

4 主桁プレートガーダー橋の津波対策に関する実験的研究

伊津野 和行¹・川崎 佑磨²・生島 直輝³・山中 拓也⁴・四井 早紀⁵

¹フェロー会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 草津市野路東1-1-1）

¹正会員 工博 立命館大学助教 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 草津市野路東1-1-1）

¹非会員 戸田建設株式会社（〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1）

¹非会員 前田建設工業株式会社（〒101-0064 東京都千代田区猿樂町2-8-8）

¹非会員 京都大学大学院（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂）

1. はじめに

2011年東日本大震災では、多くの橋が津波によって流出した。橋の流出は、貴重な社会資本の損失であるのみならず、被災地における復旧・復興の遅れにも影響する。2004年インド洋大津波によるインドネシアにおける橋の流出を受け、日本でも数多くの研究が開始された。

しかし、まだ津波対策の基準は制定されておらず、各機関で実験や数値シミュレーションが行われている状況である（例えば最近だけでも参考文献1）～7）など）。発生させる波の種類や桁断面形状が異なり、得られている津波力にもばらつきがある。まだ津波設計力の設定までには至っていない。

本研究では、4主桁断面プレートガーダー橋を対象とし、側面にいくつかの形状をもった整流板を取り付けたモデルを用いて水理実験を行い、津波力の軽減効果について考察した。他機関でも桁側面に三角形状のフェアリングを設置した場合の効果について実験的に検討されており、最適な角度や大きさについて提案されている⁸⁾。よって本研究では、種々の形状をした整流板を用いた実験を行った。

また、津波による漂流物の影響についても検討を加えた。1952年3月6日の十勝沖地震では、北海道厚岸郡浜中町の霧多布などが、津波とともに流されてきた流氷による被害を受けた⁹⁾。東日本大震災でも河川を遡上した津波が氷板を運んできた事例が報告されている¹⁰⁾。本研究では、小さな氷塊を流して、整流板形状の違いによる橋桁モデルへの衝突状況の違いについて考察した。

2. 実験概要

(1) 実験水路

本研究では図-1に示す水路を用いた。貯水槽は幅200mm×長さ4000mmで、ゲートを急に引き上げることで、幅200mm×長さ4000mmの水路に、段波状の津波を模擬した水を流す。図-2のように、ゲートから3000mmの位置に桁下空間40mmで桁モデルを設置した。模型は6分力計ロードセルで支持し、水平力、鉛直力、回転力を100Hzサンプリングで測定した。高周波ノイズを除去するため、模型の固有振動数以上をカットする15Hzのローパスフィルターをかけた。

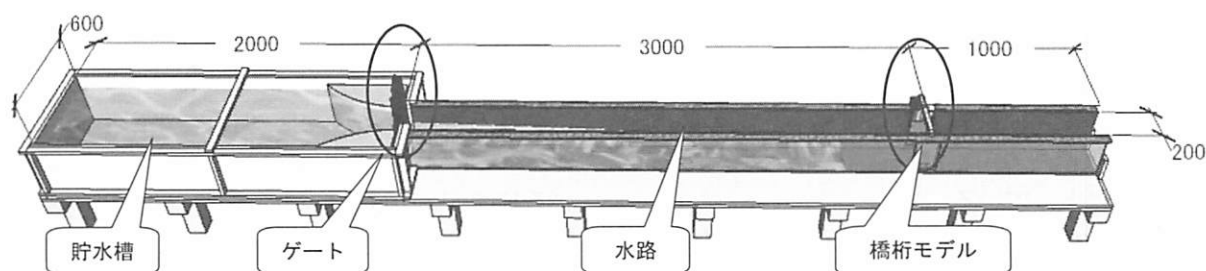


図-1 実験水路の概要

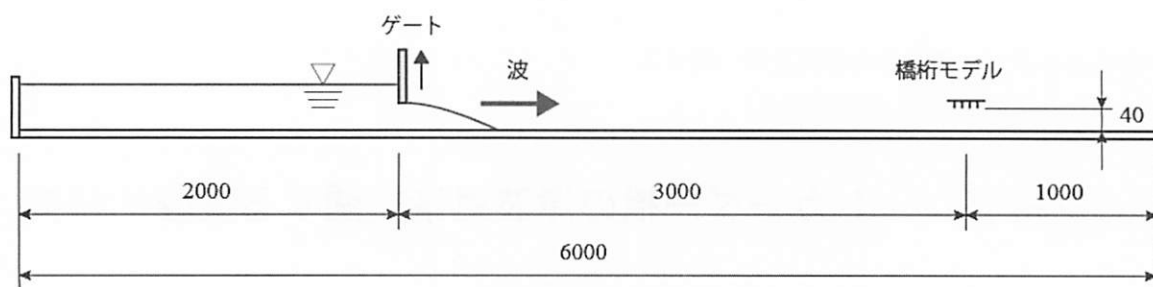


図-2 実験水路の側面図

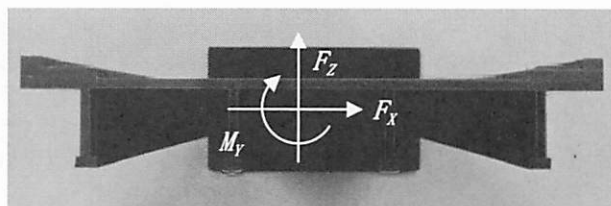
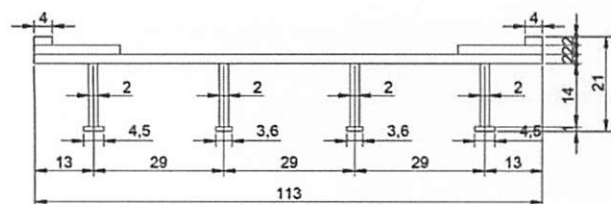
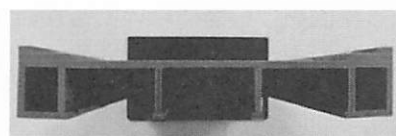
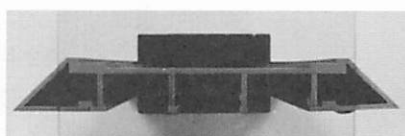


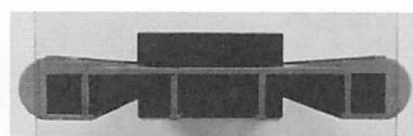
図-3 基本断面：4主桁モデル



(a) 四角形整流板

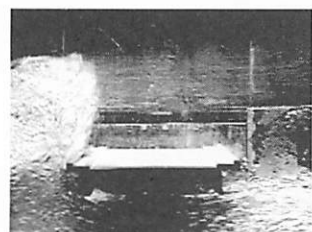


(b) 三角形整流板

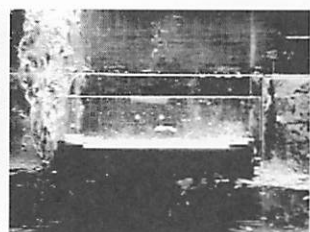


(c) 半円形整流板

図-4 整流板を設置した桁断面



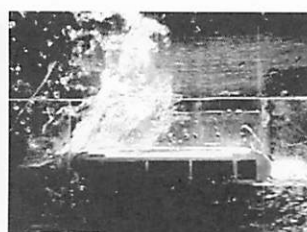
(a) 基本断面



(b) 四角形整流板



(c) 三角形整流板



(d) 半円形整流板

図-5 波が模型に到達した直後における流れの状況

貯水槽の初期水位は250mmとした。この場合、桁模型を置かずに水を流すと、桁模型位置において水路の底から67mmの水位になる。桁模型全体が水没する水位である。

(2) 橋桁モデル

4主桁プレートガーダー橋の断面を、図-3のようにモデル化した。波は図の左から右へと流れる。縮尺は、全幅員11m程度の実橋を想定すれば約1/100となる。この模型を以下「基本断面」と呼ぶ。測定した水平力、鉛直力、回転力の正方向も、この図に記している。回転力の中心は、模型を支持しているロードセルの軸としている。

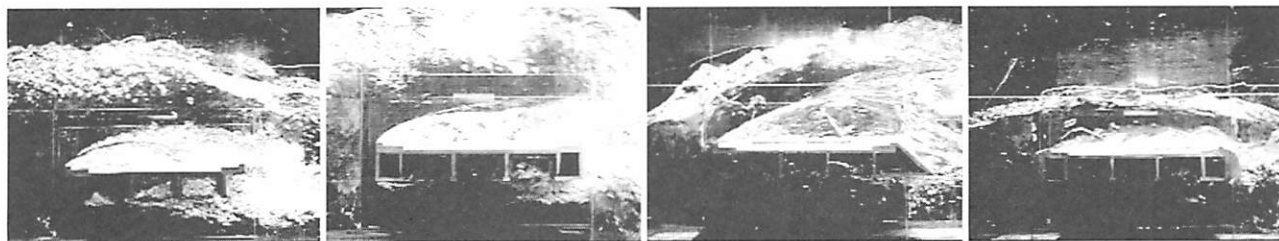
図-3の模型側面に3種類の整流板を設置した。図-4(a)の四角形、図-4(b)の三角形、図-4(c)の半円形である。

3. 実験結果と考察

(1) 桁周辺流れ

図-5に、波が作用した直後の写真を示す。図5-(a)の基本断面と、図5-(b)の四角形整流板では、桁に当たった波がほぼ垂直に上がっている。一方、図5-(c)の三角形整流板と、図5-(d)の半円形整流板では、斜めに波が成長している。

図-6は、波が模型に到達して5秒後の写真である。津波作用後、ある程度一定の力が作用している状態における流れである。図-6(d)の半円形整流板以外の3ケースでは、上流側の角部から流れが剥離している様子がわかる。一方、図-6(d)半円形整流板では、剥離が少ないこともあって、I桁とI桁との間の空間に水が流れ込んでおり、後述する波による力の時刻歴に影響を与えている。



(a) 基本断面

(b) 四角形整流板

(c) 三角形整流板

(d) 半円形整流板

図-6 波が模型に到達して5秒後における流れの状況

表-1 桁に作用する力の最大・最小値

		基本 断面	四角形 整流板	三角形 整流板	半円形 整流板
抗力 F_x (N)	最大値	6.95	6.70	3.30	2.95
	(比)	1	0.96	0.47	0.43
揚力 F_z (N)	最大値	3.75	0.03	0.03	1.05
	(比)	1	0.01	0.01	0.28
	最小値	-6.56	-6.70	-9.32	-6.37
	(比)	1	1.02	1.42	0.97
モーメント M_y (N.m)	最大値	0.08	0.02	0.00	0.01
	(比)	1	0.19	0.01	0.17
	最小値	0.00	-0.02	-0.21	-0.06
	(比)	1	6.04	70.82	19.95

また、どのケースも上流側の水位が高くなっており、桁の存在によって流れが阻害されていることがわかる。上流側水位がもっとも低いのは、図-6(d)の半円形整流板であった。

(2) 桁に作用する波の力

図-7～図-9に、桁模型に作用する力の時刻歴波形を示す。図-7が抗力（水平力） F_x 、図-8が揚力（鉛直力） F_z 、図-9が流力モーメント（回転力） M_y である。表-1に各ケースの最大・最小値と、基本断面に対する比を示す。

図-7より、基本断面がもっとも大きな抗力を示し、四角形整流板を取り付けた場合もほぼ同じ値であることがわかる。三角形整流板や半円形整流板を取り付けると、抗力が約半分になった。これは一般的な形状の抗力係数の大小関係から類推される結果である。抗力の軽減には、三角形あるいは半円形の整流板の効果が大きい。

図-8の揚力 F_z は、桁に波が到達して抗力が大きくなるのと同時刻に大きくなり、すぐに最大値に達した。これは、図-10のように耳桁外側の隅角部に波が斜め上向きに作用するためと考えられる。

整流板は、この弱点とも言える隅角部を防ぐことにもなり、どの整流板も初期における正方向の揚力がほとんど作用しなくなる。ただし、半円形の整流板を設置した場合、I桁とI桁の間に入った波によって、波が到達して5秒ほどしてから揚力が作用することになった。しかしその値は、基本断面の最大揚力の1/4にすぎない。

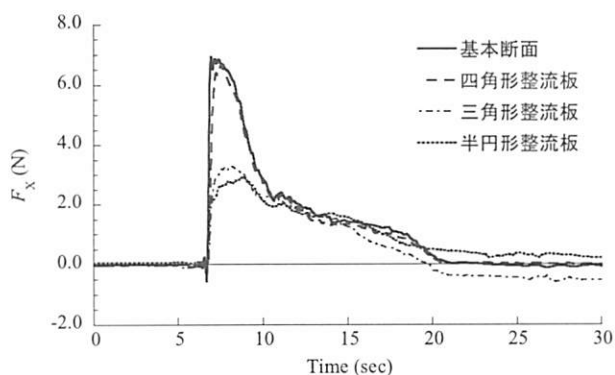


図-7 抗力の時刻歴

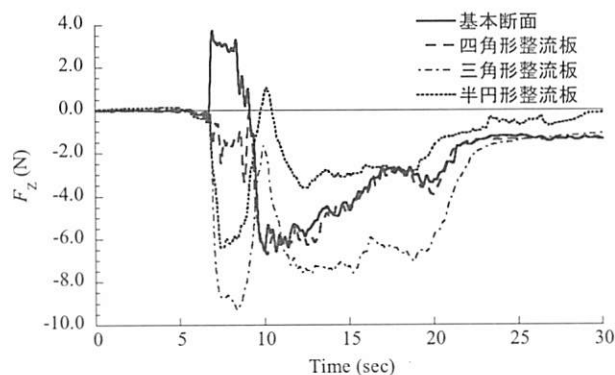


図-8 揚力の時刻歴

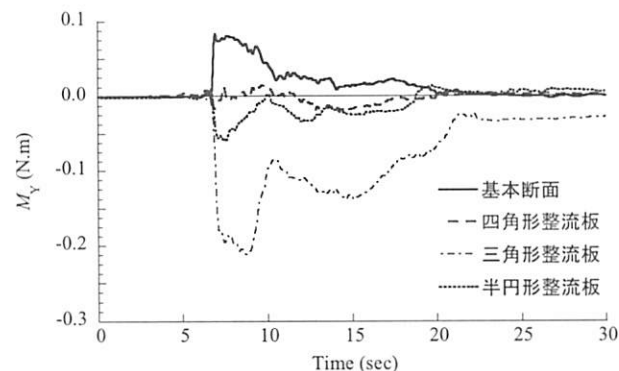


図-9 流力モーメントの時刻歴



図-10 耳桁外側に作用する力

一方、図-8の負の揚力（上から下向きの値）は、四角形や半円形の整流板を設置しても基本断面とほぼ同じ最小値（負の最大値）になる。三角形の整流板を設置した場合には大きくなり、基本断面の約1.4倍になる。張り出した斜めの整流板に波が作用するために、下向きの大きな力が作用したためである。

図-9の流力モーメント M_y は、基本断面では時計回り（桁の上流側が上に上がる方向）になる。これは、揚力で説明した図-10に示す力の作用で説明できる。実橋では、このモーメントによって桁が回転し始めれば抗力を受ける面積がさらに広くなり、より流出しやすくなる。三角形整流板や半円形整流板を設置した場合には、逆に反時計回りの流力モーメントが作用した。特に三角形整流板を設置した場合には大きな反時計回りのモーメントが発生するため、下流側の支承が浮き上がる可能性がある。四角形整流板を設置した場合には、ほとんど流力モーメントが作用しなかった。桁上流側で剥離した波は、ほぼ真上から桁に落下し、回転力を生じさせなかった。

(3) 支承反力に関する考察

実験では桁模型をロードセルで支持したが、実橋では各1桁の下部が支承で支持されている。そこで、前節に示した抗力・揚力・流力モーメントが作用した場合、支承の反力がどの程度になるのか計算することにした。ただし、実験は二次元模型であり橋軸方向のことを考慮していないため、1支承線に作用する津波外力を算出することはできない。そのため前節に示した津波外力が1支承線に作用したときの値を計算して示すこととし、絶対値ではなく基本断面に対する相対値をもって考察することとした。ここでは、図-11に示す上流側支承反力 R_1 と、下流側支承反力 R_4 について検討した。

桁が十分な剛性を有している場合、鉛直反力はそれぞれ次式で計算できる。

$$R_1 = -\frac{3H}{10L}F_x - \frac{3}{10L}M_y - \frac{1}{4}F_z \quad (1)$$

$$R_4 = \frac{3H}{10L}F_x + \frac{3}{10L}M_y - \frac{1}{4}F_z \quad (2)$$

ここで、 L （=30mm）は図-13に示すとおり隣接する1桁間の距離、 H （=10.5mm）はロードセルの軸から1桁下部（支承位置）までの距離である。

図-12が上流側支承の鉛直反力 R_1 の、図-13が下流側支承の鉛直反力 R_4 の、それぞれ時刻歴波形である。表-2にそれぞれの最大・最小値と、基本断面における値に対する比を示す。水平反力は図-7の抗力に比例するため、表-2には抗力の最大・最小値も示した。

図-12と表-2より、基本断面の上流側支承反力 R_1 が、もっとも大きな負反力を示すことがわかる。水平力も基本断面がもっとも大きい。一方、図-13より下流側支承反力 R_4 は、ほぼ正の値で終始する。支承は一般的に、正の反力（圧縮）より、負反力（引張）や水平力（せん断）に対して脆弱だと考えられ

るため、これらの値をどの程度低減できるかによって、整流板の効果を示すことができる。

四角形整流板は、上流側支承反力 R_1 の引張側（負値）を、基本断面の1/5に抑えている。ただし、圧縮側（正值）は1.3倍になる。下流側支承反力 R_4 、および水平力 F_x は、基本断面とほぼ同じになる。

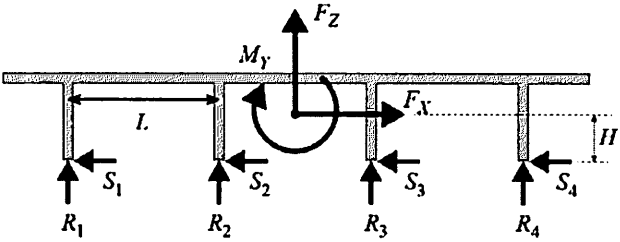


図-11 支承反力

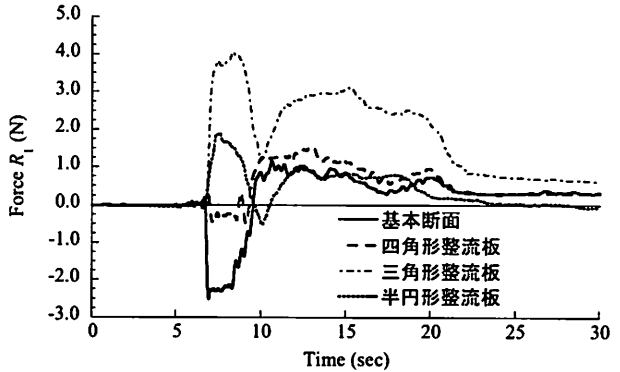


図-12 上流側支承の鉛直反力

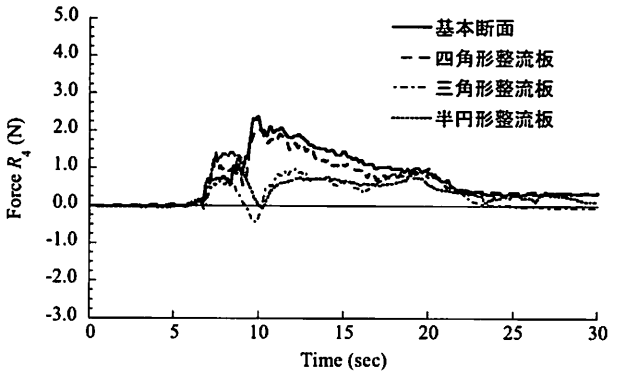


図-13 下流側支承の鉛直反力

表-2 支承反力の最大・最小値

		基本 断面	四角形 整流板	三角形 整流板	半円形 整流板
上流側 支承鉛 直反力 R_1 (N)	最大値	1.16	1.53	4.05	1.91
	(比)	1	1.31	3.48	1.64
	最小値	-2.50	-0.49	-0.01	-0.52
下流側 支承鉛 直反力 R_4 (N)	最大値	2.38	2.08	1.01	1.44
	(比)	1	0.87	0.43	0.60
	最小値	-0.03	0.00	-0.45	-0.06
水平力 F_x (N)	最大値	6.95	6.70	3.30	2.95
	(比)	1	0.96	0.47	0.43

よって、上流側支承反力の引っ張りに対する安全性向上のみに効果があると言える。

三角形整流板は、上流側支承反力 R_1 を常に正の値に保つことができる。ただし、圧縮力（正值）は基本断面の3.5倍になる。また、水平力 F_x は基本断面の半分になり、支承のせん断に対する安全性を向上させることができる。しかし、他のケースと異なり、下流側支承反力 R_4 に負反力が生じることに注意を要する。その値は、基本断面の上流側支承に作用する負反力に比べると約1/5であり、四角形整流板や半円形整流板を設置した場合の上流側支承に作用する負反力とほぼ同程度である。よって、上流側支承が大きな圧縮力の作用に耐えられるのであれば、三角形整流板を設置することには効果がある。

半円形整流板は、基本断面に比べて上流側支承反力 R_1 の最大値は、正值（圧縮）が1.6倍、負値（引張）が1/5になる。下流側支承反力 R_4 はほぼ正值（圧縮）のままであり、その最大値は基本断面の6割である。水平力 F_x は基本断面の約半分になる。よって、本研究で用いた桁モデルと流れに対しては、半円形整流板を設置することが、支承の安全性を向上させるためにはもっとも効果的だと言える。

(4) 漂流物が桁に与える影響

津波で運ばれてくる漂流物は、時には橋に対する大きな外力となる。ここでは、漂流物が外力としての方向成分に大きな影響を与え、どの形の整流板が効果的なのか調べるために基礎的な実験を行った。簡易に実験することを考え、製氷皿で作った3cm角の氷を流すこととした。相似則は考慮していないため、絶対値の比較ではなく、漂流物の有無による相対比較を行った。なお、氷を流しても波の形状にはほとんど影響がないとされている¹¹⁾。

図-15～図-17に桁モデルに作用する力の時刻歴波形を示す。図-15が抗力（水平力） F_x 、図-16が揚力（鉛直力） F_z 、図-17が流力モーメント（回転力） M_y である。これらの計測結果には、前述の通り模型の固有振動数以上をカットするローパスフィルターがかけられているため、氷が当たった瞬間のパルス的な衝撃力はあまり現れていない。氷がない場合とある場合とで、図-7と図-15、図-8と図-16、図-9と図-17をそれぞれ比較すると、もっとも違いが見られるのは図-8と図-16の揚力である。

図-15の抗力 F_x は、氷が最初に当たる瞬間には衝撃的な力を桁に与えるが、その大きさは流体力の最大値に比べると小さく、桁上流側の側面に作用するだけなので個々の衝突時間も短い。水位が上がって氷が側面に当たりやすい状況になると、今度は波が桁の上流端で剥離し始めるため、流れは桁の上下に分かれて流れ始める。水とともに流れる氷も桁の上下に分かれて流れ、桁に真横から当たりにくくなる。漂流物が桁に引っかかれば状況は異なるが、そうでない場合、桁本体への抗力の影響は少ないことが考えられる。

しかし、東日本大震災の津波で高欄が損傷した橋

が多く見られたように、剥離した波によってもたらされる漂流物の水平力は、桁上部にある付属構造物へは大きな影響を与えることが推察される。

図-16の揚力 F_z は、グラフの7～10秒で細かい振動が生じている。4本のI桁下部に氷が当たりながら流れていった影響である。水位が低い間はI桁の下部に氷が当たり、その後高欄や耳桁外側にも当たるようになる。三角形整流板を設置したケースでは、グラフの10秒以降で下向きの力が大きくなった。氷が三角形整流板の上面に当たりながら流れた影響だと考えられる。本実験のように漂流物が三角形整流板に乗り上げる形で通過する場合、その影響を受けやすいと考えられる。

図-17の流力モーメント M_y は、氷が当たった瞬間の振動が見られる以外、あまり氷の影響がない結果となった。

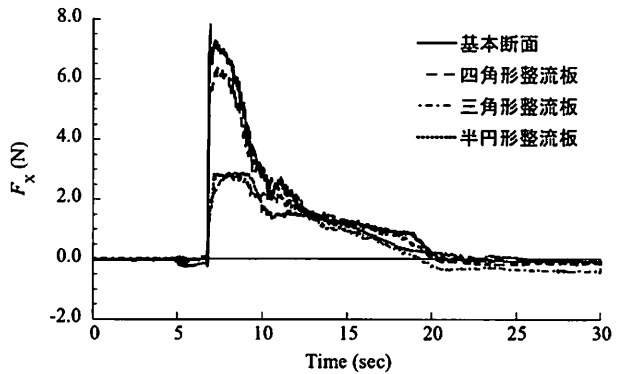


図-15 氷を流した場合の抗力

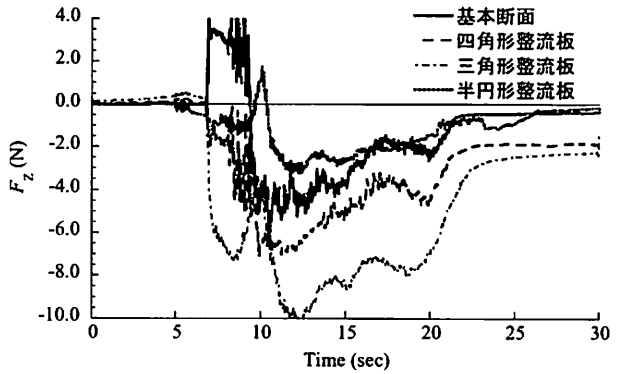


図-16 氷を流した場合の揚力

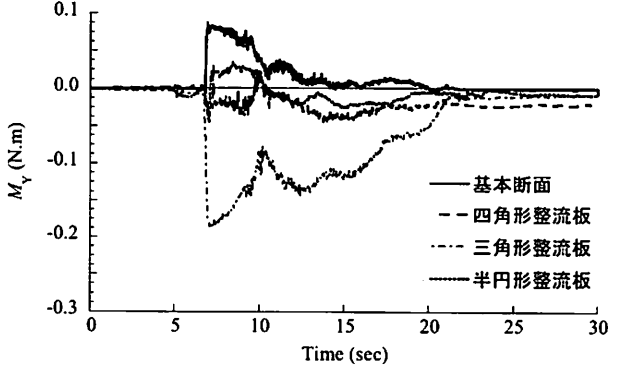


図-17 氷を流した場合の流力モーメント

以上より、氷の有無は揚力に影響を与えることと、三角形整流板が影響を受けやすいことがわかった。今後、相似則を考慮に入れた漂流物の種類や大きさ、作用確率などを考えた詳細な検討が望まれる。

4. おわりに

本研究では、4主桁橋断面を対象として、桁側面に整流板を取り付けることによって段波状の波に対する安全性向上を図った。また、氷を水とともに流した実験も行い、漂流物の桁衝突の影響について考察した。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 4主桁橋断面（以下、基本断面）は、耳桁の外側に作用する斜め上向きの波により、水平力（抗力）と上向きの鉛直力（揚力）、および、上流側を上向きに移動させようとする向きの回転力（流力モーメント）を受ける。実橋においては、上流側支承に負反力が作用することになり、支承破壊と桁流出につながる可能性がある。
- 2) 桁側面に整流板を取り付けることにより、耳桁の外側に作用する波を遮って、大きな揚力が作用することを防ぐことができる。四角形の整流板では、抗力を軽減することはできないが、上流側支承の負反力は1/5に抑えることができる。
- 3) 三角形の整流板を取り付けることにより、上向きの鉛直力は作用しなくなり、抗力も約半分になる。しかし、下向きの鉛直力は基本断面の1.4倍になり、回転力の方向が基本断面とは逆になる。このことから、上流側支承の正反力が基本断面の3.5倍に増加し、下流側支承に負反力が作用することになる。しかし、下流側支承の負反力は基本断面の上流側支承に作用する負反力に比べると約1/5であり、上流側支承が大きな圧縮力の作用に耐えられるのであれば、三角形整流板を設置することには効果がある。
- 4) 半円形の整流板を取り付けることにより、基本断面に比べて揚力は1/4、抗力は1/2になる。これにともない、上流側支承の負反力は1/5、正反力は1.6倍になり、下流側支承にはほとんど負反力が生じない。本研究で用いた桁モデルと流れに対しては、半円形整流板を設置することが、支承の安全性を向上させるためにはもっとも効果的だと言える。
- 5) 津波漂流物を模擬した氷を流した実験からは、揚力への影響があることがわかった。三角形整流板を設置した場合には、整流板に作用する氷の力により整流板を下に抑える力が大きくなった。他の桁断面においては、氷が作用した際の振動が見られる以外、影響は小さかった。

謝辞：本研究は、立命館大学「東日本大震災に関する研究推進プログラム」からの補助を受けた。また、本研究の実施にあたり、独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センターの中尾尚史専門研究員から実験に関する助言をいただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中村友昭，水谷法美，Xingyue Ren：橋桁への作用する津波力と桁の移動に与える津波力の影響に関する数値解析，土木学会第32回地震工学研究発表会講演論文集，論文番号5-225，2012。
- 2) 中尾尚史，張広鋒，炭村透，星隈順一：上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響，土木学会第32回地震工学研究発表会講演論文集，論文番号5-246，2012。
- 3) 炭村透，張広鋒，中尾尚史，星隈順一：津波によって橋に生じる作用に対する鋼製支承の抵抗特性に関する実験的検討，土木学会第32回地震工学研究発表会講演論文集，論文番号5-261，2012。
- 4) 片岡正次郎，金子正洋，松岡一成，長屋和宏，運上茂樹：上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析，土木学会第32回地震工学研究発表会講演論文集，論文番号5-349，2012。
- 5) 糸永航，中尾尚史，伊津野和行，小林紘士：鉸桁橋に対する津波の作用力に関する実験的研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 68，No. 4，p. I_1126-I_1133，2012。
- 6) 庄司学，平木雄，江面嘉之，飯高稔，藤間功司，鳴原良典：橋桁に作用する津波波力の水平成分と鉛直成分の発生メカニズムに関する実験的考察，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 68，No. 4，p. I_1134-I_1144，2012。
- 7) 中尾尚史，糸永航，野阪克義，伊津野和行，小林紘士：矩形断面桁に作用する津波の圧力特性に関する実験的研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 68，No. 4，p. I_1145-I_1150，2012。
- 8) 張広鋒，薄井稔弘，杉本健，星隈順一，運上茂樹：津波が橋に及ぼす影響とその軽減対策に関する実験的研究，土木学会性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム論文集，Vol. 14，pp. 119-124，2011。
- 9) 十勝沖地震調査委員会：十勝沖地震調査報告，地震篇，日本災害資料集・地震編，第6巻，クレス出版，p. 277，2012。
- 10) 阿部孝章，吉川泰弘，安田浩保，平井康幸：2011年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 68，No. 4，pp. I_1525-I_1530，2012。
- 11) 阿部孝章，吉川泰弘，平井康幸，伊藤丹：波状段波により輸送される河道内氷板の挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 69，No. 4，pp. I_919-I_924，2013。