

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

張 広鋒¹・薄井 稔弘²・杉本 健³・星隈 順一⁴・運上 茂樹⁵

¹正会員 博(工) (独) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 研究員 (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

²正会員 本州四国連絡高速道路株式会社 神戸管理センター橋梁維持課 (〒655-0852 神戸市垂水区名谷町 549)

³正会員 本州四国連絡高速道路株式会社 企画部道路経済課 (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通 4-1-22)

⁴正会員 博(工) (独) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員 (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

⁵正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター 地震災害研究官 (〒305-0804 つくば市旭 1)

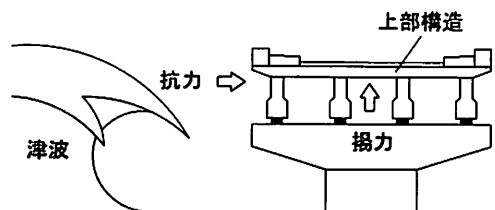
1. はじめに

2011年3月の東北地方太平洋沖地震では、津波により橋が流出する被害が生じたところであるが、我が国では、2004年のインド洋津波をきっかけとして、津波による橋梁構造物の被災メカニズムの解明、橋梁構造物に与える津波作用力の評価等に関する研究が本格的にスタートしているところである^{例え、1)~4)}。その中、著者らの研究グループは、2004年のインド洋津波より被災を受けた橋梁を対象とし、被災メカニズムの解明や津波作用力の把握を目的とした水路実験及び数値解析シミュレーションを実施してきている^{5),6)}。さらに、これらの研究成果に基づき、橋梁構造物への津波作用力を軽減させるための簡易な対策の提案も試みた。

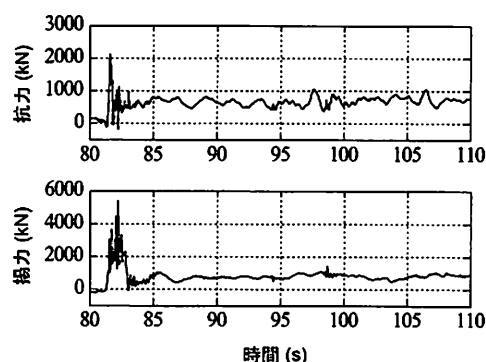
本論文は、今までに著者らが実施した実験的な研究において、橋梁上部構造への津波作用力に及ぼす津波高や水深の影響を把握するための検討結果、提案している津波作用力の軽減対策の概要およびその軽減効果を検証するための検討結果を報告するものである。

2. 津波作用力の特性とその軽減対策の一提案

津波による橋梁上部構造への作用力は、水平方向（抗力）と鉛直方向（揚力）の2方向に発生する。図-1に、橋梁上部構造への津波作用力の一例を示す。図に示すように、津波作用力は、衝突時に生じる衝撃的な力と衝突後の一定時間に継続的に作用する定常的な力が存在することが分かる。津波襲来時の橋梁上部構造は、揚力によって持ち上げられながら、抗力によって水平方向に押され、また、衝突時に瞬間的に衝撃的な外力を受け、その後も継続的に外力を受けることが考えられる。



(a) 橋梁上部構造への津波作用力



(b) 抗力と揚力の時刻歴の一例

図-1 橋梁上部構造への津波作用力の一例

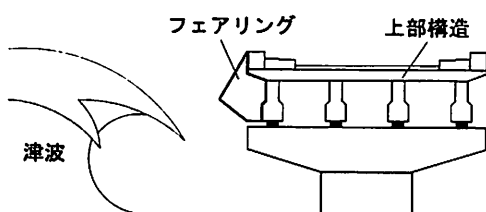
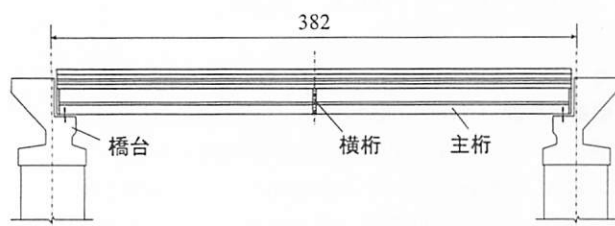


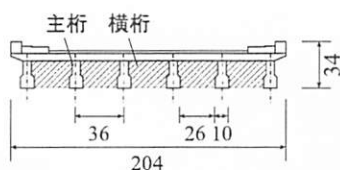
図-2 考案の軽減対策のイメージ図



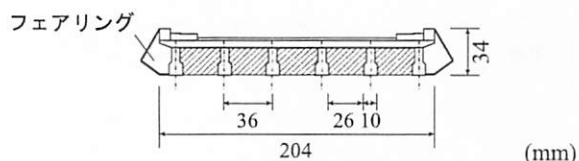
図-3 実験に用いた水路の概要図



(a) 側面図



(b) 断面図 (フェアリングなし)



(c) 断面図 (フェアリングあり)

図-4 実験対象の橋梁模型

津波による橋梁構造物の被害を軽減させるためには、津波作用力に対する橋梁構造物の抵抗力を向上させる方法や、津波作用力そのものを軽減させる方法等が考えられる。本研究では、津波作用力を軽減させる方法に着眼し、簡易な軽減対策を考案することとした。図-2に、考案している津波作用力の軽減対策のイメージ図を示す。本対策は、従来耐風分野で主に長大橋の制振対策として用いられているフェアリングに着目し、橋梁上部構造の側面（津波の作用面）にフェアリングを取り付けることによって、上部構造への津波作用力を軽減させることを図れないかという着想に基づくものである。もともと複雑な断面形状を持つ津波作用面は、フェアリングを取り付けることによって2つの斜面を有する単純な形状となり、津波波力に対する抵抗を小さくしようとするものである。

本研究では、軽減対策の提案に向けた第1歩として、小型の橋梁模型に対する水路実験に基づき、フェアリングによる津波作用力の軽減効果の確認およびその軽減効果に及ぼすフェアリングの形状の影響に関する検討を行うこととした。

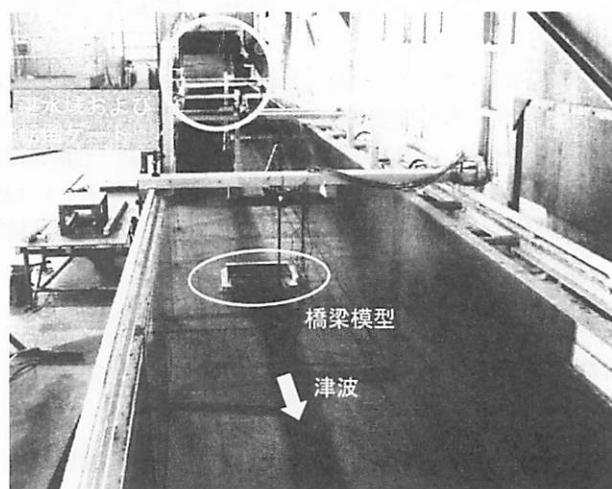


図-5 水路実験の状況写真

3. 水路実験の概要

(1) 実験対象と実験方法

図-3に、実験に用いた水路の概要図を示す。水路は長さ20m、幅1m、高さ0.8mである。実験では、2004年のインド洋津波より被害を受けた Lueng Ie Bridge の縮小模型を対象とした。本橋梁は、橋長19.1mのRC単純桁橋で、津波によって上部構造が橋軸直角方向に約3mの移動が生じた⁷⁾。図-4に橋梁模型の概要図を示す。模型の縮尺は、実験に用いた水路の寸法及び水路における津波の造波高さを考慮して1/50とした。図-4(b)、(c)にフェアリングを取り付ける前と取り付け後の断面図を示す。図-5に実験のセットアップ状況写真を示す。

本実験に用いた模型と実橋梁間の相似則については、粘性の影響より重力の影響が卓越することを考慮し、レイノルズ数を考慮せずにフルード数のみを満足させることとした⁸⁾。フルード相似則により、実橋梁の津波高と津波波力は、式(1)と式(2)を用いて計算できる。

$$H_R = \frac{H_m}{\lambda} \quad (1)$$

$$P_R = \frac{P_m}{\lambda^3} \quad (2)$$

表-1 実験ケースの一覧

実験目的と 実験ケース数	実験パラメータ		
	水深 (m)	津波高 (m)	フェアリング の形状
津波作用力に及ぼす 津波高と水深の 影響	1.0	3.0	-
	1.5	5.0	
	2.0		
	2.5		
実験ケース数：10	3.0		
フェアリングによ る津波作用力の低 減効果	3.0	3.0 5.0	$H_h/D = 0.25, 0.50,$
			$0.75, 1.00$
			$H_v/D = 0.00, 0.25,$
			$0.50, 0.75,$
実験ケース数：40			1.00
			計：20 ケース

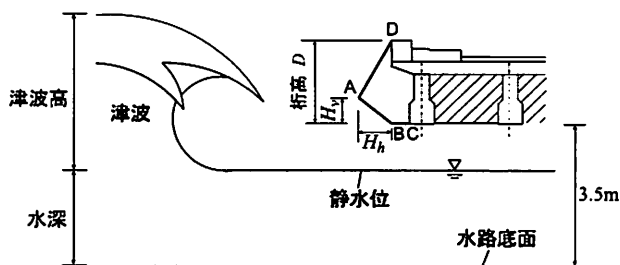
ここに、 H_m 、 P_m は模型の津波高と津波波力、 H_R 、 P_R は実橋梁の津波高と津波波力、 λ は縮尺である。以下の検討では、実橋梁規模における比較検討を行いやすくなるため、これらの式を用い、津波高や津波波力等を全て実橋梁規模に換算して示している。

実験では、湛水域のゲートを転倒させて生じた段波形状の津波を用い、転倒ゲートから 7.5m のところに設置している橋梁模型に衝突させることにより、衝突時および衝突後の一定継続時間における模型桁への津波作用力である抗力と揚力を計測した。抗力及び揚力の時刻歴は、桁下に設置している分力計によって記録した。計測時のサンプリング周波数は 500 Hz とした。分力計は、水槽の底面に固定し、取付治具を用いて模型の桁と連結させた。

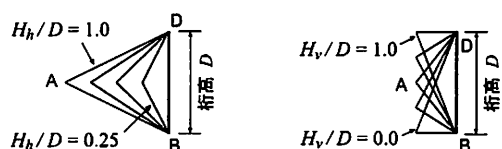
なお、実験に先立ち、模型設置地点における所定の津波高が得られるように、橋梁模型の上流側 2 m と 4 m のところ、橋梁模型の上方の計 3 箇所に波高計を設置し、津波高と湛水深の関係を事前にキャリブレーションした。実験時では、このキャリブレーション結果を用い、所定の津波高に応じた湛水深を決定した。

(2) 実験ケース

表-1 に実験ケースの一覧を示す。津波作用力に及ぼす津波高と水深の影響を検討するためには、水深を 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m の 5 ケースとし、各ケースに対してそれぞれ津波高を 3.0 m と 5.0 m の 2 ケースを実験した。フェアリングによる津波作用力の軽減効果を検討するためには、フェアリングの形状と津波高をパラメータとし計 40 ケースを実験した。図-6 に各実験ケースのイメージ図を示す。ここで、図-6(b) に示すように、検討では、フェアリングの頂点 A の B 点に対する水平方向の位置 H_h 及び鉛直方向の位置 H_v を変化させることによって各実験ケースを設定した。具体的には、 H_h/D を 0.25、0.50、0.75 および 1.0 の 4 ケース、 H_v/D を 0.0、



(a) 水深と津波高



(b) フェアリングの形状

図-6 実験ケース

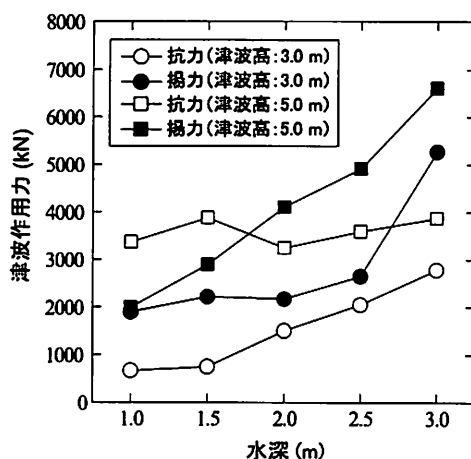


図-7 津波作用力に及ぼす津波高と水深の影響

0.25、0.50、0.75 および 1.0 の 5 ケースとし、これらの組み合わせの計 20 種類の形状を設けた。また、各形状のフェアリングに対して、津波高 3.0 m と 5.0 m の 2 ケースを実施した。

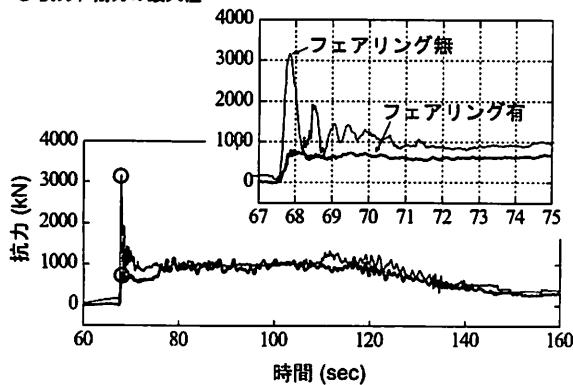
4. 実験結果

(1) 津波作用力に及ぼす津波高と水深の影響

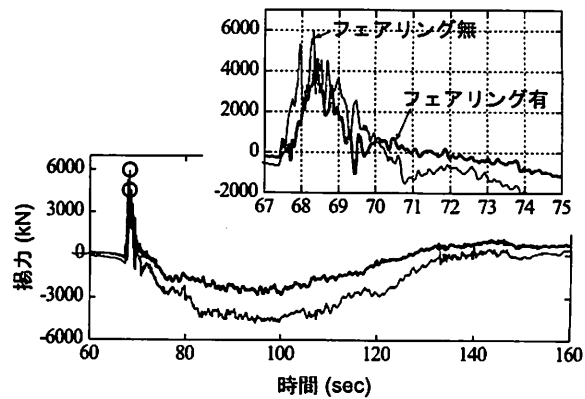
図-7 に、津波作用力に及ぼす津波高と水深の影響を検討するための各実験ケースの最大抗力と最大揚力を示す。ここで、図に示す抗力（白抜き）と揚力（黒塗り）は、いずれも衝突時の波力の最大値である（図-8 を参考）。

図-7 より、津波高 3.0 m の場合と 5.0 m の場合のいずれにおいても、水深が増加して桁下とのクリアランスが狭くなるほど抗力や揚力が概ね増加する傾向が見られる。ここで、クリアランスが 0.5 m となる水深 3.0 m の場合とクリアランスが 2.5 m となる水深 1.0 m の場合の結果を比較すると、水深 3.0 m の場合は、抗力は最大 4

○ 抗力 / 揚力の最大値

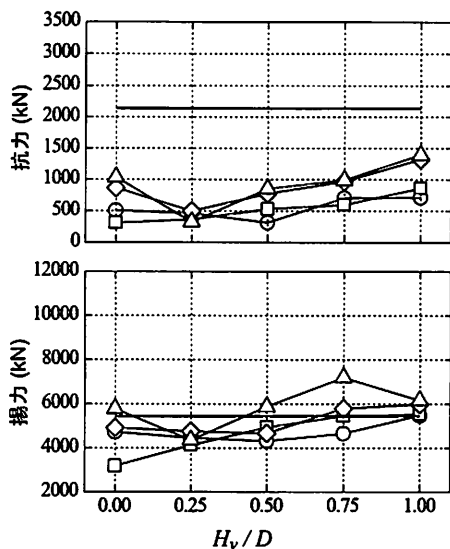


(a) 抗力

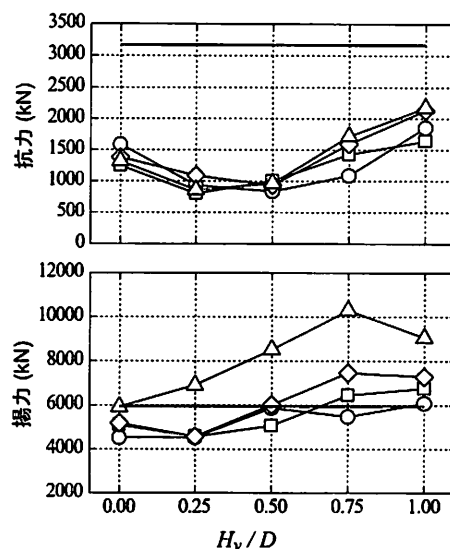


(b) 揚力

図-8 波力の時刻歴の一例 (フェアリング有: $H_h/D = 0.50$, $H_v/D = 0.25$, 津波高 5.0 m)

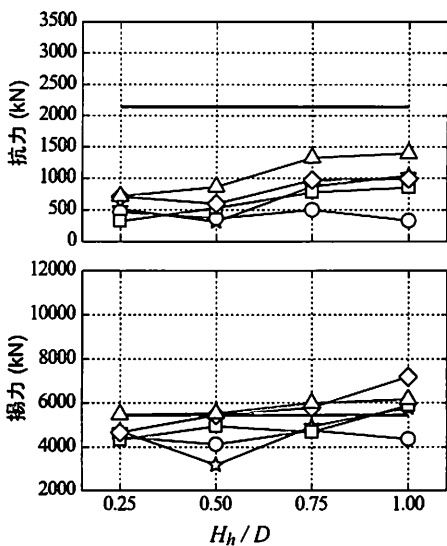


(a) 津波高 3m

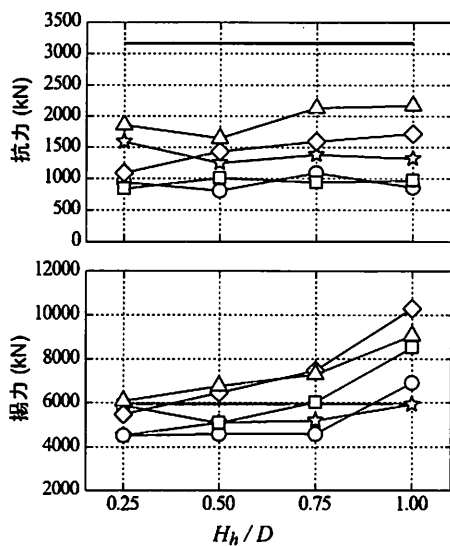


(b) 津波高 5m

図-9 最大波力と H_v/D の関係



(a) 津波高 3m



(b) 津波高 5m

図-10 最大波力と H_h/D の関係

倍程度 (津波高 3.0 m の場合), 揚力は最大 3.3 倍程度 (津波高 5.0 m の場合) 大きくなっていることが分かる。また, 津波高の影響については, いずれの水深において

も, 津波高さが高くなれば抗力や揚力が増加することが分かる。

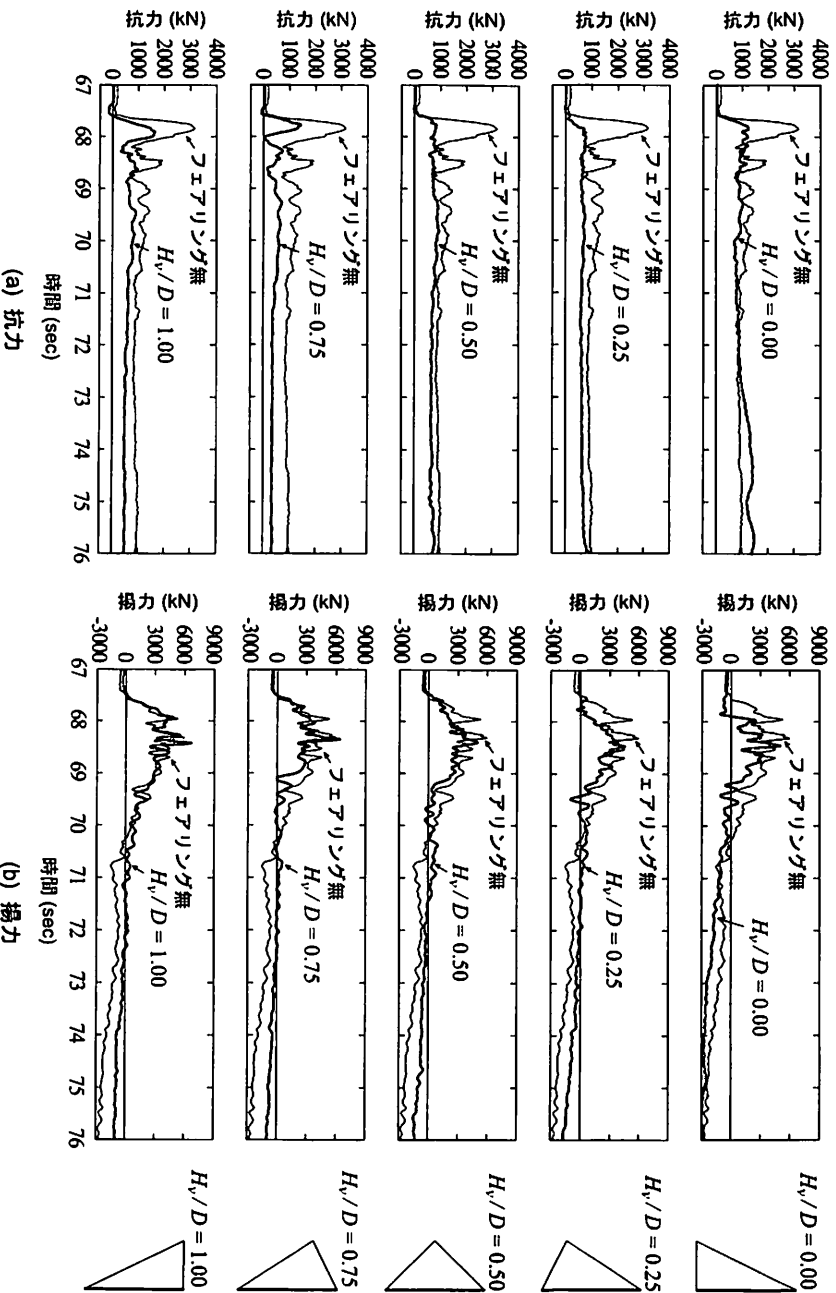


図-11 $H_b/D = 0.50$ の各実験ケースの抗力と揚力の時刻歴 (津波高：5.0 m)

(2) フェアリソングによる津波作用力の軽減効果

図-8 に、一例として、 $H_{b1}/D = 0.50$, $H_b/D = 0.25$, 津波高 5.0 m の場合とフェアリソング無の場合の波力の時刻歴を示す。図-8(a)の抗力の時刻歴については、フェアリソング無の場合は、衝突時に大きなピークが現れ、衝突の直後も抗力の変動が大きく生じていることが見られる。これらの結果と比べ、フェアリソング有の場合は、衝突時に明確なピークが現れず、衝突直後の抗力の変動も少ないことが分かる。また、図-8(b)の揚力の時刻歴については、フェアリソング有の場合はフェアリソング無の場合より最大値が低くなっているが、両者が類似な分布形状を示す。なお、衝突後には両者とも負の値となっている。これは、床版を越流した波の量が多く、下向きの荷重が発生したためである。

図-9, 10 に、フェアリソングの形状を変化させた各実験ケースの最大波力を示す。最大抗力の比較より、1) いずれの実験ケースにおいてもフェアリソングを取り付けることにより最大抗力が大幅に軽減できた。2) $H_b/D = 0.25$ と $H_b/D = 0.5$ の場合はより小さくなる傾向にある。3) 最大抗力に与える H_{b1}/D の影響が少ない。ことが分かる。一方、最大揚力については、フェアリソング有の場合は、フェアリソング無の場合よりも大きくなっているケースがあり、また、津波高が高くなると、このようなケースがさらに増えていくことが見られる。これらのことより、フェアリソングの形状が適切でない場合は、フェアリソング

無の場合より最大揚力が大きくなることもあると言える。なお、図-9, 10 の結果を総合的に考察すると、 $H_{b1}/D = 0.50$, $H_b/D = 0.25$ の場合は、最大抗力と最大揚力とも最も低い値となっていることが分かる。

図-11, 12 に、例として、それぞれ、 $H_{b1}/D = 0.50$ として H_b/D を変化させた各実験ケース、および $H_b/D = 0.25$ として H_{b1}/D を変化させた各実験ケースの波力の時刻歴を示す。まず、抗力については、図-11(a) より、 $H_b/D = 0.00, 0.25, 0.50$ の3ケースは、衝突時の抗力が低く安定な分布性状を示している。これに対し、 $H_b/D = 0.75, 1.00$ の両ケースは、衝突時の抗力の変動が大きく、フェアリソング無の場合と類似な分布性状を示している。 $H_b/D = 0.00$ を除いた各実験ケースは、いずれもフェアリソング無の場合より全体的に低い抗力を示している。なお、図-12(a) に示す各比較図を見ると、いずれの実験ケースにおいても、衝突時の抗力の分布が安定であり、各ケース間の差異も少ないことが見られる。これらのことより、抗力の軽減効果に及ぼすフェアリソングの形状の影響については、フェアリソングの頂点の水平方向の位置 H_{b1}/D の変化より、上下方向の位置 H_b/D の変化による影響が顕著であることが分かる。次に、揚力については、図-11(b), 図-12(b) より、フェアリソング有の場合は、いずれもフェアリソング無の場合と類似な分布性状を示し、揚力の軽減効果に及ぼすフェアリソングの形状の影響が明確に認められなかった。

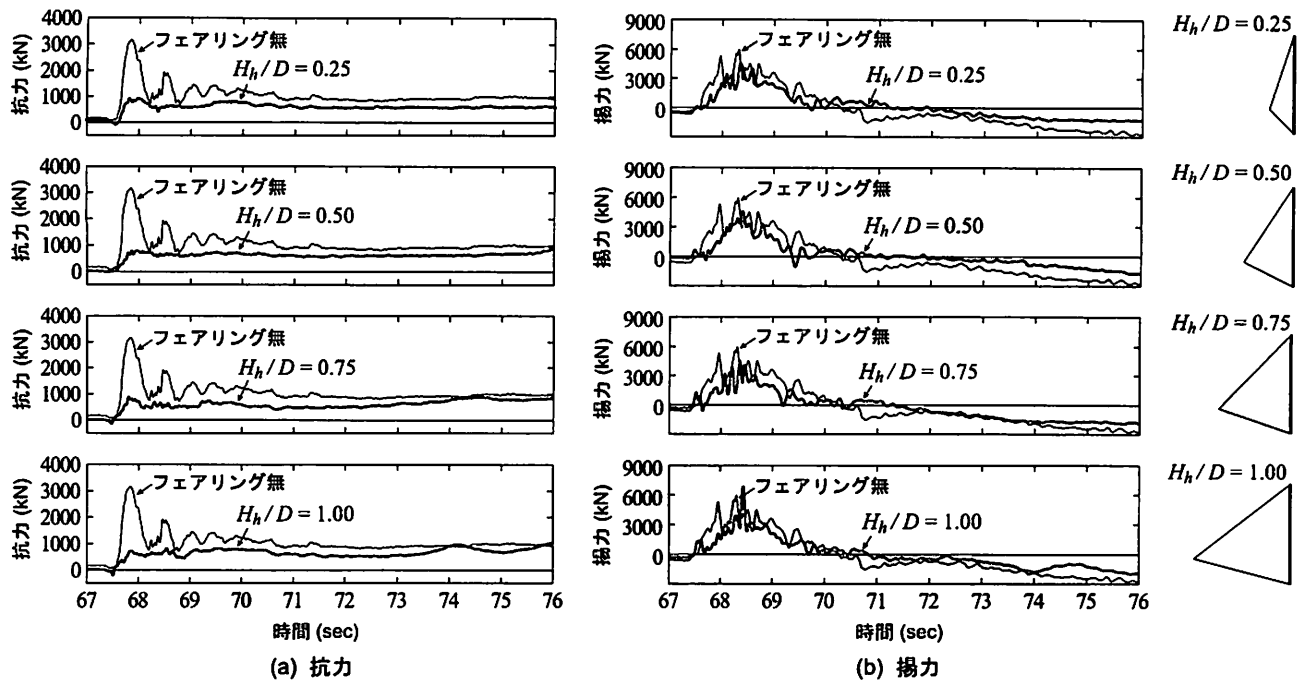


図-12 $H_h/D = 0.25$ の各実験ケースの抗力と揚力の時刻歴 (津波高：5.0 m)

5. まとめ

本研究では、橋梁模型に対する水路実験に基づき、橋梁上部構造への津波作用力に及ぼす津波高や水深の影響の把握、津波作用力の軽減対策の提案およびその軽減効果に関する実験的検討を行った。本論文の知見を整理すると以下ようになる。

- 1) 津波による橋梁上部構造への作用力は、津波高・水深と概ね正比例の関係がある。同じ津波高においても、水深が増加して桁下とのクリアランスが狭くなるほど津波作用力が増加する傾向が見られる。
- 2) 適切な形状を有するフェアリングを上部構造に取り付けることにより、津波による上部構造への作用力を軽減させることができるが、その形状により軽減効果が変わる。また、揚力の軽減効果と比べ、抗力の軽減効果の方が大きい。
- 3) 抗力の軽減効果に及ぼすフェアリングの形状の影響については、フェアリング頂点の水平方向の位置の変化より、上下方向の位置の変化による影響が顕著であることが分かる。今回の実験の範囲内においては、 $H_h/D = 0.50$ 、 $H_h/D = 0.25$ の場合は最も軽減効果が見られた。

参考文献

- 1) 片岡正次郎，日下部毅明，長屋和宏：津波衝突時の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.154-157，2006。
- 2) 庄司学，森山哲雄，藤間功司，鳴原良典，笠原健治：単径間橋桁に作用する碎波津波の荷重に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.55A，pp.460-470，2009.3。
- 3) 幸左賢二ほか：津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究，道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート，新道路技術会議，No.19-2，2010.6。
- 4) (社)土木学会：地震時保有耐力法に基づく耐震設計法研究小委員会報告書，2010.2。
- 5) 杉本健，運上茂樹：津波による橋梁の被災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。
- 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.464-473，2010.3。
- 7) 幸左賢二，内田悟史，運上茂樹，庄司学：スマトラ地震の津波による橋梁被害分析，土木学会地震工学論文集，Vol.29，pp.895-901，2007.8。
- 8) 須賀堯三編著：水理模型実験，山海堂，1990。