

## 少数主桁橋に作用する津波作用時における 流体力の特性に関する実験的研究

中尾尚史<sup>1</sup>・村上晋平<sup>2</sup>・伊津野和行<sup>3</sup>・小林紘士<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 立命館大学ポストドクトラルフェロー 総合理工学研究機構  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

<sup>2</sup>学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 立命館大学チェアプロフェッサー 総合理工学研究機構  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

### 1. はじめに

2004年に発生したスマトラ沖地震による津波により橋梁等に甚大な被害を受けたことから、津波への対策が行われてきている。我が国においても、近い将来に起こるとされる東海・東南海・南海地震により10mを越える津波が発生すると予想される。よって橋梁構造物や家屋などの建造物における津波対策は必要なことである。

堤防などの構造物やビル等の建造物については、津波が与える影響についてさまざまな研究が行われてきており<sup>例えば<sup>1)</sup></sup>、津波に対する基準がガイドライン等で設定されている<sup>2),3)</sup>。しかし、津波が橋梁構造物に与える影響についての研究は始まったばかりであり<sup>4)-6)</sup>、津波に対する設計基準は定められてないのが現状である。

著者らはこれまでに長方形断面やみぞ形断面など基本的な断面における津波による影響を実験および解析により検討してきた<sup>7),8)</sup>。しかし、実際の橋梁ではこれらの基本的な断面と異なり、床版の張出し

部に津波が衝突することにより、橋梁に上揚力やモーメントが作用することが予想される。そのために実橋梁における流体力の特性についても検討も行う必要がある、また支点部の影響（特に支承部の浮き上がり）についても検討する必要があると考えた。

よって本研究では津波外力を設計するための資料や橋梁の安全性を評価するための資料を得ることを目的として、少数主桁橋を対象とした津波作用時の流れの特性を実験によって検討する。そして支点に与える影響や流体力および流力モーメントと水位、流速との関係について検討する。

### 2. 実験方法

#### (1) 津波発生水路および橋桁模型

本実験は写真-1および図-1に示すような実験装置（全長6m／貯水部：長さ2m，幅0.6m，高さ0.35m／水路部：長さ4m，幅0.2m，高さ0.3m）を用いて実験を行った。橋桁は図-2に示したように、2主桁連続合成桁の設計例<sup>9)</sup>を基に1/150にモデル化したもの

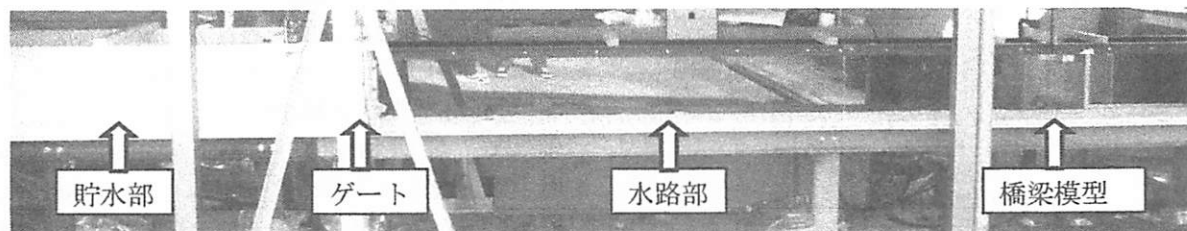


写真-1 実験装置

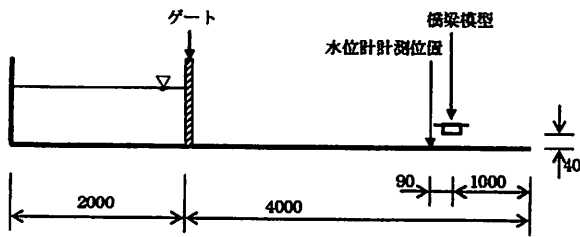


図-1 装置概要

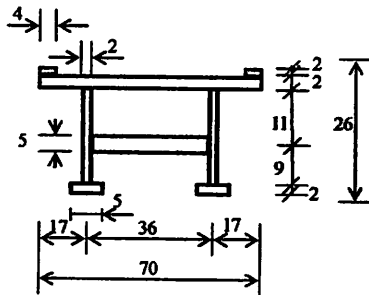


図-2 橋梁模型

を用いて実験を行った。

## (2) 測定方法

実験では貯水部に水を一定量溜め、水路部との間にあるゲートを引き上げるにより、津波をモデル化した流れを発生させ、その流れが橋桁に作用したときに発生する流体力（水平方向および鉛直方向）および流力モーメント（橋軸回り）をロードセル（AMTI社製MC3A-X-100）で計測した。本研究では流下方向、上向きおよび時計回りの方向を正とした。水位は橋桁中央から9.0cm上流に水位計を設置し、津波の水位を計測した。また模型正面にハイスピードカメラ（300コマ/1秒）を設置し、模型周辺の流況を撮影した。

計測は各貯水高で3回行い、模型の振動成分をカットするために、16Hz以上の成分をカットした。なおサンプリング間隔は0.01秒、計測時間は60秒行い、ゲート開扉時から30秒間の計測データをグラフ化した。

## (3) 支点反力の算定

津波が橋桁に作用した場合、流体力や流力モーメントにより支点部に力が作用する。図-3のように流体力および流力モーメントを考えた場合、鉛直方向の支点反力は以下のように表すことができる。

$$R_A = -\frac{F_x \times d + F_z \times (b-a) + M_y}{b} \quad (1a)$$

$$R_B = \frac{F_x \times d - F_z \times a + M_y}{b} \quad (1b)$$

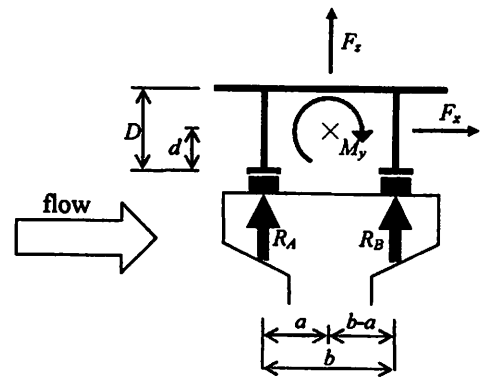


図-3 流体力および支点反力の作用位置

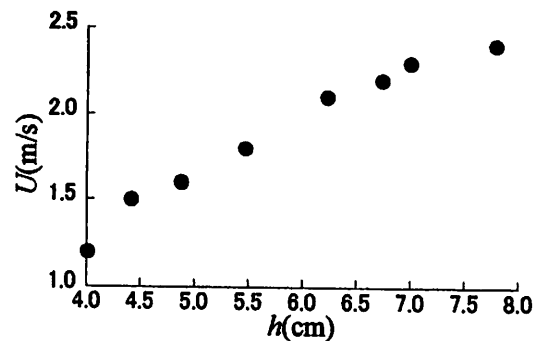


図-4 水位と流速の関係

ここでは上流側の支点反力を $R_A$ 、下流側の支点反力を $R_B$ と設定した。また式中 $a$ は上流流側端部から計測の中心位置までの距離、 $d$ は計測の中心までの高さ、 $b$ は支点間隔である。

## 3. 流体力測定結果

### (1) シミュレートされた津波の特性

#### a) 流速と水位の関係

図-4は流速と水位の関係を示した図である。横軸は水位、縦軸は流速である。正確に流速を求めるには流速計を用いて計測する必要があるが、本研究における流速は簡易的にゲートから水位計までの距離を、ゲートを開扉してから津波が水位計に達するまでの時間で割ることで平均的な流速として求めた。

図より、水位と流速にはほぼ線形的な関係があることがわかる。

#### b) 流体力と流況の関係

図-5は流体力および支点反力の計測波形である。ここでは一例として水位6.3cmの結果を示した。計測は3回行ったが計測波形に大きな差異はなかった。よってここでは3回の計測結果から流体力の最大値が中間となるケースの波形を示した。横軸は時刻、縦軸は上から水平方向の流体力、鉛直方向の流体力、流力モーメント、支点反力である。

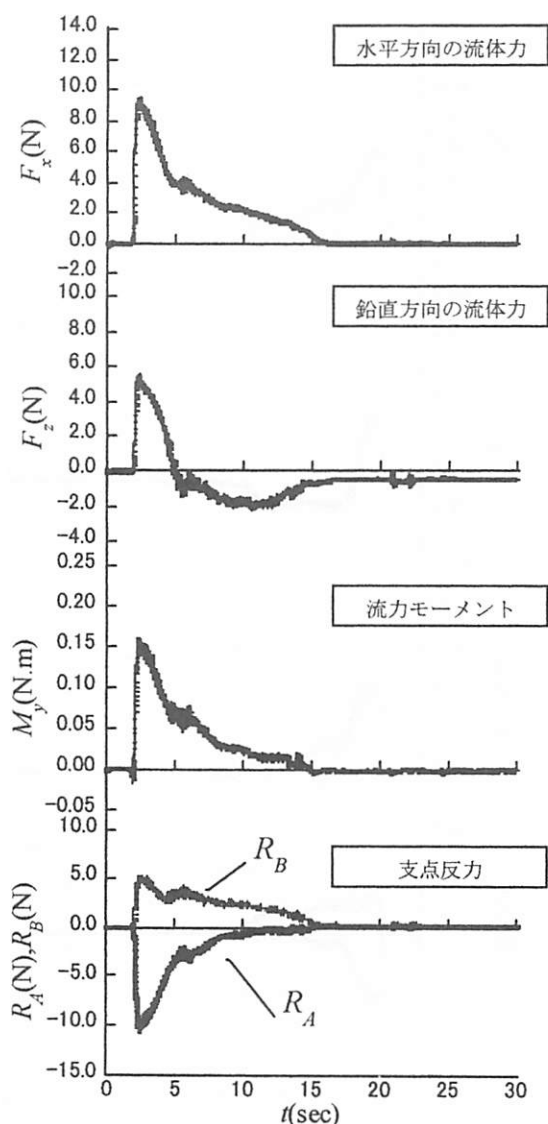


図-5 流体力の特性 (水位6.3cm)

津波が模型に到達した直後に、わずかであるが下向きの力が作用し、その直後上向きの力が急激に作用する。同様に流力モーメントも津波作用直後は反時計回りの力が作用した後に時計回りの力が急激に作用する。その後、流力モーメントは時計回りのままであるが、鉛直方向の流体力は5秒付近から下向きの力が作用する。

津波到達直後および作用後3秒付近における時刻の橋桁周辺の流況を示したのが写真-2から写真-4である。写真-2より、津波が到達すると、上流側ウェブおよび上流側張り出し部の下面に流れが衝突する。また模型下部は剥離により負圧が生じるが、写真-3に示したように模型内部に水が流入することで負圧が緩和されるために下向きの力が生じない。よって、上向きの力かつ時計回りのモーメントが作用したと考えられる。さらに衝突した水流は桁の上方向にはね上げらる。

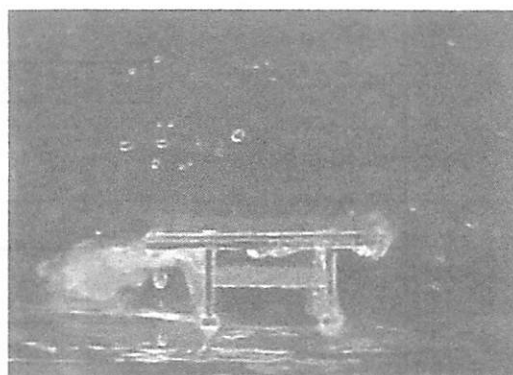


写真-2 橋梁周辺の流況 (津波到達直後)

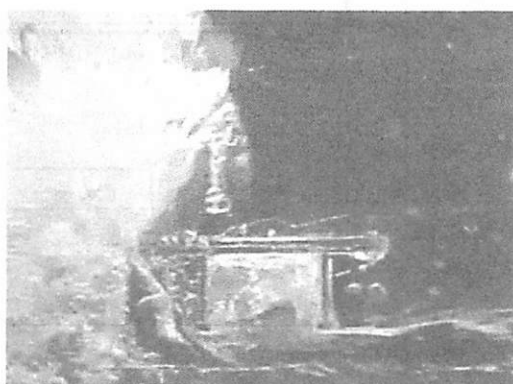


写真-3 橋梁周辺の流況 (津波到達直後0.1秒後)

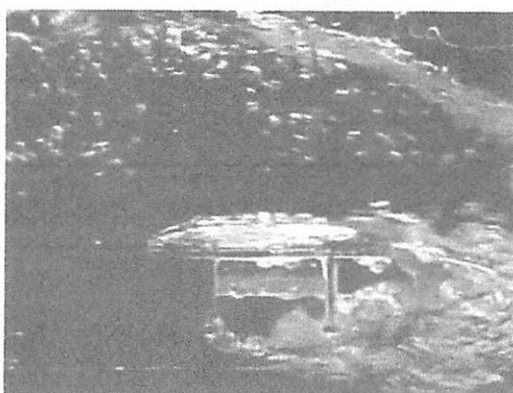


写真-4 橋梁周辺の流況 (津波が到達してから3秒後)

また写真-4に示したように、津波によって断面全体は水没する。また上流側の下フランジからの剥離起こり、さらに下流側張り出し部下面が後流域にあることなどから下向きの流体力が作用したと考えられる。

### c) 水位の違いによる影響

図-6から図-8は流体力および支点反力の波形である。横軸は時刻、縦軸は上から水平方向の流体力、鉛直方向の流体力、流力モーメント、支点反力である。

水位が4.5cmである場合、水平方向の流体力は3.8N、鉛直方向の流体力は1.8N、流力モーメントは0.05N.m程度である。これを実際に作用する力に換

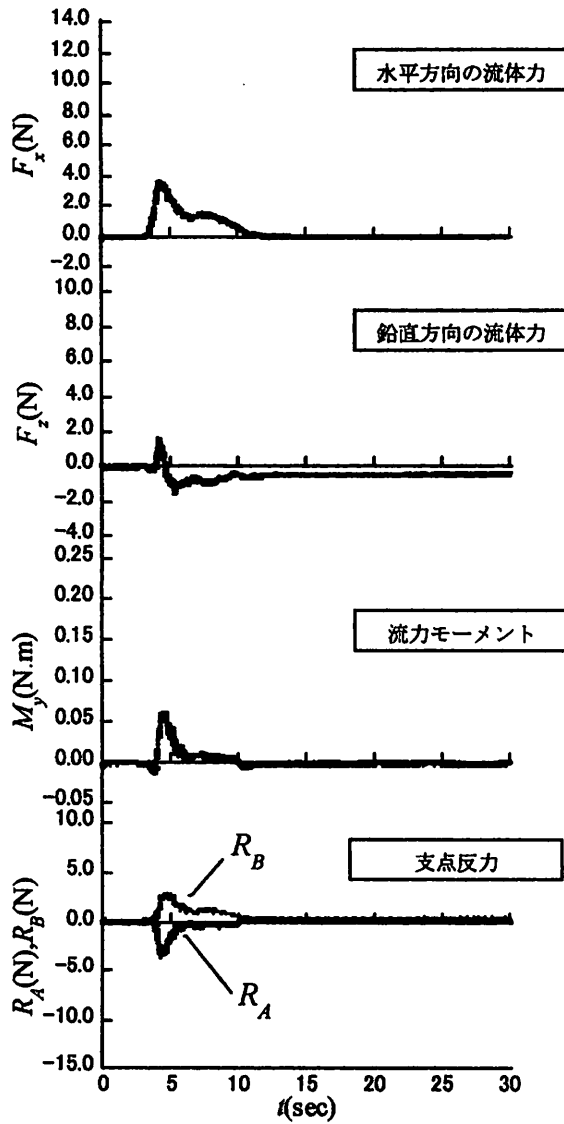


図-6 流体力の特徴 (水位4.4cm)

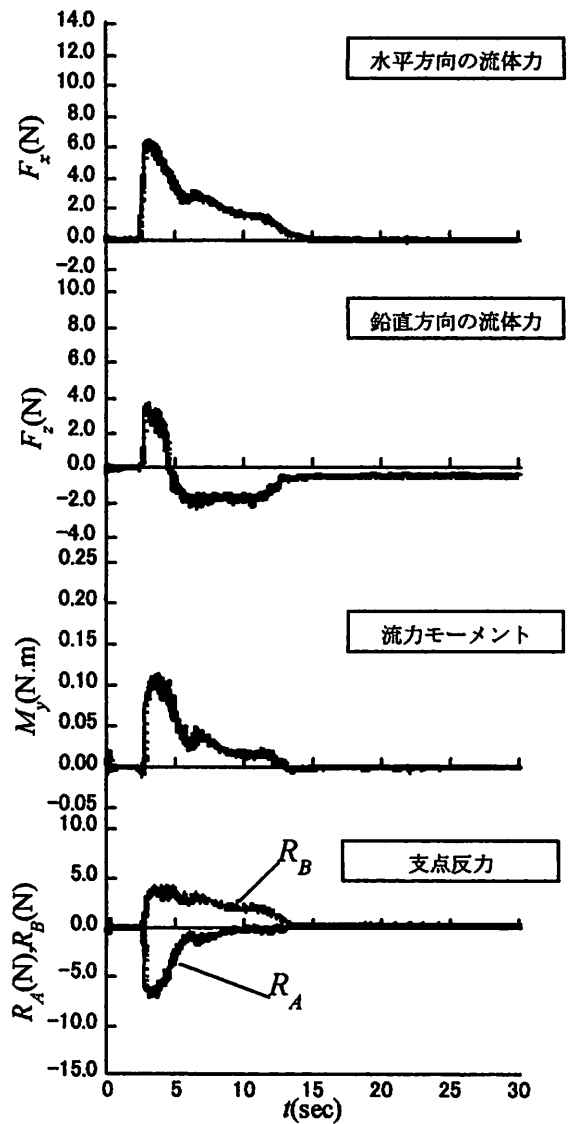


図-7 流体力の特徴 (水位5.5cm)

算すると、水平方向の流体力は12.8MN、鉛直方向の流体力は6MN、流力モーメントは0.17MN.mになる。

水位が5.5cmと水位が1cm増加すると水平方向の流体力は6.1N、鉛直方向の流体力は3.8N、流力モーメントは0.11N.m程度に増加する。

水位が7.8cmと水位が3cm程度増加すると、流体力および流力モーメントはそれぞれ13.0N、7.8N、0.22N.m程度になる。水位が4.4cmから7.8cmと2倍近く増加すると、流体力および流力モーメントは3倍以上増加する。これを実際に作用する力に換算すると流体力および流力モーメントは43.9MN、26.3MN、0.74MN.mとなる。

## (2) 支点反力

支点反力は図-5から図-8に示したように、流体力および流力モーメントが発生した直後に支点反力も

急激に作用する。また津波が模型に作用すると、上流側の支点は負反力になる。水位が4.5cmの場合、上流側の支点反力は最大で4.0N程度の負反力が生じる。

しかし水位が7.8cmになると上流側の支点は7.0N程度の負反力が最大で生じ、約1.75倍になる。これを実際に上流側の支点反力に換算すると23.6MN程度生じることになる。

## (3) 3分力係数と水位

水位および流体力と流速との関係について検討する。ここでは流体力および流力モーメントを次式のように無次元化して表した。

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (2a)$$

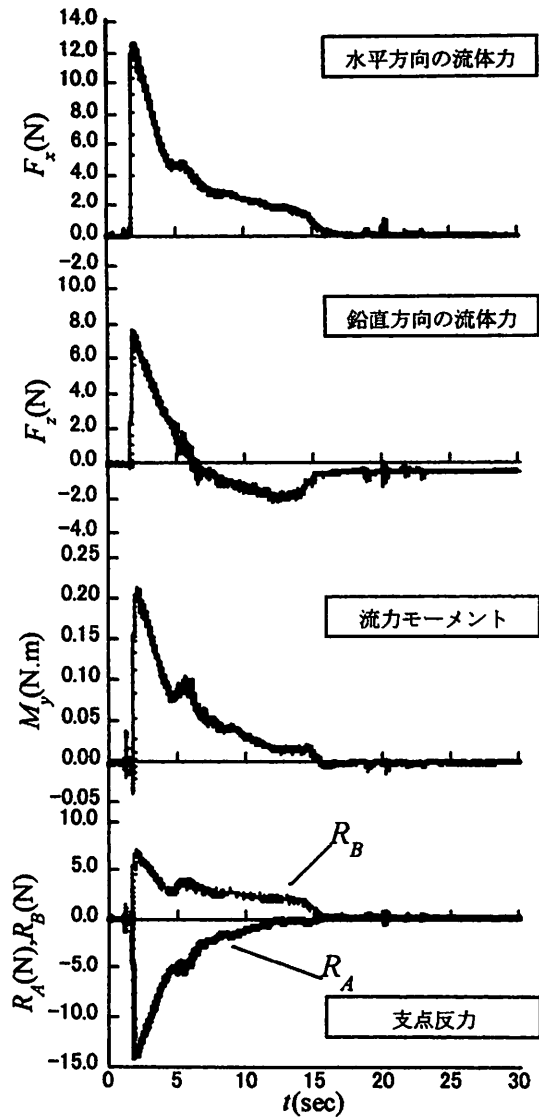


図-8 流体力の特徴 (水位7.8cm)

$$C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (2b)$$

$$C_M = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho A B U^2} \quad (2c)$$

$C_D$ は抗力係数,  $C_L$ は揚力係数,  $C_M$ はモーメント係数,  $\rho$ は水の密度( $1000\text{kg/m}^3$ ),  $U$ は流速である.  $A$ は模型を水平方向に投影した時の暴露面積である ( $A=0.0052\text{m}^2$ ). また $B$ は模型幅( $B=0.07\text{m}$ )である.

図-9から図-11は水位と抗力係数, 揚力係数, モーメント係数との関係を示した図である. 縦軸は抗力係数, 揚力係数, モーメント係数である. 横軸の  $h/h_p$  は水位を河床から模型下部までの距離 ( $h_p=0.041\text{m}$ )で割り無次元化したものである.

図-9より  $h/h_p$ が増加しても抗力係数はほぼ一定の値を示している. よって津波による流体力を規定す

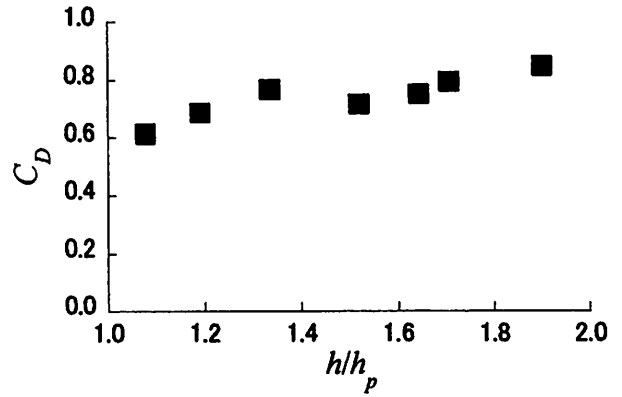


図-9 抗力係数と水位の関係

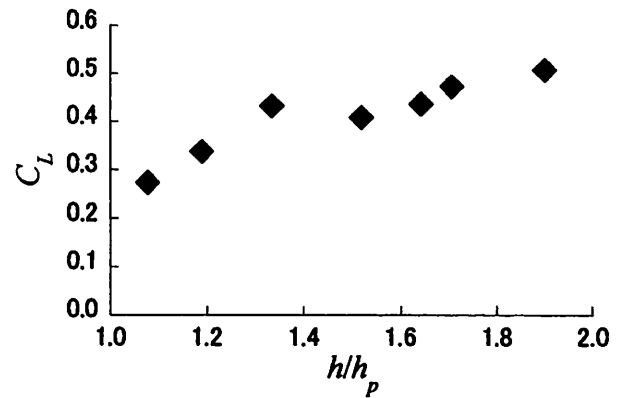


図-10 揚力係数と水位の関係

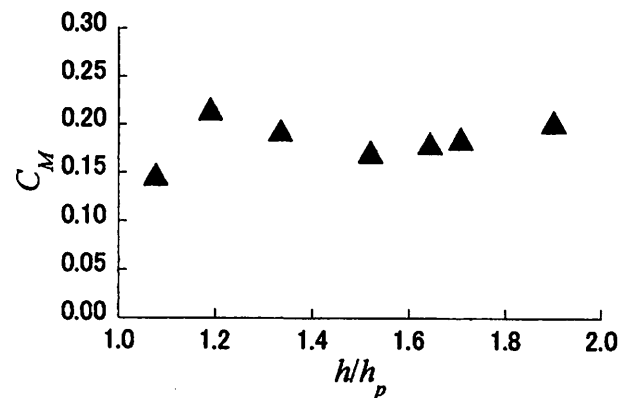


図-11 モーメント係数と水位の関係

る場合, 抗力係数を用いて規定することが可能であると考えられる. この場合, 最大値を考慮して, 抗力係数を0.7程度で規定すればよい.

同様に水位と揚力係数およびモーメント係数との関係を示した図-10および図-11においても,  $h/h_p$ が1.0から1.4の間では若干の変動があるが, それ以降は変動が小さくなり, 揚力係数を0.5程度, モーメント係数を0.2程度で規定すればよいことがわかる.

以上より, 津波外力を規定する場合, ガイドライ

ン<sup>3)</sup>などでは、水位（津波高や水深）による静水圧分布で規定されているが、抗力係数や揚力係数、モーメント係数を用いて津波外力を規定する方法も有効である。

今回は平均的な流速を求めて検討を行った。今後は流速計を用いて、各所の流速を正確に求めていく予定である。

#### 4. おわりに

本研究では2主桁断面橋げたの津波流体力について実験的に調べ、流体力の特性および水位や流速などの関係について検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 橋梁に津波が作用した場合、作用直後に模型上部に流れが当たるために、上向きの力で時計回りの力が作用する。津波通過時は模型上部の剥離流による負圧よりも模型下部の剥離流による負圧が大きくなるため、模型に下向きの力が作用する。
- ② 水平方向の流体力は、水位が4.5cmの場合では3.8Nになる。しかし水位が7.8cmと2倍近く増加すると、水平方向の流体力は3倍以上増加する。同様に鉛直方向の流体力、流力モーメントも水位が2倍近く増加すると、4倍以上増加する。
- ③ 水平方向の流体力を流速で割り抗力係数で表すと、水深と抗力係数との関係は一定の関係があり、津波による流体力を規定する場合、抗力係数を0.7程度で規定すればよい。同様に揚力係数も0.5、モーメント係数も0.2で規定すればよい。よって津波外力を規定する場合、水位による静水圧分布で規定するだけでなく、抗力係数などを用いて津波外力を規定することも可能である。

謝辞：本研究の実施にあたっては、科学研究費補助

金（若手研究(スタートアップ)20860078)「津波を想定した落橋防止ケーブルの設計に関する研究（研究代表者：中尾尚史）」および科学研究費補助金（基盤研究(C) (21560510)）「津波外力に対する落橋防止システムの必要性能の明確化（研究代表者：小林紘士）」による補助を得たことを付記する。

#### 参考文献

- 1) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則, 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 土木学会海岸工学論文集, 第47巻, pp. 911-915, 2000.
- 2) 中央防災会議：津波避難ビル等に係るガイドライン検討会(第3回)／津波に対する構造物の構造設計法(素案), 2004.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 4) 片岡正次郎, 日下部毅明, 長屋和宏：津波衝突時に橋桁に作用する波力, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp. 154-157, 2007.
- 5) 庄司学, 森洋一郎：桁橋の津波被害再現実験, 第53回海岸工学論文集, pp. 801-805, 2006.
- 6) 嶋原良典, 藤間功司, 庄司学：橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算, 第30回地震工学研究発表論文集, Vol 30(CD-ROM), Paper No.6-0001, 4 pages, 2009.
- 7) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士：断面形状の異なる橋桁に作用する津波の流体力に関する実験的研究, 地震工学論文集, 土木学会, Vol.30. (掲載決定)
- 8) 村上晋平, BUI Hong Ha, 中尾尚史, 伊津野和行：橋梁に作用する津波の流体力と流況に関するSPH法解析, 地震工学論文集, 土木学会, Vol.30. (掲載決定)
- 9) 「新しい鋼橋の設計」編集委員会：新しい鋼橋の設計, 山海堂, 2002.