

断面形状の異なる橋梁に対する津波作用時の 流体力に関する基礎的研究

中尾尚史¹・伊津野和行²・小林紘士³

¹正会員 工博 立命館大学ポス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)

²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)

³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12月に発生したスマトラ島沖地震による津波では、インド洋沿岸12カ国で死者、行方不明者合わせて220,000名以上の被害を受けた¹⁾。また橋梁構造物も甚大な被害を受けた²⁾。日本も津波の被害を受けてきており、近年発生するとされる東海、東南海、南海地震では、津波によって太平洋沿岸の地域に被害が及ぶとされ、その対策が急務とされている。特に橋梁を津波から守ることは、津波被害後の復旧作業の観点から考えても、重要なことである。

現在、津波の対策は各種のガイドライン等^{3),4)}にまとめられているものもある。また津波の研究も行われている^{5),6)}。しかし、これらは主にビル等の建築構造物や、港湾の施設構造物を対象としており、橋梁構造物に対するガイドラインはないのが現状である。また橋梁を対象とした津波外力やその対策に関する研究は現在始まったばかりである⁷⁾⁻⁹⁾。

橋梁の場合、堤防構造物と異なり、津波が桁下を通過するため、水平方向の流体力（抗力）のほかに鉛直方向の流体力（揚力）や回転力（ねじりモーメント）の影響を受けやすいと考えられる。また、津波高や桁断面によって橋梁周辺の流況や桁に与える津波外力は、大きく異なると考えられる。

よって本研究では、橋梁への安全性を評価するための基礎データを得ることを目的として、桁断面の異なる橋梁モデルを用いて、津波により桁が受ける流体力や橋梁周辺の流況について、実験によって検討した。

2. 実験による検討

(1) 実験概要

実験は写真-1および図-1の実験装置を用いて行った。実験装置の貯水部は長さ2m、幅0.6m、水路は長さ2m、幅0.2mに設計し、陸上部に橋梁がある

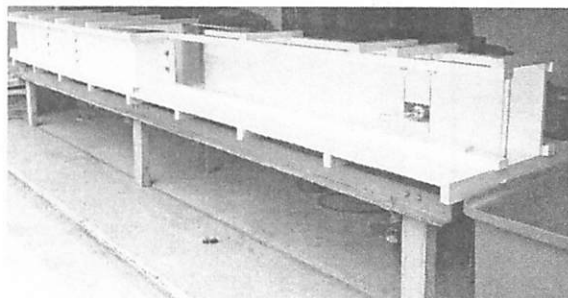


写真-1 実験装置

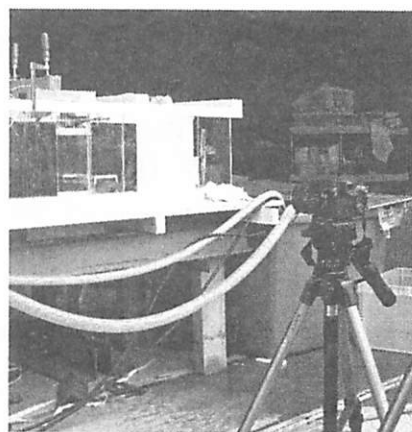


写真-2 撮影カメラ

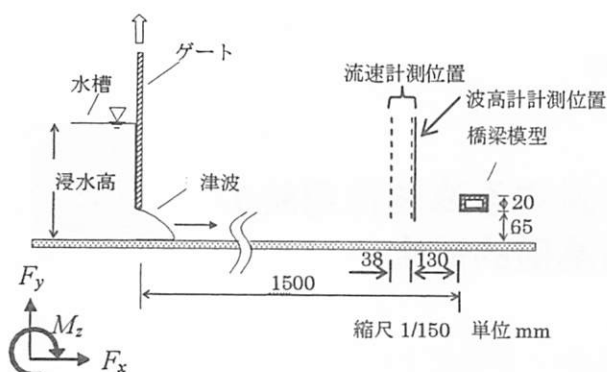


図-1 模型概要

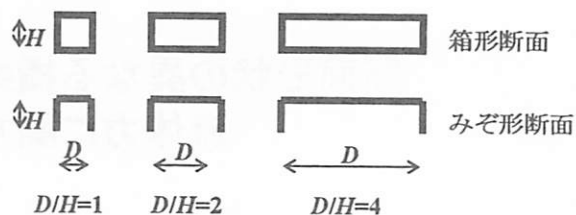
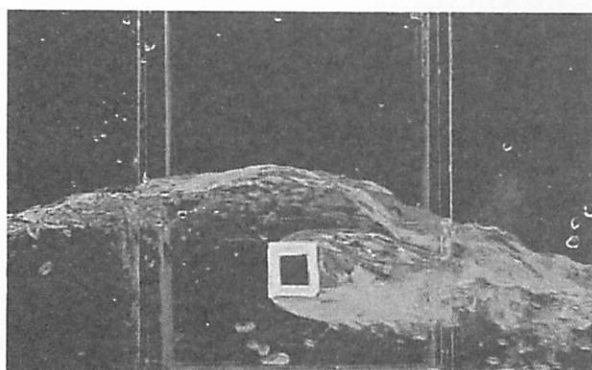
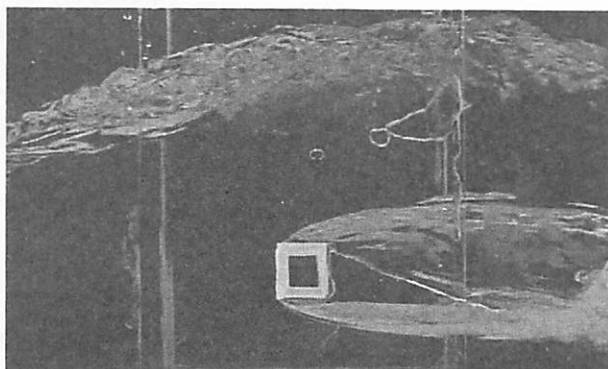


図-2 橋梁模型

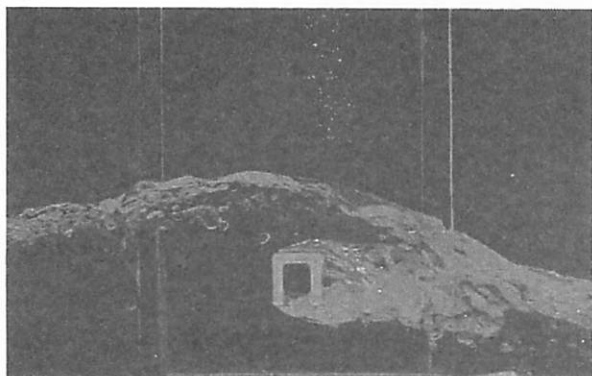


(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)



(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-3 模型周辺の流況 (箱形断面, $D/H=1$)



(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)



(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

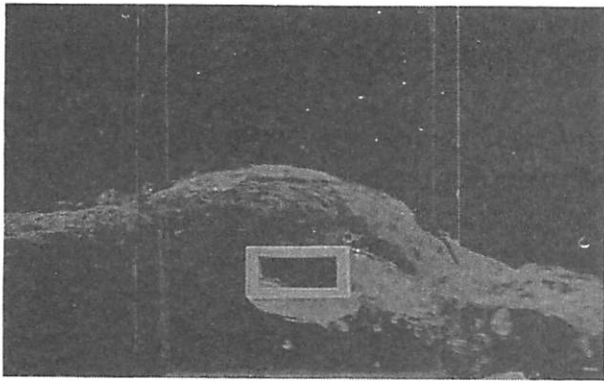
図-4 模型周辺の流況 (みぞ形断面, $D/H=1$)

と想定し、水路の勾配は無しにした。また写真-2の位置にハイスピードカメラ (1200コマ/秒, CASIO EX-F1) を設置し、橋梁周辺の流況を撮影した。方向は図に示す向きを正とした。

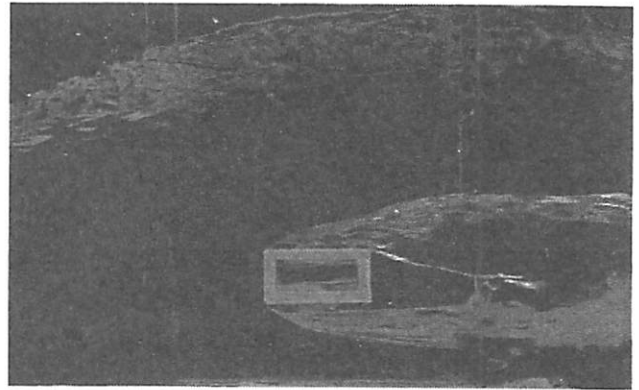
実験模型は図-2に示すように、桁幅 D と桁高 H の比 D/H を $20\text{mm}/20\text{mm}=1$, $40\text{mm}/20\text{mm}=2$, $80\text{mm}/20\text{mm}=4$, また桁断面の形状が箱形、みぞ形の計6ケースを作成した。

実験では、貯水部の水深が15cm, 17cm, 20cm,

23cm, 25cmになるまで水を溜め、浸水部の出口に設けたゲートを一気に引き上げて開放することにより、段波を発生させた。発生した段波は水路部に設置した橋梁模型に衝突し、それにより生じた流体力 (抗力 F_x , 揚力 F_y) および回転力 (ねじりモーメント M_z , z 軸回り) を6分力計ロードセル (AMTI社製 MC3A-X-100) により計測した。なお計測はそれぞれ数回行い、0.01秒間隔で移動平均をとった。サンプリング間隔は0.001秒にして実験を行った。

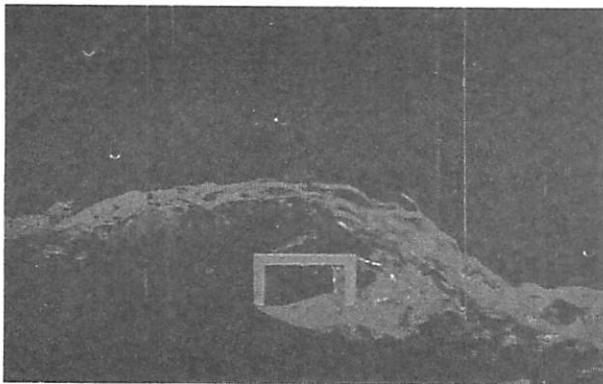


(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)

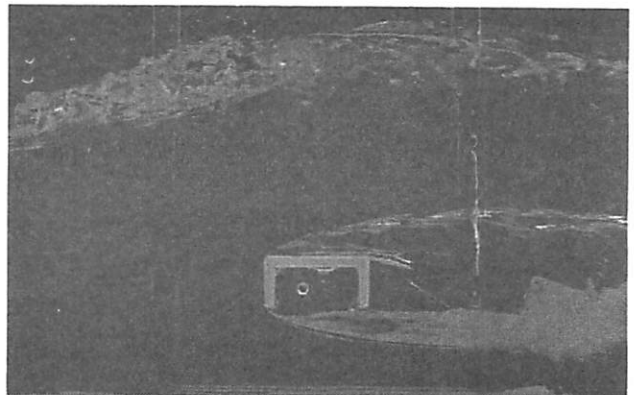


(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-5 模型周辺の流況 (箱形断面, $D/H=2$)

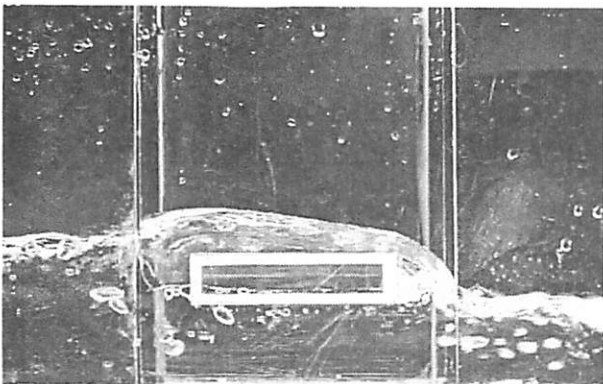


(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)

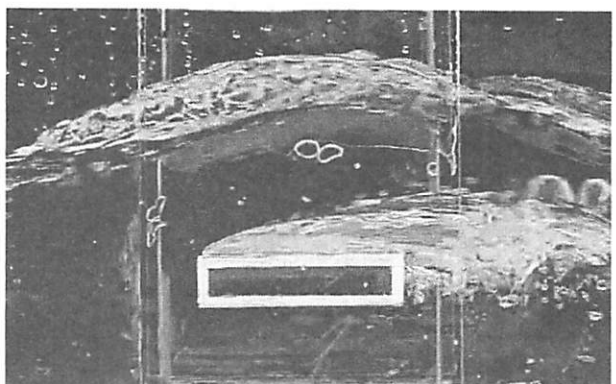


(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-6 模型周辺の流況 (みぞ形断面, $D/H=2$)

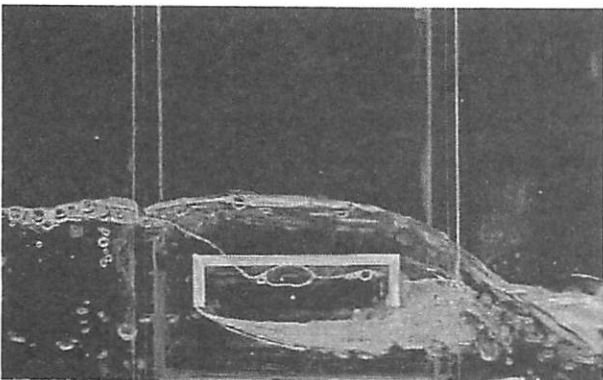


(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)



(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-7 模型周辺の流況 (箱形断面, $D/H=4$)



(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)



(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-8 模型周辺の流況 (みぞ形断面, $D/H=4$)

(2) 橋梁周辺の流況

(a) 箱形断面における橋梁周辺の流況

図-3、図-5、図-7は箱形断面における橋梁周辺の流況（津波衝突から2秒後）を示した図である。比較のため、貯水高が15cmと25cmの図を示した。

図-3の D/H が1の場合、貯水高に関係なく、模型上面および下面に剥離による空気層が形成される。しかし、貯水高が15cmのように、貯水高が小さいと、流れの勢いが小さいために、模型後部近辺に流れの乱れが生じる。貯水高が25cmになると、模型後部近辺で流れの乱れが発生しない。

図-5の D/H が2の場合、貯水高が15cmの時は上面に剥離による空気層は形成しない。貯水高が25cmになると、上面にも剥離による空気層が形成される。また、 D/H が1の時と同様に、貯水高が15cmの時は模型後部近辺で流れの乱れがの後の流れが乱れている。

しかし、図-7が D/H が4と横幅が長くなると、貯水高が15cmの時は、剥離による空気層はほとんど形成されない。また貯水高が25cmになっても、剥離による空気層は上面しか形成されない。また模型後部に空気層はできない。

b) みぞ形断面における橋梁周辺の流況

図-4、図-6、図-8はみぞ形断面における橋梁周辺

の流況（津波衝突から2秒後）を示した図である。先ほどと同様に、貯水高が15cmと25cmの図を示した。

D/H が1および2の場合、箱形断面と比べて、模型内部に流れが生じるが、剥離による空気層および模型後部の流れの乱れなどは大きな違いは見られない。

D/H が4になると、箱形断面と異なり、下面に剥離による空気層が貯水高15cm、25cm共に見ることができる。またみぞ形断面では、貯水高が15cmの場合、下面で形成された剥離による空気層が模型後部にも回りこんでいる。

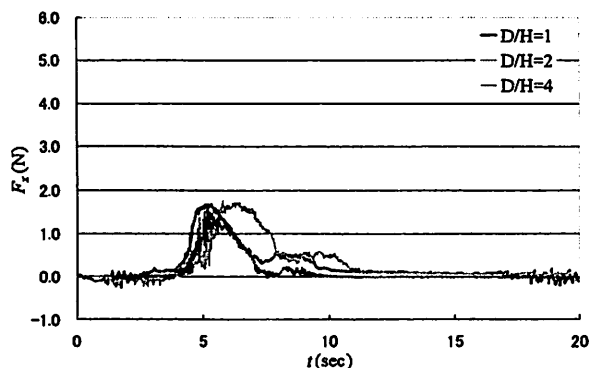
よって、桁幅が長く（ここでは D/H が4以上）になると、箱形断面とみぞ形断面で橋梁周辺の流況が異なり、この違いが橋梁に作用する流体力や回転力に影響を及ぼす。

(3) 橋梁に作用する流体力・回転力

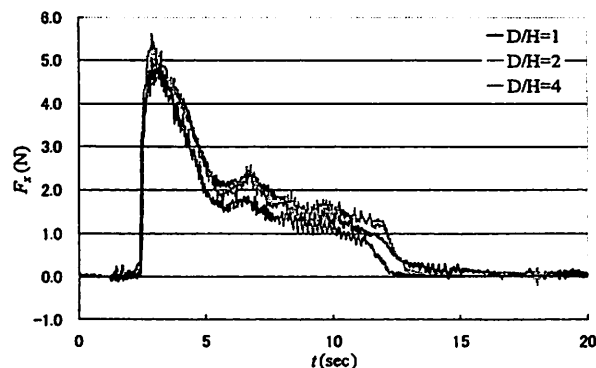
(a) 抗力

図-9および図-10は水平方向の流体力（抗力）の計測波形である。ここでは今回実験を行った貯水高が最小の15cmおよび貯水高が最大の25cmの計測結果を示した。横軸は時刻、縦軸は抗力である。

模型の高さは全て一定のため、箱形、みぞ形ともに D/H による抗力の違いはほとんど見られない。

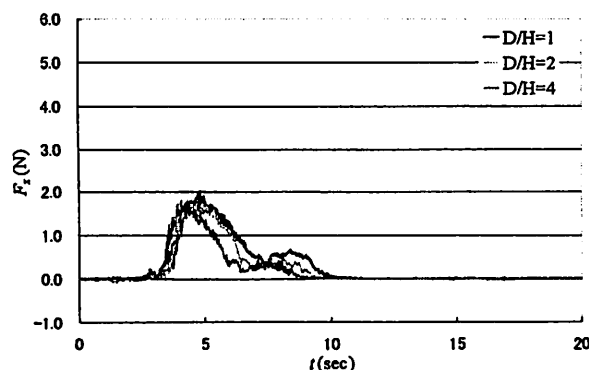


(a) 貯水高15cm（浸水高7cm）

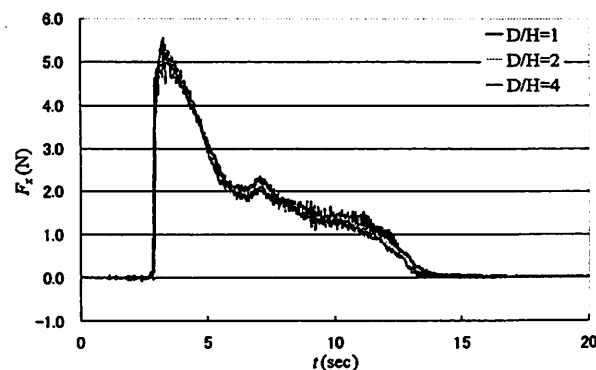


(b) 貯水高25cm（浸水高11cm）

図-9 計測波形（水平方向の流体力、箱形断面）

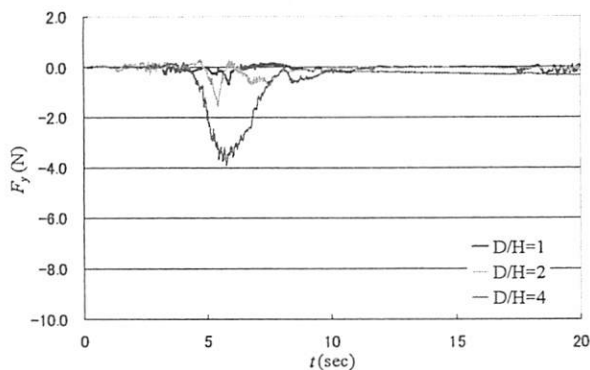


(a) 貯水高15cm（浸水高7cm）

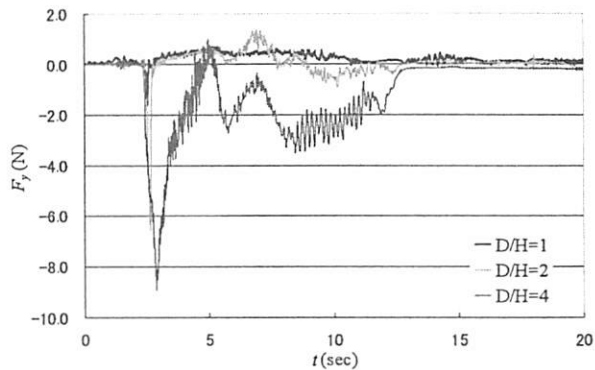


(b) 貯水高25cm（浸水高11cm）

図-10 計測波形（水平方向の流体力、みぞ形断面）

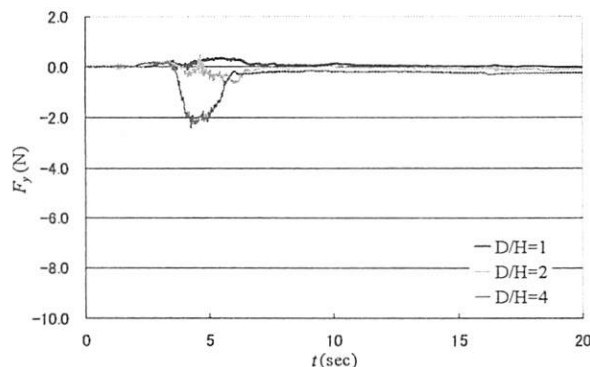


(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)

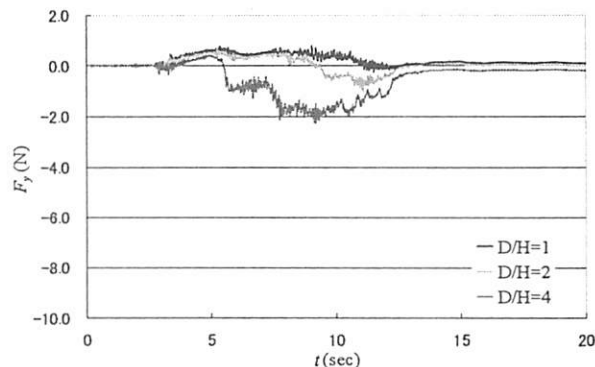


(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-11 計測波形 (鉛直方向の流体力, 箱型断面)



(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)



(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-12 計測波形 (鉛直方向の流体力, みぞ形断面)

また最大値もほぼ同じである。

貯水高が15cmの場合、津波が作用してから、抗力がピークに達するまでの時間は1秒から1.5秒程度かかる。また模型に反射した波が流下する波と重なるため、抗力が低下してから、再び抗力が増加(8秒から10秒付近)する。貯水高が25cmになると、津波が橋梁に作用すると直にピークに達し、衝撃的な力が橋梁に作用する。津波通過時は1.0Nから2.0N程度の力が橋梁模型に作用する。

(b) 揚力

図-11は貯水高15cmにおける鉛直方向の流体力(揚力)の計測波形である。横軸は時刻、縦軸は揚力である。

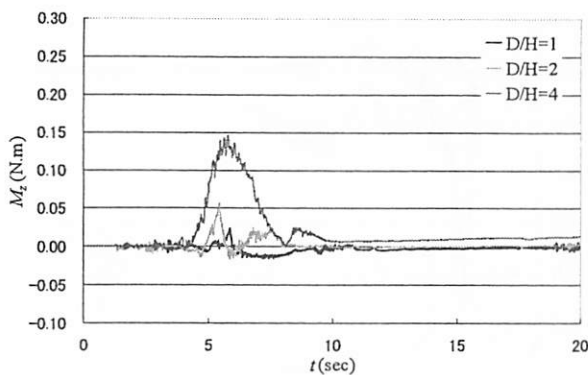
箱形断面に津波が作用すると、図-11(a)に示すように、津波作用直後は僅かに上向きの力が作用した後、下向きの力が作用する。その大きさは D/H が大きくなるにつれて増加する。 D/H が1では、下向きの力が作用した後、上向きの力が作用する。しかし、 D/H が2になると、上向きの力が作用するが、再び下向きの力が作用する。 D/H が4では、上向きの力は作用しない。図-3.5.7に示した橋梁周辺の流況から、 D/H が1の時は模型の下面に模型幅の約3倍程度の剥

離による空気層が形成される。そのために、模型を上向きに押す力が模型を下向きに押す力を上回る。 D/H が2になると剥離による空気層は小さくなり、 D/H が4になると剥離による空気層は形成されない。そのため、模型を上向きに押す力よりも模型を下向きに押す力のほうが大きくなる。

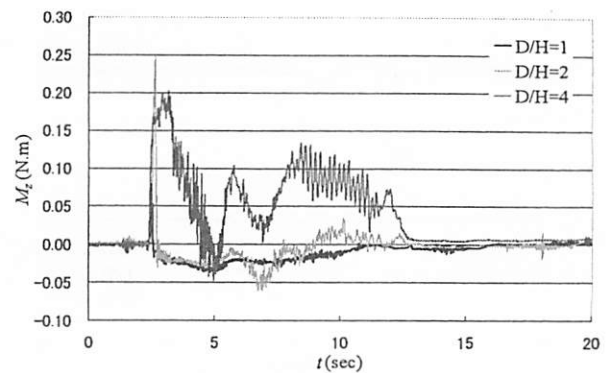
図-11(b)にみぞ形断面における揚力の計測波形を示した。みぞ形断面に津波が作用すると、箱形断面と同様に、上向きの力が僅かに作用した後、下向きの力が作用する、しかし箱形断面と異なり、下向きに作用する力の最大値は1/2以下になる。 D/H が1では下向きの力はないに等しく、上向きの力が津波作用時は作用し、最大値は箱形断面の3倍程度になる。図-4, 6, 8より、みぞ形断面では箱形断面とは異なり、 D/H が2や4でも、模型下面に剥離による空気層が形成される。そのために模型を上向きに押す力が、箱形断面よりも作用したために、下向きの力が低減されたと考えられる。

図-12は貯水高が25cmの場合の揚力の計測波形である。縦軸および横軸は図-11と同じである。

図-12(a)で示した箱形断面では津波作用直後急激に下向きの力が作用し、下向きの力の最大値は、

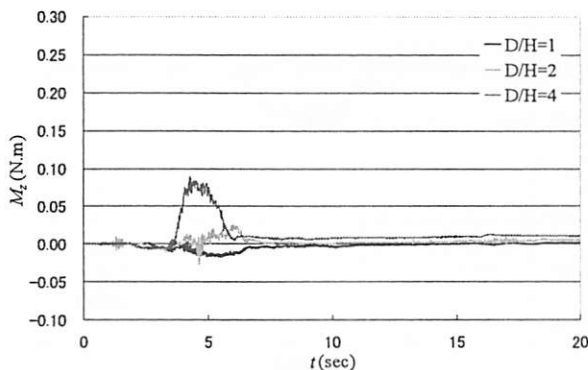


(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)

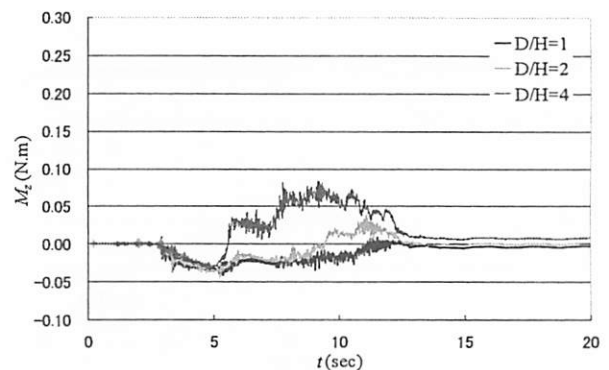


(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-13 計測波形 (ねじりモーメント, 箱型断面)



(a) 貯水高15cm (浸水高7cm)



(b) 貯水高25cm (浸水高11cm)

図-14 計測波形 (ねじりモーメント, みぞ形断面)

貯水高が15cmの時の2倍から3倍になる。また、 D/H が1や2になると、上向きの力の作用時間が増加する。 D/H が4では、5秒付近で一時上向きの力が作用するが、その後下向きの力が作用する。

図-12 (b) で示したみぞ形断面では、箱形断面で現れた津波作用直後の急激な下向きの力は作用せず、逆にどのケースにおいても、津波が作用してから約2秒間は上向きの力が作用する。その後、 D/H が2や4では下向きの力が作用するが、その最大値は箱形断面の時に比べ1/3以下になる。

貯水高が25cmでは、図-3から図-8の橋梁周辺の流況より、貯水高15cmでは形成されなかった剥離による空気層が形成されている。そのため模型には上下に作用する力が作用し、貯水高が15cmの場合とは測定波形が異なる。

以上のことから、剥離による空気層が揚力の向きやその大きさに大きく関係しており、剥離による空気層が形成されると模型側に力（上面に剥離による空気層が形成されると、模型を下向きに押す力。下面に剥離による空気層が形成されると、模型を上向きに押す力）が作用すると考えられる。

なお、 D/H が4では、測定波形は0に収束せず下向

きの力が残るが、これは模型上に残った水の影響である。増加しているのは、模型の貯水高が低下するに従い、浮力が低下したためと思われる。

(c) 回転力

図-13および図-14は貯水高15cmおよび貯水高25cmにおける回転力（ねじりモーメント）の計測波形である。図の横軸は時刻、縦軸は回転力（時計回りが正）である。

箱形断面とみぞ形断面を比較すると、箱形断面のほうが、時計回り方向のねじりモーメントが大きくなる。また箱形断面では津波が作用してから時計回りに回転するのに対し、みぞ形断面では反時計回りに回転している。

D/H が4は一部異なる箇所もあるが、全般的にねじりモーメントは大きく、 D/H が1や2に比べると計測波形がかなり異なる。

図-11や図-12の揚力の計測波形と比較すると、時間軸で対称であるが、よく似た波形を示している。今回の実験では、模型断面の高さを一定にして、幅を変化させたために、ねじりモーメントは揚力の影響を受ける結果となった。

なお、計測波形が0に収束していない箇所がある

が、これは先ほど述べたように、模型上部に残った水の影響であると考えられる。

3. 実際の橋梁に作用する流体力

(1) 実流体力の換算式

ここでは実験で得られた流体力が、実際にはどれくらいの力になるかを求め、津波の設計式と比較する。

本研究では、フルード相似則により、次式によって実物の波高および流体力を計算した。

$$H_p = \frac{H_m}{\lambda} \tag{3a}$$

$$F_p = \frac{F_m}{\lambda^3} \tag{3b}$$

H_p および F_p は実物の波高および流体力、 H_m および F_m は実験の波高および流体力である。また λ は縮尺である。

これらの式を用いて実際の流体力にする。なお、波高は模型を設置しない状態で計測した結果、貯水高が15cmでは最大で7cm、貯水高が25cmでは最大で11cmの段波が発生する。これを(3a)式を用いて実際の波高に換算すると、貯水高が15cmで11m、貯水高が25cmになると17mの津波が橋梁に作用することになる。また実際の橋梁の橋長は(3a)式を用いると30m、桁下高は9.75mになる。

最大および最小流体力は、それぞれ移動平均の最大および最小値を平均した。

(2) 実際に作用する流体力

図-15から図-17は、図-9から図-14で得られた計測波形の最大値または最小値を、実際の流体力に換算した場合の結果である。横軸は D/H 、縦軸は実際の流体力およびねじりモーメントであり、図中の揚

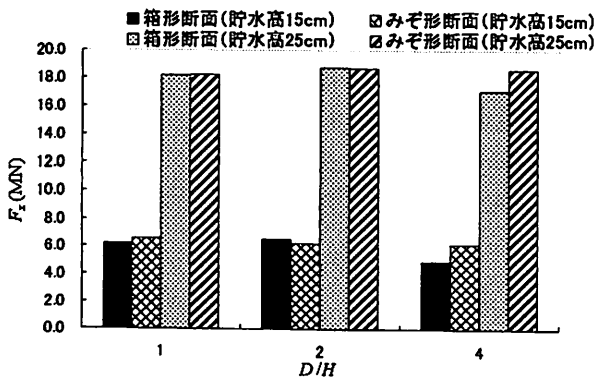


図-15 実際の流体力（抗力）

力の最大値は上向き、ねじりモーメントの最大値は時計回りを表している。

図-15から、貯水高が15cmでは、抗力の最大値は、模型実験の結果では図-9および図-10より約1.8Nである。この場合、実際の流体力に換算すると6.0MN程度になる。これを単位長さあたりに換算すると、0.2MN/mの力が橋梁に作用する。貯水高が25cmになると、実験では図-9および図-10より最大で約5.0Nとなり、貯水高が10cm増加すると、2.8倍程度抗力が増加する。実際の流体力も18.0MNになり、単位長さあたり0.6MN/mとなる。

また、模型断面の高さを一定にしていたため、 D/H や断面が異なっても最大の揚力については大きな変化がない結果となった。よって、橋梁の高さが一定では揚力は、箱形およびみぞ形では大きな変化がない。

図-16より、上向きの力の最大値は、図-11および図-12から貯水高15cmおよび25cmでそれぞれ0.4Nおよび1.0N程度の力が作用する。これを実際の揚力に換算すると1.4MN、4.5MN程度になる。下向きの力の最大値は、箱形断面の場合、 D/H が増加すると下向きの力が大きくなり、例えば、貯水高が25cmで D/H が4の場合、図-11から9.2Nになり、実際の揚力に換算すると31.2MN（単位長さあたり1.4MN/m）になる。

みぞ形断面では、箱形断面同様に D/H が増加すると下向きの力の最大値も増加する。しかし、箱形断面と比べ小さくなる。例えば貯水高が25cmで D/H が4の場合、図-12より下向きの力の最大値は2.0N程度で、実際の揚力に換算すると8.0MN程度になり、箱形断面の場合に比べて1/4程度になる。

今回の実験模型は、箱形断面はボックスガダー橋、みぞ形断面ではプレートガダー橋を想定して作成した。実験で得られた結果を実橋に置き換えて考えると、橋梁を越波する津波が作用した場合、プレートガダー橋よりもボックスガダー橋の方が、

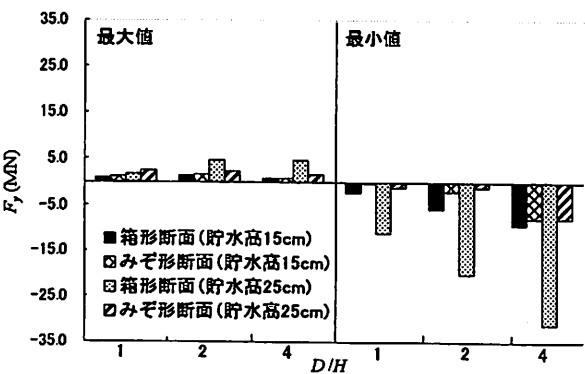


図-16 実際の流体力（揚力）

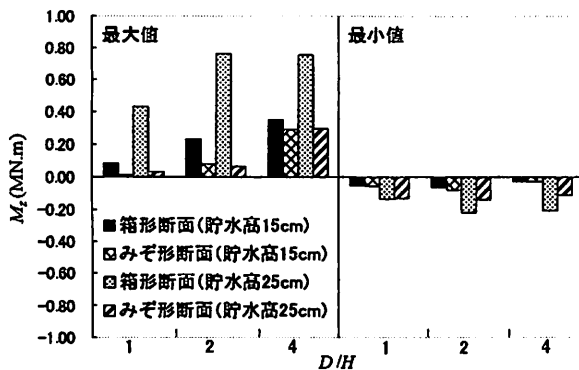


図-17 実際の流体力（ねじりモーメント）

揚力の影響を受けやすい。

図-17より、ねじりモーメントは時計回りに回転する力が大きく、図-13および図-14から最大で0.2N.mの力が作用する。実際のねじりモーメントに換算すると、0.76MN.mになり、単位長さ当たり0.025MN.m/mになる。

4. 結論

本研究は断面形状の異なる橋梁における橋梁周辺の流況および流体力について実験により検討した。得られた結果は以下のとおり。

- ① 貯水高が15cmの場合、箱形断面では、 D/H が1で模型上面および下面に流体の剥離がおこる。しかし D/H が2や4になると、流体の剥離はおこりにくくなる。みぞ形断面では、箱形断面に比べ流体の剥離はおこりやすく、特に今回の実験結果では全ケースで、模型下面に流体の剥離がおこる。
- ② 貯水高が25cmと10cm増加すると、箱形断面の D/H が4以外のケースでは、模型上面および下面に流体の剥離がおこる。みぞ形断面では全ケースで模型の上面および下面に流体の剥離がおこる。
- ③ 流体力の計測結果、水平方向の流体力（抗力）は、各貯水高で大きな変化はなく計測波形にも大きな違いはない。また貯水高が25cmでは、津波衝突時に衝撃的な力が模型に作用する。
- ④ 鉛直方向の流体力（揚力）は、箱形断面の場合、津波作用直後、衝撃的な下向きの力が作用する。みぞ形では衝撃的な下向きの力は作用しない。
- ⑤ D/H が大きいと、下向きの力が大きく作用する。また、 D/H が4になると、上向きの力はほとんど

ど作用しない。

- ⑥ 実際の流体力に換算すると、抗力は貯水高が15cmの場合、箱形みぞ形断面共に0.2MN/m。貯水高が25cmの場合では0.6MN/mの力が橋梁に作用する。
- ⑦ 橋梁模型を越波する津波が作用する場合、みぞ形断面よりも箱形断面の方が、揚力（主に下向きの力）は大きくなる。

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）」による補助を得たことを付記する。

参考文献

- 1) 首藤伸夫，今村文彦，越村俊一，佐竹健治，松富英夫：津波の事典／朝倉書店，2007。
- 2) 運上茂樹：津波による橋梁被害，日本地震工学会誌，No. 6，pp. 26-28，2007。
- 3) 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。
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999。
- 5) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No. 621/ II-47，pp. 111-127，1999。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 二井伸一，幸左賢二，運上茂樹，庄司学：津波による橋梁被害の解析的検討，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 81-88，2008。
- 9) 杉本健，運上茂樹：津波の橋梁の被害メカニズムに関する実験的研究，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 97-100，2008。