

# 局所洗掘被害を受けた直接基礎の残存支持力評価

## Evaluation of Residual Bearing Capacity of Local Scoured Shallow Foundations

都市人間環境学専攻 平野 萌果  
Department of Civil, Human and Environmental Engineering / Moeka HIRANO

**Key Words :** bearing capacity, local scouring, vertical loading test, aluminum rods ground model

### 1. はじめに

昨今の局所的豪雨や台風災害の増加に伴い、河川橋脚基礎の周囲の地盤が流出する洗掘被害が増加している。特に、戦前から高度経済成長期以前に作られた旧式河川橋脚の直接基礎の被災事例が多い<sup>1)2)</sup>。これらの被害の中には橋脚の倒壊や桁の落下・流失が生じるような大規模被害(図-1)には至らずとも、直接基礎に生じた残留沈下・傾斜によって供用中止となる被害(以下、中規模被害(図-2))も数多く発生している。このような河川橋脚基礎の洗掘現象については、水理実験等による河川条件(流量・水位・流速・流向)により基礎の上流側がどの程度洗掘されるかを予測することに着目した研究は多い<sup>3)4)</sup>。しかし、洗掘被害が地盤の支持性能に及ぼす影響について検討を行った研究は少ない。

河川橋脚基礎が洗掘被害を受けた場合、架替え等の大規模な改修が行われると復旧までに長期間を要するが、中規模被害の場合では、被災基礎を再供用することで最小限の補修により早期に応急復旧(運転開始)できる場合がある(図-3)。

本研究グループでは、中規模被害を受けた河川橋脚基礎の再供用を目指し、再供用に必要とされる残存支持力の発現メカニズムについて、砂地盤を模擬したアルミ棒積層体を用いた模型実験を実施し、局所洗掘被害を受けても、極限支持力(すなわち残存支持力)はさほど低下しないことを確認している<sup>5)</sup>。

本研究では、洗掘被害を受けている旧式河川橋脚基礎に着目し、安全率が低下した状態での地盤の支持性能の観点から橋脚が倒壊する大規模被害に至る洗掘規模の条件を明らかにするとともに、倒壊には至らずとも残留沈下・傾斜が生じる中規模被害での支持性能を明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験概要

#### (1) 模型地盤および実験装置

本研究で使用した実験装置を図-4に示す。本研究では、アルミ棒積層体を用いて鉛直載荷模型実験を行った。特に洗掘実験では、砂地盤では洗掘により流される砂の量を管理することは難しいが、アルミ棒では洗掘量



図-1 大規模被害の例  
(JR 磐越西線濁川橋梁)



図-2 中規模被害の例  
(JR 五能線中村川橋梁)

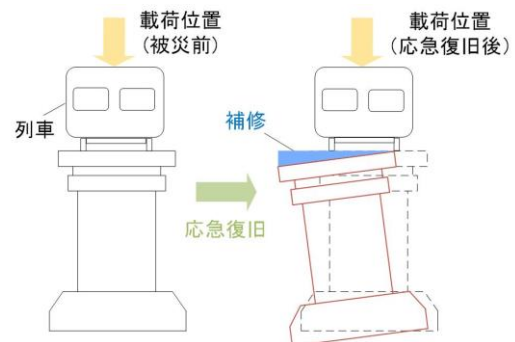


図-3 洗掘被害後の応急復旧と載荷位置の模式図

を管理することが出来る。また、砂地盤に比べて安息角が小さく、死荷重全率を低くした模型実験を行うことに適している。

模型地盤には、長さ 150 mm のアルミ棒を幅 700 mm、高さ 250 mm で積み上げたアルミ棒積層体を用いた。アルミ棒の直径は 1.5 mm、2.0 mm および 3.0 mm を重量比 1:1:1 で混合したものである。模型地盤の単位体積重量と安息角はそれぞれ、 $\gamma=21.71 \text{ kN/m}^3$ 、 $\phi=32^\circ$  である。模型地盤はまき出し厚さ 50 mm を 1 層とし、1 層ごとに上部からパイプレーターにより振動を与えて十分に締固めて作成した。

橋脚模型の基礎部(以下、基礎と記す)は、幅 100 mm、奥行 150 mm、根入れなしの直接基礎形式とした。橋脚模型はその総重量(以下、模型死荷重  $V_D$ )と高さをパラメータとした表-1 に示す全 11 種類とした。ここで、模型死荷重  $V_D$  は、洗掘の模擬をしない地盤( $d=0 \text{ mm}$ )での支持力実験(図-5)より得られた極限支持力(沈下量が基礎幅の 10%(10 mm)に達するまでの最大荷重)を、目標とする死荷重の安全率(以下、死荷重安全率  $F_{SD}$ )

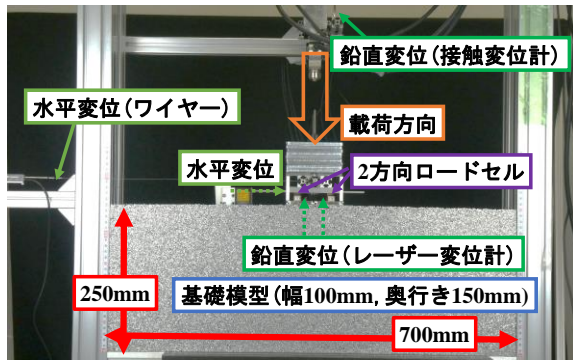


図4 アルミ棒支持力実験装置

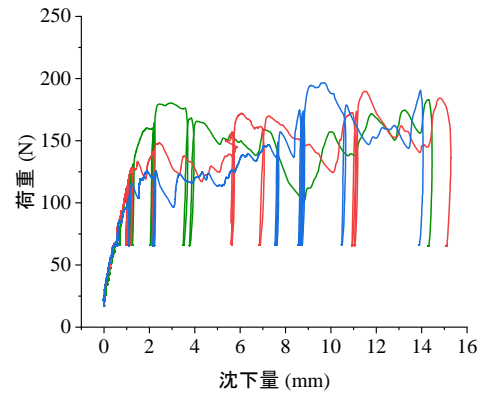


図5 荷重沈下関係( $d=0\text{mm}$ )

表-1 使用した橋脚模型一覧

死荷重安全率 $F_{sDL}$	模型死荷重 $V_D(\text{N})$	重心高さ $H_c$ / 基礎幅 $B$	天端高さ (mm)
3	60.69	0.67	111
	59.00	0.77	125
	59.24	0.87	139
	59.58	1.00	159
	57.83	1.13	179
4.5	56.67	1.45	233
	39.56	0.79	135
	39.09	0.85	149
6	39.51	1.12	209
	30.00	0.68	146
	29.62	0.74	178

表-2 洗掘模擬実験と鉛直荷重実験の流れ

目的	Step	作業内容
	Step0	模型地盤構築, 基礎の設置
死荷重載荷	Step1	基礎に錘を載せる
洗掘模擬実験	Step2	洗掘の模擬 (アルミ棒の抜き取り)
鉛直荷重実験	Step3	洗掘前の天端位置にジャッキを設置し, 鉛直に荷重

で除した値に近くなるように基礎模型の重量を設定した。旧式河川橋脚の死荷重安全率の下限値は通常に供用出来ているとして、少なくとも安全率3程度までは確保できている。重心高さの下限値は、再供用に至った中規模被害事例における橋軸直角方向基礎幅に対する重心高さの割合と同程度にした。

先行研究<sup>56)</sup>では、鉛直荷重がほとんど作用していない状態で洗掘を模擬した後に、基礎中心位置でジャッキにより鉛直荷重を荷重したため、洗掘によって基礎が傾斜して偏心荷重が作用した状態が再現できていないという課題があった。

そこで本研究では、実際に錘を用いて模型死荷重を模擬し、死荷重が作用した状態から洗掘を模擬することで、洗掘に伴う残留変位・傾斜の発生状態をより実際に近い形で模擬できるよう改善し、活荷重のみをジャッキ荷重出来るようにした。また、鉛直ジャッキの先端に、ローラーを取り付け、基礎の回転と滑動を許容する構造としている。基礎の沈下量についてはレーザー変位計を基礎の左右端から20mmの位置に設置し、基礎にかかる荷重は鉛直ジャッキを介したロードセル

と基礎模型の2か所に設置した2方向ロードセルを使って計測している。また、基礎の水平変位は沈下に追従できるように、約400mm離れた位置に設置した水平変位計でワイヤーを介して測定している。

## (2) 洗掘模擬実験と鉛直荷重実験の詳細

実験は、洗掘模擬実験と鉛直荷重実験の2段階に分けて実施し、その詳細を表-2に示す。模型地盤作成後に、模型地盤の中心位置に基礎を設置する(Step0)。基礎設置後に目的の死荷重安全率になるまで錘を載せ(Step1)、基礎に錘を載せた状態でアルミ棒を抜き取ることで洗掘を模擬する(Step2)。所定範囲まで洗掘を模擬した時点で模型が転倒しなかったケースでは、洗掘前の橋脚天端中心位置にジャッキ(電動アクチュエータ)を設置し、洗掘後の沈下量から基礎幅の10%(10mm)を超えるまで荷重(Step3)を行った。本研究では、軌道位置を変えないで補修することを目指しているため、洗掘後の荷重時は、洗掘前の橋脚天端中心位置でジャッキ荷重している。

## 3. 洗掘模擬実験

実際に洗掘被害を受けた状態を模擬するために、図-6に示すように上流側を想定した基礎端部直下に最大洗掘深さ(局所洗掘深さ $d$ )が生じた状態となるように二等辺三角形の範囲のアルミ棒を抜き取った。局所洗掘幅 $W_s$ と局所洗掘深さ $d$ の関係は $\tan\phi = d/W_s$ である。局所洗掘の断面形状に関しては、内藤ら<sup>7)</sup>が行った洗掘実験

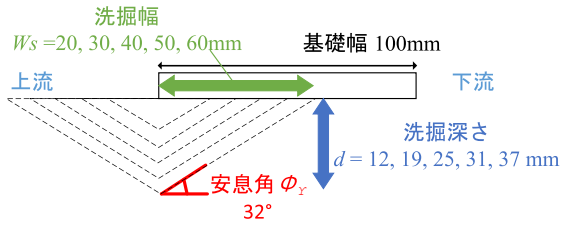


図-6 上流側局所洗掘範囲

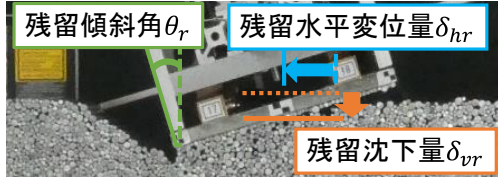


図-7 局所洗掘を模擬した様子 (d=37mm)

でも三角形形状となることが確認されている。

図-7に局所洗掘を模擬した様子を示す。図-6に示した局所洗掘範囲で示した二等辺三角形部分とは異なり、基礎直下のアルミ棒は基礎の自重により抜き取ることが出来なかった。これは、実際の河川橋脚基礎が洗掘被害を受けた時に基礎直下の土粒子は基礎の自重で拘束され洗掘が起きにくいいため、妥当と思われる。また、洗掘模擬後、基礎は沈下し、洗掘した斜面方向（上流側）に傾斜、水平変位した。洗掘規模が小さい順に局所洗掘を模擬し、途中で基礎が転倒したケースを除き、最大洗掘深さ(d=37mm)まで洗掘の模擬を行った。

洗掘深さと残留傾斜角の関係を図-8に示す。ここで、最も基礎の底面まで洗掘されたときに転倒に至らない範囲で想定される最大の残留傾斜角は、局所洗掘深さ  $d$  と基礎幅  $B$  との関係から  $\tan^{-1}(d/B)$  と推定できる（以下、推定最大残留傾斜角）。残留傾斜角が推定最大残留傾斜角を超えたケースを大規模被害とし、を超えていないケースを中規模被害とした。洗掘深さの増加に伴い、残留傾斜角は増加することがわかった。

傾斜による基礎の不安定化の程度を表す指標として偏心量  $e$  を用いて、洗掘深さと実測偏心比  $e/B$  の関係を図-9に示す。実測偏心比  $e/B$  は、以下の式より算出した

$$e/B = M / (V_0 B) \quad (1)$$

ここで、 $M$ ：2方向ロードセルから算出したモーメント（上流側に基礎が回転する方向を正）、 $V_0$ ：模型死荷重（基礎重量）とする。洗掘深さの増加に伴い、偏心比  $e/B$  は増加することがわかった。

次に、式(1)より算出した実測偏心比  $e/B$  と推定最大残留傾斜角が生じたときの偏心比（以下、推定最大偏心比） $H_c d/B^2$  との関係を図-10に示す。 $H_c$ ：基礎の重心高

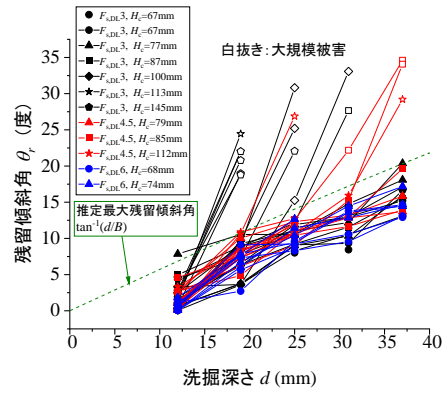


図-8 洗掘深さと残留傾斜角の関係

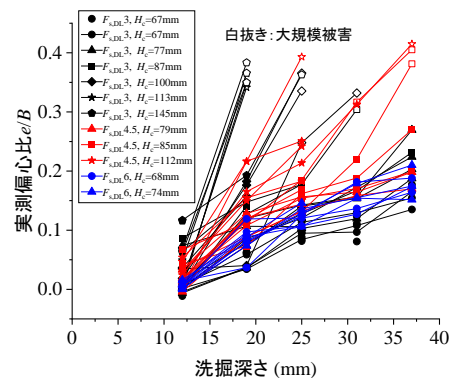


図-9 洗掘深さと実測偏心比の関係

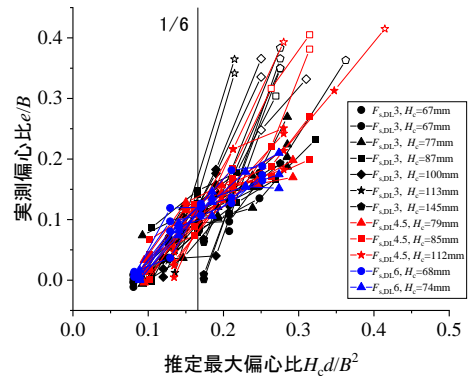


図-10 推定最大偏心比と実測偏心比の関係

さとし、推定最大偏心比  $H_c d/B^2$  を以下の関係式より算出した。

$$e = H_c \tan \theta \quad (2)$$

$$\tan \theta = \tan(\tan^{-1}(d/B)) = d/B \quad (3)$$

$$e/B = H_c \tan \theta / B = H_c d / B^2 \quad (4)$$

一般に、偏心比 1/6 を超えると基礎の浮き上がりが生じ始めて基礎の安定性が低下すると言われている。推定最大偏心比  $H_c d / B^2$  が 1/6 を超えると大規模被害の可能性が高くなることがわかった。

#### 4. 中規模被害時の鉛直載荷実験

本研究では、中規模被害後の河川橋脚基礎の再供用を目指し、再供用に必要とされる中規模被害後の支持性能を明らかにすることを目的としている。そのため、第3章の結果の中で大規模被害（基礎の転倒）に至らなかったケースについて鉛直載荷実験を行った。

局所洗掘を模擬した後に行った鉛直載荷実験により得られた荷重・沈下量の関係を、図-11に示す。洗掘後の初期勾配は低下するものの、載荷を継続することで抵抗力が増加することが確認できた。また、洗掘深さが深いほど、洗掘後の初期の勾配が小さいことが分かる。

洗掘深さと残存支持力との関係を図-12に示す。実際の応急復旧では残留変位分はジャッキアップ等により補修される。よって、補修後に期待される残存支持力を、沈下量が「被災時の沈下量+基礎幅の10%(10 mm)」に至るまでの最大荷重と定義する。洗掘深さが増加してもさほど残存支持力は低下しないが、洗掘深さが深くなるほど、ばらつきが大きくなることが分かった。

#### 5. おわりに

本研究では、旧式河川橋脚基礎が大規模被害に至る洗掘規模条件と中規模被害後の残存支持力の発現メカニズムの解明に向けて、洗掘模擬実験・鉛直載荷実験を行った。洗掘模擬実験より、重心高さが大規模被害との関連が高く、推定最大偏心比  $H_c d / B^2$  が 1/6 以下（基礎の浮き上がりが生じない範囲）では大規模被害に至らないことがわかった。また、鉛直載荷実験より、大規模被害には至らない残留沈下・傾斜を伴う中規模被害程度であれば、残存支持力はさほど低下しないことが確認できた。

このことは、局所洗掘によって比較的大きな残留沈下量・残留傾斜角を生じる被害を受けた後でも、被災基礎を再利用する簡易な応急復旧工事で早期の機能回復（橋梁の使用再開）が可能であることを示唆している。

#### 参考文献

- 1) 七澤利明, 宮原史, 藤田智弘, 猪股広典: 近年の道路橋の洗掘被害踏まえた国総研・土研の取組み, 基礎工, Vol. 50, No.6, 2022.6
- 2) 小湊祐輝, 阿部慶太, 篠田昌弘: 洪水により被災した鉄

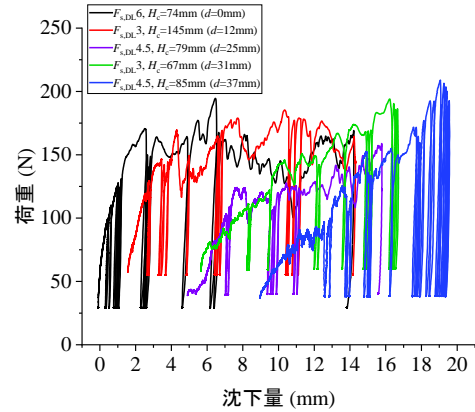


図-11 荷重沈下関係

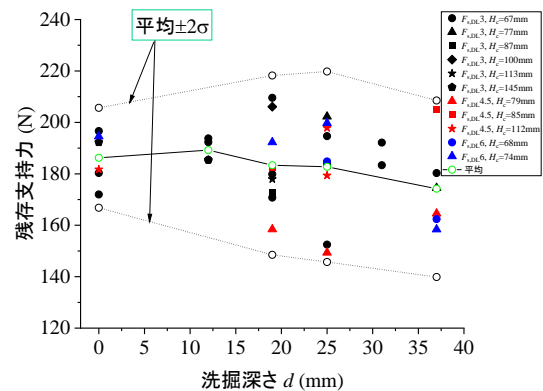


図-12 洗掘深さと残存支持力の関係

道橋梁橋脚の応急復旧事例, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 2, 332-337, 2016.

- 3) 村上温: 鉄道橋の洪水時被災機構と安全管理に関する研究, 学位論文, 京都大学, 1986.
- 4) 玉井信行, 石野和男, 榎田真也, 前野詩朗, 渡邊康玄: 豪雨による河川被害—その原因と対策—. pp.87-138, 2015.
- 5) Sasaki, Y. and Nishioka, H.: Vertical loading tests on local scoured spread foundation on aluminum rods model ground, *International Journal of GEOMATE*, Vol. 23, Issue 98, pp.17-23, 2022.
- 6) Hirano, M., Sasaki, Y. and Nishioka, H.: Evaluation of the bearing capacity of scoured bridge foundations using aluminum rod ground model tests, crest2023, Fukuoka, Japan 2023.
- 7) 内藤直人, 渡邊諭, 樺健典, 馬目凌, 布川修: 局所洗掘の進行過程における直接基礎模型橋脚の振動特性, 地盤工学ジャーナル, Vol. 15, No. 2, 269-279, 2020.