

直杭式栈橋の振動制御技術に関する研究

粟津 裕之* 中原 知洋**
岩佐 貴史* 三藤 正明*

要 旨

直杭式栈橋の耐震性能を向上させる技術として、免震装置を配置した免震栈橋と制震版付き栈橋の2種類について模型振動実験を行い、その耐震性能を実験的に検討した。免震栈橋に関しては、免震装置による固有周期の長周期化、および減衰効果により、従来式栈橋に比較して栈橋上部工の応答が速が小さくなるとともに直杭に発生する曲げモーメントが小さくなった。制震版付き栈橋は、栈橋上部工から水中まで制震版を設置し、制震版と水との動的相互作用を利用して耐震性能を向上させる工法であり、制震版の効果により従来式栈橋に比較して栈橋上部工の応答加速度、応答変位および杭頭の応答ひずみが小さくなり、直杭式栈橋の耐震性能の向上が確認された。

1. まえがき

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、港湾機能がほとんど麻痺状態に陥った。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、免震装置を配置した免震栈橋と制震版付き栈橋の2種類について模型振動実験を行い、その耐震性能を実験的に検討した。

免震構造は積層ゴム等を用いて構造物の周期を長周期化させるとともに地震動の入力エネルギーを吸収する減衰性能を持たせることにより、構造物の耐震性能を向上させる技術である^{1)~3)}。免震栈橋はこの免震構造を取り入れることにより栈橋の耐震性能を向上させるものである。

制震版付き栈橋は、制震版を栈橋上部工から水中まで設置することにより、制震版と水との動的相互作用を利用して直杭式栈橋の耐震性能を向上させるものである。

本報告では、免震栈橋、および制震版を設置した直杭式栈橋に関する模型振動実験概要、および実験結果について説明する。

2. 免震栈橋に関する検討

2.1 模型振動実験概要

図-1に水深-7.5mの直杭式横栈橋に関する模型振動実験の標準断面を示す。この横栈橋模型は長さに関する相似比を1/12としたものである。模型の杭は法線方向に2列、法線直角方向に3列の計6本を配置しており、杭径89.1mm、肉厚t2.8mm、杭長L2000mmの構造用鋼管を用いている。また、上部工には鉄板を用いている。免震装置は

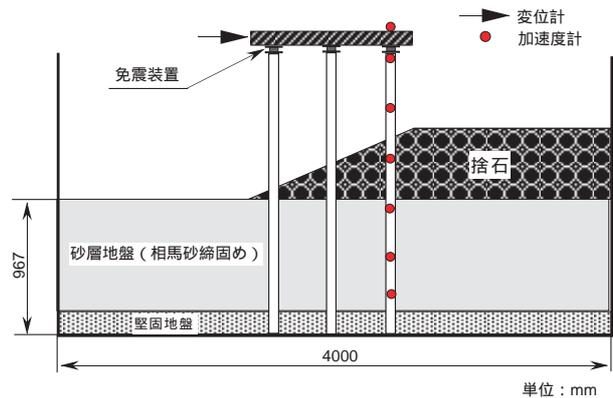


図-1 模型振動実験の標準断面

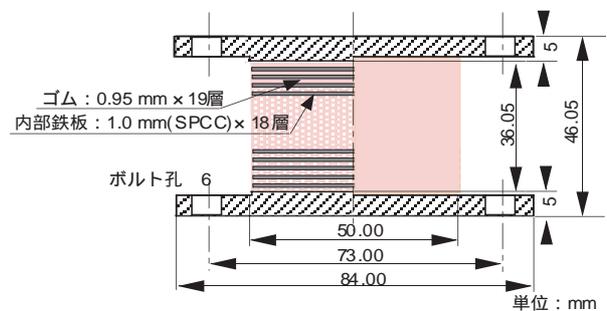


図-2 免震装置模型(高減衰積層ゴム)

* 技術研究所 ** 東京支店

表 - 1 適用相似則（免震栈橋）

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

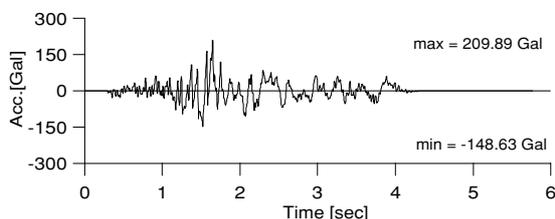
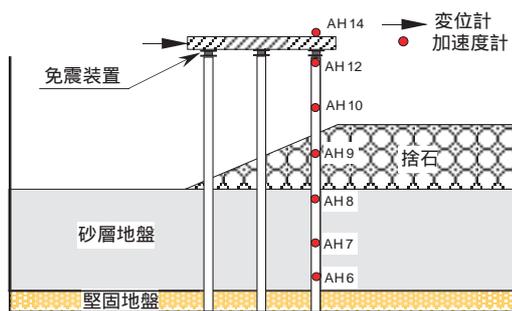


図 - 3 入力地震動（八戸波）

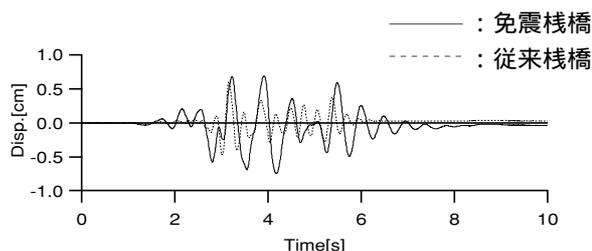
図 - 2 に示すようなブリジストン製の高減衰積層ゴム HA060（ゴム総厚20cm）、長期最大面圧4900kN/m²、二次形状係数610kN/m²を面圧の相似則に応じて模型を製作し、直杭頭部と上部工の間に設置した。高減衰積層ゴムはゴムに特殊配合を施し、ゴム自身に減衰機能を付加したゴムと鋼版を交互に積層し鉛直方向には固く、水平方向には柔らかい性能を持った構造体である。表 - 1 に示すように本実験で適用した相似則⁴⁾は加速度と免震装置に作用する面圧の相似比が1になるようにしている。したがって、上部工模型の重量は面圧に関する相似比を満足するように決定した。砂地盤は相馬砂を締め固めることにより作製し、捨て石マウンドは砕石4号を用いた。地盤の剛性、及び重量に関しては相似則を満足しておらず、相似則から得られる物性値に対して小さ目である。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 - 3 に示す八戸波を相似則に従い時間軸を縮小した波形を用いた。入力加速度は100、200、350Galの段階加振とした。なお、免震栈橋の耐震性能を実験的に比較検討するため、杭頭部と上部工を剛結合した従来式の直杭栈橋に関する模型振動実験も実施した。

2.2 模型振動実験結果の検討

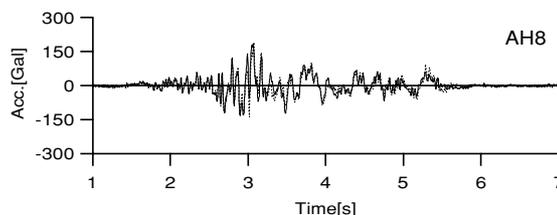
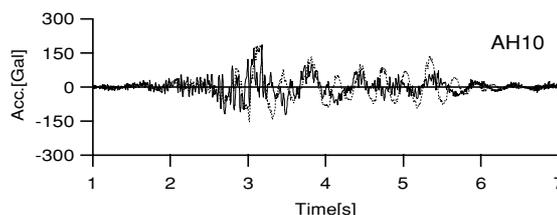
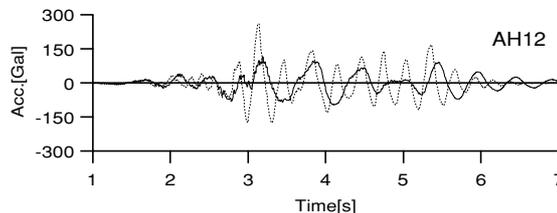
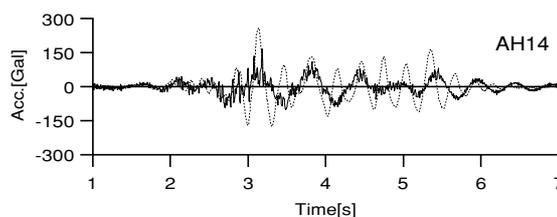
上部工、および直杭の応答特性を検討するために、200Gal加振時の上部工、および直杭の応答加速度の時刻歴、上部工の応答変位の時刻歴を図 - 4 に示す。図中の実



計器配置図



上部工の応答変位



上部工、直杭の応答加速度

図 - 4 免震栈橋振動実験の応答加速度、
応答変位の時刻歴

線が免震栈橋、破線が従来栈橋の実験結果である。応答加速度に関しては免震栈橋の場合上部工および杭頭で入力波に比較して周期が長周期化していることが明らかに判断できる。さらに免震栈橋の方が従来栈橋に比較して周期が長くなっており、その最大値は小さくなっている。これは免震装置による栈橋の固有周期の長周期化、及び減衰効果によるものと判断される。応答変位の時刻歴からも、免震栈橋は免震装置の影響により周期が長周期化しており、最大応答変位は従来栈橋に比較して大き目の値を示している。

図 - 5 には図 - 4 で示した上部工の応答加速度波形 AH14 のフーリエスペクトルを示す。実線が免震栈橋、点線が従来栈橋の結果を示している。従来栈橋の卓越振動数が 3.17Hz であるのに対して免震栈橋の卓越振動数は 1.32Hz となっており、免震栈橋のほうが従来栈橋に比較して周期の長い成分が卓越していることがわかる。また、振幅も免震栈橋は従来栈橋に比較して半分以下となっており、この図からも免震装置による長周期化、および減衰効果が顕著にうかがえる。

図 - 6 に免震栈橋の直杭、および上部工に発生した最大加速度分布を示す。図中の、●、■印の実線はそれぞれ入力最大加速度 100、200、350Gal 加振時の免震栈橋の実験結果である。いずれの場合も免震装置の効果により、杭頭部に比較して上部工の最大応答加速度が大幅に低減している。なお、免震栈橋と従来栈橋の最大加速度分布を比較検討するために、200Gal 加振時の従来栈橋の実験結果を印の破線で示している。従来栈橋に比較して免震栈橋の方が上部工の応答加速度が小さくなっている。

図 - 7 は 200Gal 加振時の直杭の最大曲げモーメントの分布を示したものである。杭頭部、および地中部の最大曲げモーメントとも免震栈橋の方が小さい値を示している。したがって、直杭の曲げモーメントに関しては従来栈橋に比較して免震栈橋の方が耐震性能が良いものと判断される。

3. 制震版付き栈橋に関する検討

3.1 模型振動実験概要

図 - 8 に制震版を設置した直杭式縦栈橋に関する模型振動実験の標準断面を示す。この栈橋模型は長さに関する相似比を 1/8 としており、栈橋の挙動を明確に捉えるために模型地盤を作成せずに、仮想固定点より上部を取り出し製作した。したがって、仮想固定点に相当する杭模型の下端は鉄板に溶接し固定条件とした。栈橋上部工と杭は剛結とし、杭の曲げ剛性は相似比を満足するようにした。また、上部工の重量は栈橋模型の 1 次の固有周期が時間の相似比を満足するように決めた。表 - 2 に適用相似則を示す。この相似則はひずみの相似比が 1 となる線形の相似則を用い

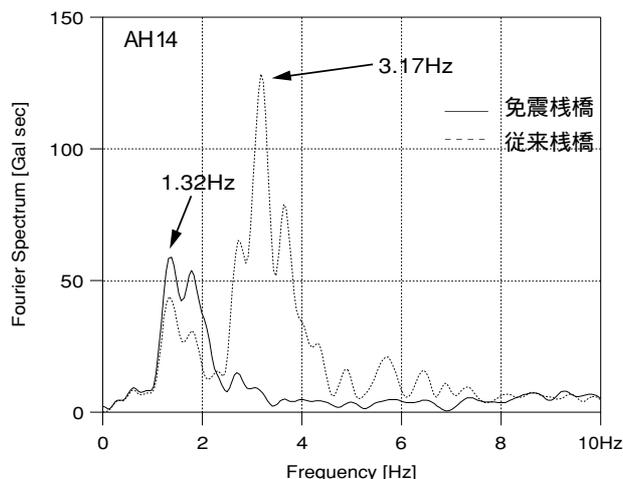


図 - 5 上部工加速度のフーリエスペクトル

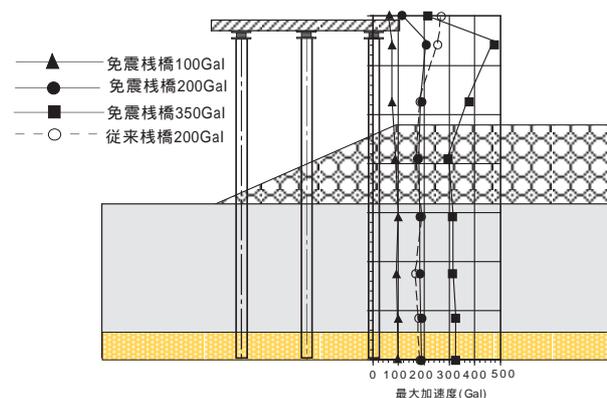


図 - 6 最大加速度の分布

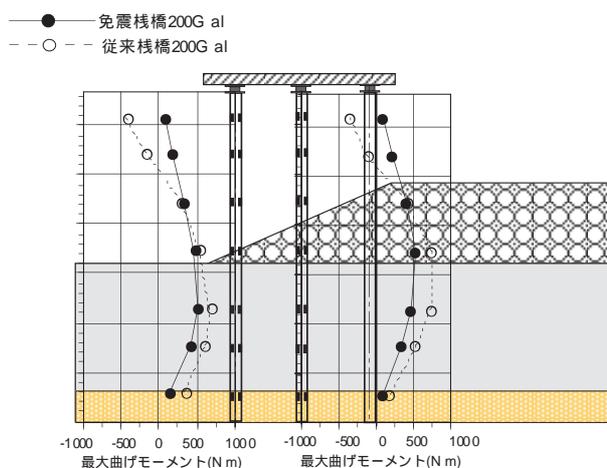
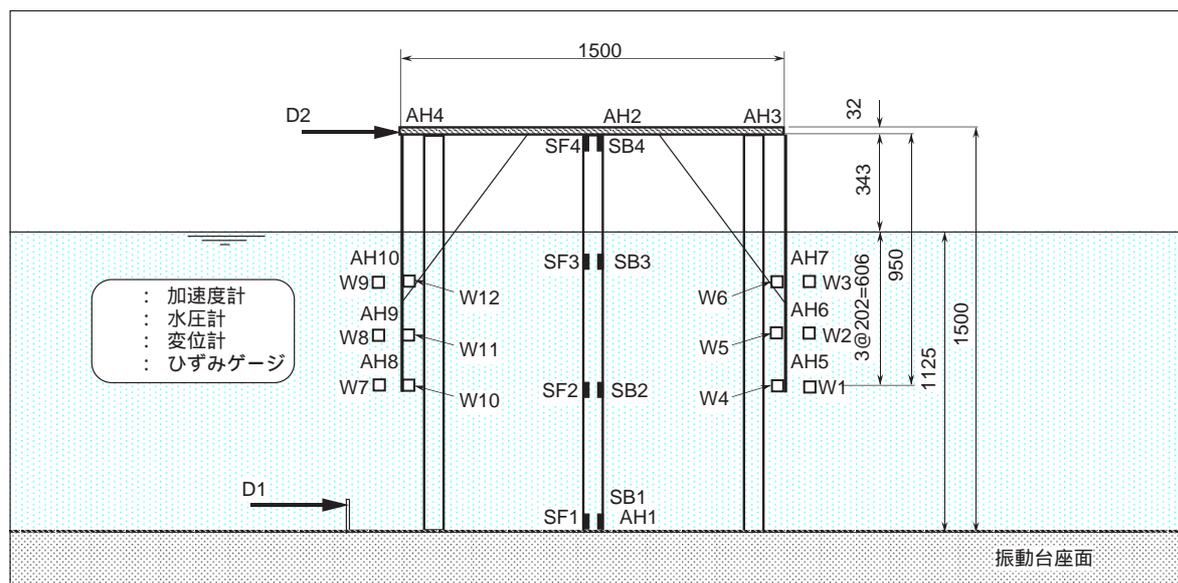


図 - 7 最大曲げモーメントの分布



(単位 mm)

図 - 8 制震栈橋振動実験の模型断面

ている。模型の杭は縦方向に3列、横方向に5列の配置で計15本設置し、杭径 48.6mm、肉厚t3.2mm、杭長 L1468mmの構造用鋼管を用いている。上部工には厚さ32mmの鉄板を用いている。

制震版は厚さ2mmの鉄板を用い上部工の両端に溶接し、上部工から水中まで設置した。その際、制震版の剛性を高めるために制震版と栈橋上部工の間に斜材を設けた。制震版の長さによる制震効果を検討するために、制震版の長さを3種類(67cm、81cm、95cm)と変化させて振動実験を行った。また、制震版が無い場合も比較検討のために振動実験を実施した。計測器は加速度計、水圧計、変位計、およびひずみゲージを適宜配置した。振動実験では、最初に共振実験を行い、その結果から栈橋の固有周期を求めた。その後、加振加速度を一定にして周期を変えて正弦波加振を行った。

振動実験では、水深2mの水槽の底面に振動台が設置されている大型水中振動台を用いた。これは、制震版と水との地震時相互作用を忠実に再現するためである。

3.2 模型振動実験結果の検討

図-9に共振実験結果を示す。横軸は周波数、縦軸は入力加速度に対する上部工の応答加速度の倍率を示す。制震版の長さは3種類(67cm、81cm、95cm)に変化させた。制震版が無い場合に比較して、制震版を設置することにより、共振周波数が小さくなるとともに応答倍率も低減

表 - 2 適用相似則(制震栈橋)

パラメータ	実物/モデル	縮尺
長さ		8
時間	0.5	2.828
ひずみ	1	1
質量	3	512
EI	5	32768

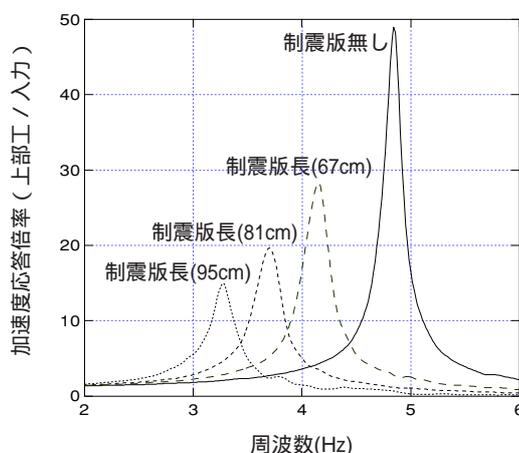


図 - 9 共振実験結果

している。また、制震版が長いほど制震版が無い場合に比較して共振周波数と応答倍率の変化の程度が顕著に現れている。共振周波数が小さくなるのは、制震版による付加質量の効果によるものと判断される。また、応答倍率が低減しているのは、制震版による水の減衰効果によるものと推測される。

図-10に制震版長を95cmとしたときの制震版の応答加速度と動水圧の時刻歴を示す。応答加速度と動水圧は概ね同位相で応答していることから、動水圧が制震版に付加質量となって作用していることが判断できる。

図-11の実線は制震版が有る場合（制震版長：95cm）の共振周波数での正弦波加振の実験結果を示す。また、図中の点線は制震版が無い場合の共振周波数での加振結果である。なお、加振周波数は共振実験より得られた値を採用し、制震版が無い場合は4.8Hz、制震版が有る場合は3.1Hzである。また、加振加速度は100Galとした。制震版が有る場合は無い場合に比較して、制震版の効果により栈橋上部工の最大応答変位が小さくなっている。同様の傾向が杭頭のひずみの応答波形からも得られている。さらに、栈橋上部工の応答加速度も大幅に低減している。これらの結果から、制震版の効果により、上部工変位、杭頭ひずみが小さくなることが分かった。

一方、実験結果の数値シミュレーションとして有限要素解析を用いて数値解析を行った。数値解析には地震応答

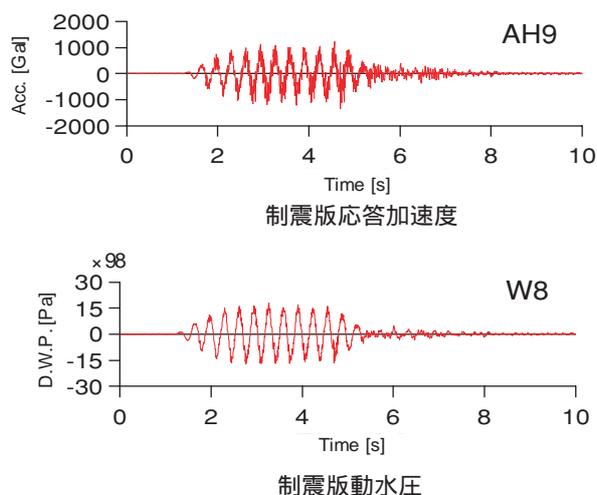
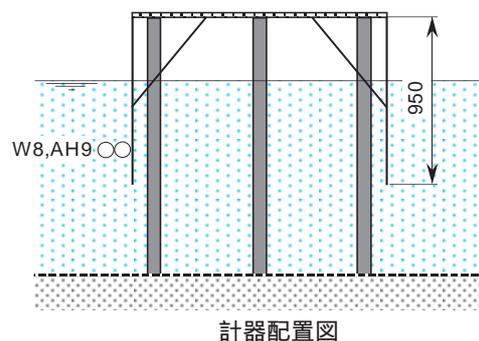
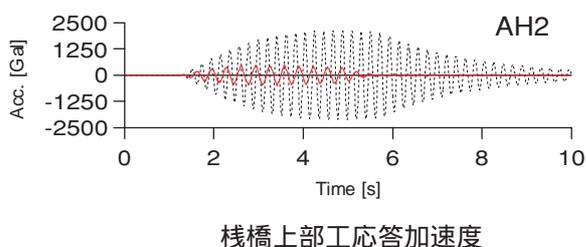
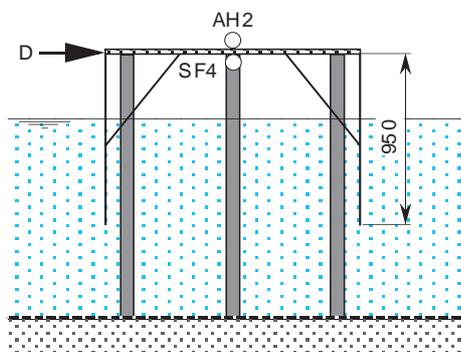


図-10 制震版の応答加速度、動水圧の時刻歴



栈橋上部工応答加速度

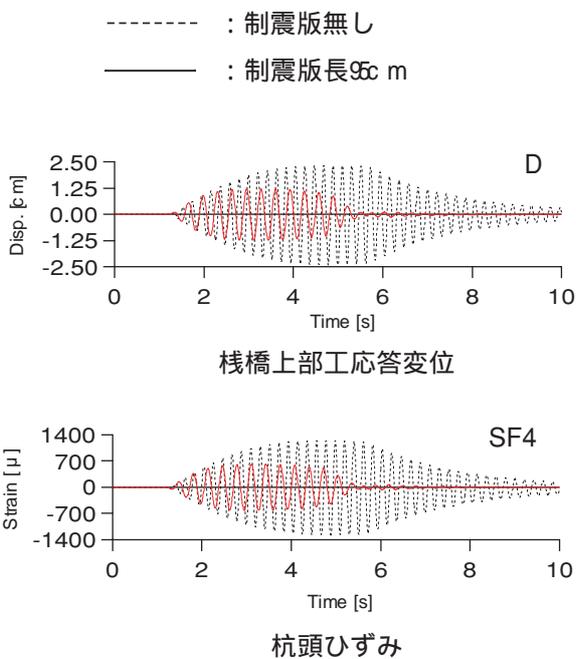


図-11 応答変位、応答加速度、杭頭ひずみの時刻歴

解析プログラム (TDAP) を用いた。図-1 2 に実験結果と解析結果の比較を示す。今回の解析で対象とした実験ケースは制震版長が95cmの場合で、比較項目は制震栈橋上部工の応答変位と応答加速度の2つである。解析モデルは2次元弾性モデルとし杭は梁要素を用いた。奥行き幅は杭一列の分担幅とし制震版に作用する動水圧の効果は共振実験結果より推定される付加質量を制震版浸水部に一樣に作用させた。また、減衰に関しては構造減衰と仮定し解析を行った。その結果得られた減衰比は10%であり、図より解析結果と実験結果を比較すると若干位相のずれがみられるが、よく似た結果となっているのが判断できる。

4. まとめと今後の課題

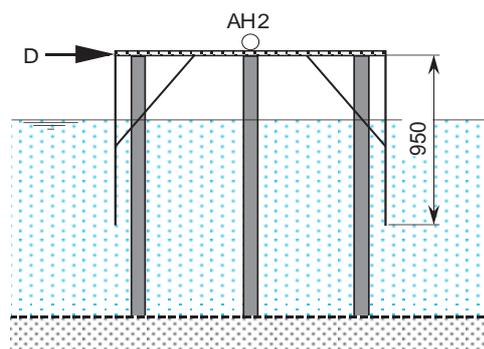
直杭式栈橋の耐震性能を向上させる技術として、免震装置を配置した免震栈橋と制震版付き栈橋の2種類について模型振動実験を行い、その耐震性能を実験的に検討した。免震栈橋に関しては、今回の模型振動実験から判断する限りでは、従来栈橋に比較して上部工の応答加速度の長周期化、減衰効果がみられ、また直杭の最大曲げモーメントの低減効果も顕著にみられ、耐震性能が良いことが分かった。しかしながら今回の模型振動実験では免震装置に作用する面圧の相似比が1となるように相似則を設定したため、基礎地盤および捨石模型の剛性、重量が相似則を満足しなかった。そのため免震栈橋の耐震性能を定量的に評価することが困難であった。

制震版を取り付けた直杭式栈橋に関しては、制震版の効果により栈橋上部工の応答加速度、応答変位および杭頭の応答ひずみは制震版の有る場合と無い場合とを比較し大幅に低減することが分かり、実験結果を2次元解析モデルで数値シミュレーションした結果に関しても概ね良好な結果が得られた。

今後は免震栈橋においては、今回の模型振動実験結果を踏まえて、その耐震性能を定量的に評価するために地盤を考慮しない模型振動実験および数値解析などを行い、詳細に検討する予定である。また、制震版付き栈橋においては制震版による制震メカニズム等を種々の観点から検討していく予定である。

謝辞

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。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。



計器配置図

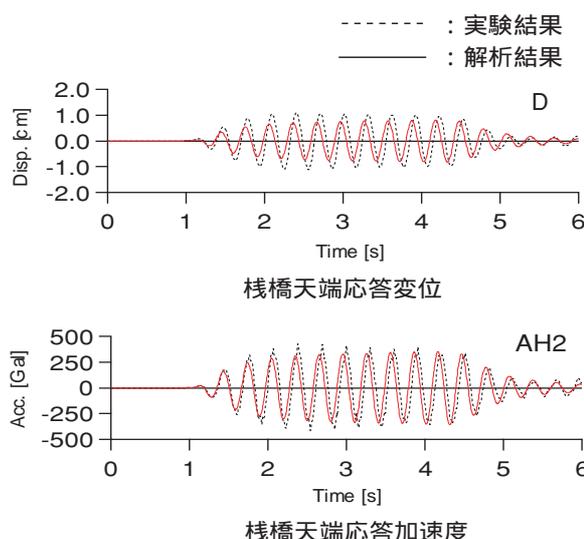


図-1 2 解析結果と実験結果の比較

参考文献

- 1) 三藤正明、磯貝哲也、五十嵐信一、清水鉄也、森田秀美：免震建築物に関する研究(その3)実物大の高減衰積層ゴムの鉛直方向特性実験および水平方向特性把握実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.513 ~ 514、1993年9月
- 2) 三藤正明、磯貝哲也：免震建築物に関する研究(その3)
- 3) 三藤正明、磯貝哲也、清水鉄也：免震建築物に関する研究(その7)地震観測結果と応答解析シミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.625 ~ 626、1996年9月
- 4) Susumu IAI :Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure Model in 1G Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Res. Inst. No.3, 1988
- 5) 免震装置のモデル化の違いが免震建築物に及ぼす影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.799 ~ 800、1994年9月