

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04687

研究課題名(和文) 洗堀により沈下・傾斜を生じた河川橋梁基礎の残存支持力発現メカニズムの解明

研究課題名(英文) Clarification of the mechanism of residual bearing capacity of a river bridge foundation caused by settlement and incline due to scouring

研究代表者

西岡 英俊 (Nishioka, Hidetoshi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：50450747

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：昨今の豪雨・台風災害の激甚化に伴い、河川を渡る鉄道橋や道路橋の基礎(地上部分の重さを地盤に伝える部位)の周辺土砂が流出する洗堀現象が生じ、沈下や傾斜によって橋が利用できなくなるという被害を生じる事例が増加している。このような被害が発生した後に速やかに橋の利用を再開するためには、洗堀被害を受けた基礎に残された抵抗力(残存支持力)がどのようなメカニズムで発現するかを解明することが求められる。本研究では、基礎周辺の地盤の状況をアルミ棒で模擬し、洗堀状態を人為的に再現した模型実験を体系的に行うとともに、剛塑性有限要素解析によりその再現解析を行い、この基礎的なメカニズムを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河川橋梁の洗堀現象自体は、以前より広く認識されているが、国内外での既往研究は、「どこまで洗堀されるか」という水理学的なアプローチであった。本研究では、従来は着目されていなかった被災直後の残存支持力について地盤工学的な検討を行った。本成果は、端的に言えば、洪水後に橋梁が倒壊していない限り、発生した残留変位および残留傾斜分を桁のジャッキアップ等で補修することで早期に再供用できる可能性が高いことを実験的・解析的に示したものである。この成果は、橋の利用再開可否を早期に判断する技術基準策定に活用できるなど、交通物流網のレジリエンス向上に大きく貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：With the recent intensification of heavy rain and typhoon disasters, there has been an increase in cases where bridges across rivers have become unusable. The cause of this damage is scour, a phenomenon in which sediment flows out around the foundation of a bridge. As the scour phenomenon increases, bridges sink and tilt significantly. To quickly resume the use of bridges after such damage has occurred, it is necessary to clarify the mechanism of residual bearing capacity of foundations damaged by scour. This study systematically conducted loading experiments under conditions that artificially reproduced the scour phenomenon using an aluminum rod model of the ground around the foundation. Then, rigid-plastic finite element analyses were performed to reproduce the model experiments. Thus, the primary mechanism of residual bearing capacity was elucidated.

研究分野：地盤工学

キーワード：洗堀 河川橋梁 直接基礎 豪雨災害対策 再供用可否診断 残存支持力

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に伴い、水災害の頻発・激甚化が懸念されている。水災害には様々な被災形態があるが、その一つに河川を渡る道路橋や鉄道橋の洗堀被害がある。特に戦前から高度経済成長期に建設された既設河川橋梁の多くが未だ供用中であり、これらの基礎が洗堀被害を受けるリスクが高まっている。また、被害復旧時に被災橋梁の撤去・再構築が必要となる場合には、その工事に半年から数年の時間を要するため、長期に渡って交通物流網が寸断され、地域の復興の足かせとなるだけでなく、場合によっては国内経済全体に大きなダメージを及ぼす。

河川橋梁周辺の洗堀現象は、主に橋脚周辺の水の流れに伴う橋脚前面側の下降流によって生じることが知られているが、実際の被災形態は洗堀の規模の違いによって大きく異なる。基礎周辺地盤全体が消失するほどの大規模な洗堀が生じた場合は橋梁自体が流出する被災形態となる。一方、洗堀範囲が比較的中規模に留まる場合は橋梁自体の流出までには至らず、図1に示すような残留沈下・残留傾斜を生じる被災形態となる。また、従来の実被災件数の分析から、大規模被害よりも中規模被害の方が高頻度に発生していることが明らかとなっており、水災害の頻発・激甚化によって、中規模被害が高頻度に発生するリスクが今まで以上に顕在化していくと考えられる。



図1 甲州街道日野橋の被災状況
(2019年10月13日研究代表者撮影)

一方、このような中規模被害に対しては、被災橋梁の基礎の残存支持力に期待してこれを再利用することで、早期かつ安価に機能回復を図れる可能性がある。しかしながら、本研究開始以前は残存支持力発現メカニズムが未解明であることから、中規模被害であっても安全側に被災橋梁の撤去・再構築を行うのが一般的であった。なお、先駆的にこのような考え方に基づいて中規模被災橋梁の基礎を再利用して早期復旧を行った事例がいくつか存在する。例えば、平成24年九州北部豪雨におけるJR九州久大本線隅上川橋りょうでは、被災後に約300mmの残留沈下量が生じたものの、撤去・再構築を行うことなく基礎は再利用して桁をジャッキアップすることで、約1ヵ月で再開している。ただし、これらの先駆的な事例においても、その残存支持力発現メカニズムが未解明であったことから、各種の検証作業を行いながら慎重な技術判断を積み重ねることに時間を要していた。

2. 研究の目的

本研究では、河川橋脚が基礎周辺地盤の洗堀により沈下・傾斜を生じる中規模な被災形態を対象とし、被災橋梁自体をできる限り再供用した早期の応急復旧技術を一般化するための基礎的な研究として、その残存支持力発現メカニズムを解明することを目的とする。これにより、被災後の残留沈下・残留傾斜を生じた状態からできる限り速やかに再供用による応急復旧が可能であるかどうかの判別精度を向上、一般化するとともに、そのままの再供用は困難な場合でも必要最小限の対策工を選定するなど、将来的な応急復旧工法開発にも貢献するとともに、最終的に交通物流網のレジリエンス向上に貢献することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、まず基礎周辺の地盤をアルミ棒積層体で模擬した2次元模型を用い、人為的に特定の範囲のアルミ棒を抜き取ることで洗堀現象を再現した条件での支持力実験（鉛直載荷実験、図2）を体系的に行い、洗堀規模の変化によって基礎の性能（荷重変位関係、基礎の傾斜角、ばね定数、支持力等）がどのように変化するかについて調べた。なお、アルミ棒積層体で地盤を2次元的に模擬する実験技術は1960年代から適用事例がある古典的な実験技術の一つである。その特徴として前背面が自立するのでアルミ棒端面の動きから地盤の変位・変形挙動が観察できることや、マスとしては中密な砂に似た強度・変形特性を呈すること、粒度特性が変化しないので実験の再現性が高いこと等が知られている。

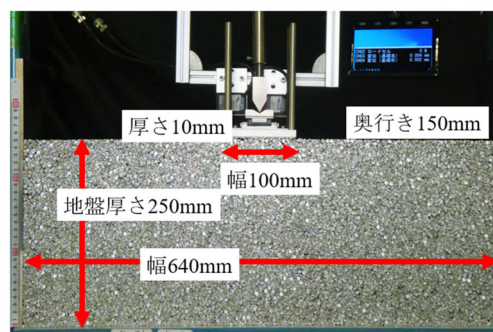


図2 アルミ棒支持力実験装置の概要

そして、剛塑性有限要素法により模型実験の再現解析を行った。剛塑性有限要素法は、有限要素による空間離散化と極限定理に基づく最適化問題を組合わせた、剛塑性境界値問題を解く数値解析手法である。地盤工学では、支持力問題や斜面の安定問題、土圧問題に適用されている。材料を剛完全塑性体と仮定するため途中変形を知ることはできないが、地盤の終局限界状態（崩壊荷重と破壊形態）を直接求めることができることが特徴である。

4. 研究成果

(1) 模型実験による残存支持力発現状況の確認
 一般に河川橋脚基礎周辺では、橋脚に衝突した流れが下降流となり、主に上流側から土砂が流出していく。よって、洗掘規模が大きくなると上流側の基礎端部から底面地盤が流出する「局所洗掘」が生じて、基礎は沈下するとともに上流側への傾斜を生じることとなる。そこで本研究では、基礎端部直下地盤が最も深く流出した状態を想定し、最深部を頂点とする二等辺三角形の領域にあるアルミ棒を全て抜き取ることで局所洗掘現象を模擬した(図3)。なお、二等辺三角形の左右の斜面の角度は、アルミ棒積層体の安息角(その地盤が崩壊しない最大の斜面角度)としている。

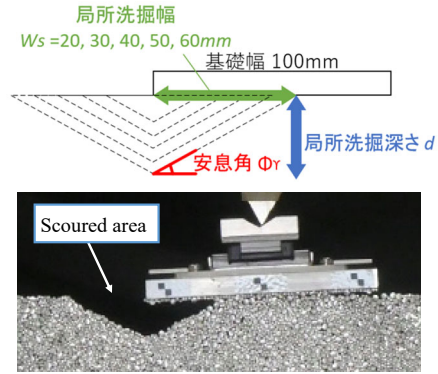


図3 局所洗掘範囲の設定方法

また、前述した久大本線隅上川橋りょう等の一部の被災事例では、残留沈下量に比べて残留傾斜角が小さい被災形態が散見されている。特に、粒径の小さい砂や細粒分を主体とする地盤の中に粒径の大きい礫・玉石が混在している地盤においては、下降流の一部が地盤内に浸透して基礎底面直下の地盤内を水平方向に流れていく透水現象が生じ、その際に細粒分のみが流出していく「内部侵食」が生じることで、このような被災形態となった可能性も考えられる。そこで本研究では、図4に示すように水平方向の浸透流が生じる範囲を仮定し、その中にある粒径の小さいアルミ棒のみを抜き取ることで、「内部侵食」を模擬したケースも行うこととした。



図4 内部侵食範囲の設定方法

「局所洗掘」と「内部侵食」それぞれの荷重変位関係を図5および図6に示す。洗掘規模の増加に伴う変化に着目すると、荷重変位関係は、縦軸(荷重)方向に小さくなるのではなく、単純に右方向に移動している。すなわち、これらの洗掘現象が生じた場合に基礎自体が発揮する最大の抵抗力自体は低下しないことが確認できる。なお、「局所洗掘」については基礎底面の接地幅が基礎幅の1/2を超えると、模型が大きく傾いて载荷を行うことが困難となった。

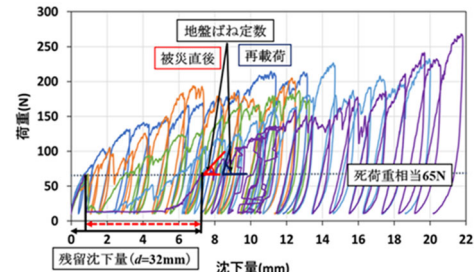


図5 局所洗掘時の荷重沈下量関係

実務上の直接基礎の設計では、このような沈下の問題も含めた評価として、設計上の基礎の極限支持力を基礎幅の10%沈下時までに発揮される最大荷重として扱われる。本研究では、この考え方に準じて洗掘発生後の荷重変位関係で基礎幅の10%沈下時までに発揮される最大荷重を残存支持力と評価することとした。洗掘規模に応じた残存支持力の変化を図7に示す。なお、ここでは、2つの洗掘形態によらず洗掘規模を统一的に表す指標として、抜き取ったアルミ棒の実断面積の合計値 A_s を用いた。また、本研究で想定する基礎の再利用に際しては、被災直後に死荷重によって生じた残留沈下・残留傾斜の影響はジャッキアップ等によって補修することが前提となる。そこで荷重変位関係において、死荷重相当(洗掘を模擬しない条件で通常の極限支持力を一般的な設計で用いられる安全率3で除した荷重)での残留沈下量から、基礎幅の10%の沈下量が増加するまでの最大荷重を、補修後残存支持力として評価することとし、このようなジャッキアップ部分を考慮しないものを補修前残存支持力として評価することとした。

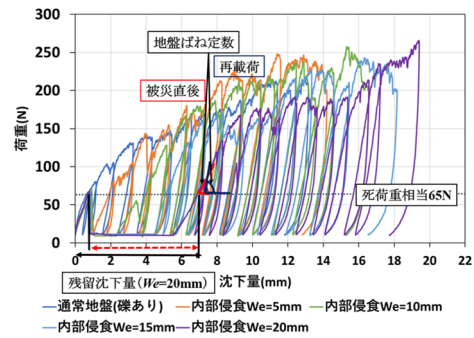


図6 内部侵食時の荷重沈下量関係

図7より、補修前残存支持力は洗掘規模に応じて低下するものの、実際に災害復旧としてジャッキアップされた基礎に期待できる補修後残存支持力については、少なくとも死荷重のみでは倒壊に

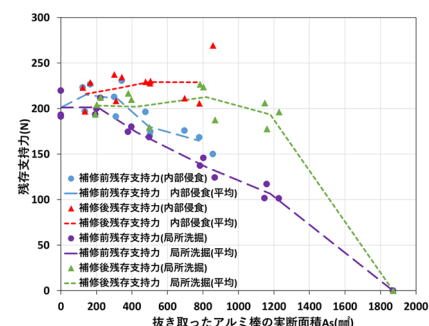


図7 洗掘規模 A_s と残存支持力の関係

は至らない中規模被害に留まっている場合であれば、洗掘規模には依存せず、被災前と同程度の残存支持力が期待できることが明らかとなった。

このように倒壊には至らない中規模被害の範囲であれば、残存支持力が低下しないメカニズムについて考察するため、画像解析により地盤変位分布を調べた。その結果の一例を図8に示す。死荷重相当作用時には地盤内の変位量自体は比較的小さくなっており、基礎自体が図中左側（局所洗掘が生じる上流側）に傾くことで基礎底面の接地面積が回復していることがわかる。なお、図6の荷重変位関係では、荷重変位関係が右方向に移動し、ある一定の変位量が生じてから反り上がるような傾向が明確に表れているが、この反り上がりが生じるタイミングが、この基礎底面の接地面積の回復時と概ね一致していることを別途確認している。その後、荷重を継続していくと、上流側（図中左側）への傾斜は増加せず、地盤内の変位は局所洗掘とは反対側に一般的な支持力破壊時と同様の円弧状のすべりが見られた。

(2) 剛塑性有限要素法による再現解析

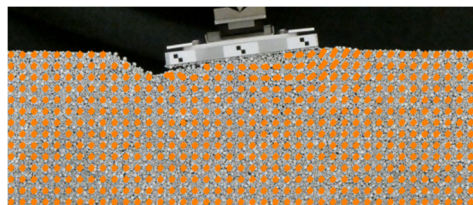
本研究では、「局所洗掘」の模型実験ケースを対象に剛塑性有限要素法による再現解析を行った。解析モデルを図9に示す。実験結果から、残留沈下・残留傾斜の発生により基礎底面の接地状況が回復する傾向が確認できたことから、解析モデルは基礎の残留沈下・残留傾斜が生じる前の局所洗掘発生直後の仮想的な状態を初期状態（Initial）としたケースと、残留沈下・残留傾斜が生じて基礎底面が再接地した後の状態（Contact）の2ケースとした。なお、実験では、基礎の回転と水平変位の発生を許容しており、解析上もピンとスライダ（Pinned-slider）でそれを模擬しているが、比較のため、基礎の回転と水平変位の発生を許容しない剛結合（Rigid）条件でも解析を実施している。

解析で得られた極限支持力を図10に示す。再接地後の条件（Contact）では、同程度の極限支持力が確保されることが解析的にも確認された。

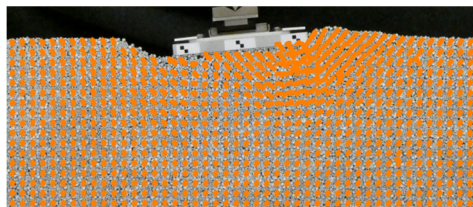
(3) まとめ

本研究により、洗掘によって倒壊には至らずとも大きな沈下や傾斜が生じる中規模被害を受けた場合は、残留変位量を適切に補修することを前提とすれば補修後の残存支持力は被災前の支持力と同程度となることが実験的および解析的に実証できた。特に残存支持力の低下が懸念される局所洗掘発生時であっても残存支持力が低下しないのは、残留傾斜が発生することによって基礎底面と地盤の設置状況が回復するだけでなく、結果的に被災前よりも根入れ深さが深くなり、上流側へのすべり破壊が生じにくい状況となることが主たるメカニズムであることが確認できた。

本研究の学術的な独自性と創造性は、洗掘現象の発生メカニズムそのものではなく、被災後の基礎の残存支持力の発現メカニズムに着目していることにある。従来の国内外での河川橋梁の洗掘問題に関する研究は、そもそも「どこまで洗掘されるか」という洗掘現象に対して橋脚周りの水の流れに着目した水理学的なアプローチであった。実際の被災メカニズムは、基礎周辺の地盤材料が部分的に流出するという洗掘現象の生じた結果、それによって基礎の支持力が低下するという大きく2段階の複雑なメカニズムとなっている。本研究では、これらを一旦分離し、後者を対象に基礎周辺の地盤材料の流出の程度が被災直後の残存支持力にどのように影響するかを解明した。このようにメカニズムを分離した条件で後者の地盤抵抗側について着目した研究事例はなく、本研究独自の創造的なアプローチである。この成果は、河川橋梁の中規模被害発生後に、基礎の再利用再開可否を早期に判断する技術基準策定に活用できるなど、交通物流網のレジリエンス向上に大きく貢献するものである。

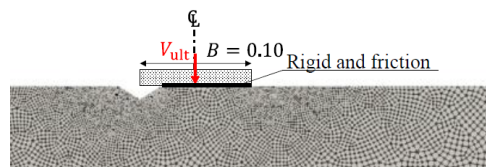


(a) 死荷重相当作用時

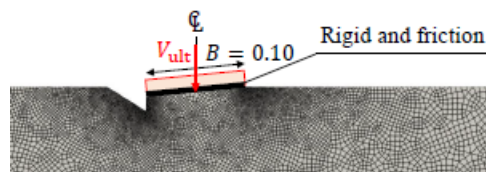


(b) 補修後残存支持力発現時

図8 局所洗掘時の地盤変位の例
(洗掘による基礎底面接地幅の減少率=18%)



(a) 局所洗掘発生直後



(b) 基礎底面再接地後

図9 剛塑性有限要素法での解析モデル

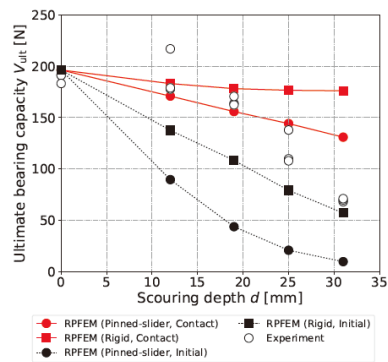


図10 剛塑性有限要素解析による局所洗掘後の残存支持力の評価結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sasaki Yuna, Nishioka Hidetoshi	4. 巻 23
2. 論文標題 VERTICAL LOADING TESTS ON LOCAL SCOURED SPREAD FOUNDATION ON ALUMINUM RODS MODEL GROUND	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 17-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2022.98.1472	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平野 萌果, 佐々木 優奈, 西岡 英俊
2. 発表標題 異なる粒度分布のアルミ棒積層体を用いた局所洗掘被害後の直接基礎の残存支持力の検討
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野 萌果, 佐々木 優奈, 西岡 英俊
2. 発表標題 アルミ棒積層体を用いた河川橋脚基礎の局所洗掘・内部侵食被害後の残存支持力に関する検討
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会（京都）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山栗祐樹, 小林俊一, 西岡 英俊, 平野 萌果, 佐々木 優奈
2. 発表標題 剛塑性有限要素解析による局所洗掘地盤の極限支持力の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 優奈, 平野 萌果, 西岡 英俊
2. 発表標題 ワイプル曲線を用いた洗掘被災直接基礎の荷重変位関係のモデル化
3. 学会等名 第50回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 優奈, 西岡 英俊
2. 発表標題 局所洗掘後の河川橋脚直接基礎の残存支持力に関する研究 アルミ棒積層体支持力実験による抵抗メカニズムの考察
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会講演概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木 優奈, 西岡 英俊
2. 発表標題 局所洗掘を受けた河川橋脚基礎の残存抵抗特性に関する鉛直載荷実験 再載荷時の地盤ばね定数と傾斜角に関する検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuna Sasaki, Hidetoshi Nishioka
2. 発表標題 VERTICAL LOADING TESTS ON LOCAL SCOURED SPREAD FOUNDATION ON ALUMINUM RODS MODEL GROUND
3. 学会等名 11th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野萌果, 佐々木 優奈, 西岡 英俊
2. 発表標題 異なる粒度分布のアルミ棒積層体を用いた局所洗掘後の直接基礎の残存支持力の検討
3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木 優奈, 平野萌果, 西岡 英俊
2. 発表標題 出水時の支持地盤の内部侵食を模擬した直接基礎の支持力実験
3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山栗祐樹, 西岡 英俊, 平野 萌果, 佐々木 優奈, 小林俊一
2. 発表標題 局所洗掘後の直接基礎橋脚の残存支持力に関する剛塑性有限要素解析 (シンポジウム講演概要)
3. 学会等名 土木学会第26回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	山栗 祐樹 (Yamakuri Yuki) (30972062)	金沢大学・地球社会基盤学系・研究協力員 (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------