

津波による橋梁の被害軽減に関する水路実験

薄井 稔弘¹・星隈 順一²

¹正会員 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）
²正会員 博（工） 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

1. はじめに

平成16年12月26日のスマトラ島沖地震に伴って発生したインド洋津波により、橋梁上部構造が完全に流失する等橋梁に甚大な被害が多数発生した。これら津波による橋梁への影響に関しては十分に解明されておらず、被災事例についての研究が重要であると考えられる。このため筆者らは、津波による橋梁の流失被災メカニズムを解明するために、実際の津波による被災橋梁を対象に橋梁模型を製作し水路実験及びシミュレーション解析を実施している¹⁾²⁾³⁾。

本稿では、津波襲来時に橋梁上部構造に作用する水平波力（抗力）及び垂直波力（揚力）を軽減するための対策として、従来耐風分野で主に長大橋を対象として取り付けられてきたフェアリングに着目した。そして、フェアリング頂部の水平方向及び鉛直方向の位置をパラメータとして津波による波力が橋梁に及ぼす影響を実験的に調べ、フェアリングの最適形状について検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 津波の水路実験

(1) 対象橋梁

本研究では、RC（鉄筋コンクリート）橋模型1体を対象に水路実験を実施した。橋梁模型は実際にインド洋津波で被災したスマトラ島の橋梁を参考に製作した。

水路実験において相似則を厳密に満たすためには実物一模型間でフルード数（ $Fr = V/(gL)^{1/2}$ ： V ：流速、 L ：代表長さ）と、レイノルズ数（ $Re = VL/\nu$ ： ν ：動粘性係数）をとともに満足させる必要があるが、実物一模型間でフルード数とレイノルズ数を同時に満足させることは困難である。したがって本実験では、

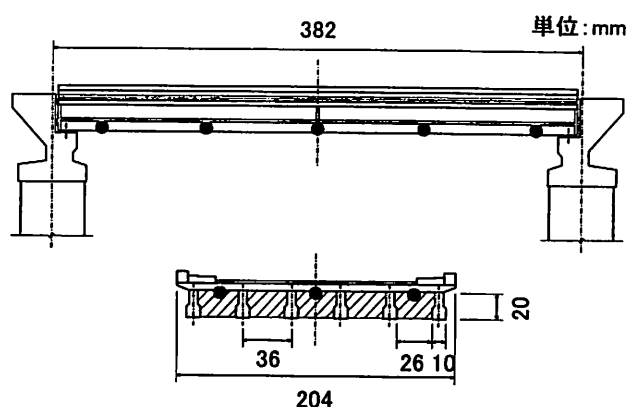


図-1 実験に用いた橋梁模型（●：波圧計設置位置）

対象としている津波の流れの場では粘性の影響よりも重力の影響が卓越することを考慮して、実物一模型間でフルード数を相似させることとした。

橋梁模型の寸法は図-1に示すとおりであり、模型縮尺は後述する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。橋梁模型の密度及び単位体積重量については実橋と合致させることとし、単位体積重量については 2.4ton/m^3 ⁴⁾とした。

(2) 実験水路

実験で使用した二次元水路は、図-2に示すとおりであり、水路長は20m、幅1m、高さ0.8mである。津波は湛水したゲートを転倒させることにより発生させた。実験に先立ち3箇所に波高計を設置し模型設置地点において所定の津波高さが得られることを確認するとともに、橋梁模型設置時にも橋梁模型上流側2m、4m地点の2箇所の波高計において実験時の時刻歴の津波高さの測定を行った。また、橋梁模型の下に分力計を設置し、橋梁模型上部構造に作用する抗力及び揚力を計測した。

水路側面図



図-2 実験に用いた水路

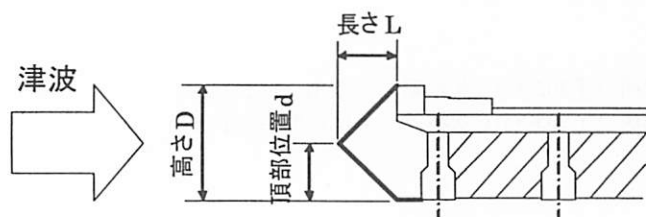


図-3 フェアリングの形状図

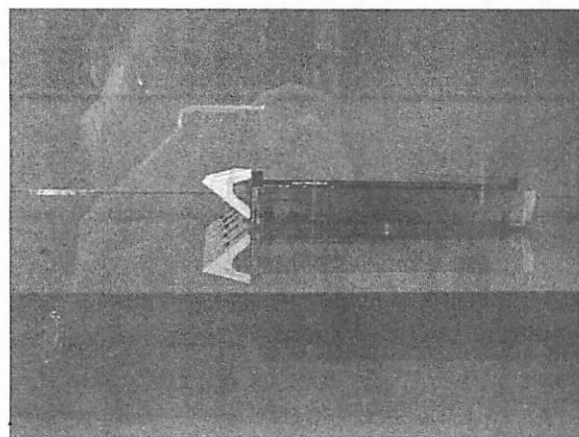


写真-1 フェアリング取り付け済みの橋梁模型

(3) フェアリング

過去の実験及び解析結果から、橋梁上部構造には津波衝突時に衝撃的に作用する外力と衝突以降一定時間継続的に作用する定常的な外力が作用することが分かっている。これらのうち津波衝突時の衝撃的な波力（抗力及び揚力）は橋梁支承部の耐力を上回る可能性があり、大規模な津波発生時において支承破壊及びそれに伴う橋梁上部構造流失の恐れがあることが懸念された。

そこで、これら衝撃的な波力を軽減するための対策として、本研究ではフェアリングに着目した。フェアリングは図-3及び写真-1に示すような形状をしており、従来耐風分野において主に強風による長大橋の変位、振動を制御することを目的として取り付けられてきたものである。

フェアリングによる波力軽減効果は、その形状に左右されると考えられるため、フェアリング頂部の水平方向及び鉛直方向の位置をパラメータとすることとした。フェアリングの形状パラメータの概念を

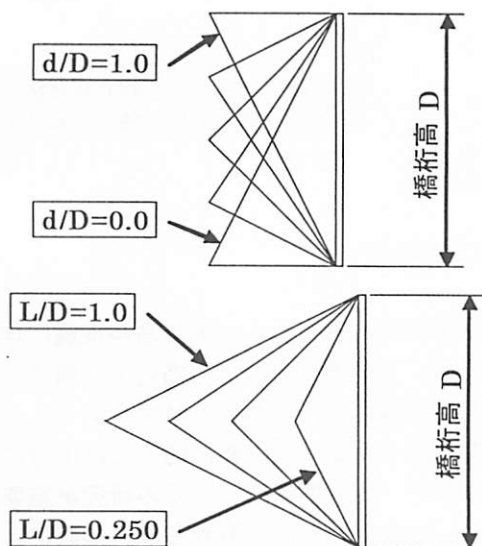


図-4 フェアリングの形状パラメータ

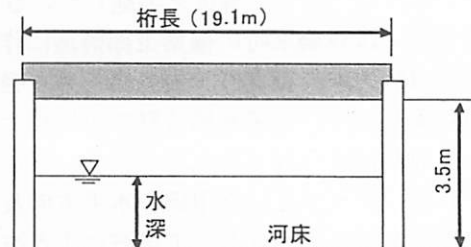


図-5 水深と桁高さの関係

図-3及び図-4に示す。なお、フェアリング基部の上下の位置は鉛直方向で揃えた。これは、パラメータの比較を容易にするほか、実橋にフェアリングを取り付ける際の製作及び施工を容易にする効果も視野に入れたものである。

(4) 実験ケース

実験ケースは、フェアリングの長さ、フェアリング頂部の高さ位置の他、津波高さをパラメータとして整理できるように40ケース（L/D 4ケース、d/D 5ケース、津波高さ2ケースの全ての組合せ）を設定した。水深は実物換算値で3mに固定した。桁高さとの関係を図-5に示す。なお、分力計と連結しているため橋梁上部構造は移動しない仕様となり、支承条件としては固定となる。

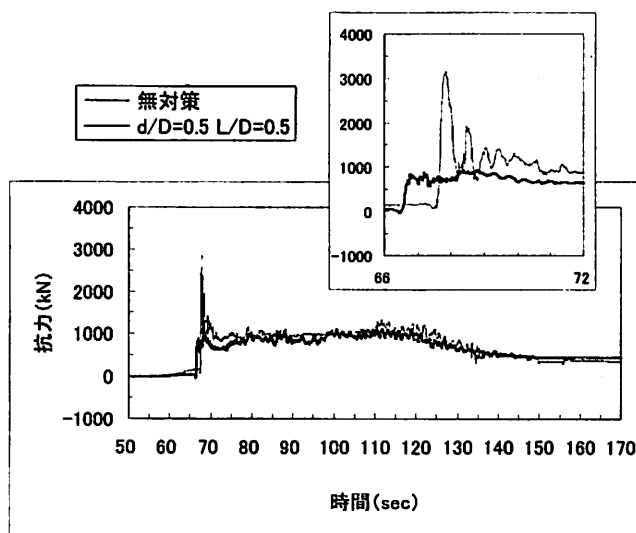


図-6 橋梁上部構造に作用する波力(抗力)
(水深3m, 津波高さ5m)

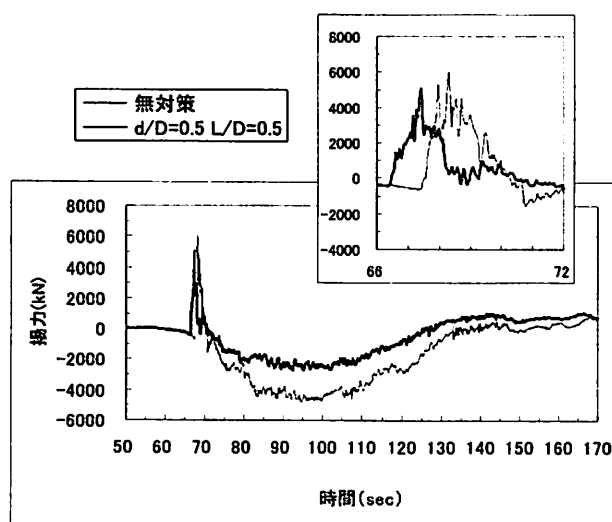


図-7 橋梁上部構造に作用する波力(揚力)
(水深3m, 津波高さ5m)

3. 実験結果及び考察

(1) 抗力及び揚力の測定結果

津波衝突時にRC橋に作用した抗力及び揚力の測定結果の一例を図-6及び図-7に示す。図-6及び図-7は、水深3mで高さ5mの津波がRC橋模型に衝突した場合に上部構造に作用する抗力及び揚力の分力計の測定値を時刻歴で示したものである。ここでは、横軸の時間及び縦軸の抗力・揚力は、実物換算値により表記している。なお、フェアリングを取り付けない無対策の場合とフェアリング形状が $d/D=0.5$ かつ $L/D=0.5$ の場合をプロットし、比較できるようにした。

橋梁上部構造に作用する抗力の時刻歴を示した図-6によれば、無対策の場合は津波衝突後すぐ

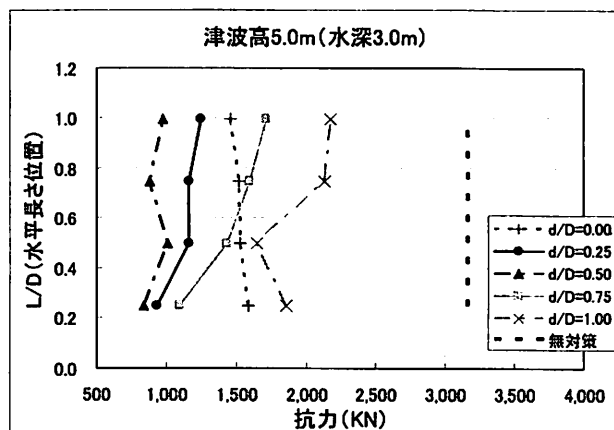


図-8 フェアリング長と抗力の関係

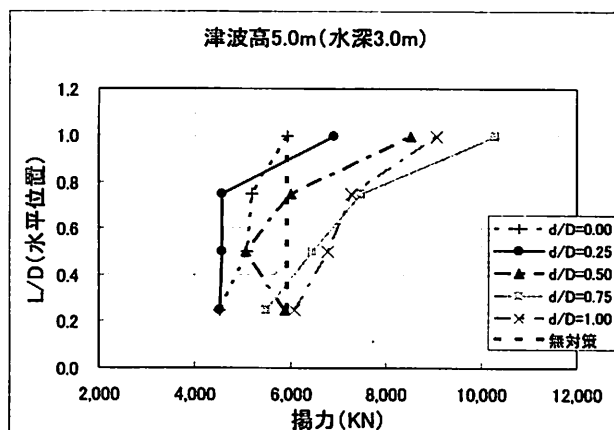


図-9 フェアリング長と揚力の関係

(67.8秒時)に最大值(3166kN)を記録し、その後は下降傾向を示すが、下降し始めの約2秒間は振動が大きい。一方、フェアリング有りの場合には明確なピークが現れず、66.8秒時に約850kNまで上昇した後、約1分間ほぼ一定の値を示した。

次に、橋梁上部構造に作用する揚力の時刻歴を示した図-7によれば、無対策の場合は68.3秒時に一回最大值(5641kN)を記録した後、下降する。それ以降は津波が床版を越流し下向きの荷重が作用するため、揚力が70.3秒時で負の値に転じ、約1分間は負の値のまま推移する。一方、フェアリング有りの場合には、67.4秒時に最大值(5068kN)を記録後、無対策の場合と似通った挙動を示した。ただし、絶対値は無対策の場合よりも小さく、ある程度フェアリング取り付けの効果があると考えられる。

(2) フェアリング長と作用外力の関係

RC橋の水路実験における抗力及び揚力の測定値(最大值)とフェアリング長及びフェアリング頂部の位置との関係をフェアリング長に着目して整理したグラフを図-8及び図-9に示す。

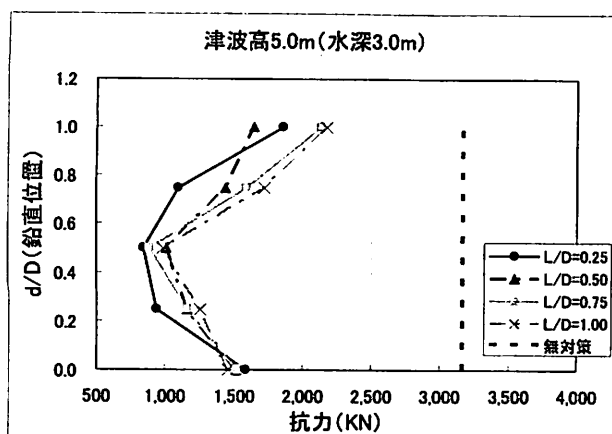


図-10 フェアリング頂部の位置と揚力の関係

フェアリング長と抗力の関係を示す図-8によれば、フェアリングの長さも変化しても、抗力にはあまり影響が見られない。

一方、フェアリング長と揚力の関係を示す図-9によると、フェアリングが短くなるにつれて揚力が低下する傾向にある。これは、揚力に効いてくると考えられる、フェアリング下面の面積が小さくなることによると推察される。

(3) フェアリング頂部の高さ位置と作用外力の関係

RC橋の水路実験における抗力及び揚力の測定値(最大値)とフェアリング長及びフェアリング頂部の位置との関係をフェアリング頂部の位置に着目して整理したグラフを図-10及び図-11に示す。

フェアリング頂部の位置と抗力の関係を示す図-10によれば、フェアリング頂部の位置が桁高さのちょうど中央の位置で抗力が最小値を示し、上方、下方のいずれにずれても抗力は増大傾向を示す。

一方、フェアリング頂部の位置と揚力の関係を示す図-11によると、フェアリング頂部の位置が上がるにつれて揚力が増大する傾向にある。これは、頂部の位置が上がるにつれて、フェアリングの下面が津波に対し正対するようになり、フェアリングに衝突した波力の上方向へのベクトル成分が増大することによると考えられる。

4. まとめ

津波襲来時に橋梁上部構造に作用する波力を軽減するための対策としてフェアリングに着目し、橋梁模型を用いた水路実験により、その効果を検討した。今回の実験の範囲内で得られた知見は以下のとおりである。

- ・フェアリングの設置により、津波衝突時に発生する衝撃的な波力を低減することが可能である。

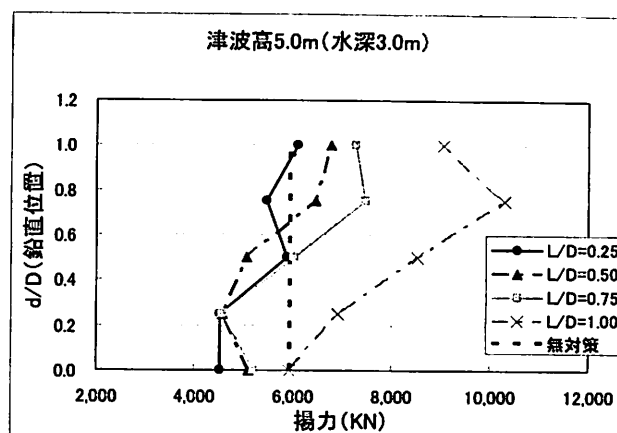


図-11 フェアリング頂部の位置と揚力の関係

- ・フェアリングの長さは、抗力にはあまり影響を与えないが、揚力については短いほど波力を低減する。
- ・フェアリング頂部の位置は、抗力に対しては、桁高さの中央位置とした場合が波力低減効果が最も大きかった。また、揚力に対しては、位置を下げた方が波力の低減効果が大きい。
- ・橋梁上部構造の安定性については、抗力よりも揚力の方が卓越する傾向にあることが過去の検討結果より判明しているが、橋梁上部構造の流失には抗力の影響も無視できないため、今回の実験の範囲内でのフェアリングの最適形状は、 $d/D=0.25$, $L/D=0.25$ であると推察される。

謝辞：本研究では、九州工業大学幸左賢二教授、筑波大学庄司学講師及び大日本コンサルタント田崎賢治氏から、インド洋津波で被災した橋梁に関する資料を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 97-100, 2008.
- 2) 杉本健, 薄井稔弘, 運上茂樹：津波及び高潮の橋梁への影響に関する水路実験, 土木技術資料, Vol.50 No.11, pp. 24-29, 2008.
- 3) 杉本健, 薄井稔弘, 運上茂樹：津波による被災橋梁に対する水路実験の再現解析, 第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 81-84, 2009.
- 4) Bridge Design Manual, PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute)