

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560510

研究課題名（和文）津波外力に対する落橋防止システムの必要性能の明確化

研究課題名（英文）Design of a bridge link system against tsunami

研究代表者

小林 紘士（KOBAYASHI HIROSHI）

立命館大学・総合理工学研究機構・客員研究員

研究者番号：90066712

研究成果の概要（和文）：橋梁に作用する津波外力の特性に関する基礎的な実験を実施した。津波発生用水路に、長方形角柱、みぞ形、台形、六角形および両端が半円形となった断面の模型を設置し、上流から津波を模擬した水を流し、津波外力および表面に作用する圧力の測定をした。津波が作用した瞬間に大きな外力が作用し、その後その力は弱まった。両端が半円形となった断面に作用する流体力はほかの断面に比べ小さく、津波対策断面として有効である。

研究成果の概要（英文）：Fundamental study on tsunami force acting on bridges was conducted. Tsunami flow was modeled in a water channel. Rectangular, channel, hexagonal and trapezoidal section shapes as well as a cylinder with semi circular ends were employed as bridge models. The result showed that the strong forces appeared just after the tsunami hit the models and then these forces were gradually reduced. Rectangular model suffered from strong down force and negative moment of very short duration time. The cylinder with semi circular ends had smallest forces.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2010年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2011年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：土木工学

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、防災、流体、橋梁、落橋防止

1. 研究開始当初の背景

2004年インドネシア・スマトラ沖地震では、インド洋大津波によって橋梁が数十mも流される被害が発生した（幸左ら：スマトラ地震の津波による橋梁被害分析，第29回地震工学研究発表会，2007年）。その他にも数多くの橋梁が流出，あるいは大きく移動し，地震後の人命救助や地域復旧にも支障をきた

した。日本においても，南海地震，東南海地震，東海地震など，海洋型の強大地震の近い将来における発生がほぼ確実とみられており，それらの地震発生にともなう津波は臨海大都市を襲うことが予測されている（内閣府・中央防災会議資料，内閣府防災情報ホームページ）。橋梁は都市のライフラインの一部であり，その被災は都市の災害復旧に対し

で大きな影響を与える。しかるに、橋梁の津波対策はまだ詳細に検討されておらず、橋梁の設計基準にも津波の影響は考えられていない。ようやく、いくつかの研究機関で基礎的な検討が始まったところである。

国交省による検討（片岡ら：道路施設の地震・津波被害想定と対策検討への活用方針，第29回地震工学研究発表会 2007年）では，落橋防止システムのある橋の津波に対する安全性は確保されているという前提条件で進められている。現在の落橋防止システムは，橋軸方向に死荷重反力の1.5倍の耐力を保障するよう設計されているが，この値とて合理的な検討に基づいて決められているわけではない。橋梁に対する津波の作用を考えると，橋軸方向よりも橋軸直角方向に津波が作用するときの方が影響が大きい。現在の落橋防止システムは，津波による橋軸直角方向の力は想定されていない。橋軸直角方向の外力に対する耐力に関する実験結果もないのが現状である。したがって，主に橋軸直角方向に作用することが予想される津波外力に対して，落橋防止システムの効果がどれほどあるのかは，まったくわからない状況にある。研究代表者は研究分担者とともに，これまで落橋防止システムについて研究を進めてきた（伊津野・小林・鎌田：桁落下を想定した桁間ケーブル連結装置の所要条件に関する考察，土木学会論文集，No.668/I-54，2001年，等）。桁が落下する際に落橋防止ケーブルに作用する力について解析的に解を求めるなど，落橋防止システムに関する研究業績を挙げてきている。これらの研究を進める過程において，津波に対する安全性を検討する上で落橋防止ケーブルが橋軸直角方向への効果があるということが前提で対策が立てられているケースがあることがわかり，本研究の着想に至った。また，研究代表者はこれまで，橋梁の耐風性に関する研究を，風洞実験や数値解析によって進めてきており，津波に見られるような流体外力に対して十分な経験を有している。平成19～20年度には立命館大学の学内提案公募研究（学内提案公募型研究推進プログラム基盤的研究，津波に対する橋桁の流出防止に関する基礎的研究，代表者・伊津野和行）によって，予備的な研究を行い，本研究への準備も行っている。これまでの研究成果をふまえて，橋梁の津波防災へと研究を進展させることにより，有益な研究成果を出せるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では，津波に対する橋梁構造物の応答を計算し，橋桁が流されることのないようにするには，落橋防止ケーブルにどのような性能を与えればよいのか，また，桁断面形状にはどのような工夫を施せばよいのか，津波の

対策法について検討することを目的とする。実験と数値解析によって，現象の再現と防災対策について様々な角度から検討する。津波被害想定では，当該地域において考慮すべき地震が想定され，津波による浸水域，津波波高，到達時間，浸水時間等が推定されている。現状では，これらの値を元に構造物が浸水するかどうかを検討されているに過ぎない。桁に対する津波の圧力効果はもとより，浮力の影響に対してさえ詳細な検討がされているわけではない。今後，支承部が浸水した場合の摩擦抵抗力に対する影響（浮力による自重軽減と水による摩擦係数の変化）をも考えていく必要がある。この検討は，箱形断面橋梁では，特に重要だと考えられる。本研究では，研究代表者および研究分担者がこれまで実施してきた落橋防止システムおよび流体力に対する桁断面形状の研究に特化した研究を行うことにより，当該研究分野のさらなる発展に寄与する。

3. 研究の方法

(1) アクリル製水路を用いた模型実験（段波による実験）

津波による橋梁への作用では，波力による桁の照査，浮力・揚圧力による桁の照査，波力による下部構造の照査，橋脚転倒の照査，津波によってもたらされる物体による衝突荷重に対する照査，洗掘の照査など，幅広い検討が必要となる。モデル橋梁と架橋地点を仮定して検討する。

貯水しておいた水をゲートを開くことで流下させることにし，水量によって水深（津波高さ）を調節する。次の実験を行う。(1) 津波外力の測定：桁の模型を剛支持し，桁に作用する流体力をロードセルで測定する。(2) 波圧力を圧力計で測定する。(3) 同時に津波波形の変動をハイスピードカメラでとらえる。これらの結果は，数値解析の際の流体，構造のモデル化の際の有用な資料となる。

(2) 実験的検討その2

初年度の実験で得られた知見をもとに，造波メカニズムとより長い流路を持つ「津波シミュレーター」を設計・製作する。桁模型の断面形状を変化させた種々のケースについて検討を行う。流速や波高を変えて最終年度まで実験を行う。研究の進展具合によって他研究機関との共同研究も視野に入れる。

(3) 数値解析

粒子法により，前述の実験結果を数値的に再現する。研究協力者のBui Hong Haは，これまでSPH法によって地盤災害の分野で斜面崩壊等のシミュレーションをしてきており，3次元SPHプログラムを完成させている。このプログラムを利用することで，実験の再現

計算を行うことが可能である。理論から直接決めることができないパラメータを、実験にあわせるように決めることで、特に構造物 - 流体間の相互作用を表現することができるようになる。

長方形角柱の実験結果に対して、数値解析による再現を試みる。再現がある程度可能になれば、実橋をモデル化して津波シミュレーションを行う。インドネシア大津波による被害橋梁のデータを、九州工業大学の幸左教授から入手し、被害状況の再現がどこまで可能かを検討する。その上で、落橋防止システムを設置した場合の効果について解析を行う。

(4) 落橋防止ケーブルの効果に関する検討

津波に対する橋梁の対策としては、桁断面形状の工夫による流体力低減対策と、桁連結（落橋防止）ケーブルの設置による構造的補強対策とが考えられる。平成 21 年度は、後者の落橋防止ケーブルの効果について検討する。現状の落橋防止ケーブルは、地震の揺れに対する保険的な意味合いが強く、死荷重反力の 1.5 倍の耐力で橋軸方向に効くよう設計されている。

橋軸直角方向の桁移動に対しても、ある程度効果があることは予想されるものの、その限界耐力がどれくらいかは未知である。落橋防止ケーブルを現行の基準で設置した場合、設置しない場合とを比べて、津波に対する橋桁の応答がどのように変化するかを計算する。また、落橋防止ケーブルの破壊をも考慮に入れてモデル化することにより、耐力が十分でない場合の桁流出シミュレーションを行う。支承の破壊による橋桁の流出を防ぐために必要な、落橋防止ケーブルの耐力について計算する。

(5) 有効な桁断面形状の決定

津波に対して落橋や過大な桁移動を防ぐための方法として、流体力学的対策について検討する。耐風設計における空力的対策を参考に、桁断面まわりの流れの 2 次元・3 次元解析を行い、水の流れに対しても有効な桁断面形状について検討を行う。

(6) 研究とりまとめ

各年度ごとに研究のまとめを行い、研究代表者と研究分担者とが直接討議して、課題の整理を行う。次年度の研究計画を毎年度末に立て直し、適切に研究が進むよう調整する。研究成果は土木学会等の論文集や各種学会において公表する。最終年度には、研究全体をとりまとめ、橋梁の津波対策について提言を行い、研究成果を社会に還元する。

4. 研究成果

(1) 実験方法

実験装置は、水槽部：長さ 2000mm、幅 600mm と水路部：長さ 4000mm、幅 200mm とよりなる。水槽部と水路部の間にゲートを設け、ゲートを引き上げることで段波状の津波を発生させる仕組みになっている。模型はゲートから 3000mm 下流に設置する。模型支持具を用いてロードセルに取り付ける。

模型がない場合、水位は最大で約 78mm になる（到達水位）。模型を設置すると最大水位は約 140mm と 2 倍近く高くなる。河床から模型下までの高さは 40mm であるため、約 15 秒間模型に津波が作用したことになる。ゲートから水位計までの距離（2910mm）をゲート開扉から水位計に到達するまでの時間（0.8 秒から 2.0 秒、100Hz のサンプリングで測定）で除し、波頭の進行速度の平均値を津波の流速としてとらえた。到達水位が 40mm から 80mm の範囲では、到達水位 h と流速 U には、ほぼ線形的な関係がある。

模型中央から 3.0m 離れた位置にハイスピードカメラを設置して橋梁周辺の流況を撮影する。橋梁模型の中心にシート光を当て、連続撮影する。光源はスポットライトを用いる。流れの様子を捉えるため、水中に中性浮遊子を投入する。シャッター ON の信号を流体力測定値と同時に記録する。

真鍮の板に受圧板を薄いゴムシートで取り付け、それを片持ち梁の先端に固定する。圧力による片持ち梁のひずみとして圧力を検出する。箱型の模型の表面に取り付ける。箱の内部の水の入らない部分にひずみゲージが取り付けられる。床版部の圧力を測定するためにひずみゲージ部分をセルに内蔵した形式の圧力計を作成する。基準圧パイプを設け、セル内の圧力を大気圧とすることができる。

(2) 実験結果

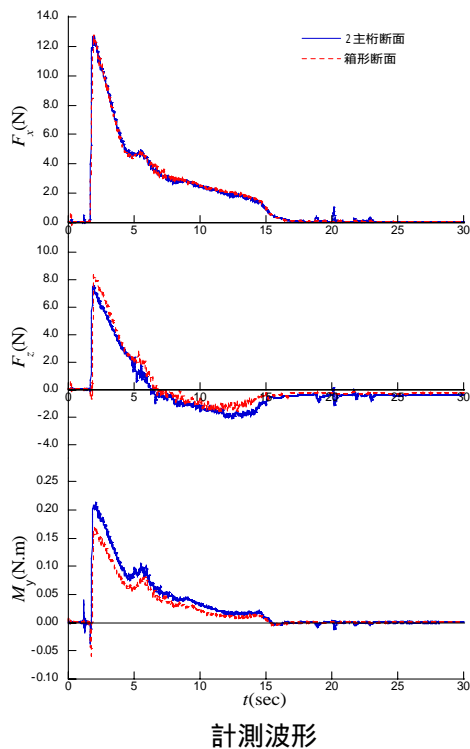
基本断面の津波流体力

水平方向の津波外力の各水位における波形は B/D が異なってもほぼ同じである。最高水位が 8.1cm のときはピークの山は 1 つである。しかし最高水位が 8.4cm になると、5 秒付近でピークの山が 2 つになる。最高水位が 10.6cm になると、津波が橋梁模型に達してからピーク値に達するまでの時間が短く衝撃的な力が作用し、2 つ目のピークが顕著で無くなる。模型に作用した流れが反射し、遡上した流れが再び流下して模型に作用することから、水位が大きくなると、重複波が発生することでピーク値が 2 つ発生すると考えられる。長方形断面の場合、 B/D が大きくなると津波外力は低下するが、みぞ形断面の場合は津波外力の低下は無い。

鉛直方向の津波外力は、長方形断面の場合、最高水位が 9.7cm になると、1 秒から 2 秒にかけて下向きの力が一瞬作用する。津波作用

直後模型下部で剥離流れが発生し、断面下部に負圧が発生しこの負圧によって下向きの力が生じると考えられる。その後は上向きの力が作用する。後半で下向きの力が作用する時間は、水が流れ終わりに差し掛かったあたりで見られるので、津波が一定量流れ続けている間は、上向きの力が常時作用していると考えられる。B/D が4になると最高水位が8.1cmの場合でも、下向きの力が作用する。

みぞ形断面では長方形断面の場合と異なり、津波作用直後の急激な下向きの力は作用しない。みぞ形断面では模型内部に水が流入するので断面下部の負圧が小さくなったために下向きの力が生じないと考えられる。津波通過時は長方形断面とほぼ同じ流れになるため、長方形断面とほぼ同じ波形を描く。津波外力も最高水位が9.7cm以上になると大きな変化はない。

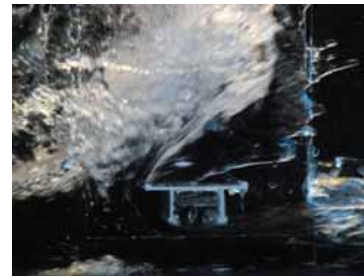


橋梁断面模型の実験結果

箱形断面および2主桁断面を用いる。計測は各3回行い、津波外力の最大値が中間の値となる測定データを利用する。サンプリング間隔0.01秒で60秒間計測する。データには16Hz以上の成分を完全にカットするローパスフィルタを施す。模型の固有振動数はいずれの模型も、いずれの方向の振動についても35Hz程度である。

到達水位が78mmのとき、いずれの模型も津波が模型に作用してから0.5秒後にD, L, Mともに計測波形はピーク値に達する。Dは上流側のウェブに作用する津波圧力によるものと思われる。Lの上向きの大きな力および

時計回りのモーメントは、主として上流側張り出し部の下面に作用する津波圧力により生じたものである。



津波外力がピークになる時



津波通過時

東北地方太平洋沖地震で流出した4主桁断面橋梁の1/100スケール模型の実験を行った。到達水位が78mmのとき、Lは津波作用直後に上向きの大きな値をとる。これは床板張り出し部下面に作用する圧力のためである。その後下向きに変わる。下向きのLは作用直後に上方に向かった水流が床板上面に落ちるため生ずる圧力のためと考えられる。Mはほとんど正の値である。

圧力測定

辺長比B/D=4の長方形角柱を用いる。貯水高Hを200mmに設定した(最大水位は54.7mm)。津波の進行速度は約1.7m/sである。水路底面と模型底面との距離は40mmである。

反時計回りの流力モーメントが最大になる時刻(3秒付近)の圧力分布では模型上面はほとんど圧力が作用しない。逆に模型下面の圧力は上流側で絶対値が相対的に大きい負圧が作用している。このことから下向きの大きな値のLおよび反時計回りのMが発生したと考えられる。下面の正圧、負圧はそれぞれ津波の剥離、再付着に起因するものと思われる。

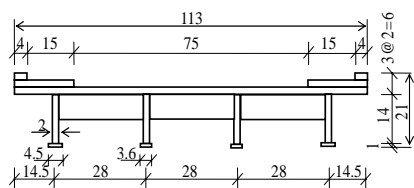
反時計回りの流力モーメントが減少する時刻(5秒付近)の圧力分布では模型下面の上流側の圧力も正圧になる。そのために、反時計回りの流力モーメントが減少したと考えられる。

対策断面

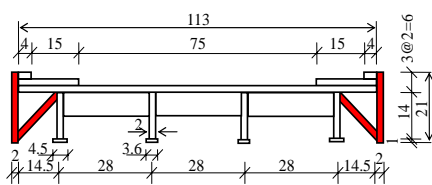
4 主桁断面の橋梁の圧力測定実験から津波作用直後に上流側の床版張出し部下面に津波が作用することで、大きな値の上向きの津波外力と時計回りの流力モーメントが作用することが分かった。床版張出し部に津波が作用しないように垂直および三角形の津波外力低減板を取り付けたことでそれらの大きな流体力の低減を図る。垂直に津波外力低減板を取り付けた場合は上向きの津波外力を、三角形の津波外力低減板を取り付けた場合は水平方向の津波外力を低減させる効果があることがわかった。

鉛直方向の津波外力は、対策なしでは津波が作用した直後に上向きの力が作用し、その後下向きの力が作用する。それに対して対策断面1では床版張り出し部下面に津波が作用しなくなるため、津波作用直後に上向きの大きな力が作用しなくなる。その一方で5秒以降で下向きの力がかなり大きくなる。対策断面2は初期および5秒前後の上向きの力が比較的大きい。

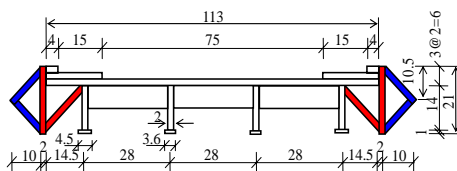
流力モーメントは対策断面1では対策なしの断面の場合に比べ大幅に小さくなっている。対策断面2では傾斜した津波外力低減板のため、津波作用直後時計回りの流力モーメントが作用するがその最大値は対策なしの断面の場合に比べ小さくなっている。



オリジナル断面



対策断面1



対策断面2

対策断面1の場合、上流側の支点Aの負反力は60%以上小さくなる。支点Bの支点も同様に対策なしに比べて負反力が50%以上小さくなる。下流側支点は各ケースともほとんど

ど変化がない。対策断面2の場合、全支点对策なしや対策断面1よりも支点反力は約50%小さくなる。しかし、対策断面1に比べて負反力は増加する。橋桁に作用する津波外力の低減対策を考えた場合、上流側の支点Aの負反力が小さくなる対策断面1が推奨される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

系永航, 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 鈹桁橋に対する津波の作用力に関する実験的研究, 土木学会地震工学論文集, 土木学会, Vol. 32, 2012. 採録決定 査読有り

中尾尚史, 系永航, 野阪克義, 伊津野和行, 小林紘士: 矩形断面桁に作用する津波の圧力特性に関する実験的研究, 土木学会地震工学論文集, 土木学会, Vol. 32, 2012. 採録決定 査読有り

中尾尚史, 系永航, 松田良平, 伊津野和行, 小林紘士: 基本的な断面形状の橋梁に作用する津波外力に関する実験的研究, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 14, pp. 481-491, 2011. 査読有り

中尾尚史, 野阪克義, 伊津野和行, 小林紘士: 津波到達水位と橋梁に生じる津波外力との関係に関する研究, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 13, pp. 789-796, 2010. 査読有り

中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 橋梁基本断面に作用する流体力と流速・波高の関係に関する基礎的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 56A, pp. 564-575, 2010. 査読有り

村上晋平, BUI Hong Ha, 中尾尚史, 伊津野和行: 橋梁に作用する津波の流体力と流況に関する SPH 法解析, 土木学会地震工学論文集, 土木学会, Vol. 30, pp. 914-920 (CD-ROM), 2009. 査読有り

中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 断面形状の異なる橋桁に作用する津波の流体力に関する実験的研究, 土木学会地震工学論文集, 土木学会, Vol. 30, pp. 892-898 (CD-ROM), 2009. 査読有り

中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 津波作用時における橋梁周辺の流れと流体力に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 55A, pp. 789-798, 2009. 査読有り

〔学会発表〕(計17件)

Nakao, H, Nozaka, K, Izuno, K, and Kobayashi, H: Characteristics of tsunami hydrodynamic force for various section bridges, Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Sep. (2012年9月発表予定) Lisbon Congress

Center (リスボン・ポルトガル)。

中尾尚史, 張広鋒, 星隈順一: 橋梁の上部構造への津波作用に及ぼす床版の張出し部の影響に関する水路実験, 24年度土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月発表予定, 名古屋大学(愛知県)。

糸永航, 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 鉸桁橋に対する津波の作用力に関する実験的研究, 第31回土木学会地震工学研究発表会講演, 2011年11月18日, 東京大学(東京都)。

中尾尚史, 糸永航, 野阪克義, 伊津野和行, 小林紘士: 矩形断面桁に作用する津波の圧力特性に関する実験的研究, 第31回土木学会地震工学研究発表会, 2011年11月18日, 東京大学(東京都)。

糸永航, 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 橋桁の断面形状の違いによる橋梁に対する津波作用力の影響, 23年度土木学会第66回年次学術講演会, 第部, 2011年9月7日, 愛媛大学(愛媛県)。

中尾尚史, 糸永航, 松田良平, 野阪克義, 伊津野和行, 小林紘士: 津波による基本的な断面形状に作用する圧力に関する研究, 23年度土木学会第66回年次学術講演会, 第部, 2011年9月7日, 愛媛大学(愛媛県)。

糸永航, 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 津波作用力の軽減を目的とした橋桁断面形状の実験的検討, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム, 2011年7月28日, 土木学会(東京都)。

糸永航, 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 橋桁の断面形状が津波の作用力に与える影響に関する基礎的研究, 平成23年度土木学会関西支部年次学術講演会, 第部, 2011年6月12日, 関西大学(大阪府)。

村上晋平, BUI Hong Ha, 中尾尚史, 伊津野和行: 橋梁上部構造に作用する津波の流体力に関する解析的検討, 第13回日本地震工学シンポジウム, 2010年11月18日, つくば国際会議場(茨城県)。

中尾尚史, 野阪克義, 伊津野和行, 小林紘士: 橋梁に作用する津波外力と圧力に関する実験的研究, 第13回日本地震工学シンポジウム, 2010年11月18日, つくば国際会議場(茨城県)。

中尾尚史, 野阪克義, 伊津野和行, 小林紘士: 橋梁断面に作用する津波外力の分力係数を用いた評価に関する実験的検討, 22年度土木学会第65回年次学術講演会, 第部, 2010年9月1-3日, 北海道大学(北海道)。

中尾尚史, 村上晋平, 伊津野和行, 小林紘士: 少数主桁橋に作用する津波作用時における流体力の特性に関する実験的研究, 第13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, 土木学会, 2010年2月3-4日, 土木学会(東京都)。

中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 津波による流体力に対する橋梁端部における遊間の影響, 21年度土木学会第64回年次学術講演会, 第部, 2009年9月2日, 福岡大学(福岡県)。

村上晋平, BUI Hong Ha, 中尾尚史, 伊津野和行: 津波作用時における橋梁周辺部の流況シミュレーションに関する研究, 平成21年度土木学会関西支部年次学術講演会, 中止成立。

村上晋平, BUI Hong Ha, 中尾尚史, 伊津野和行: 橋梁に作用する津波の流体力と流況に関するSPH法解析, 第30回地震工学研究会発表会, 土木学会, 2009年5月, 東京大学(東京都)。

中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 断面形状の異なる橋桁に作用する津波の流体力に関する実験的研究, 第30回地震工学研究会発表会, 土木学会, 2009年5月, 東京大学(東京都)。

中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 断面形状の異なる橋梁に対する津波作用時の流体力に関する基礎的研究, 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, 土木学会, 2009年1月28日, 土木学会(東京都)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 紘士 (KOBAYASHI HIROSHI)
立命館大学・総合理工学研究機構・客員研究員
研究者番号: 90066712

(2) 研究分担者

伊津野 和行 (IZUNO KAZUYUKI)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 90168328

里深 好文 (SATOFUKA YOSHIFUMI)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 20215875

野阪 克義 (NOZAKA KATSUYOSHI)
立命館大学・理工学部・准教授
研究者番号: 50373105

中尾 尚史 (NAKAO HISASHI)
立命館大学・総合理工学研究機構・ポスドク
トラルフェロー
研究者番号: 50514171

(3) 連携研究者

庄司 学 (SHOJI GAKU)
筑波大学・システム情報工学研究科・講師
研究者番号: 60282836