

免震式栈橋の免震効果に関する模型振動実験と地震応答解析

THE SHAKING TABLE TESTS AND SEISMIC RESPONSE ANALYSIS ON THE PIER WITH ISOLATION SYSTEM

三藤正明¹・上部達生²・北澤壮介³・真壁知大³・中原知洋⁴

Masaaki MITO, Tatuo UWABE, Sousuke KITAZAWA, Tomoo MAKABE, Tomohiro NAKAHARA

¹正会員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

²正会員 工博 (財) 港湾空港建設技術サービスセンター (〒100-0013 東京都千代田区霞が関3-3-1)

³正会員 工修 (財) 沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

⁴正会員 工修 五洋建設株式会社 東京支社 (〒140-0013 東京都品川区南大井6-26-3)

The shaking table test and the seismic response analysis of the pier with vertical pile which had arranged the isolation system were done as a technology which improved pier with vertical pile's earthquake resistant ability. It has been understood that the earthquake resistant ability of the seismic isolation pier is better compared with the conventional pier. The analytical method on this study was able to forecast the effect of the seismic isolation quantitatively. For future research, we will investigate the earthquake resistant ability of an actual seismic isolation pier in detail in consideration of the influence of the foundation ground based on the result achieved for this research.

Key Words : pier with the vertical pile, isolation system, shaking table test, seismic response analysis

1. 目的

兵庫県南部地震により神戸港の大半の港湾施設が被災し、港湾機能のほとんどが麻痺状態に陥った。この被災経験を踏まえて、港湾施設の耐震性をさらに合理的に確保する技術が求められている。そこで、直杭式栈橋の耐震性能を向上させる技術として、栈橋上部工と直杭の間に免震ゴムを配置した免震式栈橋を取り上げ、従来式栈橋と比較して耐震性能が向上していることを基礎地盤を考慮した模型振動実験から確認した結果は既に報告した^{1) 2)}。しかしながら、模型振動実験は基礎地盤および捨石模型の剛性、重量が相似則を満足していないため、免震式栈橋の耐震性能を定量的に評価するのが困難であった。そこで、免震式栈橋の免震効果を定量的に評価するために直杭の地中部の仮想固定点より上部

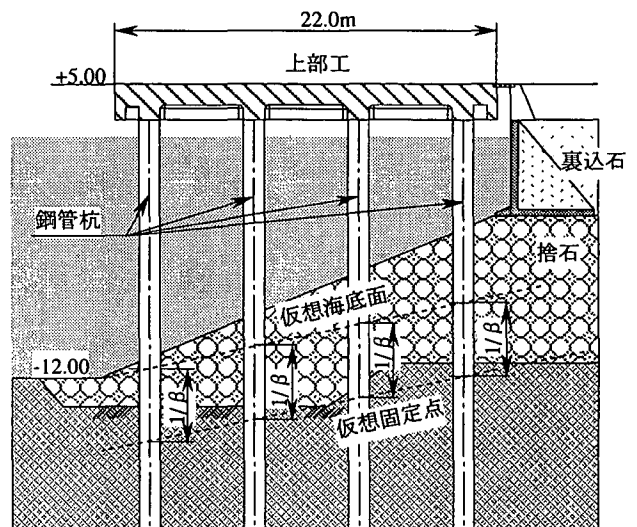


図-1 直杭式横栈橋標準断面図

の杭および上部工を取り出した直杭式栈橋に関する
 模型振動実験および地震応答解析を行った。

表-1 相似則

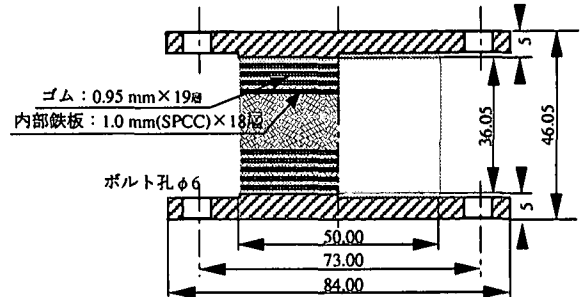
パラメータ	実物/モデル	縮尺
長さ	λ	12
重量	λ^2	144
時間	$\lambda^{0.5}$	3.46
面圧	1	1
変位	λ	12
曲げ剛性	λ^4	20736
加速度	1	1

2. 模型振動実験概要

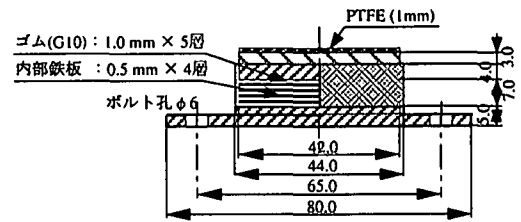
図-1に検討対象とした水深-12.0mの直杭式横棧橋に関する標準断面を示す。横棧橋は棧橋本体とその背後の土留護岸から構成される係留施設である。棧橋は、杭などの支柱の上に庄版を載せた軽量構造物である。なお、杭と上部工は剛結構造とすることが多い。

図-2に振動実験に用いた棧橋模型を示す。この棧橋模型は長さに関する相似比を1/12とした。免震棧橋の耐震性能を定量的に評価するために、図-1に示す直杭の仮想固定点より上部を取り出した直杭と上部工だけの模型とし、免震装置を直杭頭部と上部工の間に設置した。したがって、直杭と基礎地盤の動的相互作用は考慮していない。なお、仮想固定点とは、単杭の横抵抗としてはチャンの方法に従い、それによって定められる杭頭反力と杭頭曲げモーメントが両端固定梁のそれらと等しくなる杭の埋め込み長さである。図-1に示す $1/\beta$ が埋め込み長さに相当している。ここで、 β は杭の特性値である。通常の棧橋の設計では、仮想固定点を用いて構造設計が行われている。

本実験で適用した相似則³⁾は表-1に示すように加速度と免震装置に作用する面圧の相似比が1にな



(a) 高減衰積層ゴム



(b) すべり支承

図-3 免震装置模型断面

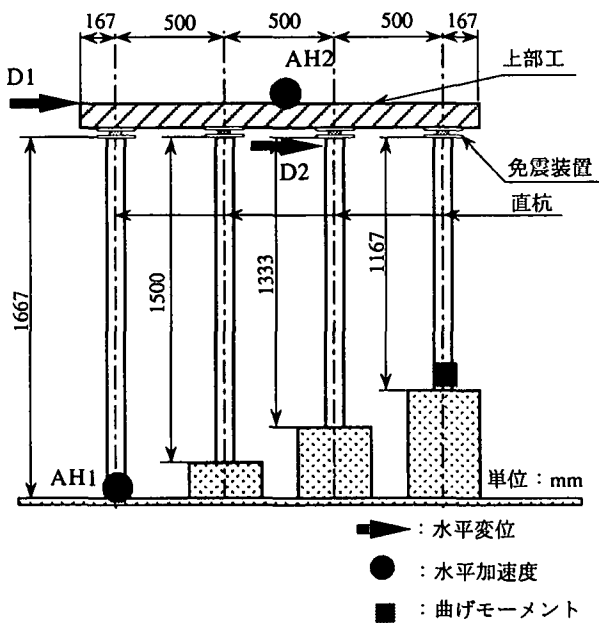
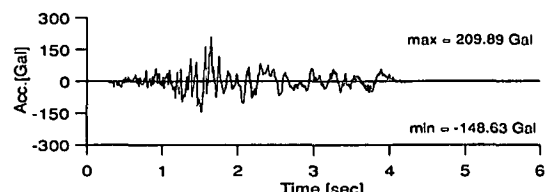
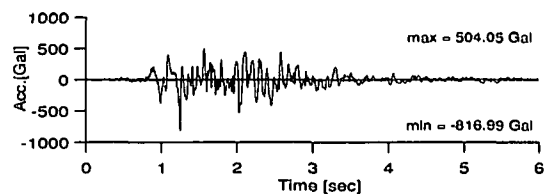


図-2 免震棧橋模型断面



(a) 八戸波



(b) 兵庫県南部地震観測波

図-4 入力地震動

るようにしている。したがって上部工模型の重量は面圧に関する相似比を満足するように決定した。免震装置としては図-3に示す高減衰積層ゴムとすべり支承を用いた。なお、免震装置の組み合わせは高減衰積層ゴムのみ、および高減衰積層ゴムとすべり支承の併用式の2種類とした。併用式の場合は両側に高減衰積層ゴム、中間の2つにすべり支承を配置した。計測器としては加速度計、変位計およびひずみゲージを適宜配置した。

入力地震動は図-4に示すようにレベル1相当として最大加速度350Galの八戸波、レベル2相当として最大加速度817Galのポートアイランド基盤入射波形（PI-79NS Base）を用い、相似則に従い時間軸を縮小した波形を用いた⁴⁾。

3.地震応答解析手法

図-5に地震応答解析に用いた解析モデルを示す。解析モデルは法線直角方向を取り出した2次元とし、直杭ならびに上部工は有限要素法のフレーム要素を用いた。境界条件として下端は固定とした。なお、栈橋上部工の重量は杭の分担幅に応じた節点荷重として与えた。栈橋模型の減衰は構造減衰と仮定し、減衰定数2%なるように設定した。なお、図中の番号は有限要素法で用いた際の節点番号を示している。

図-6、7に地震応答解析に用いた高減衰積層ゴム⁵⁾とすべり支承⁶⁾の非線形特性を示す。なお、従来型栈橋の解析では杭と上部工は剛結とした。

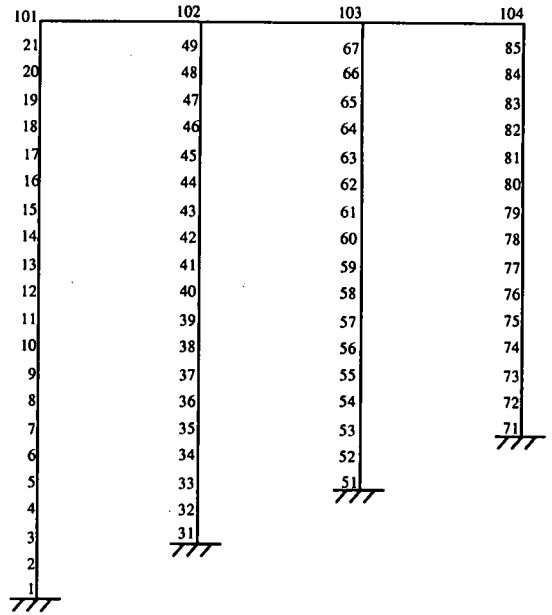


図-5 解析メッシュ

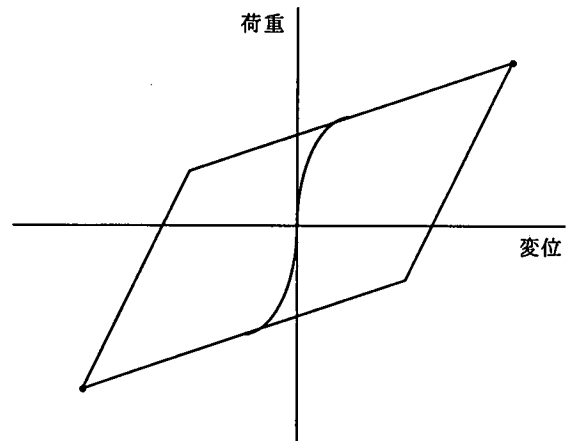


図-6 高減衰積層ゴムの解析モデル

4. 模型振動実験結果と地震応答解析結果

(1) 模型振動実験結果と地震応答解析結果の比較検討

免震栈橋の地震応答解析手法を検討するために模型振動実験結果と地震応答解析結果を比較した。なお、以下に示す結果は入力地震動としてポートアイランド基盤入射波形を用いた場合の結果である。

図-8、9に免震栈橋の模型振動実験結果と地震応答解析結果の比較を示す。図中の実線は実験値、点線は解析値を示している。図-8は免震装置として高減衰積層ゴムを用いた場合の結果で主要動部分では解析値が実験値より若干小さくなっているが、比較的よく一致していることが判断できる。

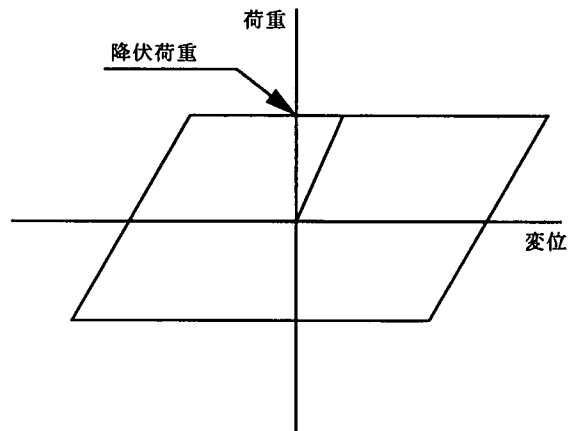


図-7 すべり支承の解析モデル

図-9は免震装置としてすべり支承と高減衰積層ゴムを併用した場合の結果で、若干位相のずれがみられるがよく一致しており、解析結果は実験結果をよく再現していると判断できる。従って、今回用いた地震応答解析手法の実現象に対する整合性が確認できた。以上の結果を踏まえて、従来型栈橋に関する検討は地震応答解析結果を用いることとした。

(2) 固有振動数に関する検討

表-2に免震栈橋と従来型栈橋の固有振動数の比較を示す。免震栈橋については本加振の前に行った共振実験より求めた。一方、従来型栈橋は解析値である。この結果より免震栈橋の固有周期は従来型栈橋に比較して約3倍となっており、免震装置の配置により栈橋の周期が長周期化したと判断できる。

表-2 固有振動数比較

免震装置	固有振動数(Hz)	固有周期(秒)
高減衰積層ゴム (実験値)	1.200	0.833
すべり支承 +高減衰積層ゴム (実験値)	1.300	0.769
従来型 (解析値)	3.811	0.262

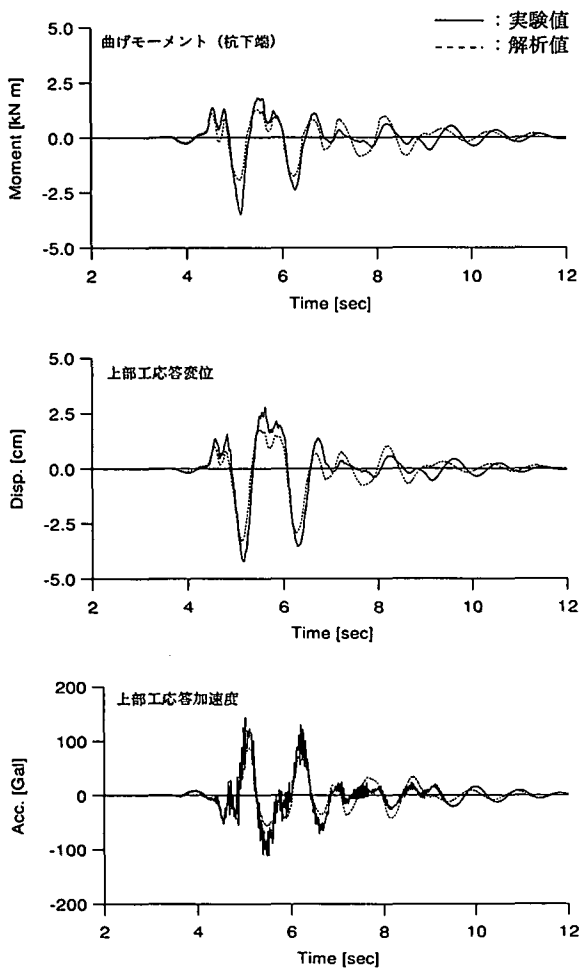


図-8 解析結果と実験結果 (高減衰積層ゴム)

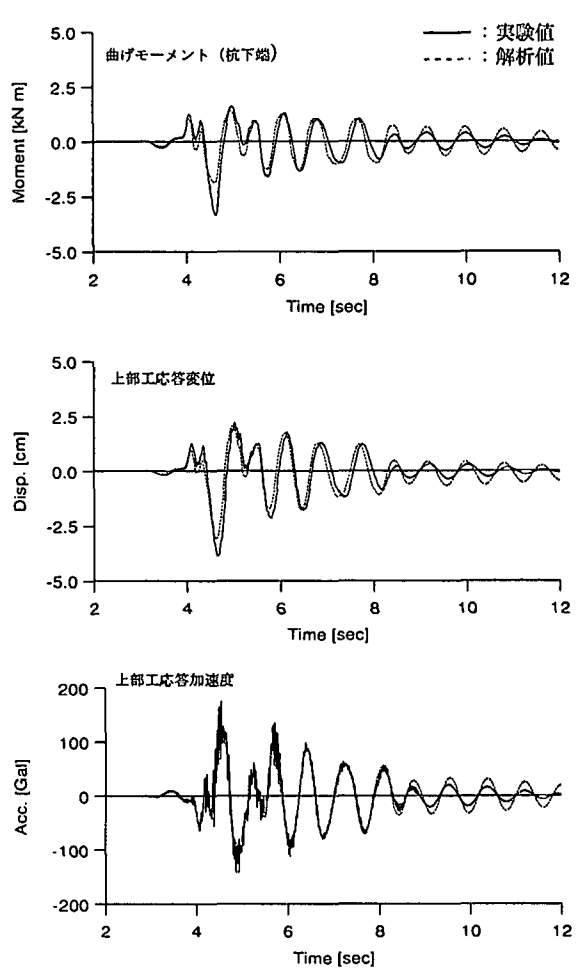


図-9 解析結果と実験結果 (すべり支承)

(3) 応答変位および応答加速度の時刻歴に関する比較検討

図-10、11に模型振動実験と地震応答解析で得られた免震栈橋の水平応答加速度および水平応答変位の時刻歴を示す。なお図中の実線は免震栈橋の実験結果、点線は従来栈橋の地震応答解析結果である。図-10は免震装置として高減衰積層ゴムを用いた場合の結果であるが、免震栈橋の上部工水平応答加速度(AH2)は振動台上の入力加速度(AH1)に対して長周期化しており、免震効果が顕著にみられる結果となった。さらに上部工の応答加速度は従来栈橋に比較して大幅に加速度が減少していることがわかる。また水平応答変位も従来栈橋に比較して免震栈橋では長周期化しており、上部工では変位量が大きくなっている。また上部工変位(D1)と杭頭変位(D2)とでは変位量に差がみられ免震装置に変形が集中していることがわかる。

図-11はすべり支承と高減衰積層ゴムを併用した場合の結果であり、高減衰積層ゴムの場合と同様に

免震栈橋の上部工水平応答加速度(AH2)は振動台上の応答加速度(AH1)に対して長周期化しており、免震効果が顕著にみられ、上部工の応答加速度は従来栈橋に比較して大幅に加速度が減少していることがわかる。上部工の水平応答変位は従来栈橋に比較して変位量が大きくなっているが、杭頭ではすべり支承を設置したことにより大きな変位が生じなかったことが確認できる。

(4) 最大加速度および最大曲げモーメントの比較検討

図-12に最大加速度、最大曲げモーメントの比較結果を示す。なお、免震栈橋は実験結果、従来栈橋は解析結果である。図に示すように上部工の最大加速度および杭下端の最大曲げモーメントは免震装置として高減衰積層ゴムを用いた場合、すべり支承と高減衰積層ゴムを併用した場合の免震栈橋両ケースでは大きな相違はみられなかった。しかしながら、免震栈橋は従来栈橋に比較すると加速度、曲げ

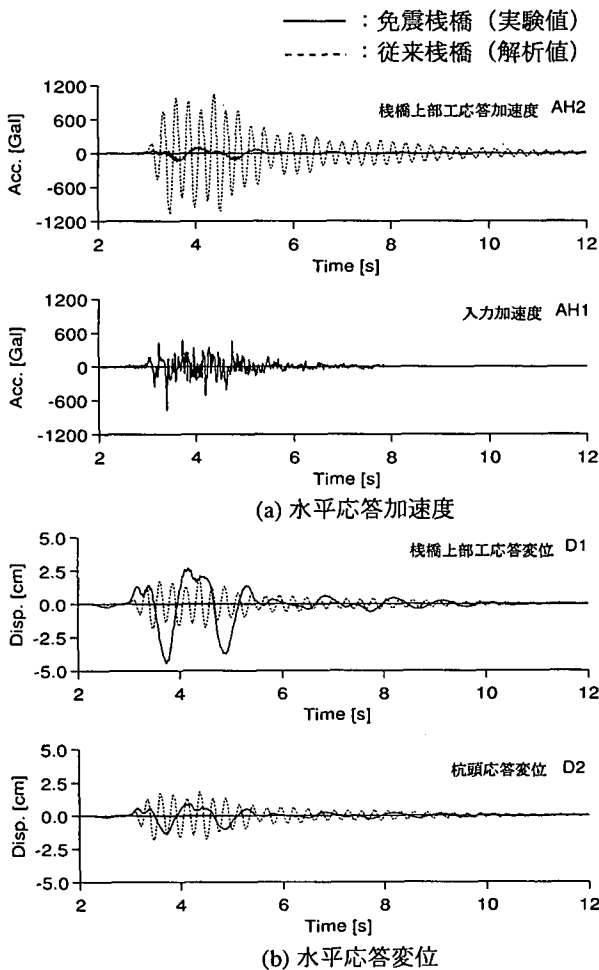


図-10 振動実験結果 (高減衰積層ゴム)

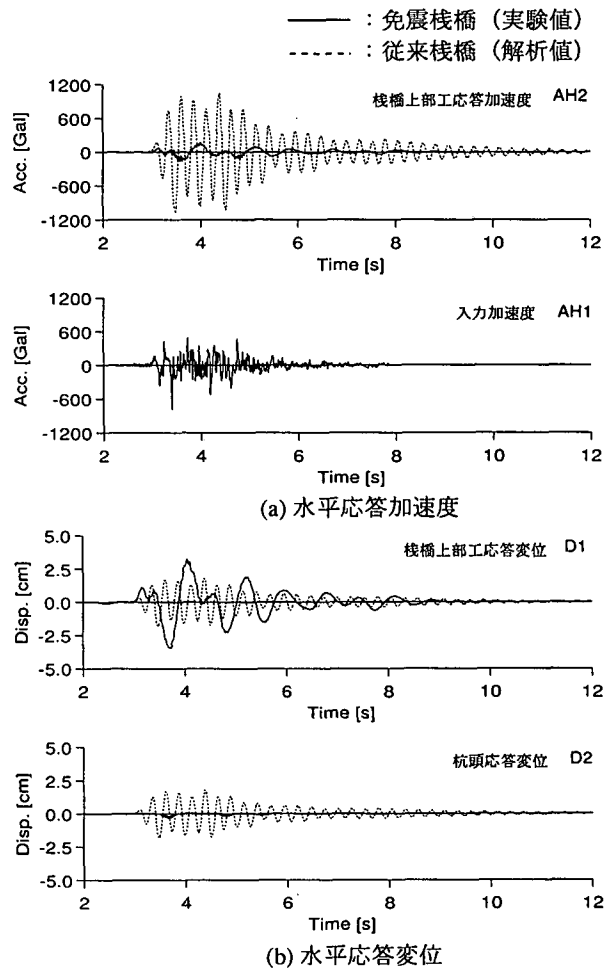
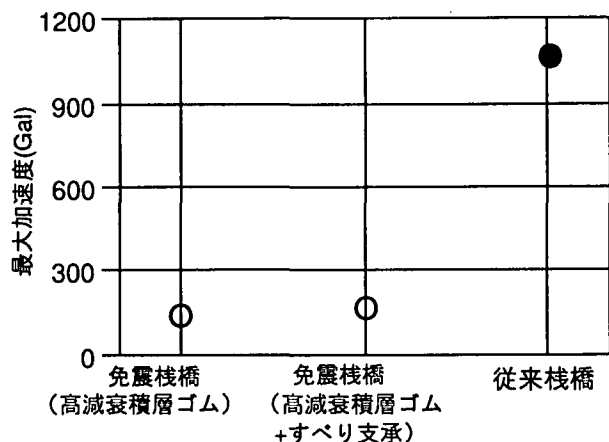


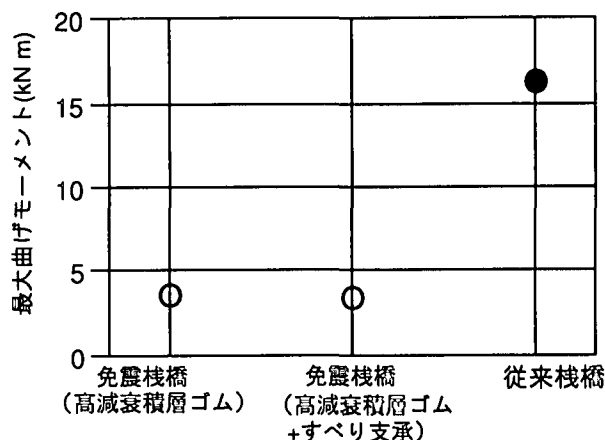
図-11 振動実験結果 (すべり支承)

○：実験値

●：解析値



(a)上部工最大加速度の比較



(b)最大曲げモーメントの比較 (陸側杭)

図-12 最大加速度、最大曲げモーメントの比較

モーメントとも大幅に低減し、免震効果が十分に発揮されたものと推測することができる。

5.まとめと今後の課題

免震装置を取り付けた直杭式棧橋の耐震性能を検討するために模型振動実験と地震応答解析を実施した。今回は直杭の仮想固定点より上部を取り出し実験と解析を行っており、その結果従来棧橋に比較して免震棧橋の方が耐震性能が良いことがわかった。また解析結果からは本研究で行った解析手法で定量的に免震効果を予測することが可能であるとの見通しが得られた。

今後は本研究で得られた成果を踏まえて、実際の免震棧橋の耐震性能を基礎地盤の影響を考慮して詳細に検討する必要があると考えている。

なお、本研究は運輸施設整備事業団基礎研究制度に基づいて行ったものである。

参考文献

- 1)三藤正明、上部達生、中原知洋、大山洋志：直杭式棧橋の免震技術に関する模型振動実験、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集、pp.144～145、1999年9月
- 2)三藤正明、上部達生、中原知洋、大山洋志：直杭式棧橋の振動制御に関する実験的研究、土木学会第25回地震工学研究発表会講演論文集第2分冊、pp.997～1000、1999年7月
- 3)Susumu IAI： Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure Model in 1G Gravitational Field, Report of the Port and Harbor Res. Inst.No.3, 1988
- 4) (財) 沿岸開発技術センター：埋立地の液状化対策ハンドブック、pp.79～81、平成9年8月
- 5)藤田隆史、鈴木重信、藤田 聡：建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究、日本機会学会論文集 (C編) 56巻523号、pp.658～665、1990年3月
- 6)森 敦、藤田亮一：免震装置の種類と特徴、土木学会 地震工学委員会 減震・免震・制震委員会 橋梁と地下構造物の免震・制震、pp27～32、1999年5月