

平成21年 6月17日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18206050  
 研究課題名（和文） 津波および高潮による橋梁構造物の被災メカニズムの解明に関する研究  
 研究課題名（英文） STUDY FOR DAMAGE MECHANISM ON THE BRIDGE STRUCTURES BY TSUNAMI AND STORM SURGE  
 研究代表者  
 運上 茂樹（UNJOH SHIGEKI）  
 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・首席研究員  
 研究者番号：60355815

研究成果の概要：本研究では、津波や高潮による橋梁の流失被災メカニズムの解明および橋梁の被害軽減策の提案を目的に、被害事例の分析、模型による水理実験、シミュレーション解析を実施した。これらの結果、事例分析により橋梁被害の実態が明らかになり、水理実験では実橋の被害状況が再現でき、橋梁への作用力に関する基礎データを得た。また、シミュレーション解析では水理実験の再現、移動制限装置を用いた被害軽減策の検証ができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	18,700,000	5,610,000	24,310,000
2007年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2008年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
年度			
年度			
総計	35,300,000	10,590,000	45,890,000

研究分野：耐震工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学、地震工学、維持管理工学

キーワード：津波、高潮、橋梁、被災メカニズム、被害軽減

## 1. 研究開始当初の背景

2004年12月26日に発生したスマトラ島沖大地震によるインド洋津波、2005年8月に米国南部を直撃したハリケーン・カトリーナに伴う高潮・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。道路は自然災害時の救援・復旧作業で重要な役割を担うことになるが、上記被災地では橋梁構造物の被災により幹線道路の多くが寸断され、救援・復旧作業に多大な支障をきたした。一方、我が国では、東南海・南海地震や東北・北海道の太平洋岸の海洋型地震により最大10数m～20m規模の大津波の発

生が懸念されているところである。

緊急輸送路等の重要度の高い道路に対しては、津波襲来後もその機能を確保することが重要と考えられるが、道路網の骨幹をなす橋梁構造物の津波及び高潮による影響に関しては十分に明らかにされていない状況である。特に、既往の被害事例から、被災橋梁は側面からの波力だけではなく、下面からの波力あるいは水没することによる浮力の影響を受けていたことが推定されるが、それら外力が連成して構造物に作用する場合の挙動については未解明の部分が多く、被災事例の研究が重要であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、1. で示した背景を踏まえ、津波・高潮による橋梁構造物の被災メカニズムの解明及び津波・高潮に対する橋梁構造物の被害軽減技術の提案を目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 津波・高潮による橋梁構造物の被害事例の収集にあたっては、国内外の文献に当たるとともに、インド洋津波及びハリケーン・カトリーナによる被害を受けた現地の研究者を招聘しヒアリングを実施することにより、より具体的な被害データを収集した。

(2) 津波・高潮による橋梁構造物の被災メカニズムの解明にあたっては、収集した被害事例を詳細に分析するとともに、実際に津波被害を受けたコンクリート橋(以下、RC橋)1橋、鋼橋1橋の1/50の模型及び高潮被害を受けたRC橋1橋の1/25の模型を製作し、津波及び高潮襲来時の海象条件を再現した水理実験を実施して、橋梁に作用する力に関する実験データを収集した。また、水理実験結果を定性的・定量的に再現可能なシミュレーション解析手法を検討した。



写真-1 水理実験の状況 (津波衝突時)

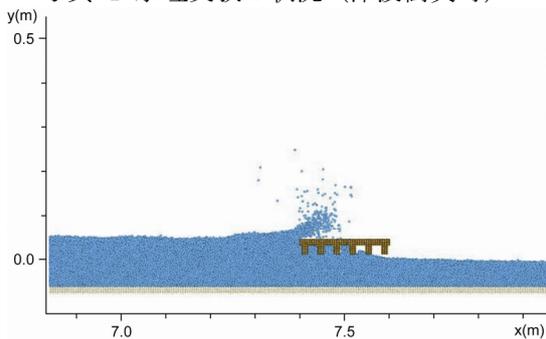


図-1 シミュレーション解析の瞬間像

(3) 津波・高潮に対する橋梁構造物の被害軽減技術の検証にあたっては、(2)で検討したシミュレーション解析手法を用い、実験では測定しづらい、橋梁上部構造の流失時における橋梁に作用する力を計測して、検証を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 被害事例の分析結果

収集した橋梁被害事例の分析により、上部構造が流失した橋梁あるいは大きな残留変位を生じた橋梁では下部構造の沓座に上部構造を乗せただけの構造であること、支承部で下部構造と剛結した構造あるいは地震時における落橋防止構造として設置されたせん断キーを有する橋梁の場合はほとんど被害が生じていなかったことを明らかにした。また、被害から見た力学的な作用としては、当初の推定通り、抗力(水平波力)、揚力(鉛直波力)、浮力の3種類の力が連成して影響していることが考えられた。

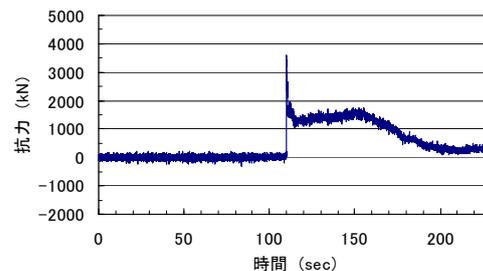


写真-2 せん断キー

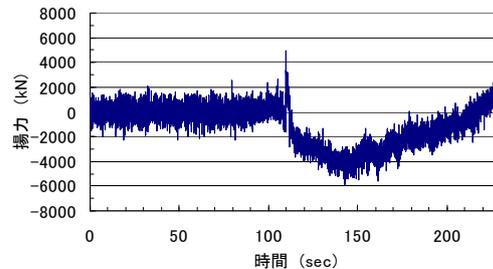
### (2) 水理実験結果

水理実験では、被災地で見られたような橋桁の移動や流失現象を再現でき、橋梁に作用する力に関する基礎実験データを得た。以下に、得られた知見を示す。

①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。



(a) 抗力(水平波力)測定結果



(b) 揚力(鉛直波力)測定結果

図-2 橋梁上部工への作用力の計測結果例 (RC橋:水深2.5m 津波高さ5m)

②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。

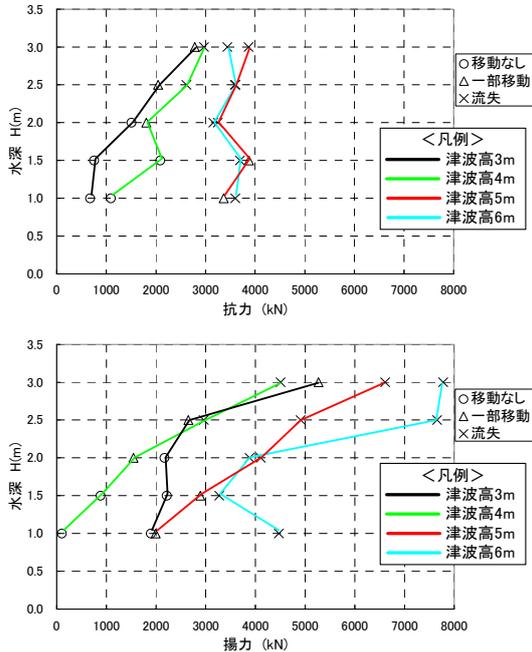


図-3 抵抗力・揚力と津波高・水深との関係 (RC 橋)

③高潮実験において、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、特に抵抗力よりも揚力が卓越する傾向がみられる。

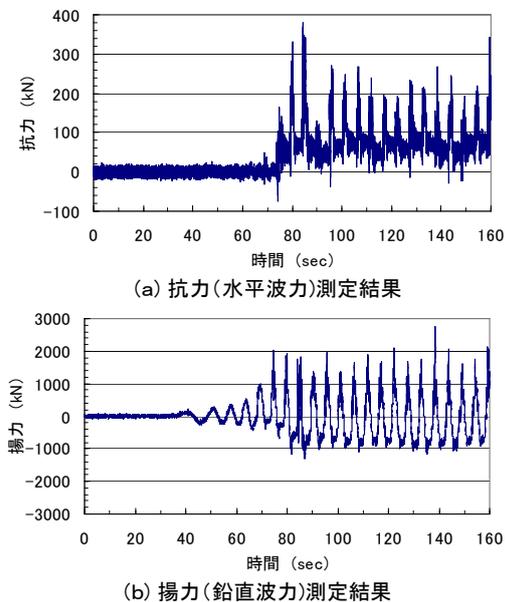


図-4 橋梁上部工への作用力の計測結果例 (RC 橋: 波高 2.16m 周期 5.3sec 水深 7.7m)

③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。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砕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。

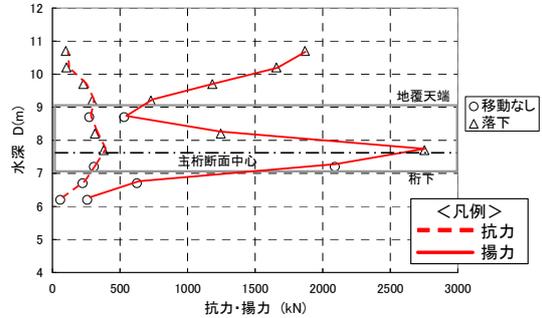


図-5 抵抗力・揚力と水深との関係 (RC 橋)

### (3) シミュレーション解析結果

シミュレーション解析では、水理実験の結果を定性的・定量的に概ね再現できたとともに、津波の被害軽減策として考案した移動制限装置(せん断キー)の有効性について検証できた。以下に、得られた知見を示す。

①粒状体個別要素法 (Practical Flow Code : PFC) を用いた水理実験の再現解析では、流体の負圧を表現できない、自由水面を境界条件として与えることができないなどの、PFC モデル自身のもつ制約により、定性的な再現にとどまった。



図-6 PFC モデルによる津波の解析例 (RC 橋)

②粒子法 (Moving Particles Semi-implicit Method : MPS 法) を用いた津波水理実験の再現解析では、水やコンクリートに標準的な物性値を与えるのみで、水の床版裏面への回り込みや飛沫等の再現ができ (図-1)、実験結果を定性的・定量的に概ね再現できた。

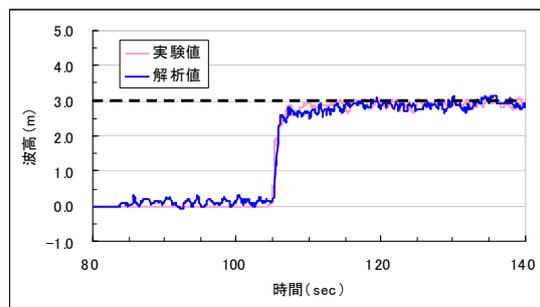


図-7 波高の時刻歴の解析結果例

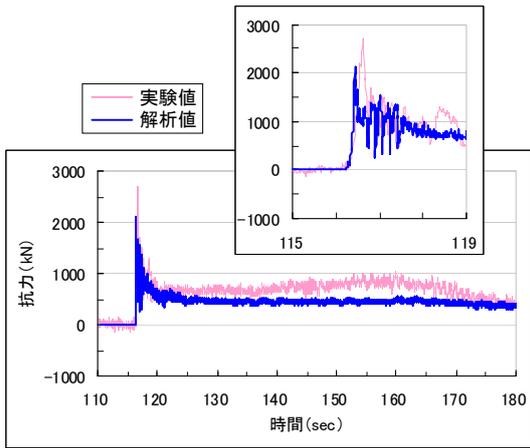


図-8 橋梁上部工への作用力(抗力)の解析結果例

③MPS法を用いた高潮水理実験の再現解析では、床版を越流する水深が浅い場合に水粒子の圧力が0と判定されやすいというMPS法自身のもつ特性のため、特に揚力について定性的な再現にとどまった。ただし、これは粒子径を小さくすることにより対応可能であると考えられる。

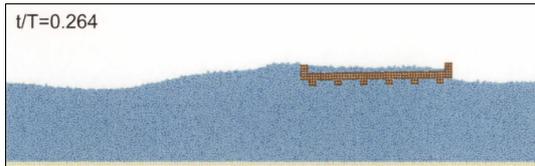


図-9 MPS法による高潮の解析例(RC橋)

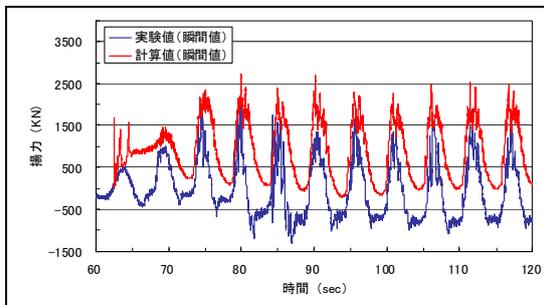


図-10 橋梁上部工への作用力(揚力)の解析結果例

④MPS法を用いた津波水理実験の再現解析及び被害軽減策の検証解析では、橋梁上部構造の流失時の挙動は、支承部に作用する反力及びアニメーションによると、津波が橋梁に衝突後すぐに支承部が破壊し、上部構造の前面(津波が当たった面)が浮き上がる。しかし、上部構造はすぐに橋台の上に落下し、その後は津波に押され、水平移動を行う。その後、移動制限装置に引っかかり、流失を免れるという挙動を示した。

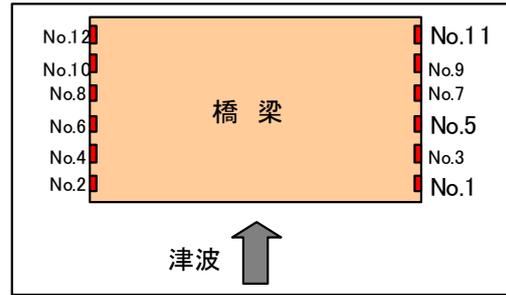


図-11 支承番号

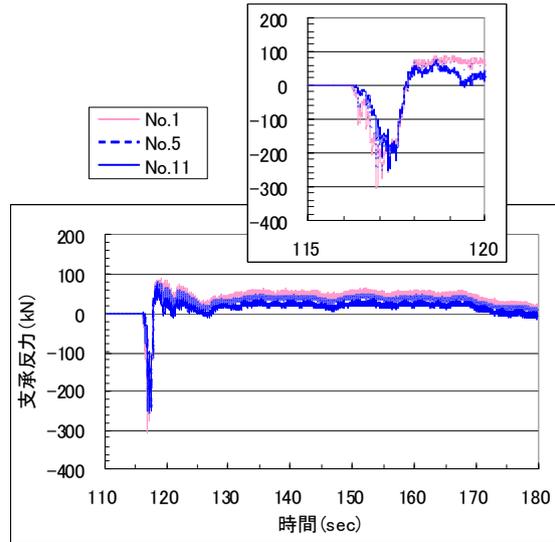


図-12 支承部に作用する反力(鉛直方向)

⑤MPS法を用いた津波被害軽減策の検証解析では、橋梁上部構造は支承破壊後、下流方向へ流されるが、移動制限装置に引っかかって流失を免れており、あくまで1つの解析例ではあるが、津波による橋梁上部構造の流失を防止する機構として、本来、地震時における上部構造の移動制限装置であるせん断キーが1つの有効な対策である可能性が示された。なお、移動制限装置には橋梁上部構造の衝突に対する緩衝材としてゴムパッドを想定したが、ゴムパッドが薄い場合、上部構造が移動制限装置に衝突した時点で計測される抗力に、支承固定の場合のピーク値を超えるケースが生じた。これは、移動制限装置を設ける場合、緩衝材の設置が重要であることを示していると考えられる。

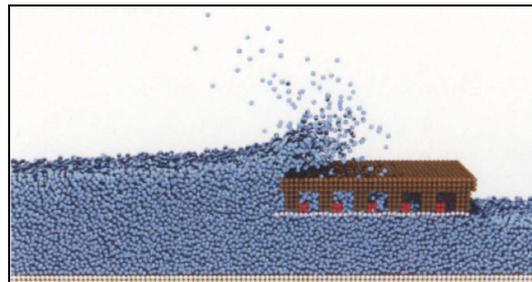


図-13 被害軽減策の解析例(RC橋)

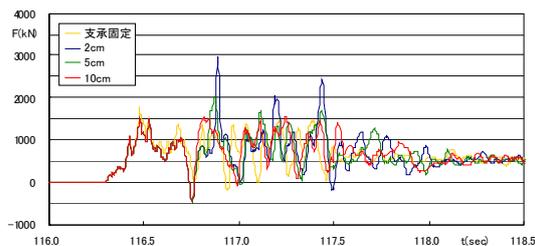


図-14 上部構造に作用した抗力(水平力)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① 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、査読無し、12巻、2009、81-84
- ② 運上茂樹、津波災害軽減方策に関する研究委員会報告書 6.3 橋梁、津波災害軽減方策に関する研究委員会報告書、査読無し、2008、91-97
- ③ 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、査読有り、11巻、2008、24-29
- ④ 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、査読無し、11巻、2008、97-100
- ⑤ 杉本健、運上茂樹、HYDRAULIC MODEL TESTS ON THE BRIDGE STRUCTURES DAMAGED BY TSUNAMI AND TIDAL WAVE、PROCEEDINGS OF THE 23<sup>rd</sup> U.S.-JAPAN BRIDGE ENGINEERING WORKSHOP、査読無し、23巻、2007、233-242
- ⑥ 運上茂樹、津波による橋梁被害、日本地震工学会誌、査読無し、6巻、2007、25-27

[学会発表] (計3件)

- ① 薄井稔弘、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、2009年1月28日、土木学会会議室
- ② 杉本健、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、2008年1月31日、土木学会講堂
- ③ 杉本健、HYDRAULIC MODEL TESTS ON THE BRIDGE STRUCTURES DAMAGED BY TSUNAMI AND TIDAL WAVE、THE 23<sup>rd</sup> U.S.-JAPAN BRIDGE ENGINEERING WORKSHOP、2007年11月5日、Tsukuba Japan

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

運上 茂樹 (UNJOH SHIGEKI)

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・上席研究員

研究者番号：60355815

### (2) 研究分担者

田中 茂信 (TANAKA SHIGENOBU)

独立行政法人土木研究所・水災害リスクマネジメント国際センター・上席研究員

研究者番号：70414985

遠藤 和男 (ENDO KAZUO)

独立行政法人土木研究所・耐震研究グループ・主任研究員

研究者番号：90370725

杉本 健 (SUGIMOTO TAKESHI)

独立行政法人土木研究所・耐震研究グループ・主任研究員

研究者番号：90442847

### (3) 連携研究者

田中 茂信 (TANAKA SHIGENOBU)

独立行政法人土木研究所・水災害リスクマネジメント国際センター・上席研究員

研究者番号：70414985

薄井 稔弘 (USUI TOSHIHIRO)

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・主任研究員

研究者番号：60515336