

# 制震栈橋の耐震性能評価に関する検討

田村 保<sup>1</sup>・岩佐 貴史<sup>2</sup>

正会員 M.S. 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)

正会員 工修 東京大学 宇宙科学研究所 (元五洋建設) (〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-3)

直杭式栈橋上部工に制震版を設置した性震栈橋の地震時における耐震性能について検討を行った。制震栈橋工法は栈橋上部工の一部を水中に没水させた制震版を設置することによって、栈橋の耐震性能を向上させるものである。水中振動台を用いた模型振動実験から、その減衰効果により栈橋上部工の応答が低減することが確認されているが、その減衰機構と耐震性能評価方法は明らかではなかった。本論文では制震版による減衰機構を明かにするため、制震版に作用する外力をモリソン式で表現し、非線形地震応答解析を行い、模型振動実験結果の再現を試みた。本解析では制震栈橋を1質点系の振動モデルと仮定したものの実験結果は良好に再現され、制震版の減衰効果をモリソン式で評価する妥当性が示された。

Key Words : Strucural Control , Large-Scale Dynamic Model Test , Morison Formula ,  
Non-lineare Response Analysis

## 1. 研究の目的

直杭式栈橋の耐震性を向上させることを目的として栈橋上部工に制震版を設置した制震栈橋が提案され、その耐震性能について検討が行われている<sup>1), 2)</sup>。本工法は栈橋上部工に、一部を水中に没した制震版を設置することにより栈橋に減衰性能を付加し、地震時の栈橋上部工の応答を低減させるものである。

これまでの検討では、大型水中振動台を用いた模型振動実験および地震応答解析による検討を行っており、耐震性能を向上させる効果が確認されている。また、制震版に適切なスリットを設けることにより減衰性能を向上することができるがわかっている。しかしながら、制震版の制震メカニズムについては造波および乱流効果による減衰が期待できるとされているものの、その定量的な評価は、剛性比例型減衰と仮定した場合の減衰定数で与えられているのみである。本工法の現地への適用性を考えた場合に、減衰の定量的な評価方法を確立することが課題と考えられる。

本検討では、制震版に働く水による外力をモリソン式

で表現することで減衰性能の評価を行うこととし、制震栈橋を一質点系の振動モデルと仮定した非線形地震応答解析を実施することにより、その妥当性の検証を行った。

## 2. 既往の研究成果の概要

図-1は大型水中振動台を用いた模型振動実験で採用した直杭式栈橋模型の標準断面図を示したものである。栈橋模型の長さに関する縮尺は1/8としており、changの式より想定される仮想固定点より上部を取り出した模型としている。すなわち、これらの実験での杭下端は仮想固定点に相当し、固定条件を採用している。杭と栈橋上部工とは剛結とし、杭模型は曲げ剛性で線形の相似則<sup>3)</sup>を満足するよう決定している。栈橋上部工の重量は、栈橋模型の1次の固有周期が時間に関する相似則を満足するよう決定した。制震版は栈橋上部工の両端に設置し、剛性を高めるために制震版と栈橋上部工との間に斜材を設けている。

実験では加速度計、水圧計、変位計およびひずみゲージの4種類を図-1に示す位置に取り付けている。制震

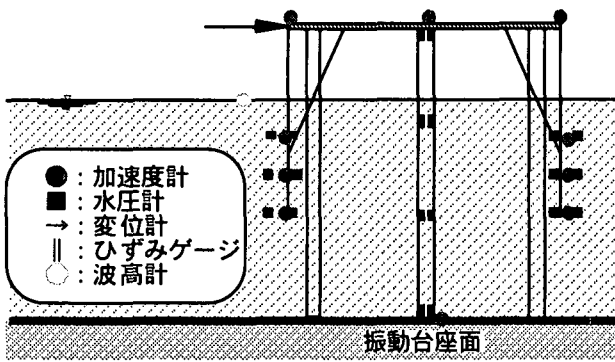


図-1 栈橋模型標準断面図

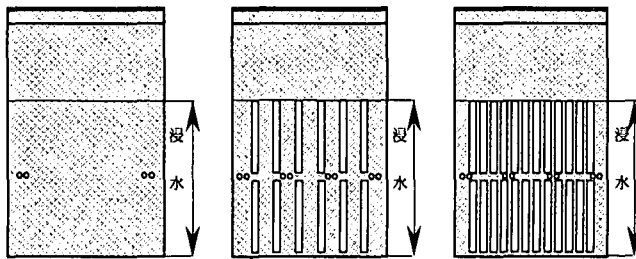


図-2 制震版詳細図

版の詳細は図-2に示す通りである。入力地震動としてはレベル1地震動に相当する観測波を入力している。

図-3は実験模型の共振実験結果を示したものである。この結果によれば、制震栈橋の共振周波数は、制震版のスリット開口率が少なくなるほど小さくなっている。これは制震版の没水面積が小さくなることにより動水圧の付加質量効果が浸水面積と共に大きくなったためと推測されている。

図-4に地震動入力時の模型振動実験結果のうち、制震版スリット開口率25%の場合を制震版を設置しないケースと比較して示したものである。スリットを設けた制震栈橋は従来栈橋と比較して、水平変位、上部工応答加速度、杭頭ひずみが大きく低減しており、制震版の制震効果が確認されている。また、制震効果が增大するにつれて波高が高くなることから、造波減衰が制震効果の主要原因の一つであるとされている。また、地震応答解析から求められる剛性比例型の減衰定数による減衰効果の評価を行い、スリット開口率が25%において最も高い10%の減衰定数を得ている。

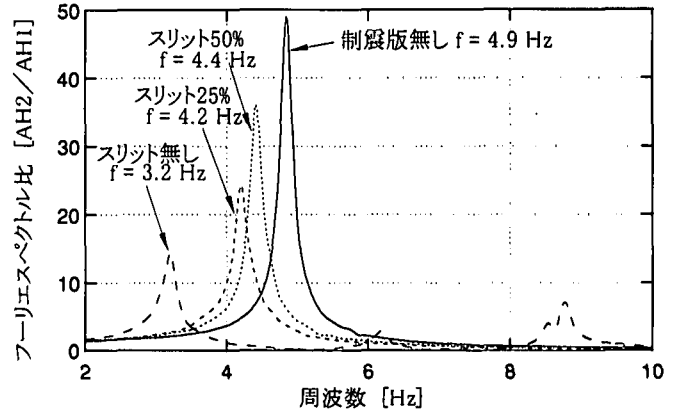


図-3 共振実験結果

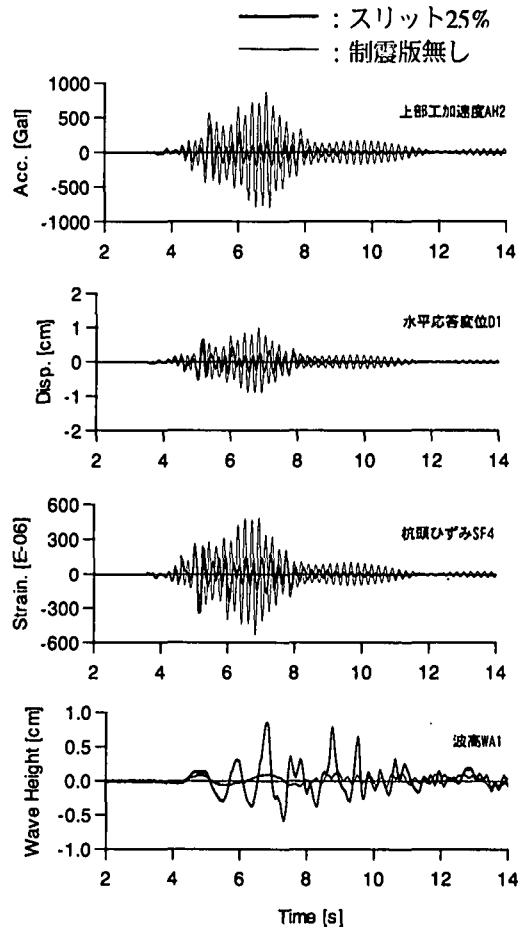
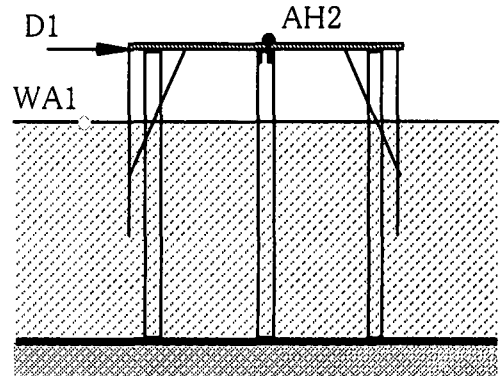


図-4 模型振動実験結果 (八戸 350gal 加震時)

### 3. 非線形地震応答解析の概要

制震版による減衰メカニズムを表現するために地震時に制震版に作用する水の外力をモリソン式で表されるものと仮定し<sup>4), 5)</sup>、その結果を用いた非線形地震応答解析を行い、モデル化の妥当性の検証を行った。非線形地震応答解析の実施にあたっては、制震橋模型を1質点系の振動モデルに仮定して計算を行った。これは図-3に示した共振実験結果から一次の固有振動数が2次以上の固有振動数と比較して卓越していたことを考慮したものであるが、制震版と上部工が同位相で応答する限りはほぼ妥当な仮定条件となるものと考えられる。

一質点系にモデル化した制震橋の運動方程式は空中においては以下の通り表される。

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_0) + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

また、水による外力をモリソン式で表すと

$$F = C_m \rho V (\ddot{x} + \ddot{x}_0) + 0.5 C_d \rho A_p (\dot{x} + \dot{x}_0)^2 \quad (2)$$

となる。ここで(2)式で表されるモリソン式を(1)式の左辺に水の外力として代入し整理すると最終的に水による影響を考慮した制震橋の運動方程式は(3)式の通り示される<sup>6)</sup>。

$$\begin{aligned} & [m + (C_m - 1)\rho V] (\ddot{x} + \ddot{x}_0) \\ & + [c + 0.5 C_d \rho A (\dot{x} - 2\dot{x}_0)] \dot{x} \\ & + kx = -0.5 C_d \rho A \dot{x}_0 |\dot{x}_0| \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式で表される制震橋の運動方程式をNewmark法による直接積分法を用いて解析を行った。なお、質量項に関しては図-3に示す共振実験結果を参考に一次の固有振動数が一致するよう決定し、減衰項cに関しては構造減衰で1%を与えた。解析を実施するにあたり、モリソン式に表れる質量係数C<sub>m</sub>値および抗力係数C<sub>d</sub>値は解析結果が実験結果を良好に再現するよう試行的に求めた。

### 4. 非線形地震応答解析結果

図-5に解析結果と実験結果の比較の一例を示してい

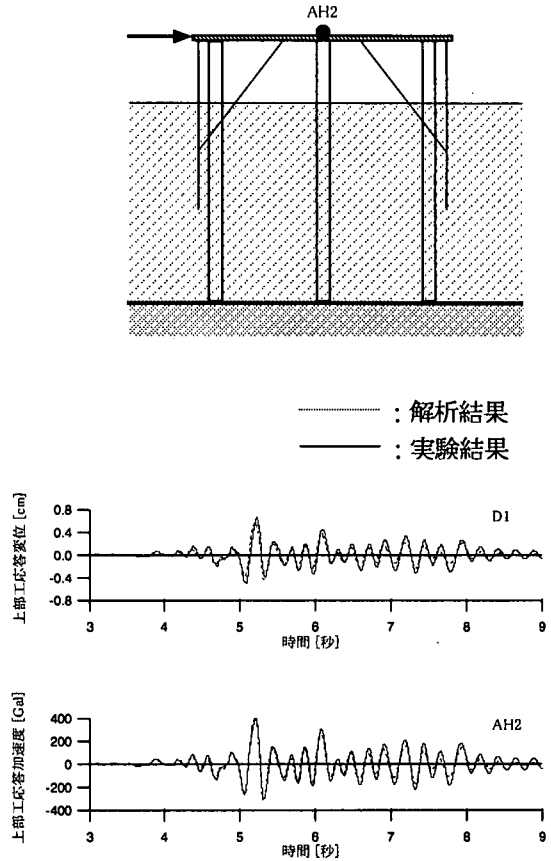


図-5 解析結果と実験結果の比較

る。同図は制震版スリット25%の場合の八戸波加振結果を示したものである。この結果によれば、解析結果と実験結果の比較から応答変位の時刻歴に若干の違いが生じているものの、上部工応答加速度に関しては非常に良く実験結果を再現することができている。入力波を変えたケースにおいても同様に、模型振動実験を良好に再現する結果が得られている。これらの結果からモリソン式により制震版に作用する水の効果を評価した1質点系モデルによる制震橋の解析が概ね妥当であると考えられることができる。

また、この解析において試行的に決定した抗力係数C<sub>d</sub>値は4.2となったが、通常、板の抗力係数C<sub>d</sub>値として知られている値と比較して大きめの結果となった。一樣流中に置かれた板の場合は抗力係数C<sub>d</sub>値は一般に2.0程度と言われており、振動流中に置かれた板の場合はKC数の影響により大きめの値となることが知られている。既存の実験結果ではスリットの無い板で7.0程度と

いう結果<sup>7)</sup>も示されている。今回の実験では制震版は振動流中の条件下にあり、抗力係数  $C_d$  値が一般的に言われている値より大きめの結果となったのも、この  $KC$  数による効果と考えられる。

以上の結果より、振動時に制震版に作用する水の外力をモリソン式で表現し、その結果に基づいた非線形解析を行うことにより、模型振動実験結果を精度良く再現できることがわかった。この結果から、制震版による栈橋への減衰メカニズムを、地震時に制震版に作用する水の減衰効果と考えモリソン式による評価を行うことで、その効果を定量的に評価できる可能性が示されたと考えられる。また、その結果を適切に地震応答解析に取り込むことにより、地震時の応答を予測することが可能であることが示された。

## 5. 今後の課題

今回の検討では栈橋上部工に制震版を設置することによる制震効果の評価方法について検討を行った。その減衰効果の評価にあたっては、地震時に制震版が水との相互作用の結果うける外力をモリソン式で評価することで、減衰効果を定量的に表現することが可能であることを示した。しかしながら、制震版と水の相互作用力をモリソン式で表現する際に、質量係数  $C_m$  値および抗力係数  $C_d$  値は実験結果を最も良く再現する値として試行的に求めている。そのため、今回の解析で用いた質量係数  $C_m$  値および抗力係数  $C_d$  値は、制震版と水との相互作用メカニズムを直接評価してえられる固有の値とは言えない。制震版の質量係数  $C_m$  値および抗力係数  $C_d$  値は本来は別途実験によって求めるべきものと考えられ、それらの実験から得られる値が今回の解析で用いた質量係数  $C_m$  値および抗力係数  $C_d$  値と一致すれば、今回の解析の妥当性が示されるものと考えられることができる。

本工法を実際の構造物に適用するにあたっては、これらの考察を踏まえ、制震版と水との相互作用による減衰効果のより一般的な評価方法について実験的および解析的に検討していくことが必要と考えられる。その上で、制震版形状毎の質量係数  $C_m$  値および抗力係数  $C_d$  値を求め、最適な制震版形状を決定するとともに、その減衰効果を設計に取り込むことが必要と考えられる。

謝辞:本研究で用いた既往の研究成果および実験結果は運輸施設整備事業団の「運輸分野における基礎的研究推進制度」に基づき採択された、港湾技術研究所、(財)沿岸開発技術研究センター、五洋建設(株)の共同研究により実施された成果であります。また、本研究の実施にあたっては東海大学海洋学部関田教授よりモリソン式による評価に関して有益なコメントを頂きました。記して謝意を表する次第です。

## 参考文献

- 1) 中原知洋,上部達生,三藤正明:水の制震効果を付与した直杭式栈橋に関する研究,港湾技術研究所報告第38巻,第4号, pp.49-159, 2000
- 2) 上部達生,三藤正明:構造物の耐震・減震・免震・制震—港湾構造物—,1995年兵庫県南部地震5周年特別企画「日本 地震 あれから これから」、pp.123-126
- 3) 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
- 4) J.Penzien,M.K.Kaul:Response of offshore towers to strong motion earthquakes, Earthquake Engineering And Structural Dynamics, Vol.1 pp.55-68, 1972
- 5) N.Haritos ,H.Yang :An Investigation of Hydrodynamic Damping of Vertical Bottom-Pivoted Cylinders, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME ,Vol 114 , pp.257-263 , 1992
- 6) 金徳印,松井徹哉:海洋プラットフォームの地震応答における動水減衰影響の解析、第10回日本地震工学シンポジウム、pp.2039-2044, 1998
- 7) 増田光一,高岩千人,八木英紀:没水平板を用いた浮き栈橋動揺軽減効果に関する研究、海岸工学論文集、第42巻、pp.981-985, 1995