

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289148

研究課題名(和文) 津波や洪水など橋梁の水害に対する安全性向上対策に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of bridge safety against tsunami and flood disaster

研究代表者

伊津野 和行 (Izuno, Kazuyuki)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：90168328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：橋梁が津波や洪水で流されると、社会基盤施設の損失という物理的被害のみならず、被災地の救援や復旧にも支障を来す。本研究の目的は、洪水や津波などの水害に対する橋梁の安全性向上策を開発することである。その目的を達成するため、1. 橋脚や橋台の被害防止のための正確な流体力評価、2. フェアリングの設置による桁の流出防止、3. 水害後の維持管理のための構造物ヘルスマニタリング、について検討・提案を行った。得られた結果は7編の査読付き学術論文として公表し、16件の学会発表を行った。

研究成果の概要(英文)：Many bridges were damaged due to the tsunami that followed in the wake of the 2011 Great East Japan Earthquake. A tsunami has such a great power as destroying bridges. When bridges washed away by a tsunami, the damage causes loss of valuable social capital and delays of rescuing people and supplying goods. This project aimed to improve safety of bridges against tsunami and floods. To accomplish this, the following topics were studied; 1. numerical simulation methods to evaluate hydrodynamic forces to bridges, 2. effects of side fairings on tsunami induced loads to prevent washout of bridges, and 3. structural health monitoring system after tsunami and floods.

研究分野：地震工学・構造工学

キーワード：社会基盤 橋 津波 洪水 水害 安全性

1. 研究開始当初の背景

橋の耐震設計に関して、日本は世界でも有数の技術先進国となり、大地震が発生しても新しい設計基準によって建設もしくは補強された橋が揺れによる大きな被害を受けることは、以前に比べると少なくなってきた。一方、2011年東日本大震災における津波による多数の橋梁流出、毎年のように発生する洪水や土石流による落橋など、近年、橋が水の作用により流出する事態が続いている。2013年には7月に山口県で豪雨のためJRの鉄道橋が落橋し、9月の台風18号で京都府で国道162号線の道路橋、滋賀県で信楽高原鉄道の鉄道橋が落橋した。しかし、構造工学分野における水害対策はさほど注目されてこなかった。当然のことではあるが、落橋は貴重な社会資本の損失であるのみならず、災害後における救援や地域の復旧に多大な遅延をもたらす。中小河川に架かる小規模橋梁であっても、何らかの対策を考へておくことは必須だと言える。

橋の設計にあたっては、地震時動水圧以外には常時の静水圧や流水圧しか考慮されていない。地震時動水圧についても、下部構造の付加質量として考慮されるだけで、津波や洪水の作用とは状況が異なる。津波の橋梁に対する作用に関しては、現在、多くの機関で実験や数値解析による検討が進められているが、2012年に改定された道路橋示方書では、適切な構造計画を検討するよう書かれるにとどまっている。地域の防災計画などを参考にしながら、津波の高さに対して桁下空間を確保すること、津波の影響を受けにくいような構造的工夫を施すこと、上部構造が流出しても復旧しやすいように構造的な配慮をすることが記載されたが、具体的な規定とはなっていない。

洪水や土石流に対しては、構造的な検討がなされていないのが現状であり、桁上げや掘削による桁下空間の確保、あるいはルート変更くらいしか今は対応策がない。橋梁側方への溢流による二次被害など、津波とは異なる問題も存在する。年々、豪雨の頻度が増してきていることを鑑みると、構造工学分野における対策検討は必須の状況である。

津波や洪水では、水だけが流されてくるのではない。土砂や岩、流木や船、場所によっては氷など、漂流物が流されてきて橋に衝突する。1952年十勝沖地震では、流氷が津波で流されて来て霧多布など浜中湾に面した町の構造物を破壊したという記録がある。燃えた家や車が流されてきて、大規模な火災に発展することもある。奈良県の国道168号にかかる折立橋は、2011年台風12号の際、流木がトラス部分に引っかかって流出した。これら漂流物に対する検討は、大規模橋梁に対する津波による船舶の衝突が検討し始められたところである。むしろ中小河川における洪水に伴う漂流物対策の方が遅れている。

また、自治体の資金不足も深刻であり、災

害対策の必要性がわかっているにもかかわらず、すべての橋梁を同時期に補強することができない。長寿命化計画や耐震補強計画など、各種の計画が都道府県ごとに策定されているが、いずれも今後50年ほどを見据えた長期計画となっている。毎年のように繰り返される落橋を防ぐ対策を早急に確立し、補強計画になるべく早く組み入れることは喫緊の課題と言える。今、組み入れておかないと、さらに対策が十年単位で遅れてしまうことが危惧される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、洪水や津波などの水害に対する橋梁の安全性向上策を開発することである。この目的を達成するため、(1)災害時における橋梁周辺流れの解明、(2)橋梁に対する漂流物の影響評価、(3)水害後における橋梁の維持管理に関して3年間集中的に研究する。橋脚基部の洗掘対策など一定の対策が確立している橋梁下部構造に比べ、ほとんど対策が考えられていない橋梁上部構造に対する研究を中心に推進し、流体力の作用を軽減する方法と桁下空間の閉塞を防ぐ方法について、数値解析と水理実験をもとに解決策を提案する。

(1)の災害時における橋梁周辺流れの解明に関しては、桁模型を水路に設置した水理実験を実施し、桁に作用する力を測定する。フェアリングを付けた桁断面を数種類用意し、波力を受け流すのに適切なフェアリング形状を最終的に提案する。また、研究分担者による粒子法シミュレーションで、実験結果を再現することを目指す。

(2)の橋梁に対する漂流物の影響評価に関しては、土石流および漂流物として主に氷を用いた実験および解析を実施し、漂流物が橋梁に与える影響を定量的に評価することを目指す。そして漂流物の漂着による質量増加および桁下空間の閉塞と、桁に作用する波力の増加との関係を明らかにすることを目的とする。

(3)の水害後における維持管理に関しては、鉄筋腐食や橋脚基部の洗掘を早期に発見するモニタリング手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、過去の災害資料の調査を行い、洪水や津波による橋梁被害の状況を把握する。全体会議を開催して方向性を確認しつつ、研究目的で述べたテーマ、(1)災害時における橋梁周辺流れの解明、(2)橋梁に対する漂流物の影響評価、(3)水害後における維持管理、に関して各要素技術の充実を図った。適宜全体会議を実施して討議するとともに、各時点における進捗状況を見極めた。研究代表者および研究分担者が協力して実験および数値解析により検討を進め、橋梁の水害対策に資する結果を得た。

4. 研究成果

(1) 災害時における橋梁周辺流れの解明

流体力評価の精度検証と、流体・剛体連成問題の妥当性確認

津波時などの橋梁流失予測を行うには、まずは橋梁に作用する流体力の評価の精度が重要となる。その精度検証を実験と比較することで実施した。また、流失挙動までを再現するために、流体剛体連成解析ツールを開発し、実験との比較により妥当性を確認した。

その結果、研究分担者が開発した粒子法を用いた数値解析手法を用いれば、流体力について、橋梁に作用する抗力・揚力とも、十分に実用的な範囲内で事前予測が可能と判断した。また、流体力を受ける剛体移動の挙動までを適切に評価できることを確認した。

津波作用時の上部構造の挙動分析

津波が作用した時の上部構造の挙動について、実験等により検討が行われているが、多くの実験は橋梁の横断勾配がない直線橋を対象としており、横断勾配の影響等が検討されている例は少ない。そこで本研究では、実際に横断勾配がついている橋の構造を再現したモデルを作製し、横断勾配があることで上部構造の挙動がどのように変化するのか、水路実験により検討した。また上部構造から独立したフェアリング（津波作用力を軽減させる装置）を設置した場合の有効な位置（高さや、上部構造とフェアリングの間隔）について実験により検討した。

その結果、模型前部を高くした場合、津波高が低い場合は、勾配がない場合に比べて床版張出部底面に津波が作用しにくくなるため、鉛直方向の津波外力が小さくなることわかった。逆に、津波高が高くなると、勾配なしの場合に比べて、鉛直方向の津波外力が大きくなることわかった。模型後部を高くした場合、鉛直方向の津波外力は、勾配なしに比べてほぼ同じ、または小さくなる傾向になることわかった。平板フェアリングを設置すると、半円フェアリングを設置する場合に比べて、津波外力の軽減効果が大きいことわかった。また、フェアリングを橋梁模型より低い位置、または橋梁模型から離れた位置に設置すると、津波外力の軽減効果が高い傾向にあることもわかった。

部分的フェアリングの効果

抗力を低減させるためにフェアリングが有効だとわかっていても、桁端部など施工上、全面に設置することができない場合も想定される。部分的にフェアリングを設置した場合の効果について、水理実験および数値解析によって検討した。

その結果、75%桁側面をフェアリングで覆うことができれば、100%覆わなくても図1のように抗力（水平力）低減に効果があることがわかった。図2の揚力（鉛直力）についても、限られた津波に対する検討ではあるが、

部分的なフェアリングの効果があることがわかった。表1のように、部分的フェアリングの設置による流体力低減効果が明らかになった。

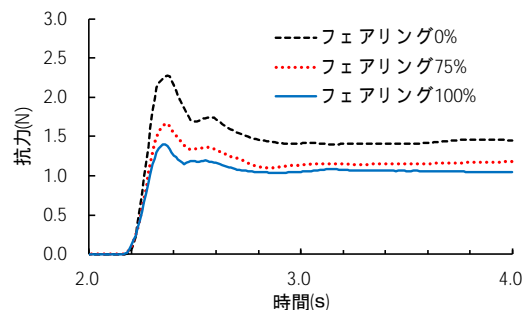


図1 抗力の比較

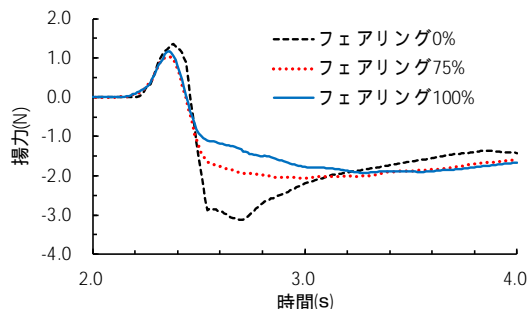


図2 揚力の比較

表1 フェアリングの効果

フェアリング設置率	0%	75%	100%
抗力最大値(N)	2.3	1.7	1.4
軽減率	-	27%	39%
揚力最大値(N)	1.4	1.0	1.2
軽減率	-	24%	14%
揚力最小値(N)	-1.9	-1.4	-1.0
軽減率	-	27%	48%

(2) 橋梁に対する漂流物の影響評価

氷板漂流物を伴う冬期河川津波の橋梁に対する影響評価

北海道のような積雪寒冷地域においては河川で結氷が発生する。このような状態の河川に津波が侵入した場合、結氷が破壊されて漂流物化することにより、構造物への衝突や損傷をもたらす可能性がある。実際に、1952年十勝沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震発生時には漂流物化した多量の氷塊が痕跡として確認された。本研究では、河道内で漂流物化する氷板に特に着目し、水理実験や数値解析的手法により、氷板漂流物がもたらす流況や津波波力の変化を分析した。

まず、大規模な河川津波による氷板漂流物輸送に関する水理実験を実施し、これを再現するための鉛直2次元の数値解析モデルの構築を行った。実験における水理諸量の計測結果と数値解析結果を比較し、モデルの妥当性が検証できた。そのうえで氷板が混入するこ

とによる外力の変化を明らかにし、積雪寒冷地における橋梁設計の留意点として提案を行った。

橋梁における流木の被害軽減対策に関する研究

近年、林業の衰退による山林の荒廃や地球温暖化の影響を受けた集中豪雨等による斜面崩壊に伴って発生する土石流や洪水とともに流木が流出し、下流域の橋梁等で閉塞に伴って橋梁の損傷や流出、橋梁周辺への洪水氾濫の原因となることが、近年の災害事例より報告されている。橋脚における流木対策等として、古くから橋脚の上流部に設けられた木除杭(例えば、渡月橋)が提案されている。木除杭は芥留杭とも称されており、流木の橋脚への衝突防止や橋脚で詰まりやすい流木や芥の巻付け防止を目的としている。ただし、木除杭に関する設計手法は確立しておらず、橋梁毎にその杭の配置形式等が異なっている。そこで、先ず、木除及び芥留杭の機能やその配置設計に関して、基礎的な実験に基づいて提案した。さらに、下流への流木流出の更なる低減のために、上流域の不透過型砂防ダムにおける流木制御の高度化を目的に、鋼材を効果的に併用した対策に関して実験により提案した。

その結果、木除杭は流木の橋脚への直接的な衝突防止だけでなく、杭を中心とした回転による流木の流向制御に関する機能も期待できることが実験により新たに確認された。また、部分透過型砂防堰堤における流木捕捉高は、水深程度(約1.0倍から1.2倍程度)までであることが、新たにわかった。

渡月橋に設置された流木止めの効果に関する一考察

京都の嵐山地区に架けられている渡月橋を例にとり、流木止めの効果について考察した。渡月橋は流木止めが設置されているめずらしい橋の一つであり、2013年に発生した台風18号では冠水被害を受けたものの、橋の本体に大きな被害はなかった。橋が倒壊しなかった要因のひとつとして流木止めの存在が考えられるがその効果は定かではない。本研究の目的は、流木止めの存在による流況の変化を確認することである。流木止めあり・なしの解析モデルを用いて解析を実施し、流線を比較することで流木止めが流況に与える影響について考察した。また、流木止めの配置を変えたモデルを作成し、解析結果を比較、流木止めの配置場所の影響についても検討した。

その結果、流木止めの効果を視覚的に表現することができた。また、流木止めの設置位置の検討項目について整理することができた。

橋梁前面に設置した木除杭の効果に関する研究

近年、洪水や津波により橋梁上部構造や橋脚が流出する被害が認められている。これに伴い、洪水及び津波を外力として、橋梁の橋桁及び下部構造に作用する流体力を明らかにする研究が盛んに行われた結果、徐々に解明されてきた。しかしながら、洪水や津波はいくつかの漂流物と共に流れるため、条件によってはこれらが橋梁被害に影響するが、未だ漂流物が橋梁に与える影響評価がなされていない。以上より、本研究では、いくつかの種類を想定した漂流物を様々な条件で流下させ、構造物に与える影響を検討すると共に、木除杭を配置した場合の効果を明らかにする実験を行った。実験は、安定した流量が期待できる実水路を利用し、漂流物を木材(4種類)を流下させ、橋脚付近での振る舞いや通過率の比較を試みた。また、橋脚付近に木除杭を設置し、この木除杭の効果を検証した。実験の結果、木除杭を配置した場合は、木除杭がない場合に比較し、漂流物の通過率が高くなる結果を得た。また、また漂流物の形状により、流速が同じでの流下率に差が認められること、さらには木除杭と橋脚の距離が離れるほど、流木の通過率が向上する結果等を得た。

以上により、木除杭を設けることで、漂流物(今回は木材)が橋脚間をスムーズに流下し、閉塞する可能性が低くなることが明らかとなった。

(3)津波や洪水の後における橋梁の維持管理に関する検討

水害後の橋梁部材の鉄筋腐食に対する健全性の評価に関する研究

橋梁が津波や洪水などの水害を受けると、橋桁上部や橋脚全体などに河川水あるいは海水が接触し、橋桁上部などには滞留する可能性もある。通常の設計あるいは維持管理において、橋桁上部など橋梁全体系に水や海水が接触・滞留する可能性は考えていない。特に水害では、津波や洪水時の揚力や抗力などの影響により橋梁自体が損傷することもあり、損傷した箇所には水や海水が浸入すると、鉄筋腐食を加速的に誘発し、橋梁の劣化を早める可能性も考えられる。そこで、非破壊試験法の一つであるアコースティック・エミッション(AE)法を利用して、水害後の橋梁部材の鉄筋腐食に対する健全性評価を行った。

その結果、AEモニタリングを行うことで、早期に鉄筋腐食評価が可能であることを確認した。現時点では、100mm四方の供試体に1個のセンサを設置しているが、現地計測においては、1m以上距離を離してモニタリングすることも可能である。しかし、センサ間距離および評価方法の妥当性については現地計測も踏まえて今後の課題となる。

データ同化に基づく洗掘を受ける橋脚基礎の地盤剛性同定に関する基礎的研究
河川の流れを受ける橋脚において、洗掘が

生じる事が知られている。河川中の橋脚の安定性は、橋脚の洗掘深さと橋脚への作用外力の大きさに関係があると考えられている。本研究では、河川の流れを受ける橋脚の安定性を評価する上で、重要なパラメータである地盤の剛性を流水力(入力)とそれによる橋脚の振動(出力)データから同定することを目的とした。データ同化とは、一般的にいうと、対象となるシステムの入出力データの測定値から、ある目的で、対象と同一であるということを実証するために、なんらかの数式モデルを形成することである。データ同化は、構造物全体を一つとしてとらえてマクロな状態でヘルスマonitoringすることが可能である。その上、構造物の運動方程式の物理情報をダイレクトに得ることができるなどの利点がある。

同定には、非線形カルマンフィルタ(UKF)、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)に加えて粒子フィルタ(MPF)も比較対象に含めた。データ同化の3手法の性能を比較した結果、EnKFから最も精度の良い結果が得られた。その理由として、EnKFは融合粒子フィルタとは違い、観測値との誤差に基づいて粒子を正確な値に修正していくという性質がうまく同定できた点ではないかと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

伊津野和行・川崎佑磨・中津研人：斜橋に対する津波作用力に関する基礎的研究，構造工学論文集，査読あり，63A，353-362，土木学会，2017．<http://www.jsce.or.jp/committee/struct/journal/>

原田紹臣・里深好文：橋梁における歴史的な流木対策に関する研究，歴史都市防災論文集，査読あり，10，115-122，2016．<http://hdl.handle.net/10367/7583>

原田紹臣・内藤秀弥・里深好文・水山高久・小杉賢一郎：橋脚における木除杭及び芥留杭の機能に関する基礎的な実験，土木学会論文集 B1(水工学)，査読あり，72-4，I_301-I_306，2016．

DOI: 10.2208/jscejhe.72.I_301

川崎佑磨・中尾尚史・伊津野和行：矩形断面桁に作用する津波荷重と圧力に関する二次元混相流解析，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，査読あり，71-2，199-207，2015．

DOI: 10.2208/jscejsee.71.199

川崎佑磨・伊藤典昭・伊津野和行：鉸桁橋に作用する津波の圧力特性に及ぼす桁端部の影響に関する一考察，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，査読あり，71-4，I_62-I_68，2015．

DOI: 10.2208/jscejsee.71.I_62

中尾尚史・松田良平・赤松克児・葛原道久・伊津野和行：橋桁に対する津波作用力の差分格子ボルツマン法による発生メカニズムの解明，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，査読あり，71-4，I_689-I_696，2015．

DOI: 10.2208/jscejsee.71.I_689

阿部孝章・佐藤好茂・吉川泰弘・伊津野和行・船木淳悟：氷板群を伴う大規模河川津波が橋桁に及ぼす波力の変動特性に関する実験的検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，査読あり，71-2，I_943-I_948，2015．

DOI: 10.2208/kaigan.71.I_943

〔学会発表〕(計16件)

大屋朋子・浅井光輝・伊津野和行・磯部大吾郎：粒子法による流体剛体連成解析の精度検証と妥当性確認，土木学会第71回年次学術講演会，第1部，I-006，東北大学，宮城県仙台市，2016.9.7.

伊津野和行：孤立波による橋桁への作用力，対津波設計のベンチマークテストに関するシンポジウム，土木学会，東京都新宿区，2016.8.4.

阿部孝章・矢部浩規：漂流物を伴う大規模河川津波の橋桁周辺の流れ特性に関する数値解析的検討，第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計法に関するシンポジウム，土木学会，東京都新宿区，2016.7.13.

北川雅樹・川崎佑磨・伊津野和行：津波による橋桁の流出過程に関する考察，平成28年度土木学会関西支部年次学術講演会，I-1，立命館大学，滋賀県草津市，2016.6.11.

太田将成・川崎佑磨・伊津野和行：橋脚の津波に対する安全性に関する基礎的検討，平成28年度土木学会関西支部年次学術講演会，I-2，立命館大学，滋賀県草津市，2016.6.11.

Abe, T., Funaki, J., Toyabe, T. and Yoshikawa, Y.: Experimental and numerical investigation on the massive tsunami wave force on the bridge girders, 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan, USA, 2016.5.31.

原田紹臣・内藤秀弥・里深好文・水山高久・小杉賢一郎：橋脚における木除杭及び芥留杭の機能に関する基礎的な実験，水工学講演会，土木学会，東北工業大学，宮城県仙台市，2016.3.15.

阿部孝章・船木淳悟：漂流物群を伴う大規

模河川津波に関する実験及び数値解析の検討, 日本地震工学会大会, P2-7, 東京大学生産技術研究所, 東京都目黒区, 2015.11.19.

阿部孝章・佐藤好茂・吉川泰弘・伊津野和行・船木淳悟: 氷板群を伴う大規模河川津波が橋桁に及ぼす波力の変動特性に関する実験的検討, 土木学会第 62 回海岸工学講演会, タイム 24 ビル, 東京都江東区, 2015.11.12.

阿部孝章・藤浪武史・船木淳悟: 3次元陽解法型 MPS 法に基づく土石流計算モデルの開発, 第 20 回計算工学講演会, B-5-1, つくば国際会議場, 茨城県つくば市, 2015.6.8.

Izuno, K.: Benchmark results of flume tests using OpenFOAM, Tsunami Workshop, The United States-Japan Cooperative Program in Natural Resources (UJNR), Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA, 2014.12.10.

伊藤典昭・川崎佑磨・伊津野和行: 鉸桁橋に作用する津波外力の二次元混相流解析, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, OS7-Sat-AM-4, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市, 2014.12.6.

川崎佑磨・伊藤典昭・伊津野和行: 鉸桁橋に作用する津波の圧力特性に及ぼす桁端部の影響に関する一考察, 第 34 回土木学会地震工学研究発表会, D14-717, まちなかキャンパス長岡, 新潟県長岡市, 2014.10.9.

中尾尚史・松田良平・赤松克児・蔦原道久・伊津野和行: 橋桁に対する津波作用力の差分格子ボルツマン法による発生メカニズムの解明, 第 34 回土木学会地震工学研究発表会, D14-690, まちなかキャンパス長岡, 新潟県長岡市, 2014.10.9.

田邊将一・浅井光輝・伊津野和行: 粒子法による津波が橋桁に作用する際の流体力評価とその精度検証, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 第 1 部, I-520, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2014.9.10.

伊津野和行・川崎佑磨・中尾尚史・里深好文: 橋梁に作用する津波外力の簡易な二次元混相流解析, 第 17 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, 土木学会, 東京都新宿区, 2014.7.1.

〔その他〕

ホームページ

<http://www.ritumei.ac.jp/se/rv/izuno/kakenhi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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・教授
研究者番号: 50373105

川崎 佑磨 (KAWASAKI, Yuma)
立命館大学・理工学部・准教授
研究者番号: 90633222

野村 泰稔 (NOMURA, Yasutoshi)
立命館大学・理工学部・講師
研究者番号: 20372667

浅井 光輝 (ASAI, Mitsuteru)
九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 90411230

竹田 周平 (TAKEDA, Shuhei)
福井工業大学・工学部・教授
研究者番号: 60511954

阿部 孝章 (ABE, Takaaki)
国立研究開発法人土木研究所・寒地土木研究所・研究員
研究者番号: 10645154

中尾 尚史 (NAKAO, Hisashi)
国立研究開発法人土木研究所・構造物メンテナンス研究センター・研究員
研究者番号: 50514171