

# 津波及び高潮の橋梁への影響に関する水路実験

杉本 健\* 薄井稔弘\*\* 運上茂樹\*\*\*

## 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、平成17年8月に米国南部を直撃したハリケーン・カトリーナによる高潮・高波により、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<sup>1)2)</sup>。道路は災害時において救援・復旧活動面で重要な役割を担っているが、これらの被災地では橋梁の流失により海岸付近の幹線道路が寸断され、救援・復旧活動に多大な支障をきたした。

これら津波及び高潮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。本研究では、津波及び高潮による橋梁の流失被災メカニズムを解明することを目的として、インド洋津波及びハリケーン・カトリーナによる被災橋梁を対象に橋梁模型を製作し津波及び高潮を作用させた水路実験を実施した。

## 2. 津波の水路実験

### 2.1 対象橋梁

本研究では、RC（鉄筋コンクリート）橋模型1体、鋼橋模型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。

水理実験において相似則を厳密に満たすためには実物-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（ $Re = VL/\nu$   $\nu$ ：動粘性係数）をともに満足させる必要があるが、実物-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、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-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、いずれも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相似させることとし、単位体積重量について、RC橋模型では2.4ton/m<sup>3</sup><sup>3)</sup>、鋼橋模型では、主桁一本あたり5.4kN/m、床版については24.5kN/m<sup>3</sup>とした<sup>4)</sup>。

### 2.2 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を測定を行った。また、橋梁模型の下に分力計を設置し、支承固定条件時において橋梁模型全体に作用する抗力及び揚力を計測した。

### 2.3 実験ケース

実験ケースは、水深、津波高さ、支承条件をパラメータとして整理できるように、RC橋、鋼橋ともに40ケースずつ設定した。水深と桁高さの関係を図-3に示す。支承条件としては固定、可動の2条件とし、支承可動条件の水路実験は、橋梁模型の支承構造をゴムパッド支承としてモデル化するとともに、津波が衝突したときの橋梁上部構造の挙動を再現するために実施した。

### 2.4 実験結果及び考察

#### 2.4.1 津波及び橋梁上部構造の挙動

津波衝突時にRC橋及び鋼橋模型に作用した抗力及び揚力の測定結果の一例を図-4に示す。図-4は、水深2.5m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。なお、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。いずれの測定結果にも電源によるノイズが含まれているが、ここでは処理せずそのままの値を示している。

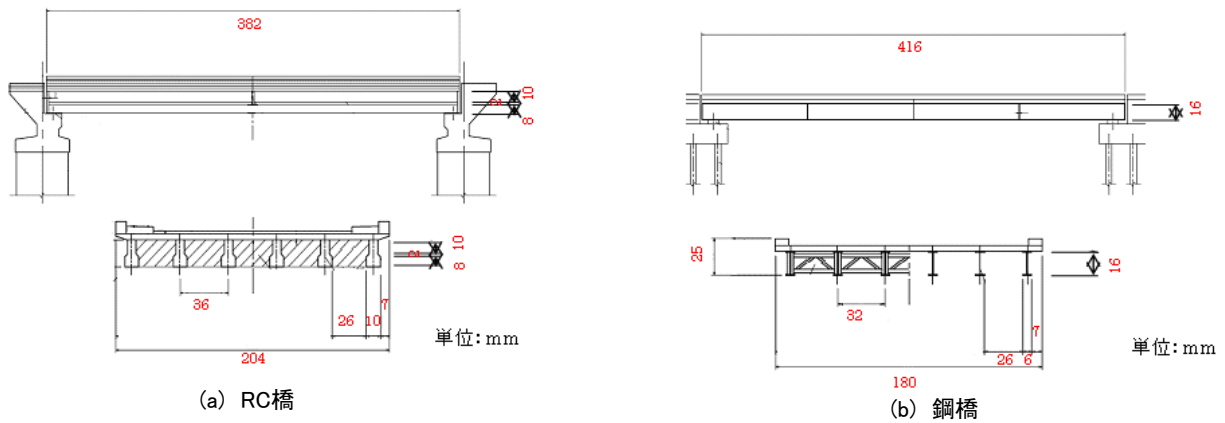


図-1 津波水路実験に用いた橋梁模型

水路側面図

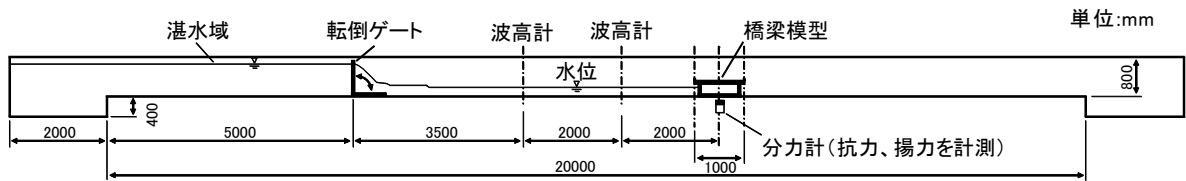


図-2 津波の実験に用いた水路

津波は発生後、一気に水路を進み橋梁模型に衝突する。この際、図-4(a)に示すような衝撃的な力を橋梁模型に与えて砕波し、橋梁模型を巻き込みながら流下する。津波衝突時の状況の一例を写真-1に示す。

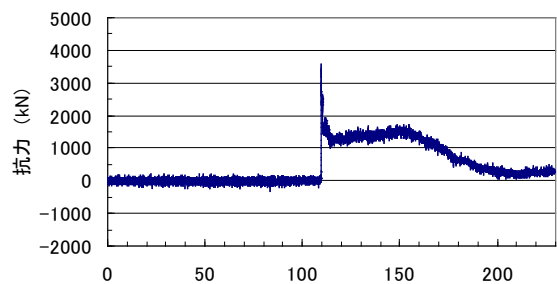
支承可動条件での実験の場合、この作用力が大きいと橋梁模型は橋台上を移動し、さらに作用力が大きいと橋台上から流失する。支承可動条件での実験後の橋梁模型移動状況の一例を写真-2に示す。

2.4.2 抗力及び揚力の測定結果

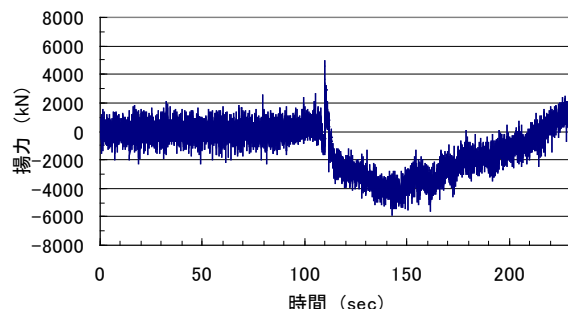
橋梁上部構造に作用する抗力の時刻歴を示した図-4(a)によれば、計測開始110秒後に津波が上部構造に衝突し瞬間的に最大値3591kNをとるが、継続時間は短く約1秒後には1500kN程度に低下し、その後50秒程度1400kN程度の抗力が継続的に作用し、以降津波の流下とともに抗力の値は低

下し0に収束する。

次に、橋梁上部構造に作用する揚力の時刻歴を示した図-4(b)によれば、抗力と同様に計測開始110秒後に揚力は瞬間的に最大値4910kNをとる。それ以降は津波が床版を越流し、分力計に下向きの荷重が作用するため、揚力が一転して低下し負の値をとるが、津波の流下とともに揚力の値も0



(a) 抗力測定結果



(b) 揚力測定結果

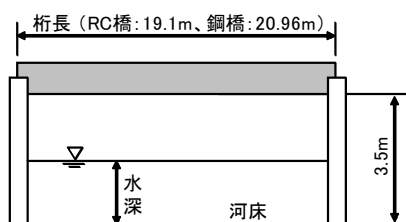


図-3 水深と桁高さの関係

図-4 橋梁上部工への作用力 (RC橋：水深2.5m 津波高さ5m)

に漸近している。

以上のように、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継続的に作用する定常的な外力が作用しており、これら双方の外力が橋梁上部構造の損傷や移動、流失に影響を及ぼすものと考えられる。

### 2.4.3 津波高・水深と作用外力の関係

RC橋の水路実験における抗力及び揚力の測定値（最大値）と津波高さ、水深及び橋梁模型の被害状況との関係を図-5及び図-6に示す。ここで、抗力・揚力の値は支承固定条件での実験により、橋梁模型の被害状況は同条件下での支承可動条件での実験によりプロットした。このため、抗力・

揚力の値と橋梁模型の被害状況は、厳密には対応していないことに留意されたい。ただし、抗力・揚力双方の増加に対して被害状況は悪化しており、概ねの傾向は合致している。

図-5によれば、津波高さが高くなる、あるいは水深が深くなると抗力が増加する傾向にあるが、津波高さ5m及び6mでは津波高さ、水深に関わらず一定の値をとる傾向がみられる。一方、図-6に示す揚力の場合には、いずれの津波高さ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大きくなる傾向がみられた。

図-7及び図-8に示す鋼橋の場合も、抗力・揚力ともにRC橋と同様の傾向がみられた。



写真-1 津波衝突時の状況  
(鋼橋：水深2m 津波高さ3m)

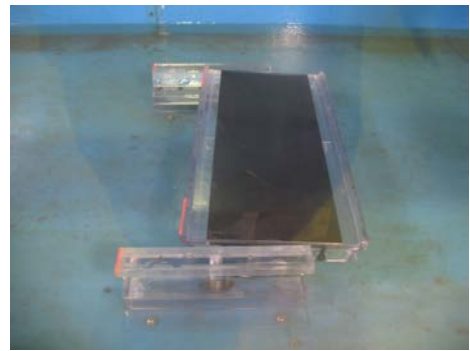


写真-2 津波による橋梁模型の移動  
(RC橋：水深3m 津波高さ3m)

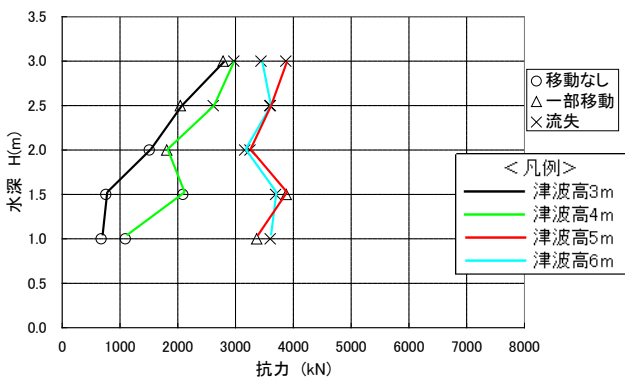


図-5 抗力と津波高・水深との関係 (RC橋)

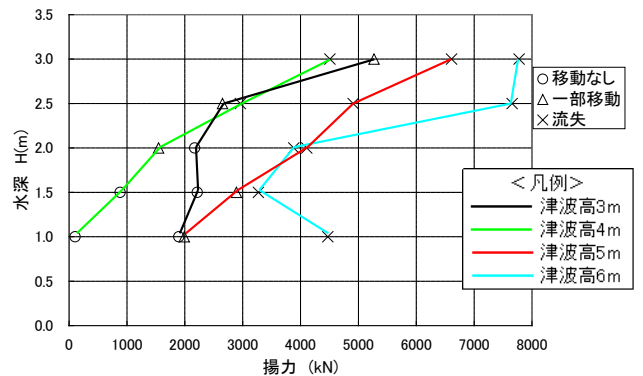


図-6 揚力と津波高・水深との関係 (RC橋)

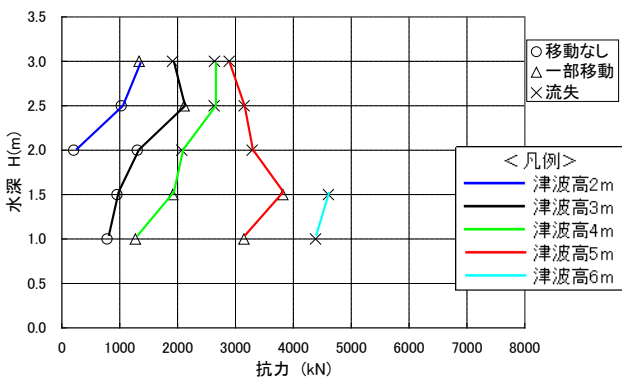


図-7 抗力と津波高・水深との関係 (鋼橋)

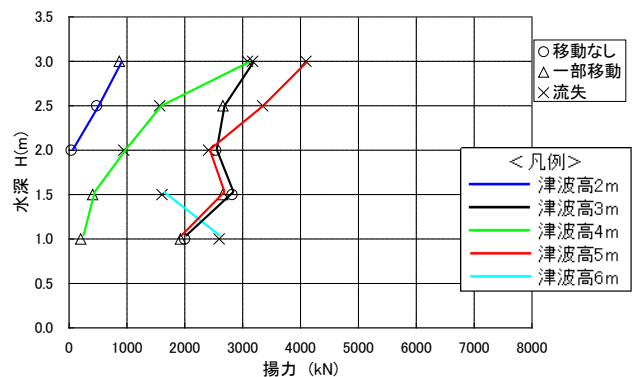


図-8 揚力と津波高・水深との関係 (鋼橋)

水路側面図

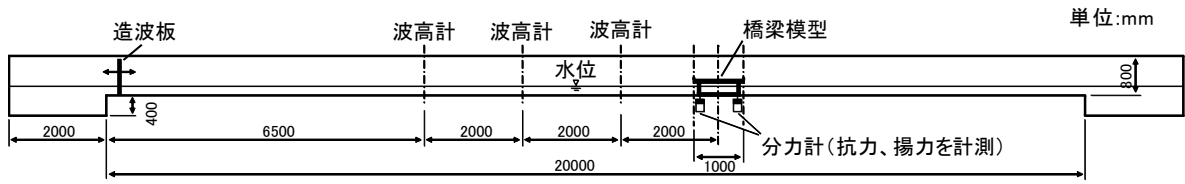


図-9 高潮の実験に用いた水路

3. 高潮の水路実験

3.1 対象橋梁

本研究では、RC橋模型1体を対象に水路実験を実施した。橋梁模型は実際にハリケーン・カトリナによる高潮・高波で被災した橋梁を参考に製作した。

フルード数とレイノルズ数の関係については津波の水路実験と同様に、本実験で対象としている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-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-10に示すとおりであり、模型縮尺は1/25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相似させることとし、単位体積重量については2.4ton/m<sup>3</sup>とした。

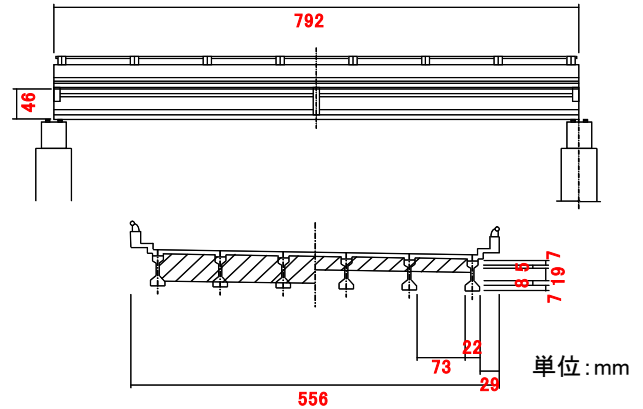


図-10 高潮水路実験に用いた橋梁模型

3.2 実験水路

実験で使用した二次元水路は図-9に示すとおりであり、水路長は20m、幅1m、高さ0.8mである。高波は造波機により発生させた。実験に先立ち4箇所波高計を設置し模型設置地点において所定の波高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波高の測定を行った。また、橋梁模型の下に分力計を設置し、支承固定条件時において橋梁模型全体に作用する抗力及び揚力を計測した。

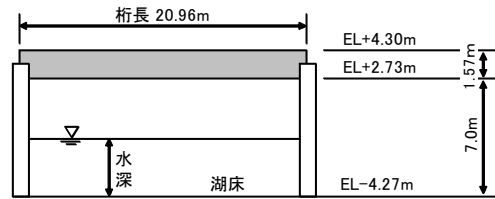


図-11 水深と桁高さの関係

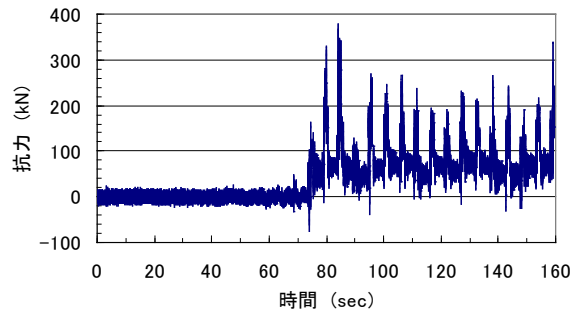
3.3 実験ケース

実験ケースは、波高、周期、水深、支承条件をパラメータとして整理できるように、40ケース設定した。水深と桁高さの関係を図-11に示す。支承条件は津波実験と同様に固定、可動の2条件とした。

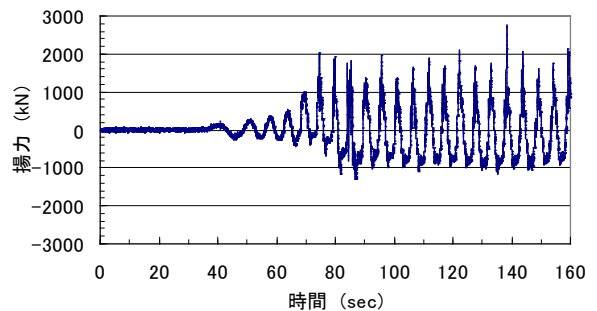
3.4 実験結果及び考察

3.4.1 高波及び橋梁上部構造の挙動

高波衝突時に橋梁模型に作用した抗力及び揚力の測定結果の一例を図-12に示す。図-12は、水



(a) 抗力測定結果



(b) 揚力測定結果

図-12 橋梁上部工への作用力 (波高2.16m 周期5.3sec 水深7.7m)

深7.7mで周期5.3秒、波高2.16mの高波が衝突した場合に橋梁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。なお、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。いずれの測定結果にも電源によるノイズが含まれているが、ここでは処理せずそのままの値を示している。なお、揚力については水深設定後に0値補正しているため、浮力の影響を織り込んでの0値であることに留意されたい。

高波は徐々に波高を高め、設定波高で定常化するよう作用させた。高波は設定周期に従って橋梁模型に衝突を繰り返し、その都度、図-12(a)に示すような衝撃的な力を橋梁模型に与える。高波衝突時の状況の一例を写真-3に示す。

支承可動条件での実験の場合、この衝撃力が大きいと橋梁模型は衝撃を受ける度に橋台上を徐々に跳ねるように移動し、ついには橋台上から落下する。支承可動条件での実験後の橋梁模型落下状況の一例を写真-4に示す。

3.4.2 抗力及び揚力の測定結果

橋梁上部構造に作用する抗力の時刻歴を示した図-12(a)によれば、計測開始75秒後に123kN、

84秒後に最大値379kNをとるが、それ以降は概ね0kNから250kN程度の値を周期的にとるようになっている。

一方、橋梁上部構造に作用する揚力の時刻歴を示した図-12(b)によれば、計測開始後徐々に波力の影響が大きくなり、74秒後に2033kNを計測した後は、-1000kNから2000kNの値を周期的にとるようになる。ここで、揚力が正の値の場合は桁に上向きの、負の値の場合は下向きの荷重が作用することを示している。この場合、上向きの荷重は高波が床版裏面に与える衝撃により、下向きの荷重は高波が床版を越流することにより生じていると考えられる。

以上のように、橋梁上部構造には高波時に周期的な外力が作用しており、抗力・揚力の相対的な大きさから考えて、特に揚力が橋梁上部構造の損傷や移動、流失に影響を及ぼすものと考えられる。

3.4.3 水深・波高と作用外力の関係

得られた結果のうち特徴的である、抗力・揚力の測定値（最大値）と水深及び橋梁模型の被災状況との関係を図-13に示す。ここで、抗力・揚力の値は支承固定条件での実験により、橋梁模型の被害状況は同条件下での支承可動条件での実験に



写真-3 高波衝突時の状況 (波高2.16m 周期5.3sec 水深7.7m)

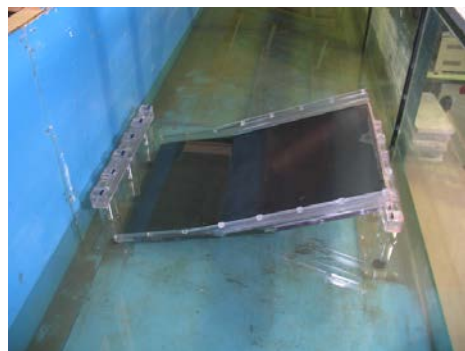


写真-4 高波による橋梁模型の落下 (波高2.16m 周期5.3sec 水深9.7m)

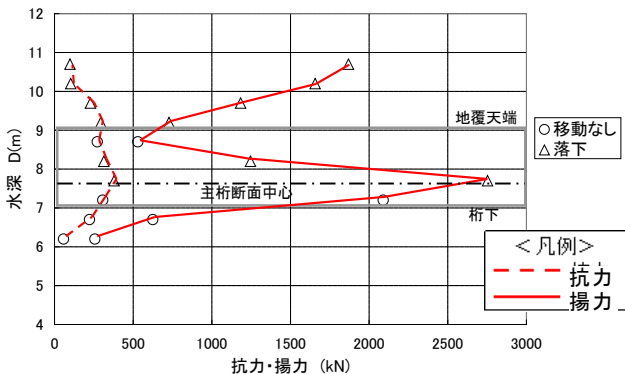


図-13 抗力・揚力と水深の関係

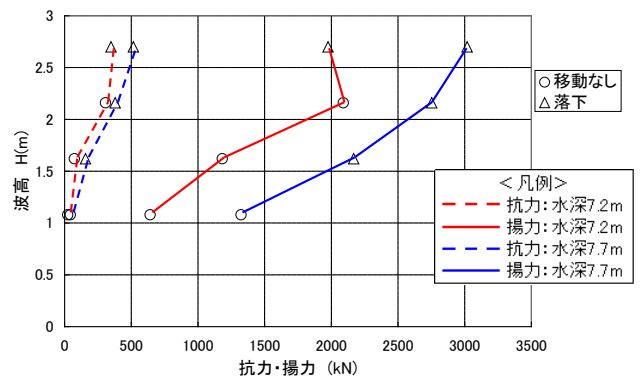


図-14 抗力・揚力と波高の関係

よりプロットした。このため、抗力・揚力の値と橋梁模型の被害状況は、厳密には対応していないことに留意されたい。また、揚力の値はあくまでも上向きに作用する力の最大値であることに注意が必要である。

図-13によると、水深がほぼ主桁断面中心高さにあるとき(7.7m)、橋梁上部構造に作用する抗力・揚力が最大となる。また、水深が床版上面付近にあるとき(8.7m)、抗力・揚力ともに一時的に小さな値をとっている。これは、水深が主桁断面中心高さ付近にあるときには高波衝突により生じる碎波が床版裏面あるいは主桁に上向きの衝撃力を与え、また橋梁の水没時には波によって引き上げる力が床版上面に掛かるのに対し、水深が床版上面付近にあるときには越流による下向きの荷重が卓越するからではないかと考えられる。

一方、図-14に示す抗力・揚力と波高との関係においては、波高が高くなると抗力・揚力ともに大きくなる傾向がみられる。

#### 4. まとめ

インド洋津波及びハリケーン・カトリーナによる高潮・高波により被災した橋梁3橋を対象に橋梁模型を作成し水路実験を実施した。本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- ・津波実験において、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。
- ・津波衝突時に橋梁上部構造に作用する外力と津波高さあるいは水深には概ね正比例の関係があり、橋梁被害の大きさも概ねこれと同様の傾向がみられる。

の傾向がみられる。

- ・高潮実験において、高波時に橋梁上部構造に作用する外力は抗力よりも揚力が卓越する。
- ・高波時に橋梁上部構造に作用する揚力は水深とは比例せず、水深が桁に対してどの位置にあるかによって値が大きく異なる。

#### 謝 辞

本研究は、(独)日本学術振興会より科学研究費補助金(18206050)の助成を受けて実施したものである。また、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は、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) “The Damage Induced by Sumatra Earthquake and Associated Tsunami of December 26, 2004, A Report of the Reconnaissance Team of Japan Society of Civil Engineers”, Japan Society of Civil Engineers, 2005
- 2) Preliminary Damage Reports on Bridges, MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research), 2005  
[http://mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/Katrina8-28-05/damage\\_reports\\_bridges.asp](http://mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/Katrina8-28-05/damage_reports_bridges.asp)
- 3) Bridge Design Manual, PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute)
- 4) 遠藤和男、運上茂樹：平成16年スマトラ島沖大地震による津波を想定した橋梁の応答特性に関する解析的検討、土木学会第61回年次学術講演会、2006

杉本 健\*



本州四国連絡高速道路(株)長大橋技術センター技術調整グループサブリーダー(前 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ耐震チーム主任研究員)  
Takeshi SUGIMOTO

薄井稔弘\*\*



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橋梁構造研究グループ主任研究員  
Toshihiro USUI

運上茂樹\*\*\*



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橋梁構造研究グループ上席研究員、工博  
Dr. Shigeki UNJOH