

津波による橋梁の被災メカニズムに関する実験的研究

杉本 健¹・運上 茂樹²

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（〒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。津波による橋梁への影響に関しては十分に解明されていないことから、こうした被害事例について研究することが重要と考えられる。本研究では、津波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、インド洋津波による被災橋梁を対象に橋梁模型を製作し津波の水理実験を実施した。

2. 津波の水理実験

(1) 対象橋梁

本研究では、RC橋模型1体、鋼橋模型1体を対象に水理実験を実施した。

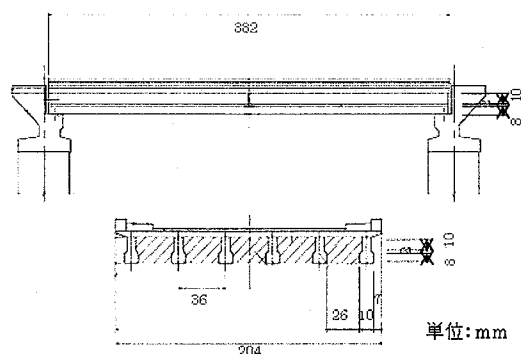
実験対象としたRC橋はLueng Ie Bridgeで、スマトラ島西海岸沿いで海岸線から1km陸側に位置する橋である。橋梁付近の津波高さは17.22mとされている

¹⁾。橋梁上部構造はゴムパッド支承で支持されており、津波により橋梁上部構造が橋軸直角方向に約3m移動する被害を生じた¹⁾。

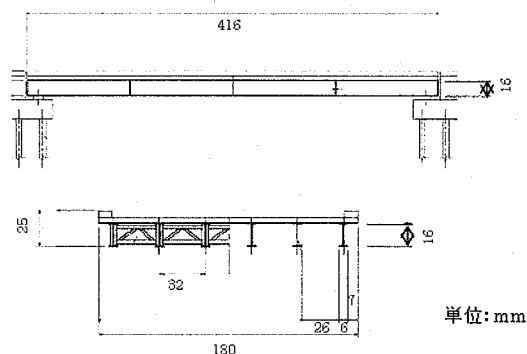
実験対象とした鋼橋はKr.Cuntuem Bridgeで、スマトラ島西海岸沿いに位置する橋である。橋梁付近の津波高さは13.55mとされている¹⁾。橋梁上部構造は沓座上に設置されており、津波により橋梁上部構造が橋軸直角方向に約2.4m移動する被害を生じた¹⁾。

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 ($Re = VL/\nu$ ν :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およ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。



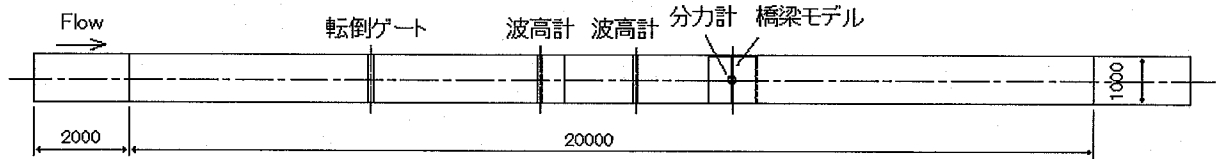
(a) Concrete Bridge Model (Lueng Ie Bridge)



(b) Steel Bridge Model (Kr.Cuntuem Bridge)

図-1 水理実験橋梁模型

水路平面図



水路側面図

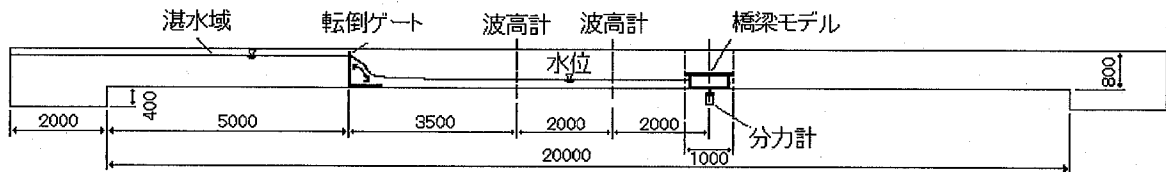


図-2 水路概要及び配置図

橋梁模型の密度および単位体積重量については実橋と相似させることとしたが、実橋の単位体積重量が不明であったことから、RC橋梁模型の単位体積重量については $150\text{pcf}^2)$ (2.4ton/m^3)、鋼橋模型については、主桁一本あたり 5.4kN/m 、床版については 24.5kN/m^3 とした³⁾。

(2) 水路概要

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。実験実施に先立ち、橋梁模型設置地点(橋梁模型設置前)と橋梁模型の上流側2m、4mの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、橋梁模型設置時には橋梁模型設置地点の波高計を撤去し、残りの2個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水平力および鉛直力を計測した。津波衝突時の状況の一例を写真-1に示す。

(3) 実験ケース

実験ケースは表-1に示すとおりである。津波高さは3mと5mの2ケース、河床からの水深は1~3mの5ケース、支承条件は固定条件と可動条件の2ケースである。支承可動条件の水理実験は、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、津波が橋梁に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。支承可動実験後の橋梁模型の移動状況の一例を写真-2に示す。

表-1 実験ケース

水深(m)	津波高さ(m)	支承条件
1	3	固定 可動
	5	
1.5	3	
	5	
2	3	
	5	
2.5	3	
	5	
3	3	
	5	

注) 水深及び津波高さは実寸法により表記

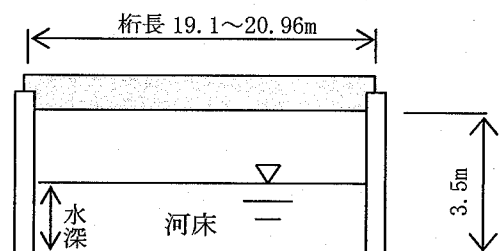


図-3 水深と桁高さとの関係

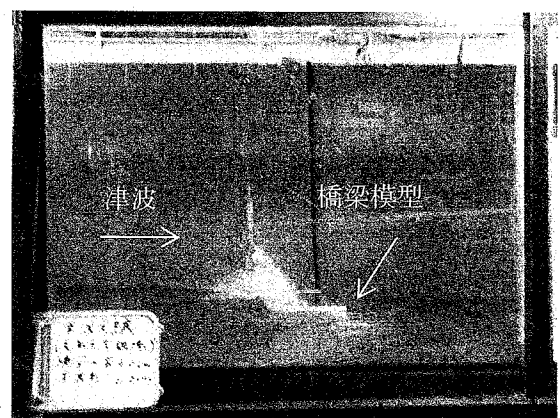


写真-1 津波衝突時の状況(鋼橋:水深2m 津波高3m)

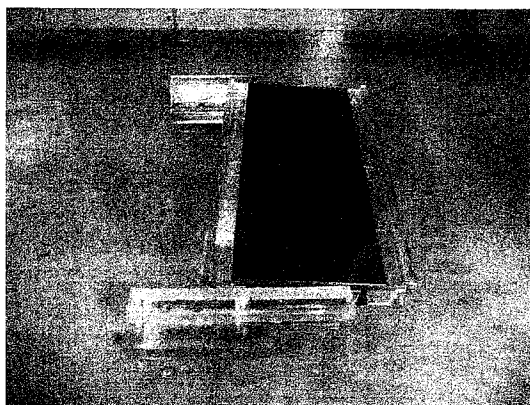


写真-2 RC橋模型の移動(水深3m 津波高3m)

3. 実験結果および考察

(1) 抗力および揚力の測定結果

津波衝突時にRC橋および鋼橋模型に作用する抗力および揚力の測定結果の一例を図-4および図-5に示す。図-4、図-5は、水深2.5mで津波高さが5mの津波がRC橋模型に衝突した場合に橋梁上部構造に作用する抗力およ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、横軸の時間および縦軸の抗力（あるいは揚力）については、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。

橋梁上部構造に作用する抗力の時刻歴を示した図-4によれば、計測開始110秒後に津波が橋梁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。

橋梁上部構造に作用する揚力の時刻歴を示した図-5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。本研究では、津波衝突時に衝撃的に作用する外力に着目し、抗力、揚力の測定値については最大値で結果の整理を行った。ただし、いずれの値にもノイズが含まれていることに留意する必要がある。

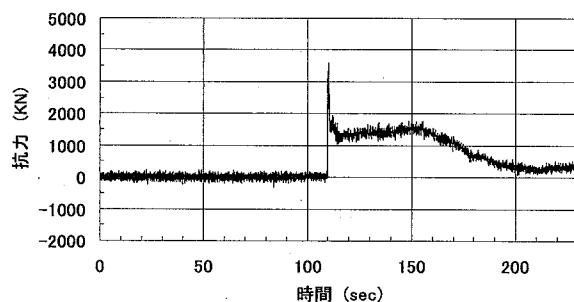


図-4 抗力測定結果

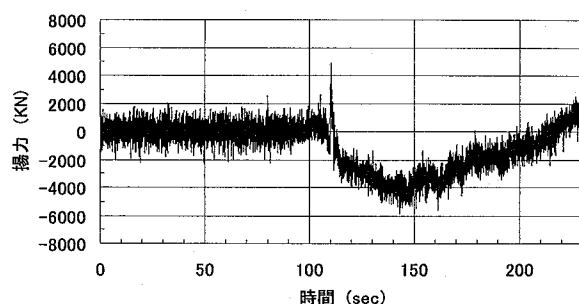


図-5 揚力測定結果

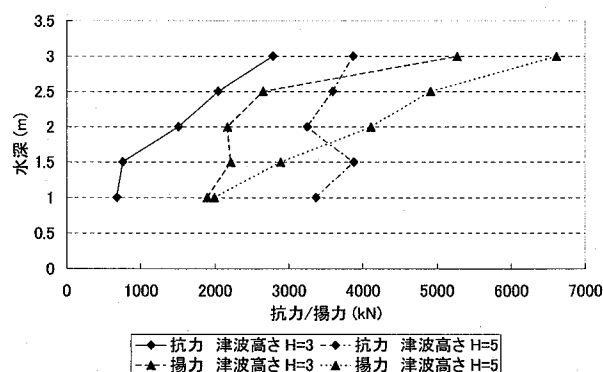


図-6 抗力・揚力と津波高さ・水深との関係 (RC橋)

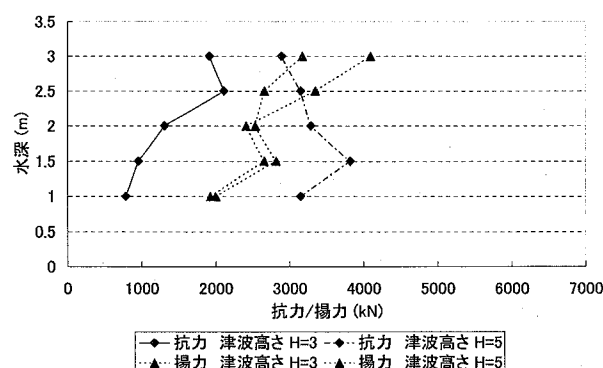


図-7 抗力・揚力と津波高さ・水深との関係 (鋼橋)

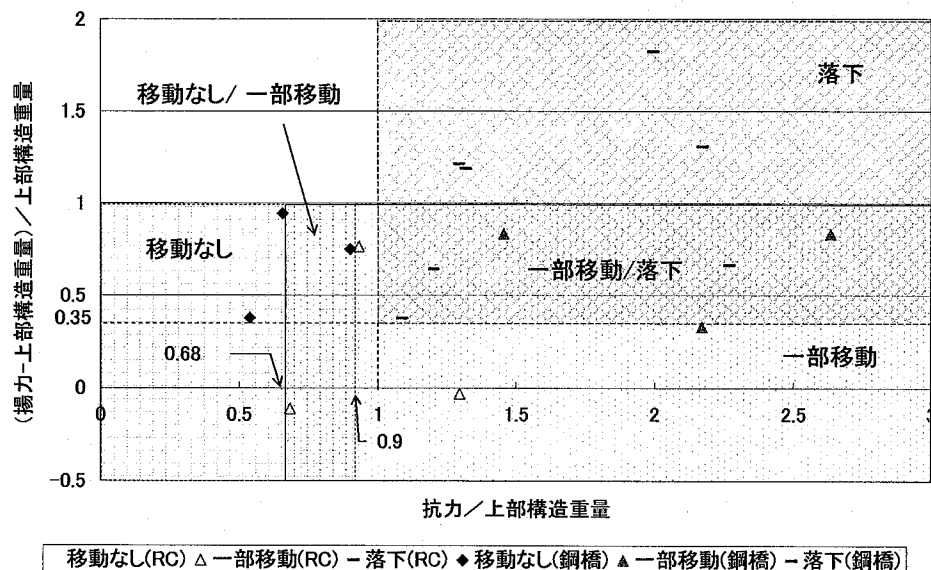


図-8 橋梁に作用する津波外力と被害との関係

(2) 津波高・水深と作用外力との関係

RC橋の水理実験における抵抗力および揚力の測定値と、津波高、水深との関係を図-6に示す。津波高さが3mの場合と5mの場合の抵抗力を比較すると、津波高さが高くなれば、いずれの水深においても抵抗力が一様に増加する傾向がみられた。一方、津波高さが3mの場合の揚力と5mの場合の揚力を比較すると、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揚力が大きくなる傾向がみられた。

鋼橋の水理実験における抵抗力および揚力の測定値と、津波高、水深との関係を図-7に示す。津波高さ、水深と抵抗力、揚力間についてはRC橋と同様の傾向がみられた。

(3) 作用外力と橋梁被害との関係

橋梁に作用する津波外力と橋梁被害との関係を明らかにするため、図-8において抵抗力(測定値)/上部構造重量を横軸、(揚力(測定値)-上部構造重量)/上部構造重量を縦軸にとり、支承可動条件における橋梁模型の被災状況を凡例で示した。なお、上部構造を载荷した状態で分力計の計測値が0となるように設定しており、分力計が上部構造重量の値を示したときに支承反力が0となる。図-8の結果から、橋梁上部構造が流失するのは、ある閾値以上の抵抗力と揚力が作用する場合であり、ある閾値以上の抵抗力が作用する場合でも揚力が閾値を越えなければ上部構造は流失せず移動にとどまるものと推察される。

4. まとめ

インド洋津波により被災したRC橋1橋、鋼橋1橋を対象に橋梁模型を作成し水理模型実験を実施した。本研究により得られた成果は以下のとおりである。

- ・ 津波が衝突したときに橋梁上部構造に作用する抵抗力および揚力の時刻歴を示し、津波外力の特性を示した。
- ・ 水理実験の結果から、津波高さ、水深と抵抗力、揚力間関係を示すとともに被災状況との関係を整理した。

謝辞：本研究は、独立行政法人日本学術振興会より平成18年度、平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(A))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および大日本コンサルタント田崎賢治氏からは、Lueng Ie BridgeおよびKr. Cuntuem Bridge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) 九州工業大学幸左教授らによる調査情報
- 2) PCI Bridge Manual, <http://www.pci.org/publications/bridge/>
- 3) 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、平成18年9月