

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289156

研究課題名(和文) 巨大水害適応型新形式河川堤防・防潮堤の提案

研究課題名(英文) A new type of river levee and tsunami wall for extreme flood disaster

研究代表者

二瓶 泰雄 (Nihei, Yasuo)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：60262268

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：想定外規模の洪水氾濫・津波に対する被害を最小化するための減災対策として、耐越流侵食性を大幅に向上し粘り強く壊れない新形式河川堤防・防潮堤を提案した。ここでは、越流侵食対策として、最新の盛土工法であるジオシンセティックス補強土(GRS)と堤防のり面のコンクリート製被覆工を一体化し、小さい断面積でも越流に対して壊れず、かつ、耐浸透性と耐震性にも優れたものとする。これらの基本性能を調べるために、模型河川堤防・防潮堤の越流侵食・浸透実験を行い、従来形式堤防の結果と比較し、新形式河川堤防の有効性を示すと共に、様々な全体・部分的、洗掘等の補強条件下での耐越流侵食性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Overflows from huge floods have caused levee breaches in a great number of places, including Japan. To prevent such destruction and thereby increase the resistance of armored levees to overflow erosion, in this study, we presented the performances of Geosynthetic-Reinforced Soil (GRS) levees and tsunami wall against overflow erosion under various conditions, such as reinforcement, back slopes, and geo-grid layers. In addition, we investigated the effect of geo-grid layers on the infiltration of levees. The model tests revealed that the GRS levee with partial and full reinforcements had a comparably high resistance against overflow erosion. The infiltration discharge of the GRS levee was lesser than that of the levee with no reinforcement due to the reduction in infiltration erosion in the GRS levee.

研究分野：水工学

キーワード：河川堤防 防潮堤 水害 洪水氾濫 津波 越流 減災 浸透

1. 研究開始当初の背景

H23年の新潟・福島豪雨や紀伊半島災害のように、異常降雨に伴う超過洪水により堤防の越流決壊が毎年各地で頻発している。また、東日本大震災では、高さ10mを越える津波が広範囲に観測され、世界一の防潮堤と言われた岩手県田老海岸の防潮堤を含む多くが越流決壊し、背後地が甚大な被害を受けた。さらに、H24年九州北部豪雨災害では、福岡県矢部川にて越流は生じないものの計画高水位を上回る水位が継続した後に、浸透決壊と推測される破堤が生じた。このような想定外規模の洪水・津波災害被害を軽減した防災・減災先進社会を実現するには、耐越流侵食・浸透性を大幅に向上させた河川堤防・防潮堤強化技術の開発が社会的に強く要請されている。

一般的な河川堤防は、超過洪水に対応しておらず、計画高水位を上回り、長時間越流もしくは浸透する超過洪水に耐えることを前提とした設計はなされていない。また、防潮堤を含む津波防災対策では、東日本大震災を契機にレベル1（防災）とレベル2（減災）の概念が導入されたが、越流侵食が想定されるレベル2規模の防潮堤強化技術の確立は現在緊急な課題となっている。このような中、既存の耐越流侵食用の堤防としては、「高規格堤防（スーパー堤防）」及び河川堤防・防潮堤用として用いられる「アーマ・レビー」が挙げられる。高規格堤防では、堤内地側に広大な用地買収が必要となり、コスト面と用地確保の問題のため実現困難である。また、堤体表面（天端や表・裏のり面）にコンクリート製被覆工が設置されるアーマ・レビーでは、越流・浸透対策として一定の効果が検証されているが、越流量が大きくなると堤体表面の被覆工が流失し、その後、破堤するケースが多く、そのような事例が東日本大震災における防潮堤や河川堤防でも確認された。そのため、単に堤体表面をコンクリート製被覆工でカバーするだけでは耐越流侵食性は不十分であり、抜本的に異なる河川堤防・防潮堤強化技術の開発が大きな課題である。

2. 研究の目的

本研究では想定外規模の洪水氾濫・津波に伴う越流時でも粘り強く壊れない河川堤防・防潮堤強化技術を開発することを目的と

する。具体的には、以下の通りである。

(1) ジオシンセティックス補強土（GRS）と堤体表面のコンクリート製被覆工を結合し、耐越流侵食性を大幅に向上させ、一般的な2割勾配と同程度もしくはより小さい断面積でも越流により壊れず、かつ耐震性・耐浸透性に優れた新形式河川堤防・防潮堤を開発する。

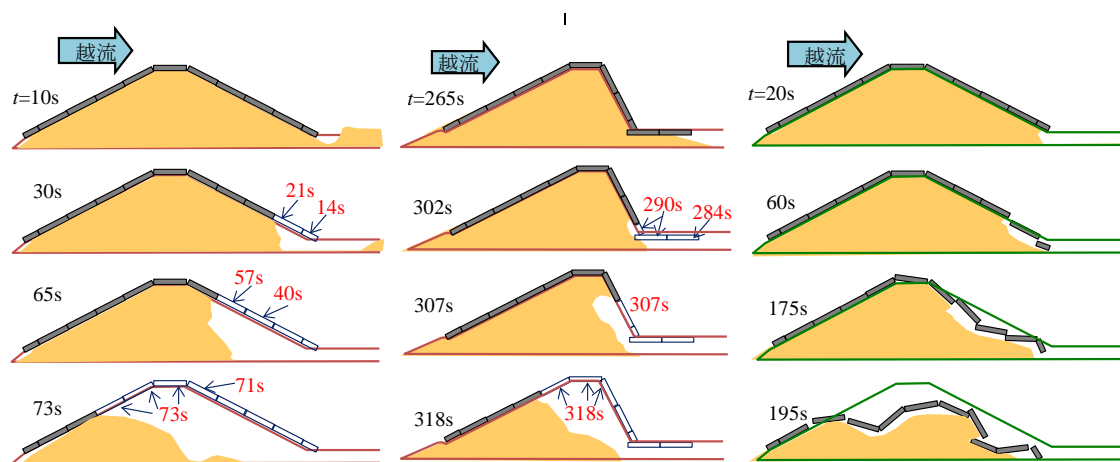
(2) 新形式河川堤防・防潮堤の基本性能や有用性を調べるために、模型河川堤防・防潮堤の越流侵食実験を行う。ここでは、堤体条件として、GRS補強条件（堤体全体・部分補強、無補強）や堤防断面積、土質条件を変化させ、流況条件として河川堤防用では越流状況、防潮堤用には津波高さを変えて実験を行い、各条件の堤防侵食量を定量評価する。また、下流側基礎地盤の洗掘対策も検討する。

(3) 模型河川堤防に関する長時間浸透実験を行い、新形式河川堤防の耐浸透性を実証する。

3. 研究の方法

(1) 新形式河川堤防の耐越流侵食性を把握するために、水平開水路（東京理科大学所有）に模型堤防を設置し、越流侵食実験を行う。ここでは、堤防高を25cm（1/20スケール）とし、越流条件とは一般的な決壊時の流況（実スケールで越流水深を0.5m、越流時間5時間）を基本とし、越流水深・時間をいくつか変化させる。新形式河川堤防の補強条件は全体・部分補強とし、部分補強ではジオテキスタイルの設置幅等を変化させる。比較用として、無補強（土堤）と従来形式（アーマ・レビー）も実験対象とし、耐越流侵食性に関する新形式河川堤防の有用性を検討する。全ての堤防断面形は2割勾配、珪砂を基本とする。堤体侵食状況を計測するために複数のデジタルビデオ（DV）カメラで撮影する。

堤体材料の粒度特性とジオグリッドの目合いがGRS堤防の越流・浸透特性に及ぼす影響を明らかにするための応用実験を行う。そのため、1) 堤体材料の細粒分含有率を変化させて越流実験を行い、細粒分を含む堤体材料が越流侵食に及ぼす影響を検討した。また、2) ジオグリッドの種類（目合いの大きさ）を変化させて越流実験を行い、ジオグリッド



(a) 従来形式堤防 (Case C-1) (b) 従来形式堤防 (Case C-2) (c) 新形式堤防 (Case D-1)

図 1 堤体侵食・被覆工流出状況の時間変化 (黒字：越流開始からの時間 t , 赤字：被覆工が流出した時間)

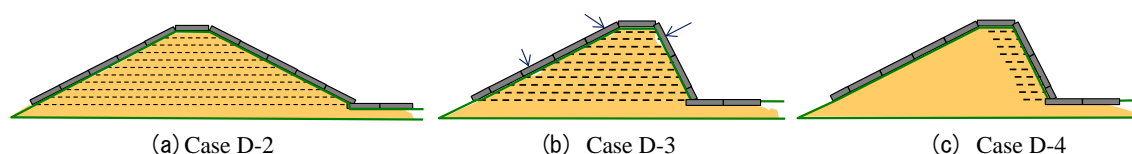


図 2 越流開始 10 分後における堤体状況 (新形式堤防, 洗掘防止工有)

の目合いと耐越流侵食性の関係を把握した。さらに、3) 定水位浸透実験を行い、ジオグリッドを堤体内に敷設した場合の基本的な浸透特性を明らかにした。

(2) 一次元造波水路 (東京理科大学所有, 長さ 36m, 幅 1m) を用いて防潮堤の越流侵食実験を行う。ここでは、高さ 20cm の模型防潮堤 (1/50 スケール) を作成・設置し、東日本大震災規模 (実スケールで津波高さ 20 m (防潮堤高さの 2 倍), 越流時間 10 分) を対象とし、この津波発生には段波発生装置と循環流装置を組合せる (循環流ポンプを新規購入する)。堤体条件は河川堤防と一緒である。計測には河川堤防と同じ計測装置一式とともに、波高計・水圧計・間隙水圧計を用いて流速・圧力場や堤体の越流・侵食状況を計測する。河川堤防で想定している洪水氾濫と異なり、津波では津波到達時の衝撃波力が重要となるので、これを捉えるためには多くの水圧計や六分力計が必要となり、これらを購入する。越流時間 60s 以上の津波による越流侵食実験を行い、GRS 防潮堤と従来型防潮堤の耐越流侵食性を検証する。特に、裏のり尻における「洗掘対策工」や「GRS 補強土」の重要性に着目する。また、一般的な堤防照査に準じて、防潮堤の被覆工の力学バランス

や流出条件を理論的に検討する。

(3) いくつかの水害調査を行い堤防被災状況のデータベースを作成すると共に、それに基づいて既往堤防の越流決壊条件を把握することを目的とする。そのため、まず、堤防被災状況に関わる調査票を作成し、そのデータベース化を行う。ここでは、3 河川の水害調査を行い、堤防の決壊・破損状況や越流状況、堤体の基本データを取得する。これらの結果に基づいて、堤防の決壊・破損状況と水理条件との関連性を明らかにすると共に、それに対する堤体条件 (勾配, 高さなど) や補強状況 (護岸の有無や種類など) の影響を把握する。一次元河川不定流シミュレーションに基づいて洪水時における河道部の水位を再現し、その結果に基づいて現地調査では評価困難な堤防上の越流時間を推定することを試みる。また、対象区間内に水位観測所がある場合を想定して、水位観測所における水位時系列データのみから簡便に越流時間を推定する方法を提案し、その有効性を前述の数値計算結果等を用いて検証する。

4. 研究成果

(1) 新形式河川堤防の開発と性能検証

1) 越流実験の基本ケース

小型越流実験結果として、従来形式堤防（アーマレビー）と新形式堤防（GRS河川堤防）における堤体侵食状況及び被覆工の流出状況の時間変化を図1に示す。ここでは、洗掘防止工の無い従来形式（Case C-1, C-2）と新形式堤防（Case D-1）の結果を表示する。裏のり面勾配が2割で洗掘防止工が無い従来形式（Case C-1）では、初期に裏のり尻部分の基礎地盤が局所洗掘された（ $t=10s$ ）。裏のり面最下部の被覆工下側の土砂が流送され、その被覆工が不安定化して流出し、堤体表面が露出した部分から急速な侵食が開始し（ $t=30s$ ）、天端崩落が発生した（ $t=65s, 70s$ ）。このケースでは、裏のり尻部の被覆工流出から天端崩落まで50s程度で進行し、急激に破堤が生じた。次に、裏のり面勾配が5分で洗掘防止工が有る従来形式のCase C-2では、洗掘防止工の効果により裏のり尻部における洗掘は抑制されるが、徐々に洗掘防止工下側の土砂が流送し始めた（ $t=265s$ ）。その後、洗掘防止工が流出すると、裏法尻部の局所洗掘が進んで窪み部分が形成され、天端崩落の発生に至った。一方、洗掘防止工の無い新形式堤防（Case D-1）では、初期に裏のり尻部の局所洗掘やそれに伴う被覆工下部の侵食が生じるが、被覆工自体は流出せず、その場に留まった（ $t=20s, 60s$ ）。これは、被覆工がジオグリッドと結合されている効果である。その後、堤体内部から砂の吸出しが生じるが、ジオグリッドと繋がっている被覆工は流出せず、盛土変形に合わせて被覆工の位置も変化した（ $t=175s$ ）。その砂の吸出しが天端付近まで到達すると、堤体高さは維持できなかった。天端や表・裏のり面の被覆工は初期位置から変位したが、被覆工は一枚も流出せず、全てジオグリッドと結合したままであった。そのため、本ケースでは、越流開始から10分後でも堤体高さや断面積が初期の1/3、1/5程度をそれぞれ維持できた。

洗掘防止工が有る新形式堤防の3ケース（Case D-2, 3, 4）では、図2に示すように、越流開始から10分後においても初期の堤体形状をほぼ完全に維持した。この図に示すように、洗掘防止工よりも下流側の基礎地盤は侵食されるが、その侵食面は洗掘防止工付近で留まり、裏のり面の被覆工下側には到達しなかった。これは、これらのケースでは、洗掘防止工は堤体内に敷設されたジオグリッ

ドと結合していた。それらの結果、洗掘防止工の流出が抑制され、Case D-1の結果で見られた裏のり面側の侵食やそこでの被覆工の変位が生じなかったものと考えられる。これより、新形式堤防に盛土底部の補強材に連結した洗掘防止工を設置することにより、耐越流侵食性が大幅に向上することが明らかとなった。また、裏のり面が5分勾配の場合では、従来形式堤防では洗掘防止工の流出とそれに伴う裏のり面側の被覆工流出が見られたが、新形式堤防ではそのような現象は生じなかった。これは、堤体内に敷設されたジオグリッドによる洗掘防止工流出抑制と裏のり面の被覆工流出抑制、急勾配盛土の安定化、という3つの効果が発揮されたためである。

2) 越流実験の応用ケース

応用実験のケースとして、GRS堤防（部分補強）の耐越流侵食性に及ぼすジオグリッドの目合いの影響を調べるため、いくつかの経過時間におけるGRS堤防の侵食形状を調べた。これより、目合い大・中・小における破堤の進行過程が異なる。具体的には、目合い大の場合では、所定の目標越流時間の10分に到達する前に（ $t=8\text{ min }30\text{ s}$ ）、裏のり尻付近の被覆工付近に空隙が形成され始め、その後、洗掘防止工の下から徐々に砂が吸い出され、 $t=10\text{ min }40\text{ s}$ では空隙がかなり拡大し、その後すぐに天端が崩落し、これらの最終的な破壊形態は従来形式堤防の結果と類似している。目合い中の場合では、 $t=10\text{ min }56\text{ s}$ から裏のり尻部が徐々に流下方向に膨らみ、 $t=11\text{ min }20\text{ s}$ の時には、裏のり尻部が膨らむとともに表のり肩部に空隙が形成された。ここが弱部となり、最終的に、弱部である表のり肩部と裏のり尻部を結ぶ形ですべり破壊が生じ破堤した。一方、目合い小の場合では、堤体内に空隙は生じなかったが、 $t=20\text{ min }50\text{ s}$ の時から裏のり面の被覆工が重なるようにつぶれ、その状況がしばらく続いた後、 $t=24\text{ min }05\text{ s}$ に破堤した。これらの3ケースを比べると、目合い小のケースで堤体形状が最も長く維持されている。また、目合い小のケースでは裏のり面からの堤体材料の吸出しも見られなかった。このため、裏のり面からジオグリッドを通過する堤体材料の流出が抑制され、これが堤体面積残存率を維持することにつながったものと推察される。これらのこ

とは、耐越流侵食性に対してジオグリッドの目合いが大きく影響することを示している。

3) 浸透実験

GRS堤防の浸透特性について検討したところ、ジオグリッドの敷設により浸透流量は抑制され、水みちの形成は確認されなかった。また、堤体内にジオグリッドを敷設することにより、裏のり面の侵食が大幅に抑制され、GRS河川堤防は耐浸透性に対しても強化し得る技術であることが示唆された。

(2) 新形式防潮堤の開発と性能検証

従来型防潮堤と新形式防潮堤（GRS 防潮堤）の耐越流侵食性に関する津波実験を行うと共に、被覆工流出条件の理論的検討を行った。その結果、洗掘防止工の有無により被覆工流出状況やそれに伴う防潮堤の侵食結果が大きく変化し、耐越流侵食性に対する洗掘防止工の重要性が示された。また、津波高さ $\Delta h=30\text{cm}$ では、洗掘防止工がある場合でも従来型では大きく侵食されたが、GRS 防潮堤ではほとんど侵食されていなかった。これは GRS 補強土の引抜抵抗により被覆工が堤体から流失せず、防潮堤全体の耐越流侵食性が大幅に向上したためであり、GRS 防潮堤は粘り強く壊れない防潮堤強化技術になり得ることが示された。理論解析に基づいて、GRS 防潮堤におけるジオグリッドによる被覆工流出抑制効果を定量的に検証した。

(3) 既往堤防の決壊状況の把握

堤防被災状況を取りまとめるためのデータベースに必要な調査票を整理し、3河川の水害調査結果に基づいてデータベースを作成した。その結果、越流水深が0.5m以下では堤防はほぼ無被害であるが、0.5m以上では破損大や決壊が多い。また、0.5m以上の越流水深では越流水深が大きいと被災レベルも増える、というような関係性は見られない。堤体表面の被覆状況と堤防被災状況の関係性は見られず、土羽やコンクリート張りでも堤防被災状況には明確な差異は確認されなかった。

本一次元河川不定流シミュレーションの計算結果は洪水痕跡から推定された越流水深の最高水位や水位時系列データと概ね一致しており、洪水時の越流水深・時間を再現できていることが示された。水位時系列データと越

流水深のみを用いる越流時間簡易推定法は、本一次元河川不定流シミュレーション結果と良好に一致しており、本簡易手法の有効性が示された。

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31件）

査読有13件、査読無18件

- ①倉上由貴・二瓶泰雄・川邊翔平・菊池喜昭・龍岡文夫：ジオテキスタイル補強土を用いた耐越流侵食河川堤防の提案，ジオシンセティックス論文集，Vol.28，pp.265-272，2013.
- ②森田麻友・倉上由貴・二瓶泰雄・板倉舞・吉森佑介・浅野友里・二見捷：GRS河川堤防の耐越流侵食性向上に対する堤体材料の効果，土木学会論文集B1（水工学），Vol.71，No.4，pp. I_1279-I_1284，2015.
- ③吉森佑介・倉上由貴・二瓶泰雄・森田麻友：堤防裏のり尻部の洗掘現象の把握と対策工配置条件の基礎的検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71，No.2，pp.I_1117-I_1122，2015.
- ④倉上由貴・二瓶泰雄・森田麻友・二見捷・板倉舞・菊池喜昭・龍岡文夫：GRS河川堤防における越流・浸透に対するジオグリッドの目合いの効果について，ジオシンセティックス論文集，Vol.30，pp.67-74，2015.
- ⑤Yuki Kurakami, Yasuo Nihei, Kojiro Yada, Tatsuya Yamazaki, Shinpei Yamaguchi, Shohei Kawabe, Yoshiaki Kikuchi and Fumio Tatsuoka: Design for River Levee with Increased Resistance against Overflow Erosion, *Proc. of 2013 IAHR World CONGRESS*, 2013(8pages, USB).
- ⑥Yasuo Nihei, Yuki Kurakami, Mayu Morita, Sho Futami, Shohei Kawabe, Yoshiaki Kikuchi and Fumio Tatsuoka: A new river levee type using geosynthetic-reinforced soil to increase resistance against overflow erosion, *Proc. of the 36th IAHR World Congress*, 2015 (3pages, extended abstract,USB).
- ⑦服部泰士・二瓶泰雄・大槻順朗・八木澤順治：実測データベースに基づく河川堤防の越流決壊・破損条件の検討，土木学会論文集B1（水工学），Vol.71，No.4，pp. I_1285-I_1290，2015.

⑧服部泰士・二瓶泰雄・大槻順朗・M.A.C Niroshinie : 次元不定流計算に基づく堤防越流時間の推定と簡易評価法の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp. I_1165-I_1170, 2016.

⑨二瓶泰雄・縄野惇郎・柳沢舞美・川邊翔平・菊池喜昭・龍岡文夫 : GRS 防潮堤の耐越流侵食性に関する実験的・理論的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_986-I_990, 2013.

⑩二瓶泰雄・柳沢舞美・釜池達也・南まさし : 津波越流量抑制のための多重防潮堤の設置条件の実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_311-I_315, 2014.

⑪ Maimi Yanagisawa, Yasuo Nihei, Shinpei Yamaguchi, Shohei Kawabe and Fumio Tatsuoka: Use of Concrete Panels Connected to Geogrid Layers to Effectively Increase Resistance of Sand Dunes to Tsunami Overflow, *Proc. of 2013 IAHR World CONGRESS*, 2013(9pages, USB).

⑫山口晋平・大林沙紀・川辺翔平・龍岡文夫・菊池喜昭・二瓶泰雄 : 津波に対する防潮堤補強技術に関する実験的検討, ジオシンセティックス論文集, Vol.28, pp.245-250, 2013.

⑬川邊翔平・大林沙紀・山口晋平・菊池喜昭・二瓶泰雄・龍岡文夫 : 津波を受ける GRS 一体橋梁の模型実験, ジオシンセティックス論文集, Vol.28, pp.251-258, 2013.

査読無 18 件省略

[学会発表] (計 3 0 件)

① Yuki Kurakami, Design for River Levee with Increased Resistance against Overflow Erosion, 35th IAHR, 2013.9.10, 成都(China).

② Yuki Kurakami, A new river levee type using geosynthetic-reinforced soil to increase resistance against overflow erosion, 36th IAHR, 2015.7.1, Hague(Netherlands), .

③ 倉上由貴, 耐越流侵食性向上のための河川堤防強化技術の実験的検討, 第 68 回土木学会全国大会, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス (千葉県・習志野市), 2013.9.4.

④ 山口晋平, 越流津波に対する防潮堤補強技術の実験的検討, 第 9 回地盤工学会関東支部発表会, 日本科学未来館, (東京, 江東区), 2013.10.4.

⑤ 二瓶泰雄, GRS 河川堤防の耐越流・浸透・洗堀特性に関する総合的検討, 地盤工学特別シンポジウム ―東日本大震災を乗り越えて―, 東京電機大学 (東京・足立区), 2014.5.15.

⑥ 森田麻友, 小型水路実験に基づく河川堤防の耐越流侵食性に及ぼす細粒分の影響, 第 69 回土木学会全国大会, 大阪大学 (大阪・吹田市), 2014.9.10.

⑦ 倉上由貴, ジオテキスタイル補強土を用いた耐越流侵食河川堤防の実験的検討, 第 70 回土木学会全国大会, 岡山大学 (岡山), 2015.9.16.

⑧ 倉上由貴, ジオグリッド性能が GRS 河川堤防の耐越流侵食性に及ぼす影響, 第 3 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集, 地盤工学会 (東京・文京区), 2015.12.2.

他 22 件 (省略) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

二瓶 泰雄 (NIHEI Yasuo)

東京理科大学・理工学部土木工学科 教授
研究者番号 : 60262268

(2) 研究分担者

菊池 喜昭 (KIKUCHI Yoshiaki)

東京理科大学・理工学部土木工学科 教授
研究者番号 : 40371760

(3) 連携研究者

なし