

津波作用力の軽減を目的とした 橋桁断面形状の実験的検討

糸永航¹・中尾尚史²・伊津野和行³・小林紘士⁴

¹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)

²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)

³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)

⁴正会員 工博 立命館大学名誉教授 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

東北地方太平洋沖地震により発生した大津波は、多数の橋梁を流出させ、また多くの橋梁の機能に対して致命的な被害を及ぼした。現在、津波による被害対策は各種のガイドライン等^{1)~2)}にまとめられているが、これらは建築構造物や港湾施設を対象としており、橋梁構造物に対する津波対策の明確な基準が存在しない。また、橋梁を対象とした津波対策に関する研究例は限られている^{3)~8)}。津波被害によるライフラインの寸断を防ぐためにも、津波による橋梁構造物の被害を最小限に抑える方法を考える必要がある。

著者らは、長方形断面やみぞ形断面などの基本的な断面を用いた津波作用力や橋梁模型周辺の流況についての検討を行ってきた^{9)~10)}。一方、既存の橋梁に対する津波作用力軽減策の1つとして、橋桁にフェアリングを取り付けることにより、津波の作用力が軽減されることが張らの研究で示されているが¹¹⁾、どのような形状のフェアリングが最適かは明らかになっていない。本研究では水理実験を行い、橋桁の断面形状が津波の作用力に与える影響について検討

することを目的とした。断面形状の異なった150分の1スケールの橋梁模型を用いて、橋梁に作用する津波作用力の測定を行い、ハイスピードカメラを用いて橋梁周辺の状況を撮影した。その実験データから津波が作用した時の流況の分析を行った。

2. 橋梁模型を用いた津波衝突実験

(1) 実験装置概要

本実験は図-1のような実験装置を用いた。実験装置は水槽(0.6m×2.0m)と水路(0.2m×4.0m)を繋ぎ合わせたもので、水槽と水路の間にはゲートを設けている。開閉装置を用いてゲートを引き上げることでゲート急開流れを発生させた。なお、水槽のゲート付近では流体が水路に流れる際のエネルギー損失を軽減するために水槽の側壁は弧を描くような形状に加工している。

また、水槽と水路の間にあるゲートから3.0m離れた位置に橋桁模型を設置し、津波が模型に作用するときの津波作用力(水平・鉛直・回転)をロードセル(AMTI社製MC3A-X-100)により計測した。サンプリング間隔を0.01秒に設定し、得られた波形は

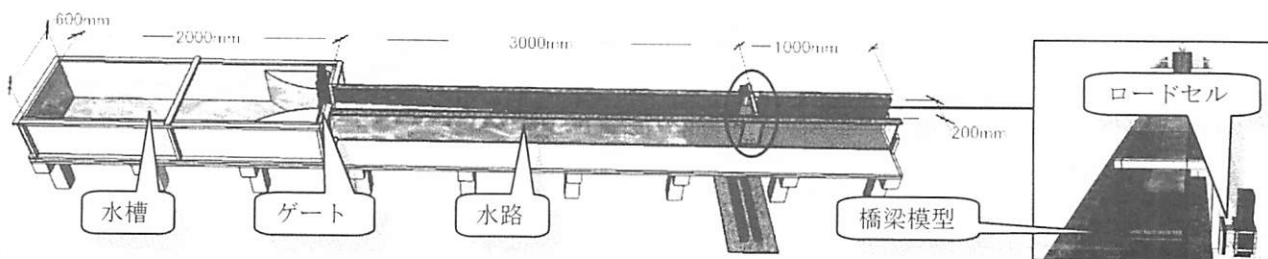


図-1 実験装置

15Hz以上の成分をカットするようなローパスフィルタをかけて処理した。

(2) 橋梁模型

橋梁模型にはアクリル板を用い、桁部分をモデル化したものを作成した。模型に接着した側壁のアクリル板は、ロードセルと接続されており、模型の橋軸が水路の側壁に直角になるように設置して、水平方向の津波作用力 F_x と鉛直方向の津波作用力 F_z 、流力モーメント M_y を計測した。なお、水平方向の津波作用力 F_x は上流から下流へ向かう向き、鉛直方向の津波作用力 F_z は上向き、流力モーメント M_y は時計回りを正としている。

橋桁断面は図-2に示すような橋梁模型の基本となる長方形断面に加え、台形断面(2ケース)、穴あき断面、六角形断面、半円断面の合計6ケースを用いた。台形と六角形型の断面は長方形型断面の両端にフェアリングを取り付けたものを、穴あき断面は吊り橋で用いられている橋桁断面を想定して作成した。

(3) 流況の撮影

橋梁模型に津波が作用したときの様子をハイスピ

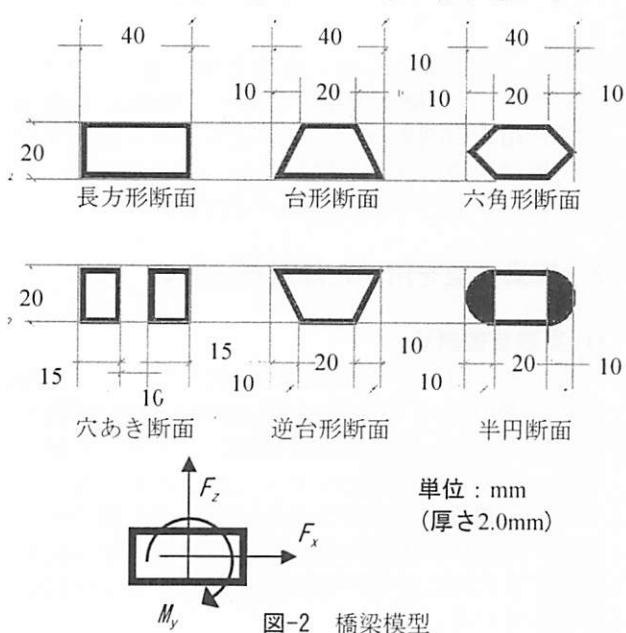


図-2 橋梁模型

ードカメラ(CASIO:EX-FH25およびEX-F1)を用いて撮影した。その際、カメラは図-3のように橋桁模型から水路と直角方向に3.0m離れたところに設置した。水路の中央部分の流体の動き撮影するため、橋梁模型から水路に直交する方向に箱をかぶせて暗室にした。橋梁模型の上に光源を設置し、シート光発生装置を用いて水路の中央部分だけが写るようにした。橋梁周辺の流況を動画(240fps/secおよび420fps/sec)および高速連写撮影(30fps/sec×60枚=2秒)により撮影した。

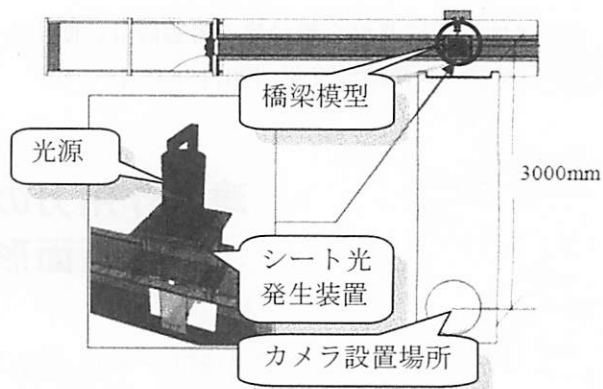


図-3 撮影方法

3. 実験結果

(1) 津波作用力測定結果

それぞれの断面に作用する津波外力の違いを比較する。ここでは1例として水槽に水を20cm貯めて計測を行ったときに得られた水平方向の津波作用力 F_x を図-4、図-5、鉛直方向の津波作用力 F_z を図-6、図-7、流力モーメント M_y を図-8、図-9に示す。

a) 水平方向の津波作用力 F_x に関して

図-4および図-5から津波作用直後(計測開始後2.5s~5.0s)で台形断面と半円断面が他の断面と比べると、全体的に津波作用力が50%程度小さくなり、フェアリングが津波作用力を軽減させることが判明した。また、津波通過時(計測開始後7.5s~13.0s)

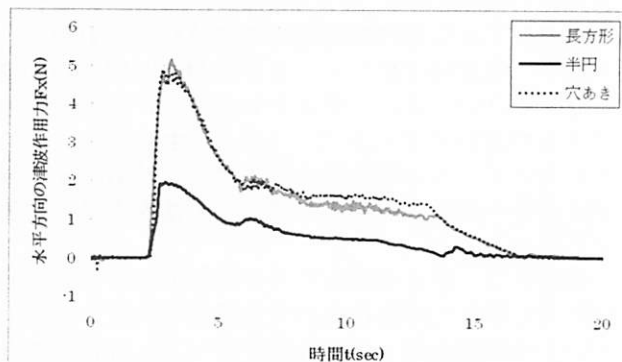


図-4 水平方向の津波作用力 F_x (貯水高20cm)
長方形、穴あき、半円断面比較

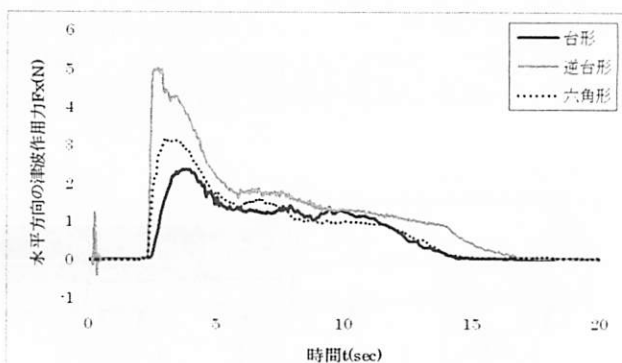


図-5 水平方向の津波作用力 F_x (貯水高20cm)
台形、逆台形、六角形断面比較

における穴あき断面の津波作用力が長方形断面よりも30%程度大きくなった。穴あき部分の側面にも津波が作用したため、このような結果になったと考えられる。

b) 鉛直方向の津波作用力 F_z に関して

図-6および図-7から津波の作用直後、長方形断面や台形断面では下向きの津波作用力が顕著に現れるのに対して、逆台形断面と六角形断面では上向きの津波作用力が顕著に現れる。長方形断面では津波が模型に作用したときに模型下面上流側に剥離が発生し、負圧が生じるために下向きの力が作用する。台形断面は斜面に垂直に作用する下向きの力も作用するために、下向きの津波外力しか加わらなかったと考えられる。

それに対して逆台形断面の場合、長方形断面同様に模型下面に発生する剥離で負圧が生じて下向きの力が作用するが、斜面に垂直に作用する上向きの力が負圧による下向きの力よりも上回ったために、上向きの力が作用したと考えられる。

六角形断面では津波作用直後は上向きの津波作用力が顕著に現れているが、逆台形断面よりもピーク値に達してから早い時間で低下する。津波の水位が模型の中心より高くなると模型上部の斜面に津波が作用することで下向きの力が加わり、上向きの力が減少したと考えられる。そのため、津波の水位が模型の中心より低くなる計測開始後5.0s以降では再び上向きの力が大きくなる。

また、穴あき断面の津波作用力は他の模型と比べると、最大値は逆台形断面、六角形断面の30%程度、最小値は長方形断面、台形断面の12~18%となった。模型下面に発生する負圧が、模型の中央に開いた穴により軽減されたため、下向きの津波作用力が減少したものと考えられる。一方、上向きの津波外力に関しては津波が作用する模型下面の面積が小さくなったため、減少したと考えられる。

半円断面に関して、津波作用直後は長方形断面と同様に下向きの力が作用するが、長方形断面よりも値は40%程度小さい。しかし、長方形断面では計測開始後2.5sあたりで下向きの力はほとんど作用しなくなるのに対し、半円断面では計測開始後6.0sあたりまで作用し続けることがわかった。

c) 流力モーメント M_y に関して

図-8および図-9から長方形断面と穴あき断面では、津波作用直後に反時計回りの流力モーメントが作用する。長方形断面と穴あき断面は津波作用力直後に模型の下面上流側の剥離で発生した負圧により、模型の左下の部分に下向きの力が作用したため、反時計回りの流力モーメントが作用したと考えられる。

台形断面も同様に反時計回りの流力モーメントが作用する。この断面の場合、剥離による影響ではなく、津波により模型の左側面上流側に作用する下向きの力により、反時計回りの力が作用したと考えられる。

逆台形断面と六角形断面において、津波作用直後

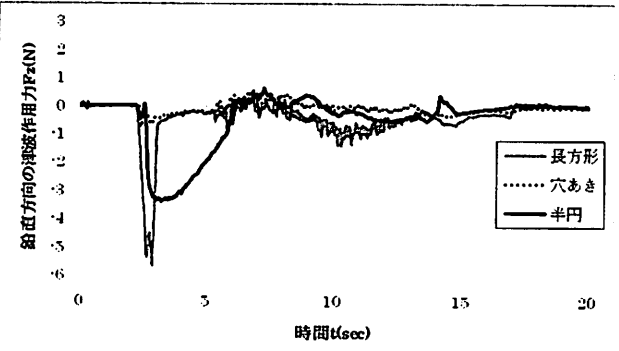


図-6 鉛直方向の津波作用力 F_z (貯水高20cm)
長方形、穴あき、半円断面比較

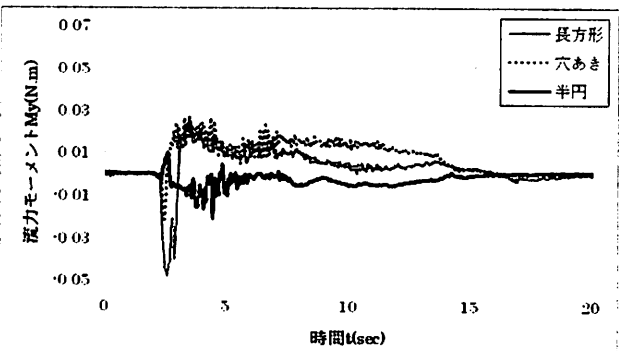


図-8 流力モーメント M_y (貯水高20cm)
長方形、穴あき、半円断面比較

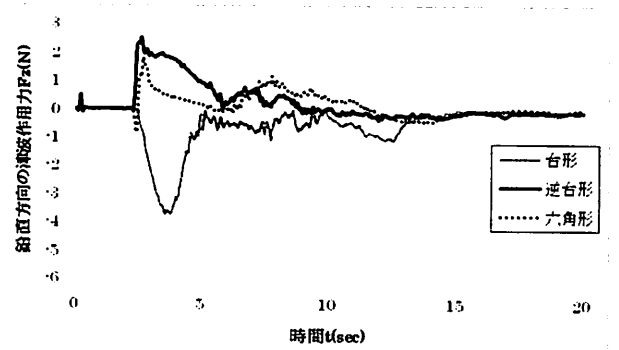


図-7 鉛直方向の津波作用力 F_z (貯水高20cm)
台形、逆台形、六角形断面比較

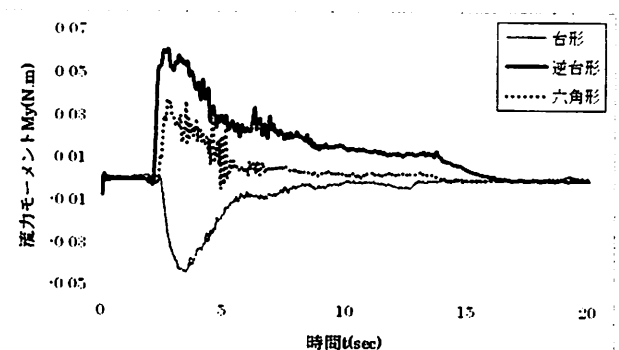


図-9 流力モーメント M_y (貯水高20cm)
台形、逆台形、六角形断面比較

から時計回りの回転力が作用している。逆台形断面はピーク値が六角形断面の2倍ほどあるが、この違いは模型に作用する上向きの力が加わる面積の違いによるものだと考えられる。六角形断面では模型の中心から側面の角度が変わっているため、計測開始後2.6s以降は模型を下向きに抑える力も作用している。

半円断面は他の模型と比較すると流力モーメントはあまり作用していない。模型の上下面に剥離がほとんど生じないため、回転を生じさせる力が小さかったと考えられる。

(2) 橋梁模型周辺の流況

a) 津波作用直後の流況

写真-1～写真-6は津波作用後0.2sの流況を示したものである。模型側面が地面と垂直である長方形断面と穴あき断面では波は真上に成長していることが

写真-1と写真-2からわかる。また、穴あき断面は模型の上流側下面だけではなく穴あき部からも剥離が生じ、模型の間に水の流れを確認できた。

写真-3より、台形断面の模型上部では、模型の下流側方向に伸びる波を確認することができた。また、模型下面の流況において、他の断面とは違い、津波作用直後は剥離を確認できなかった。模型の下面は両端部分を鋭角にすることで、剥離による津波作用力の影響を軽減できることがわかった。

逆台形断面(写真-4)と六角形断面(写真-5)では模型の傾斜した側面の影響により、津波作用力直後は波が上流側に戻される。また、下流側の波は少し上向きに弧を描くような剥離が形成された。

半円断面の流況は写真-6より、他の断面よりも越波する波の量が多いことが判明した。また、半円断面は模型の回り全体に水が飛び散り、模型上下面の剥離も起こらない。そのため、力は模型全体に加わ

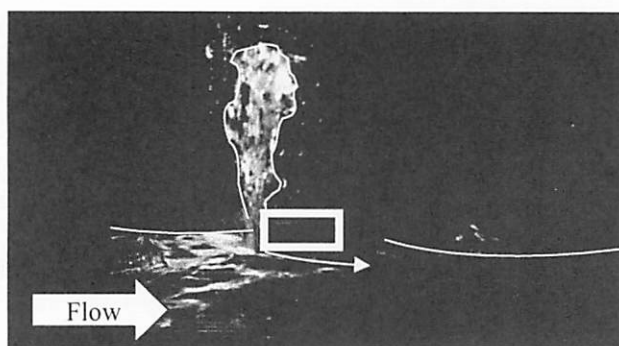


写真-1 長方形断面の流況 (津波作用後0.2s)

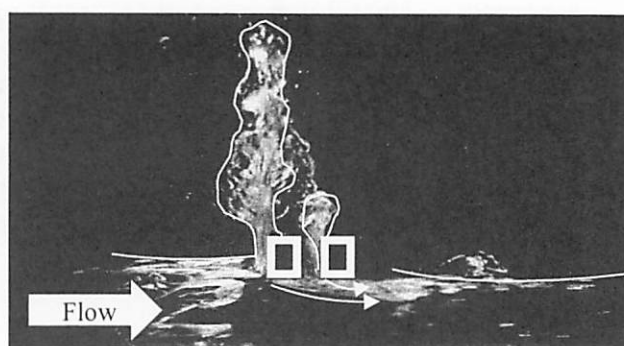


写真-2 穴あき断面の流況 (津波作用後0.2s)

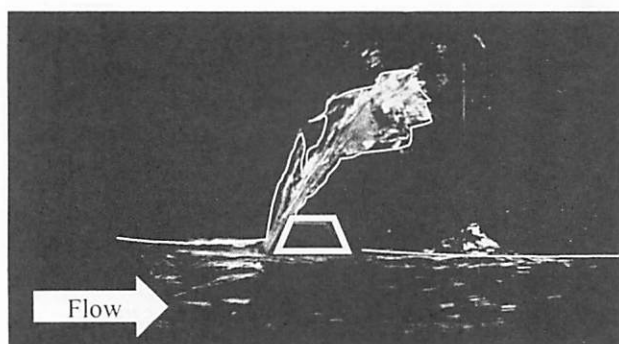


写真-3 台形断面の流況 (津波作用後0.2s)

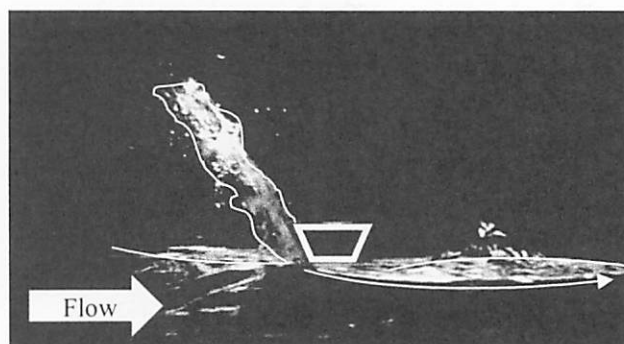


写真-4 逆台形断面の流況 (津波作用後0.2s)

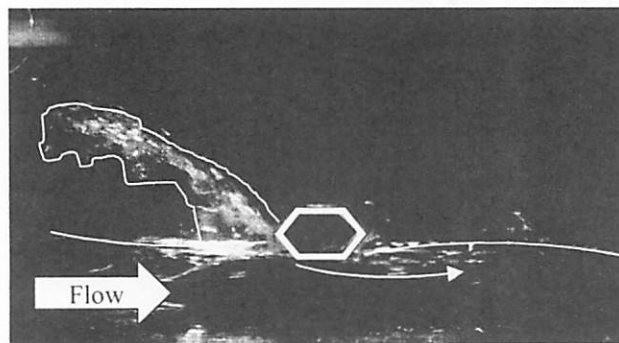


写真-5 六角形断面の流況 (津波作用後0.2s)

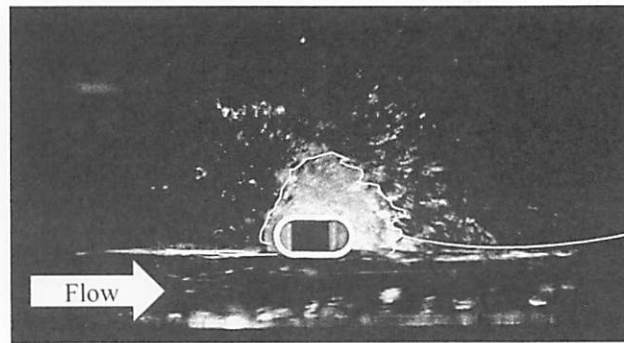


写真-6 半円断面の流況 (津波作用後0.2s)

り、外力は図-4、図-6、図-8のように軽減されたと考えられる。

b) 津波作用後1.0sの流況

写真-7～写真-12に津波作用後1.0sの流況を示す。津波作用直後と比べると、すべての模型の下面に剥離が生じている。また、水位が高くなったため、模型の上面にも剥離を確認することができた。

津波作用後1.0sに下向きの力が作用している長方形断面、穴あき断面に関して、模型の側面(上流側)周辺の流況はほとんど変わらなかった(写真-7、写真-8)。しかし、模型の中央部から生じる剥離に違いが見られた。模型下面では模型の上流側しか剥離が生じなかったが、穴あき断面では模型の中央からも微小な剥離が生じている(写真-8)。上面も同様に穴あき断面では穴あき部から若干の剥離が生じた。

穴あき断面の右側に生じる剥離において、模型上面よりも下面の方が剥離は大きく作用していること

が写真-8よりわかる。図-6より模型全体における鉛直方向の津波作用力 F_z は軽減されたが、今回行った模型では穴の間隔が種類だったため、最適な穴の間隔についても検討を行う必要がある。

上向きの力が作用している逆台形断面、六角形断面に関して、逆台形断面では模型の上部に生じる剥離がよりはっきりと確認することができた(写真-10)。それに対して、六角形断面では(写真-10)、下面と同様に両端部分の角度が影響し、模型上面の剥離の影響が軽減される。

台形断面(写真-9)と六角形断面(写真-11)、半円断面(写真-12)では他の断面と比較すると、模型の上流部の水位が他の断面よりも30%程度低い。他の断面では模型の側面により波が堰き止められているが、これらの断面の場合は、波が下流側に流されやすくなっている。そのため鉛直方向の力が小さくなったと考えられる。

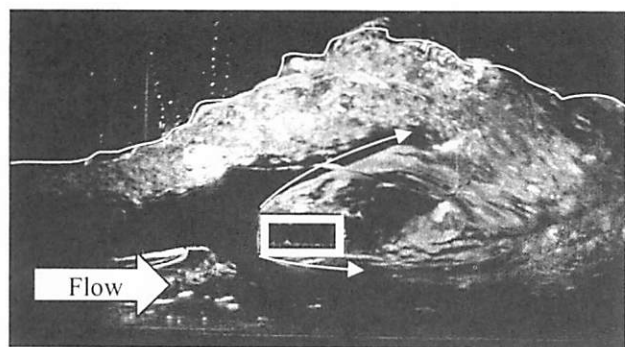


写真-7 長方形断面の流況 (津波作用後1.0s)

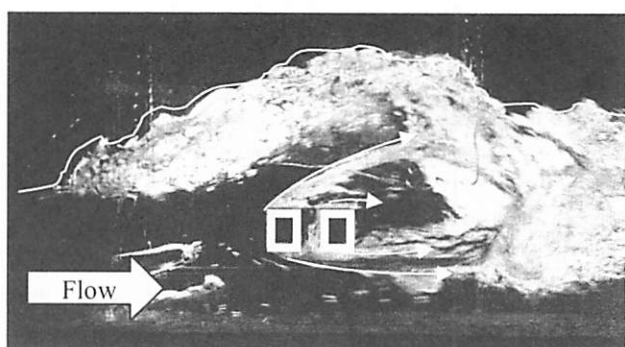


写真-8 穴あき断面の流況 (津波作用後1.0s)

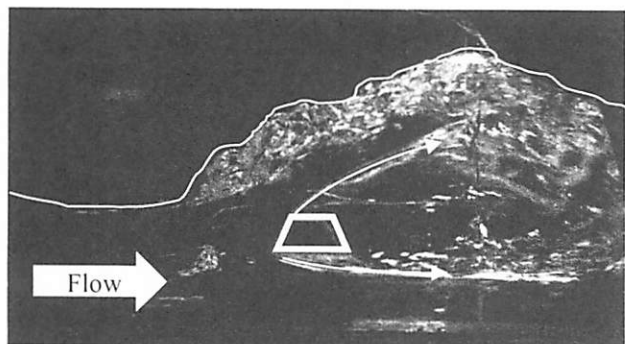


写真-9 台形断面の流況 (津波作用後1.0s)

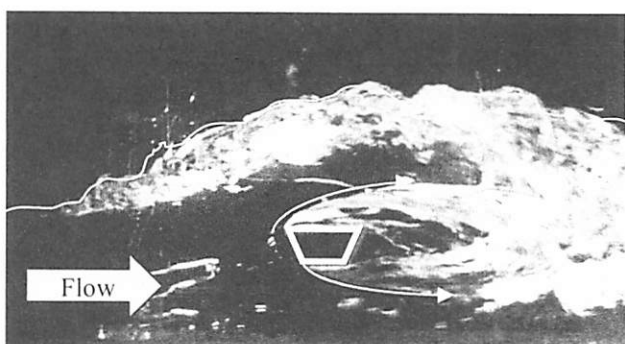


写真-10 逆台形断面の流況 (津波作用後1.0s)

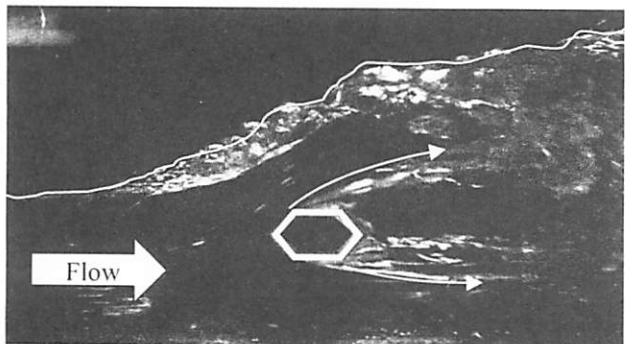


写真-11 六角形断面の流況 (津波作用後1.0s)

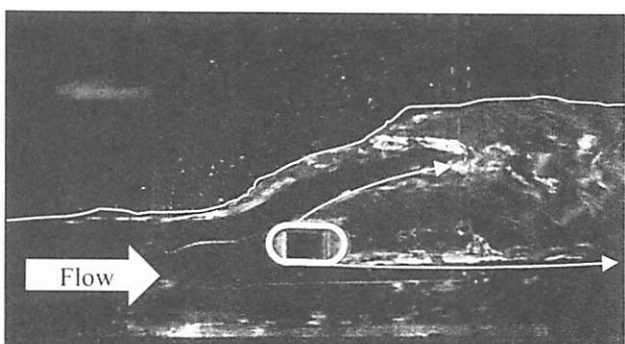


写真-12 半円断面の流況 (津波作用後1.0s)

半円断面では、上下面の剥離ははっきりと確認することができなかった(写真-12)。図-4、図-6、図-8より、津波作用力も他の模型と比べると小さいため、橋桁の津波作用力の軽減に関しては最も適した断面だと言える。

4. 結論

本研究では橋桁の断面形状が津波の作用力に与える影響について、水理実験を行い検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 水平方向の津波作用力に関して、フェアリングは津波作用力を軽減することがわかった。
- ② 穴あき断面は他の断面と比べると、鉛直方向の津波作用力の最大値と最小値が小さいことがわかった。
- ③ 台形断面の流況から、模型の下面は両端部分を鋭角にすることで、剥離による津波作用力の影響を軽減させることがわかった。
- ④ 穴あき断面の津波作用直後の流況では模型の穴あき部からも剥離が生じることがわかった。
- ⑤ 津波作用後1.0sの流況ではすべての模型の上下面に剥離を確認することができた。
- ⑥ 六角形断面、半円断面では波が下流側に流れやすくなり、鉛直方向の力が軽減された。
- ⑦ 半円断面の津波作用力は他の模型と比べると小さい。模型上下面の剥離も小さいため、橋桁の津波作用力の軽減に関しては最も適した断面だと言える。

謝辞：本研究の実施にあたっては、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) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1999。
- 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) 日下部毅明，渋谷研一，片岡正次郎：津波による道路施設の被災度と経済的損失の設計手法に関する現況等の調査と基礎的検討，国土技術政策総合研究所資料，pp. 35-45，2006。
- 4) 片岡正二郎，鶴田舞，長屋和宏，日下部毅明，小路泰広：道路施設の地震・津波被害想定と対策検討への活用方針，土木学会地震工学論文集，pp. 918-925，2007。
- 5) 幸左賢二，二井伸一，庄司学，宮原健太：スマトラ沖地震に伴う津波による橋梁の被害分析，構造工学論文集，Vol. 56A，pp. 454-463，2010。
- 6) 薄井稔弘，運上茂樹，杉本健：津波に対する道路橋の被害軽減に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol. 56A，pp. 464-473，2010。
- 7) 二井伸一，幸左賢二，庄司学，木村吉郎：津波形状の違いによる橋梁への津波作用力に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol. 56A，pp. 474-485，2010。
- 8) 鳴原良典，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，地震工学論文集，土木学会，Vol. 30，pp. 899-904，2010。
- 9) 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，土木学会地震工学論文集，Vol. 30，pp. 914-920 (CD-ROM)，2009。
- 10) 中尾尚史，伊津野和行，小林紘士：橋梁基本断面に作用する流体力と流速・波高の関係に関する基礎的検討，構造工学論文集，Vol. 55A，pp. 564-575，2010。
- 11) 張広鋒，薄井稔弘，星隈順一：津波による橋梁上部構造への作用力の軽減対策に関する実験的研究，土木学会論文集A1，Vol. 66，No. 1，pp. 425-433，2010。