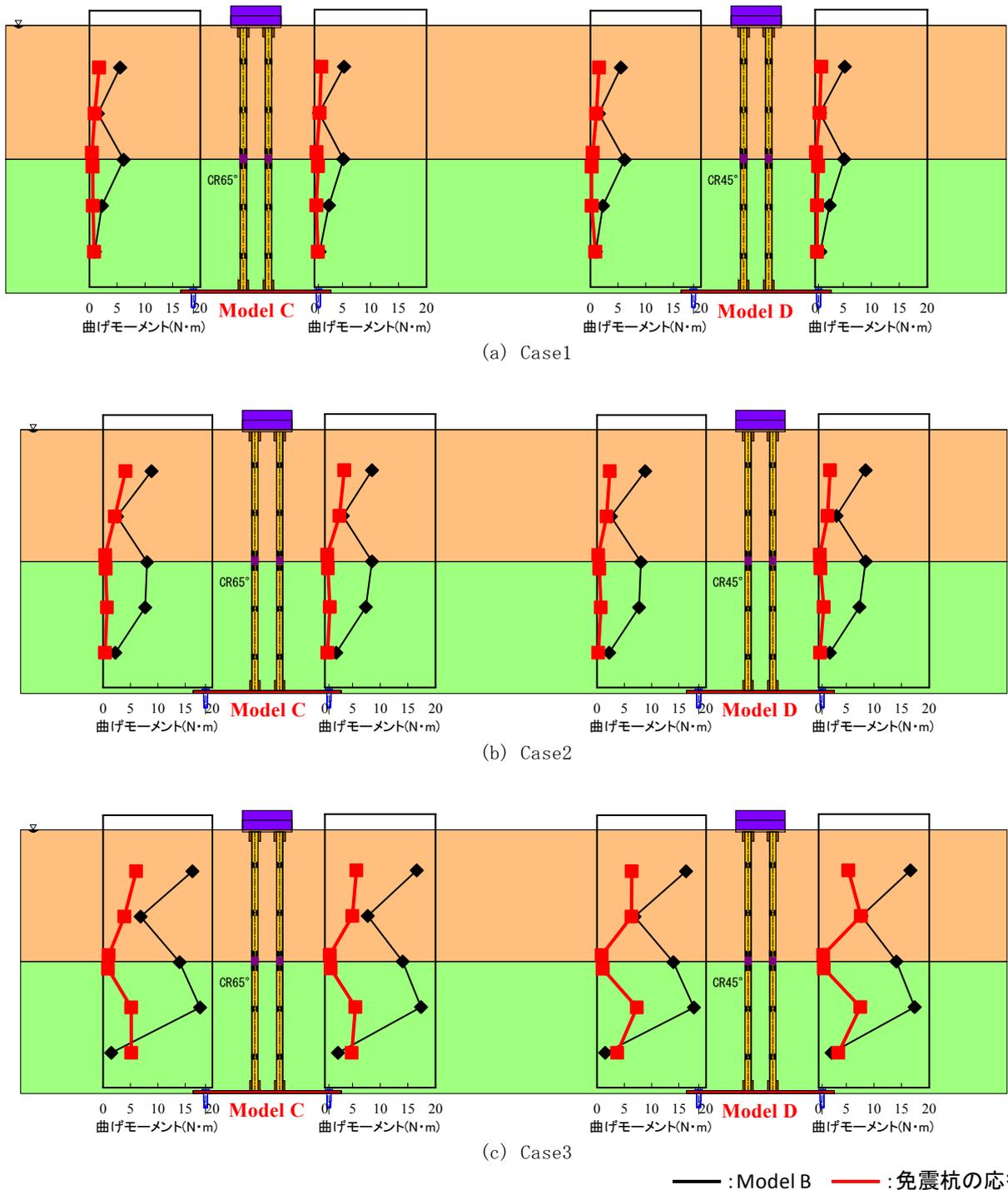


図-16 杭基礎の最大曲げモーメント分布（無対策杭と免震杭との比較）

支持機能を保持できるものと考えられる^{25),26)}。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。

5.4 最大曲げモーメント

図-16 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で得られた Model B 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。

6. 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状化および慣性力の影響を把握するために、今回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。その後、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。

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

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注目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。

なお、今回の実験に関しては杭基礎に残留変位は生じていないが、このようなゴムの杭中間部に用いる場合は、残留変位に関して留意する必要がある。ただし、地震直後の間隙水圧が消散するまでは地盤の有効応力が小さく、ゴムの復元力によって残留変位を小さくできると考えられるので、この地盤特性を活かしてゴムの設計すればよい。

また実施工に関しては、場所打ち杭の場合は、コンクリートの打設方法、鋼管杭の場合は打撃工法について、ゴムが影響を与えないかを検討する必要があり、今後具体的構造を考える予定である。

さらに技術的な面での今後の課題として、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。

7. 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、池野勝哉博士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) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002. 3
- 2) 大塚久哲監修：最新地中・基礎構造の耐震設計 [改訂増補版]，九州大学出版会，2006. 6
- 3) 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. 12
- 4) 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
- 5) 小倉裕介，岡田太賀雄，西田秀明，運上茂樹：相互作用を考慮した基礎地盤バネの減衰定数に関する考察，第28回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 1-7，

2005. 2
- 6) 土岐憲三, 清野純史, 小野祐輔, 古川愛子: 杭基礎-地盤系における非弾性挙動を考慮した相互作用ばねのモデル化について, 土木学会論文集, No. 710/I-60, pp. 235-245, 2002. 7
- 7) 木村至伸, 河野健二: 非線形性を有する地盤-構造物系の地震応答解析に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 599-606, 2001. 3
- 8) 原田隆典, 山下典彦, 坂梨和彦: 地盤との動的相互作用を考慮した道路橋橋脚の周期と減衰定数に関する理論的研究, 土木学会論文集, No. 489/I-27, pp. 227-234, 1994. 4
- 9) 宇野州彦, 塩尻弘雄, 川口和広, 仲村成貴, 中原知洋, 大島貴充: 解析手法や境界条件等の違いが地盤-基礎-上部構造物からなる系の動的挙動に与える影響評価, 第 29 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 1151-1158, 2007. 6
- 10) Kunihiro Uno, Hiroo Shiojiri, Kazuhiro Kawaguchi and Masataka Nakamura: Analytical Method, Modeling and Boundary Condition for the Response Analysis with Nonlinear Soil-Structure Interaction, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, No. 14-0156, 2008. 10
- 11) 飛田哲男, 井合進, 仲山賢司, 中道正人, 斉藤安立, 近藤徹: 杭・地盤系の動的応答の位相関係に関する実験的研究, 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. 241-244, 2004. 12
- 12) 石川義樹, 名古屋和史, 前原康夫: 地震時の地盤変状が橋梁の耐震性に与える影響の検討, 第 9 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. 105-110, 2006. 2
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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. 4
- 16) 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. 10
- 17) 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. 10
- 18) 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. 1
- 19) 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
- 20) (社)鋼管杭・鋼矢板技術協会: 鋼管杭 - その設計と施工 -, 2009.
- 21) 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.
- 22) 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
- 23) 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
- 24) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1976.
- 25) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004. 4
- 26) 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, 2000. 10

(2011. 6. 30 受付)