

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職
	こうさ けんじ 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	津波に強い道路構造物の研究開発			
	政策 領域	[主領域]	【領域7】防災・災害復旧対策	公募	タイプII
		[副領域]		タイプ	
③研究経費（単位：万円） ※H24は精算金額、H25は受託金額、H26は計画額を記入。 端数切り捨て。	平成24年度	平成25年度	平成26年度	総合計	
	1,200	2,250	2,250	5,700	
④研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。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			
廣岡 明彦		九州工業大学・准教授			
藤間 功司		防衛大学・教授			
嶋原 良典		防衛大学・助教			
庄司 学		筑波大学・准教授			
小野 祐輔		鳥取大学・准教授			
⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）					
本研究では以下の課題に取り組むことにより耐津波設計法を確立するとともに、津波に強い道路構造物を開発することを目的とする。					
1) 構造物被害分析：10mを超える大津波による道路構造物の概略被害調査を実施し、構造物への作用力と抵抗力の関係を明らかにする。					
2) 地域被害状況分析：画像解析や数値解析による橋梁被害の詳細分析を実施し、橋梁への作用力と抵抗力の関係を明らかにする。					
3) 橋梁に関する検討：10mを超える津波高を想定した水理模型実験により、桁、橋台への作用力、抵抗力算定手法を提案する。					
4) 橋台構造に関する検討：橋台の被害調査を実施し、その損傷度を評価する。また、その損傷メカニズムを明らかにする。					
5) 津波設計法・対策手法提案：実橋梁・橋台構造物を対象に津波対策手法を提案する。具体的には、東日本大震災の被害橋梁などを対象に、安全性の照査手法、対策工を提案する。					

⑥これまでの研究経過

24, 25年度の検討により得られた概要を以下に示す。

I. 構造物被害分析

現地調査で確認した39橋を対象に、損傷度と β 値（桁抵抗力と津波作用力の比）を評価した。

$$\beta = S/F = \mu W / 0.5 \rho \cdot c_d \cdot V^2 \cdot A \quad (1)$$

S：桁抵抗力 F：津波作用力 V：津波の流速 A：被圧面積 μ ：摩擦係数 W：上部工重量

図-1に示すように桁損傷度Aでは0.5~1.4の範囲にあり、平均値は0.89となる。一方、桁損傷度Cは0.6~4.9の範囲にあり、平均値は1.52となる。Cの平均値は、Aの平均値に対し、1.76倍の大きな差となっている。このように、桁損傷度の平均値で見れば β 値の上部構造の流失評価指標としての有効性が見いだせる。特に、 β 値が2.5を超える橋梁が4橋あるが、図-2に示すようにいずれも橋面積あたりの重量の重い道路橋のコンクリート桁であることに加え、桁高(D)に比べて、橋の総幅(B)が比較的大きい扁平な形状である。以上のことから、 β 値が2.5を満足するような桁形状にすれば極めて流失しにくいことが分かる。

図-3は各地域で浮遊物の移動速度を計測した結果である。地域および計測位置により測定流速は1.9~9.0m/sと大きく変化するが、平均的には5.7m/sとなっている。地域で見ると、陸前高田では平均7.0m/sと他の地域よりも大きな値になっている。以上の結果から、計測された津波流速は平均的には6.0m/s程度で、最大でも8.0~9.0m/sであることが分かる。逆に言えば(1)式において、この流速に耐えられるように設計できれば、橋梁は流失しないと考えられる。

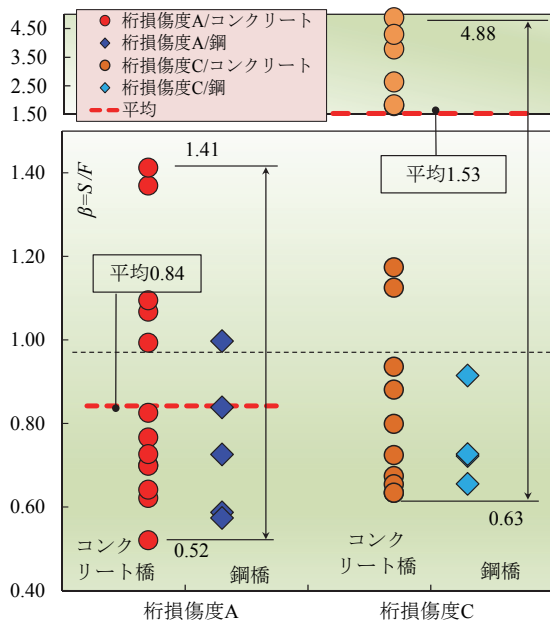


図-1 桁抵抗力作用力比 (β) と損傷度

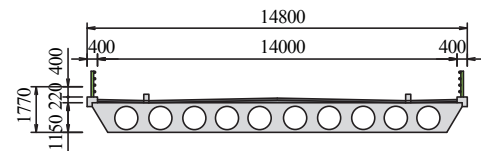


図-2 β 値が2.5を超える橋梁例（川原川橋）

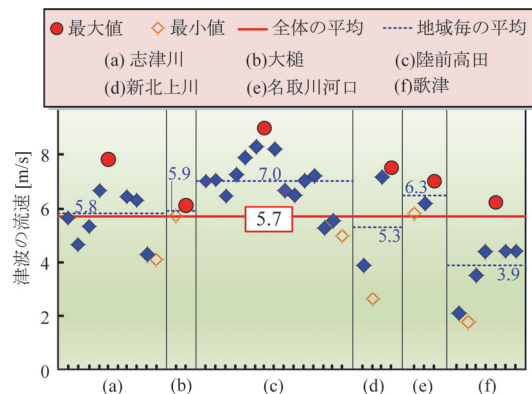


図-3 映像分析により算出した各地域の流速

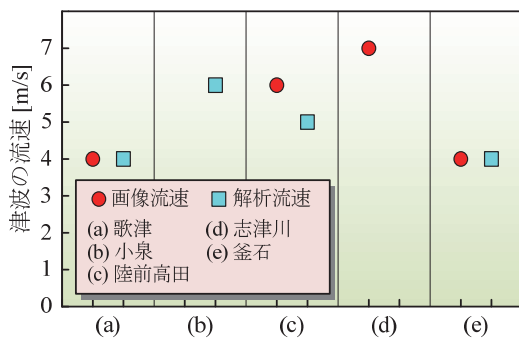
II. 地域被害状況分析

II-1. 分析概要

津波作用による橋梁の被害原因を明らかにするために、5地区を対象に詳細な被害分析を実施した。まず映像解析に基づいて時刻歴の流速と水位変化を求め、同様に、津波遡上伝搬解析を実施し、映像解析結果と比較し、その整合性を確認する。以上により得られた流速を用いて桁抵抗力作用力比を求め、被害状況を再現した。図—4に5地区の分析結果を示す。分析の結果、いずれも先端の段波状津波の高さは2～3mであり、津波は桁下面を通過している。その後、津波は1～3m/minの比較的緩やかな水位上昇を伴って、桁位置に到着する。このときの流速は、地区により異なるが、4～7m/s程度であった。このように、桁高5mを超える橋梁では、水位上昇の緩やかな定常流的な津波により流出に至る場合が多いことが明らかになった。

II-2. 陸前高田の被害状況

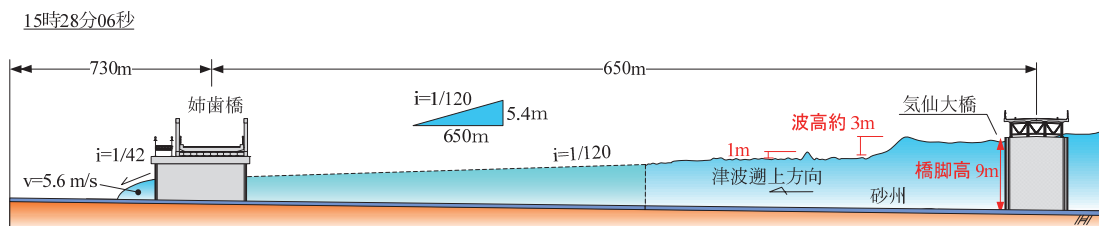
分析の代表例として陸前高田での結果について示す。図—5には陸前高田市沿岸部の津波浸水範囲および橋梁位置を、図—6には画像分析により得られた津波の全体形状を示す。水面勾配に着目すると、全体の水面勾配が1/120であるのに対して先端部の勾配は1/42と3倍程度も大きいことから、津波先端が通り過ぎた直後は水面が急激に上昇するが、その後の上昇傾向は比較的緩やかであることが分かる。図—7には数値解析による流速と浸水高の時刻歴変化を示す。浸水高は地震発生38分後から上昇を始め、46分頃に最大浸水高に至る。一方流速は桁下の高さに至る時点で5m/s、桁が完全に水没する時点で6m/sまで上昇する。図—8には桁への作用力と桁抵抗力の時刻歴変化を示す。区間(b)では浮力の影響で抵抗力が8580kNから5603kNへと35%減少する。作用力は流速がピークとなる42分30秒では作用力が抵抗力を上回り流出に至る。解析結果は画像分析から得られた桁水没後に桁流出に至る実現象とも一致しており、妥当な結果となっている。



図—4 地域別分析結果



図—5 陸前高田全体の橋梁被害と浸水範囲



図—6 気仙川を遡上する津波の全体形状

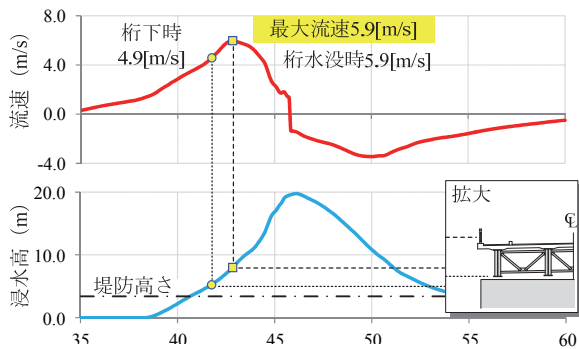


図-7 水位と流速の時刻歴変化

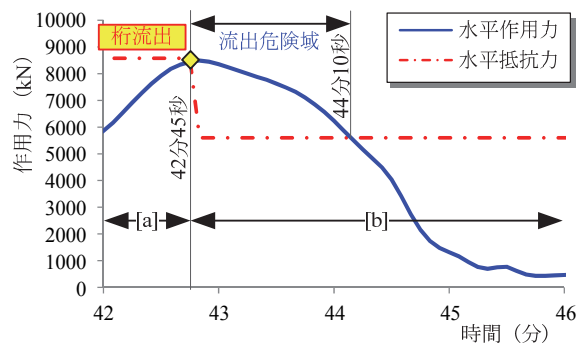


図-8 作用力と抵抗力の時刻歴変化

Ⅲ. 橋梁に関する検討

Ⅲ-1. 孤立波実験

津波先端部に見られる段波状の波が橋梁に作用することを想定し、これを模擬した孤立波を作用させた。この実験では孤立波の波高をパラメータとし、波高(10, 15, 20, 25cm)、水平波力、鉛直波力、流速、圧力の測定を実施した。図-9に実験装置を示す。図の左端にはスライド式造波装置を示す。図-10に波高と水平波力の関係を示す。波高の増加に伴って、水平波力は概ね比例して増加することが分かる。図-11には著者らの提案式(後述の(2), (3)式)を用いた算定波力と計測水平波力の関係を示す。波高に増加に伴い、計測波力と算定波力が20%程度の差異で対応できていることが分かる。

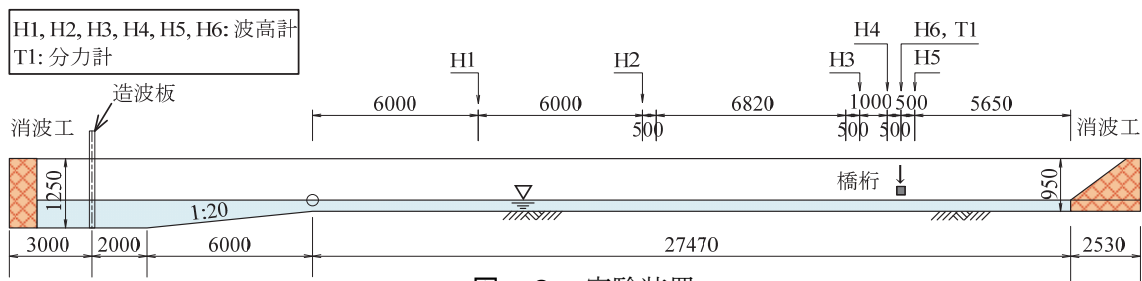


図-9 実験装置

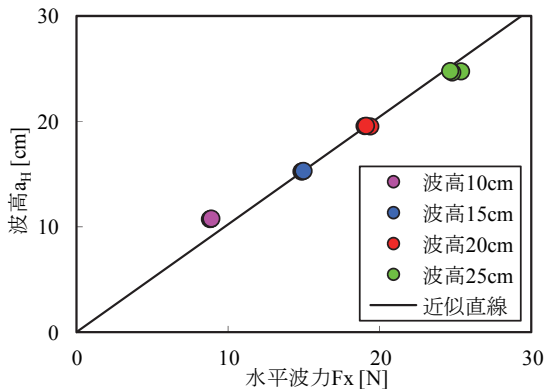


図-10 水平波力と波高

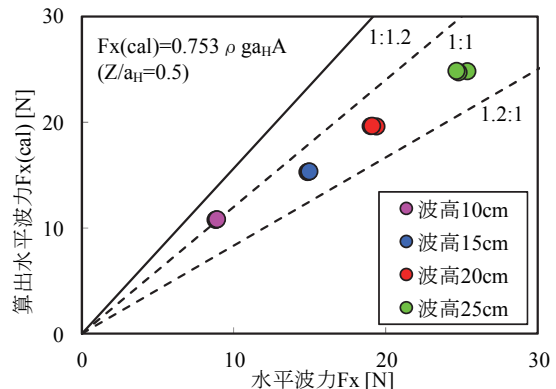
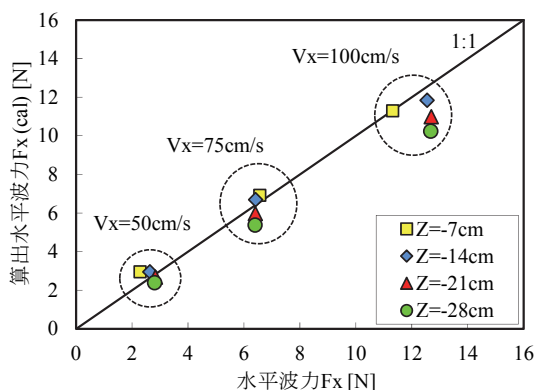


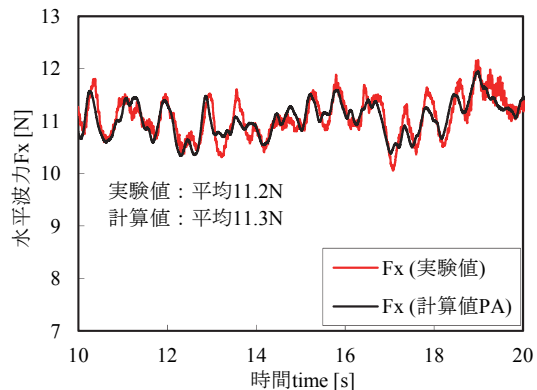
図-11 提案式と水平波力の関係

Ⅲ－２．定常流実験

水位上昇が緩やかな定常的な津波を想定し，流速（50, 75, 100cm/s），桁位置(水深35cmに対して7, 14, 21, 28cm)をパラメータとして，水平波力，鉛直波力，流速，圧力の測定を実施した．**図－12**には計測水平力と提案式（ $0.5 \rho c_d V^2 A$ ）との比較を示すが，ほぼ対応した結果となっている．**図－13**には桁側面で計測された圧力に側面積を掛けた算定波力と分力計による測定波力の関係を示すが，ほぼ対応しており，側面のみで作用力を受けていることが分かる．



図－12 Fx と算出 Fx

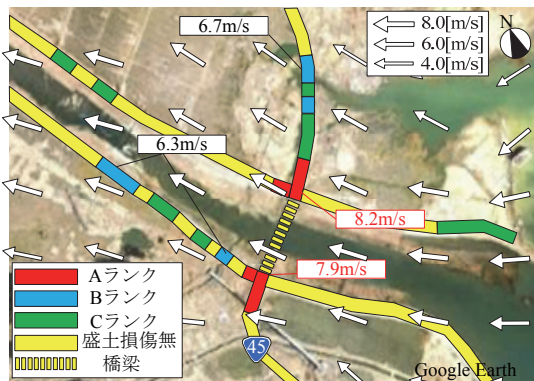


図－13 Fx と圧力計から求めた Fx

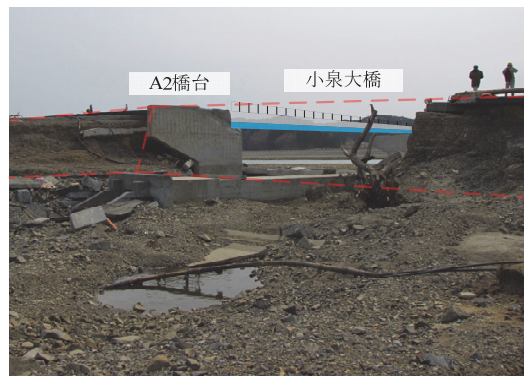
Ⅳ．橋台構造に関する検討

津波作用による橋台構造物の被害原因を明らかにするために，3地区（小泉，陸前高田，志津川）を対象に橋台構造物の被害分析を実施している．代表で小泉地区の被害分析を示すが，**図－14**には盛土被害状況と数値解析結果を示し，**図－15**にはAランクとなる橋台背面盛土の被害状況を示す．津波は概ね河川方向に遡上しており，直角方向の津波作用を受けた道路盛土は被害の発生割合が大きい．盛土越流時の最大流速は6m/sを超え，最大は8m/s程度となる．一方，津波の遡上方向と同じ方向の河川堤防の被害はB, Cランクに限定され，被害の発生箇所は護岸境界部や樋門樋管などの構造物周辺に集中する．

このように，河川を遡上する方向と直角方向となる道路盛土の被害が大きく，特に橋台背面の被害が最も大きい．よって，今後橋台と背面盛土を対象とした津波実験を実施する．



図－14 盛土被害状況と数値解析結果



図－15 橋台背面の盛土被害状況

V. 津波設計法・対策手法提案

現在までの検討状況の概要を以下に示す。東日本大震災の画像分析によると津波形状には孤立波タイプと定常流タイプに区分でき、標準桁の実験によると作用力は以下のように考えられる。

(1) 孤立波タイプの場合

孤立波の波高と桁位置をパラメータとした実験の結果（波高 10cm 砕波有，波高 11cm 砕波無，波高 25cm 砕波有）を図-16 に示す。3種類の実験を包括する近似線を求め、桁への単位面積あたりの作用力を次式のように提案できる。ここで、注意すべき点は a_H は孤立波の波高であり、現地で観測されている浸水高ではないことである。

1) 水平力

$$Z/a_H \geq 0.5 \text{ の場合} \quad q_x = \rho g(3.10a_H - Z/0.42) \quad (2)$$

$$Z/a_H < 0.5 \text{ の場合} \quad q_x = 1.9 \rho g a_H \quad (3)$$

2) 上揚力

$$q_z = \rho g(0.53a_H - z/2.18) \quad (4)$$

ここに、 Z : 桁中心位置 z : 桁下高 a_H : 波高 q_x : 単位面積あたりの水平力 q_z : 単位面積あたりの上揚力

上記式に桁側面積あるいは桁底面積を乗ずることにより作用力を求めることができる。

(2) 定常流タイプの場合

定常流タイプの実験を実施した結果、水平作用力は前述(1)式におけるF値より求めることが可能である。また実験によると定常流の場合、上揚力は水平力に比べて極めて小さいことが確認されている。一方詳細な検討は今後とも必要であるが、例えば観測された孤立波が最大5m程度であったことから、浮力および5m程度の孤立波による上揚力を考慮する設計法も考えられる。

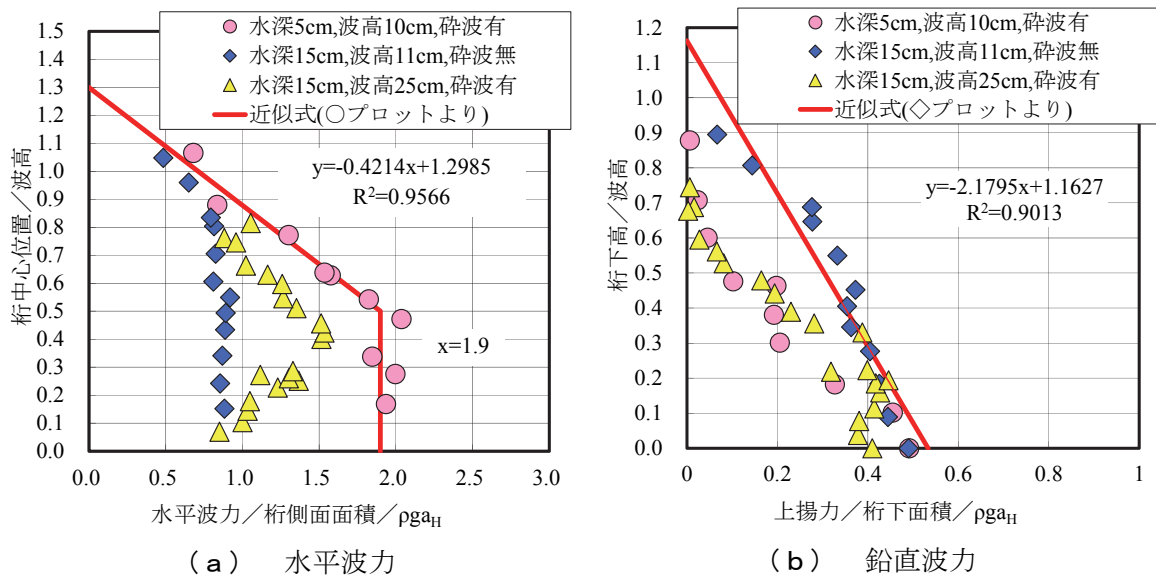


図-16 波力から求めた波圧と静水圧の関係

上記の条件の基で、流失した気仙大橋を対象に、桁に流速 8m/s の定常流に伴い階段状の高さ 5m の孤立波が作用したと仮定し、流失を防ぐための落橋防止構造を検討した。

図-17 に津波対策工を示す。ここでは孤立波による上揚力と浮力を考慮し、対策工のみで水平力に抵抗すると仮定する。水平作用力 36631kN を 24 個のコンクリートブロックで負担すると断面幅 500mm, 長さ 1000mm を配置する程度の規模で十分抵抗できることになる。また、孤立波に比べて定常流では水平作用力が小さいことから、現存の橋脚でも十分余裕を有する結果となっている。

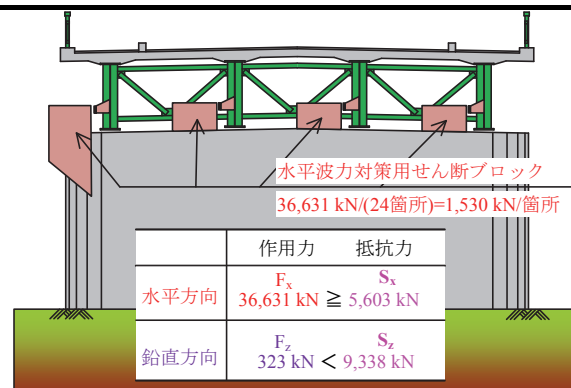


図-17 津波対策工

⑦研究成果の発表状況

I. 発表論文

24, 25年度には下記を含む15件の査読付論文を掲載した。

- 1)桁抵抗力津波作用力に基づく橋梁の被害分析, 佐々木達生, 幸左賢二, 鄭玉龍, 構造工学論文集 Vol.59A, pp.417-427, 2013.
- 2)Tsunami damage evaluation of Utatsu Bridge by video and 2-D simulation analyses, Li Fu, Kenji Kosa and Tatsuo Sasaki, Journal of St. Eng. Vol.59A, pp.428-438, 2013.
- 3)Tsunami damage analysis for bridges in Shizugawa area, Yulong Zheng, Kenji Kosa and Tatsuo Sasaki, Journal of St. Eng. Vol.59A, pp.439-449, 2013.
- 4)津波に対する歌津地区の詳細被害分析, 付李, 幸左賢二, 中野亜美, 佐々木達生, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.799-804, 2013.
- 5)津波被害を受けた小泉地区橋梁の詳細被害分析, 佐々木達生, 幸左賢二, 神宮司博志, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.805-810, 2013.
- 6)EVALUATION OF BRIDGE OUTFLOWS DUE TO GREAT TSUNAMI, Yulong ZHENG, Kenji KOSA and Tatsuo, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.841-846, 2013.
- 7)道路橋の津波による被害分析, 清水英樹, 幸左賢二, 佐々木達生, 構造工学論文集 Vol.58A, pp.366-377, 2012
- 8)Damage Judgment of Utatsu Bridge Affected by Tsunami due to Great East Japan Earthquake, Li Fu, Kenji Kosa, Hideki Shimizu and Zhongqi Shi, Structural Engineering Vol.58A, pp.377-387, 2012
- 9)DAMAGE TO STRUCTURES DUE TO TSUNAMI AND EVALUATION OF TSUNAMI VELOCITY IN SHIZUGAWA, LI FU, Kenji KOSA, Hideki SHIMIZU and Yulong ZHENG, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.2, pp.805-810, 2012
- 10)津波による津谷川周辺地域の PC 桁橋梁を含む構造物の損傷分析, 佐々木達生, 幸左賢二, 付李, 田崎賢治, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, pp. 1117-1122, 2012

II. 招待講演

24, 25年度には下記を含む8件の招待講演を行った。

- 1)津波に対する道路構造物（盛土を含む）の対策と課題, 幸左賢二, 土木学会, 第13回地震災害マネジメントセミナー

III. 表彰

25年度には下記の表彰を受けた。

- 1)津波による橋梁の損傷分析（第21回シンポジウム論文集）平成24年度プレストレスコンクリート工学会賞（論文部門）

⑧研究成果の活用方策

I. 実務への適用に向けた活用方法

1. 津波遡上解析モデルの提案

実被害地域を対象とした画像分析と津波遡上解析結果を照合することにより、精度の向上を図り、標準的な津波遡上解析モデル（メッシュ数、要素分割法、境界条件設定法）を提案する。

2. 耐津波設計法の提案

実構造物の被害分析および実験的検討により、橋梁の被害メカニズムが明確となりつつある。具体的には標準桁（コンクリートT桁）を対象とした実験により、作用力および抵抗特性を明確にした。今後さらに、桁形状（T型、ホロ-桁、I型）をパラメータとした実験により、実橋梁の桁形状ごとの耐津波設計法を提案する。

II. 成果活用の展開

1. 実構造物に対する津波遡上解析モデルの提案

例えば、南海・東南海地震が予想される地域の橋梁を対象として提案した津波遡上解析モデルを用いることにより橋梁の被害の有無を判定することが可能となる。

2. 耐津波対策の提案

上記対象個所に対して、提案設計手法を満足する具体的な抵抗特性を増す手法（例えば落橋防止装置、せん断キーの追加）が提案されることから、実務設計に極めて有益となる。

⑨特記事項

I. 研究で得られた新たな知見

1. 津波形状

5か所の画像分析により、陸上を遡上する津波形状（2～3m程度の先端段波の後に、1～3 m/min. のなだらかな水位上昇を伴う定常流であること）を明らかにした。これにより5mを超える構造物に対しては流速5～6m/sの定常流による作用力が支配的であることを明らかにした。

2. 設計手法の提案

段波および定常流タイプの波高、流速をパラメータとした実験により、橋梁への水平作用力、鉛直作用力を求めた。その結果、波高、津波形状を想定し、津波作用力と抵抗力を比較することによる耐津波設計が可能となった。今後さらに、桁形状、橋台をパラメータとした検討により、橋梁全体系としての耐津波設計法の提案が可能となる。

II. 研究の見通しや進展度（自己評価）

関係者の協力により、東北地方の現地調査において十分なデータが入手できた。また、津波実験においても国土交通省下関港湾事務所の協力により、予定通りのスケジュールで進んでいる。以上から次年度以降の実験や分析の準備体制も十分に整っている。