

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職
	コウサ ケンジ 幸左 賢二		九州工業大学建設社会工 学科		教授
②研究 テーマ	名称	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			
	政策 領域	[主領域] (7)防災・災害復旧対策	公募	タイプIIブレイクスルー	
		[副領域]	タイプ		
③研究経費 (単位:万円)	平成19年度	平成20年度	平成21年度	総合計	
※端数切り捨て。	1,200	1,000	1,000	3,200	
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)				
氏名	所属・役職 (※平成22年3月31日現在)				
宮島 昌克	金沢大学大学院 教授				
藤間 功司	防衛大学校 教授				
庄司 学	筑波大学 准教授				
小野 祐輔	京都大学大学院 助教				
重枝 未玲	九州工業大学 准教授				
廣岡 明彦	九州工業大学 准教授				
木村 吉郎	九州工業大学 准教授				
⑤研究の目的・目標	<p>最近の津波研究の成果により、地震発生に伴い海岸に押し寄せる津波高については、ある程度予測が可能となりつつある。一方、津波による道路構造物の被害評価については、検討自体が極めて少ない状態である。このような背景から、以下の手法を用いて、早急に津波が道路構造物に及ぼす影響について検討するとともに、その軽減方策の確立を目指す。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>スマトラ沖地震による道路構造物の被害状況の分析 津波が、道路構造物に与える影響を評価し、部材別の損傷度と津波高さとの関係を明らかにする。</li> <li>橋梁の津波外力に対する設計手法の確立 実損傷構造物をモデルとした、水理実験および数値解析により、橋梁を対象とした作用波力モデル、橋梁抵抗モデルを提案する。</li> <li>盛土構造物に対する設計手法の確立 遠心模型実験により従来の盛土高と越流水深の判定基準の妥当性を検証する。</li> <li>モデル地区を対象とした津波被害予測 和歌山県紀南事務所管内のモデル地域の想定被害を推定し、最適な対策手法を提案する。</li> </ol>				

## ⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

### 1. スマトラ沖地震による道路構造物の被害状況の分析（担当：幸左，藤間，庄司）

19, 20年度にはスマトラ島において被害状況・地形測量を実施した。20, 21年度にはこれらの結果を用いて数値解析を実施した。その結果，津波作用力と桁抵抗力の比（ $\beta$ ）と損傷ランクには明確な相関が認められた。また，詳細測量を実施した3橋梁の数値計算結果によると，抵抗力が小さいにも拘わらず損傷の小さいRitting橋では後面山地の影響により津波流速が小さかったことを明らかにした。

### 2. 橋梁の津波外力に対する設計手法の確立（担当：幸左，藤間，庄司，木村）

19, 20, 21年度には津波により3mの桁移動が発生したLunge Ie橋をモデルとした2種類（中型，小型）の水理模型実験を実施した。その結果を用い，想定津波高さ，桁位置をパラメータとした水平力，上揚力算定式を提案した。

### 3. 盛土構造物に対する設計手法の確立（担当：廣岡・重枝）

被害事例に基づく盛土高と越流水深の判定基準の妥当性を遠心模型実験により検証した。その結果，盛土被害には越流した波の影響が大きいこと，盛土高2mまでは従来の判定基準の適合性が高いことを明らかにした。

### 4. モデル地区を対象とした津波被害予測（担当：幸左，藤間，宮島，小野）

紀南事務所管内の175橋を照査した結果，10橋について桁移動の可能性が指摘された。そこで，想定津波高さが8mと特に浸水高の高い3橋を対象に，上記の実験結果を基に，詳細図面を用いて桁に作用する水平波力，上揚力を算定し，桁の水平抵抗力，鉛直抵抗力との照査を実施した。その結果，2橋については水平抵抗力が小さく，被害危険性が高いことから，対策工法を提案した。

## ⑦中間評価で指摘を受けた事項への対応状況

### 1. スマトラと日本の橋梁や盛土，地盤などの違いを踏まえた上で，スマトラの調査結果を具体的にどのように反映するのか。

スマトラ島で被害の生じた橋梁のうち代表的3橋について，橋梁形状，地盤，地形などの詳細分析を実施した。日本の代表例として被害が想定されている串本地区においても同様の調査を実施し，その津波高さ，桁高，桁形状の差異を考慮した上で，設計法を提案した。

### 2. 模型実験において相似則を十分考慮されたい。

実験においては，フルード則を用いて相似則を考慮するとともに，実構造物においても相似則を考慮した設計式を提案した。

### 3. 水平力および上揚力を同時に組み合わせた作用力式は問題があるのではないか。

詳細に検討の結果，ご指摘に従い水平力，上揚力をそれぞれ独立した提案式と修正しました。

### 4. ブロック積み工などによる標準的な補強工法の提案が挙げられているが，どのようなプロセスで提案を行うかが不明確である。

ブロック積み工等を実施した道路盛土についても模型実験を実施し，補強の有無による補強工法の効果についても検討した。

## ③研究成果

### 1. スマトラ沖地震による道路構造物の被害状況の分析

本検討では、現地調査の被害分析と簡易式を用いた詳細調査を行っている。まず、現地調査の被害分析では、過去4回の被害調査において確認できた26橋を対象とし、それらの損傷程度、構造種別を分類し、各部材による損傷度の違いについて検討した。その結果、26橋のうち損傷ランクAが上部工で13橋、土工部で7橋と多く、これらの部材で大きな損傷が発生していることが分かった。

ついで、詳細調査では26橋中18橋を対象として、津波作用力と桁抵抗力の比（ $\beta$ ）と構造物の損傷度の関係を分析した（図-1）。損傷ランクの平均値はAでは0.8、Bでは1.9、Cでは2.2となり、 $\beta$ 値と損傷ランクは明確な傾向を示す。また、 $\beta$ 値が最も大きい橋梁種別はRC桁（2.7）であり、最も小さい橋梁種別は鋼トラス桁（0.6）である。例えば、鋼トラス桁では抗力係数が大きく、桁長が長いために $\beta$ 値が小さくなるためである。

以上のように多数の橋梁を対象に、橋梁の抵抗力と津波外力の関係を定量的に評価した事例は従来極めて少なく、上部工および土工部が設計上の着目すべき部材であること、およびこれらの損傷に対する設計法が重要であることを示した。

### 2. 橋梁の津波外力に対する設計手法の確立

本研究では波高をパラメータとして波力、揚力の計測を行い、橋梁上部工における津波外力算定式の提案を行った。図-2に示すように津波が桁に作用する水平波力（ $F_x$ ）、上揚力（ $F_z$ ）を計測した。図-3に示すように実験ケース（波形状、津波高さ、桁下高）ごとに、（桁の位置/波高）と（水平波力/桁側面積/静水圧）の関係をプロットし、包括する一次近似曲線を求めた。

ついで、得られた式を変換し、津波波高と桁下高が分かれば、作用力を算出することが可能となる水平波力、上揚力算定式を提案した。

以上の手法を用いることにより、当該地点の到達津波高さを想定することにより、津波作用力、抵抗力を算定することが可能となり、橋梁構造物に対する想定被害度を評価することが我が国で初めて可能となった。

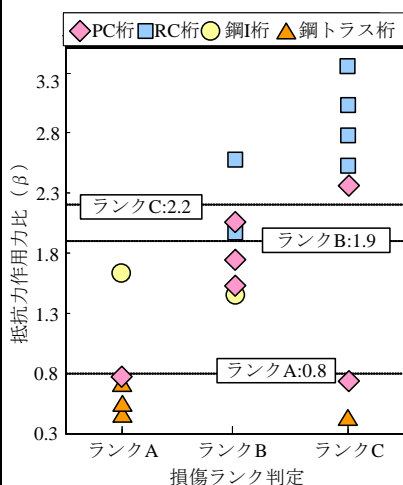


図-1 損傷ランク判定別の $\beta$ 分布

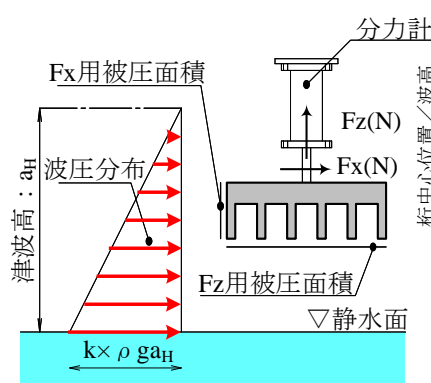


図-2 実験計測要領図

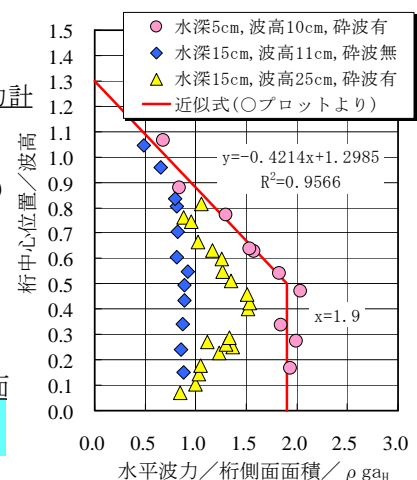


図-3 波圧と静水圧の関係

## ⑧研究成果（つづき）

### 3. 盛土構造物に対する設計手法の確立

現在の津波による道路盛土の想定被災状況は、41ケースの過去の被災事例により求めた越流水深と盛土高の関係式によっている。本研究では、この判定基準の精度の検証を目的とし、一連の遠心模型実験を用いた津波による盛土構造物の損傷被害評価実験を実施した。実験は、法面工を設置しない台形盛土タイプと擁壁模型および張工模型を有するコンクリート護岸タイプの2種類を用いて、全27ケースを実施した。

図-4に実験結果と被災判定基準図の関係を示すが、既往の被災判定手法は被災事例に示されるように道路盛土や鉄道盛土などの単に土を盛り上げた盛土に対しては有用であることを明らかにした。護岸タイプでは、盛土高および越流水深が高く発生しているにも拘らず破壊評価は非破壊と判定されており、コンクリート護岸構造物の場合、盛土部分の被災軽減効果があるといえる。

以上のように、遠心模型実験により、従来の道路盛土の被災判定基準の妥当性およびコンクリート護岸タイプの有効性が我が国で初めて明らかにされた。

### 4. モデル地区を対象とした津波被害予測

津波対策が進んでいる和歌山県南部を対象に、国道に架かる橋梁について現地調査、橋梁諸元の整理および津波による浸水状況の分析を行った。紀南国道事務所管内の橋梁は全175橋で、そのうち津波浸水区間内の橋梁は89橋で、要検討と判断された橋梁は66橋である。この66橋について架設状況や浸水シミュレーション結果を整理し、津波高さが橋梁道路面の1m下から上方におよぶ橋梁は19橋であった。ついで、提案式を用いて、照査した結果を図-5に示すが、19橋の内10橋について桁移動が生じる可能性があることが分かった。

そこで、詳細図面の入手できた3橋について、詳細分析を実施し、2橋については水平抵抗力が小さくなり、その補強手法の提案を行った。

以上のように、想定される南海・東南海地震を対象として紀南国道事務所内の橋梁について危険度判定および補強手法の提案を実施し、本検討手法が実用面でも適用可能であることを示した。

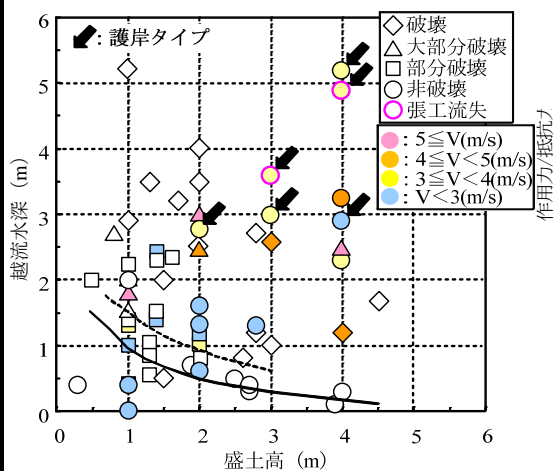


図-4 実験結果と被災判定基準図

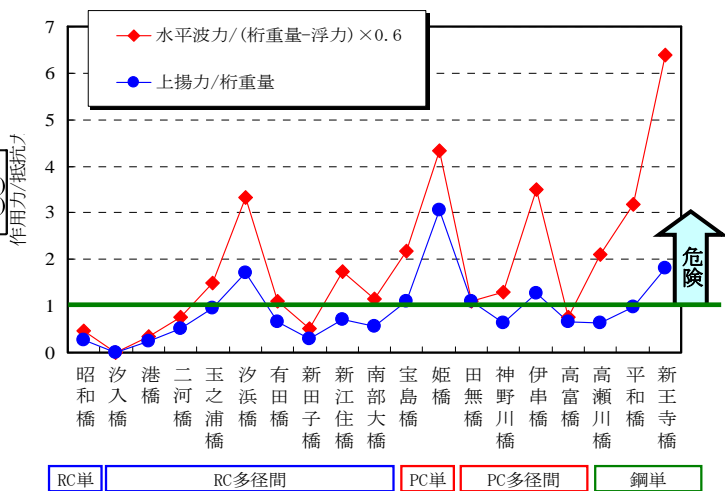


図-5 19橋の作用力と抵抗力の比

## ⑨研究成果の発表状況

本研究関係の研究成果を平成19年度に4編、平成20年度6編、平成21年度8編合計18編におよぶ査読付論文を発表している。以下に代表的査読付論文のみを示す。

- 1) 幸左賢二, 二井伸一, 庄司学, 宮原健太: スマトラ沖地震による橋梁の被害分析, 構造工学論文集 Vol. 56A, 2010.
- 2) 二井伸一, 幸左賢二, 庄司学, 木村吉郎: 津波形状の違いによる橋梁への津波作用力に関する実験的検討, 構造工学論文集 Vol. 56A, 2010.
- 3) 幸左賢二, 二井伸一, 宮原健太, 庄司学: スマトラ沖地震によるPC橋梁の被害分析, 第18回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2009.
- 4) Akihiko Hirooka, Hiroshi Fujii, Kousuke Tanaka, and Hideo Nagase: CENTRIFUGAL MODELING OF ROAD EMBANKMENTS ENGULFED BY TSUNAMI FOR ITS DAMAGE PREDICTION, JOINT CONFERENCE PROCEEDINGS 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE), 2010
- 5) 嶋原良典ら: 2004年インド洋津波におけるスマトラ島北西部沿岸の被災橋梁に関する数値解析, 海岸工学論文集, Vol. 65, 2009.
- 6) 庄司学, 森山哲雄, 平木雄, 藤間功司, 嶋原良典, 笠原健治: 巻き砕波段波及び寄せ波砕波段波の作用を受ける橋桁の津波荷重評価, 海岸工学論文集, Vol. 65, 2009.
- 7) アフマドファウジ, 嶋原良典, 藤間功司, 水谷法美: 陸上構造物に作用する津波波力の推定手法に関する実験, 海岸工学論文集, Vol. 65, 2009.
- 8) 笠原健治, 藤間功司, 嶋原良典: 砕波形態を考慮した津波の砕波減衰モデル, 海岸工学論文集, Vol. 65, 2009.
- 9) 幸左賢二, 二井伸一, 庄司学, 宮原健太: 津波波力による桁移動現象の解析的検討, 構造工学論文集 Vol. 55A, 2009.
- 10) 二井伸一, 幸左賢二, 庄司学, 木村吉郎: 橋梁の津波作用力に関する実験的検討, 構造工学論文集 Vol. 55A, 2009.
- 11) 庄司学, 森山哲雄, 藤間功司, 嶋原良典, 笠原健治: 橋桁に作用する津波荷重の評価, 構造工学論文集 Vol. 55A, 2009.
- 12) Yusuke One: SPH Simulation for Modeling Tsunami Force Acting on Structure, Symposium on Giant Earthquake and Tsunami, Phuket, 2008.
- 13) Shoji, G and Moriyama, T.: Evaluation of Tsunami Wave Load Acting to a Deck of a Road Bridge, 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 15-0033(CD-Rom), Beijing, China, 2008.
- 14) 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, 地震工学論文集 Vol. 29, 2007.
- 15) 藤間功司ら: スマトラ島北西海岸における2004年インド洋津波の痕跡高分布, 土木学会地震工学論文集 Vol. 29, 2007.
- 16) 笠原健治, 藤間功司, 嶋原良典: 流れを遡る津波の砕波機構に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 55, 2008.
- 17) K. kosa, G. Shoji and K. Tasaki: DAMAGE TO BRIDGES DURING THE OFF-SUMATRA EARTHQUAKE, Proceeding of 4<sup>th</sup> CECAR, 2007.
- 18) Shoji, G. and Moriyama, T.: Evaluation of the structural Fragility of a Bridge Structure subjected to a Tsunami Wave Load, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 29, No.2, 2007.

## ⑩研究成果の社会への情報発信

下記の公開実験を実施するとともに、土木学会の委員会活動の一環として津波設計法WGを組織し、シンポジウムにおいて活動状況の報告を実施した。

- 1) 橋梁への津波の作用力に関する公開実験, 下関港湾技術調査事務所, 2009.4, 参加者20名
- 2) 橋梁への津波の作用力に関する公開実験, 下関港湾技術調査事務所, 2009.10, 参加者20名
- 3) 日韓三大学交流シンポジウム特別講演, 九州工業大学, 2009.8, 参加者50名
- 4) 日韓シンポジウム特別講演, 九州工業大学, 2010.5, 参加者50名
- 5) 地震時保有耐力法シンポジウム, 津波WG中間報告, 2008.2, 参加者100名
- 6) 地震時保有耐力法シンポジウム, 津波WG報告, 2010.2, 参加者100名

## ⑪研究の今後の課題・展望等

本研究により津波による橋梁への作用力, 抵抗力の標準的な評価手法および盛土構造への評価手法が提案され, 十分な成果が得られたと考えられる. 一方さらに検討すべき課題も存在する. 以下に具体的検討課題について説明する.

### 1. 特殊形状の桁に関する検討

本研究ではもっとも多いT形断面に着目して検討を実施した. これに対して, 鋼I桁やボックス断面では, 抗力係数が大きく異なり, 水平力や上揚力も大きく異なることが予想され, これらの形状に対する検討が不可欠である.

### 2. 桁の補強手法に関する検討

本研究では, ケーブルやアンカーボルトを用いることにより, 水平抵抗および鉛直抵抗を確保できると仮定し, その有効性について確認した. しかしながら, アンカーボルトやケーブルが共同して抵抗することは必ずしも明確ではなく, 模型実験により確認する必要がある.

### 3. 盛土の補強手法に関する検討

実験によりコンクリート護岸工については流失防止効果が顕著であることは明らかとなったが, その評価は定量的なレベルにはなっていない. 今後, さらに遠心模型を用いて, コンクリートブロック形状や津波流速をパラメータとした実験を実施することにより, 具体的な設計手法の確立が求められる.

## ⑫研究成果の道路行政への反映

具体的な道路行政に対する成果を以下に示す.

### 1. 設計の考え方の明示

本設計手法では想定津波高さ, 桁位置により設計波力を算定することができる. よって想定津波高が明らかになれば, 標準的な橋梁に対しては危険度の判定が可能である. 同様に, 道路盛土についても浸水高さが分かれば危険度の判定が可能となり, 津波に対する標準的な設計手法が明示された.

### 2. 区域における想定被害検討手法の明示

本検討により, 南海・東南海地震が想定される道路において, 橋梁および盛土部の被害の想定が可能となった. 同様の手法を用いることにより, 例えば南海・東南海地震が想定される九州, 四国, 近畿, 東海区域内の道路構造物被害の想定が可能となる.

### 3. 対策工の明示

危険と判定された橋梁に対してはケーブルやアンカーボルトを用いた対策法が有用であることを明らかにした. 同様に, 盛土に対してはコンクリート護岸による対策法が有用であることを明らかにした. 本手法を標準として, さらに効率的な手法を検討することにより, 実構造物の津波に対する補強対策が可能となった.

## ⑬自己評価

### 1. 研究目的の達成度

3カ年に亘る実験により、津波に対する橋梁や盛土部の照査法の提案といった目的は達せられた。また、設計手法の妥当性を評価するために実施した和歌山県の橋梁被害予想分析により、175橋のうち10橋で被害が想定されるなど、極めて実務的な成果も得られた。

### 2. 今後の展望

標準的な橋梁形状や盛土構造については、評価手法が明らかとなったものの、特殊な桁形状、背面地形の影響、橋梁や盛土の補強手法については、必ずしも十分な検討とはなっていない。今後、これらをパラメータした実験を実施することによって、各個別構造物に対する設計法や補強手法を提案することが可能となる。

### 3. 道路政策の質の向上への寄与

本研究成果により、津波に対する標準的な設計手法が明示された。よって本研究手法を用いて、各津波来襲想定地域の橋梁の実務設計を実施することが可能と考えられる。

### 4. 研究費の投資価値

本研究においては、3カ年に3種類の実験（中型水理、小型水理、遠心模型）、2箇所の現場計測（スマトラ島、和歌山県）により、十分な成果が得られたと考えられる。研究者8名、研究支援大学院生20名でこれらの課題に取り組み、得られた成果を考慮すると業務費用3200万円に対して、1.0倍近い投資効果があったと考えられる。