

長時間洪水で河川橋脚基礎が不安定化する条件に関する実験的検討

東京大学大学院 工学系研究科 学生会員 ○竹崎 奏詠

東京大学大学院 工学系研究科 正会員 渡邊 健治

東京大学大学院 工学系研究科 正会員 知花 武佳

1. 研究背景・目的

近年局所洗掘による河川橋脚の被災事例が増加傾向にあり、洗掘が進行した後の橋脚の不安定化に関する検討が行われるようになってきた^{例えば1)}。一方、洪水の継続時間に着目した研究事例は限定的である。そこで本検討では、流水時間を比較的長く設定することで、継続時間の比較的長い洪水によって橋脚が不安定化する条件について、実験的検討を行った。

2. 実験手法

本研究では、長さ 2200 mm、幅 600 mm の開水路中に作製した地盤（深さ 203 mm）に、長さ 140 mm、幅 70 mm、

表 1 実験条件

Case	河床材料	河床勾配	初期根入れ深さ(mm)	相対密度(%)	フルード数 (最大流量時)
Case2	珪砂 4 号 ($d_{50}=0.74\text{ mm}$)	1/400	58	79	0.69
Case48					0.73
Case50					0.79

高さ 250 mm のモルタル製小判型橋脚模型（模型スケール 1/30）を構築した（図 1）。実施した実験ケースおよび実験条件を表 1 に示す。河床材料は鹿島珪砂 4 号（50%粒子径 $d_{50}=0.74\text{ mm}$ 、均等係数 $U_c=1.69$ 、曲率係数 $U_c'=0.96$ ）を使用し、河床勾配、橋脚の初期根入れ深さ、地盤の相対密度を実験ケース間で統一させ、ハイドログラフのみを変化させた。各実験ケースのハイドログラフを図 2 に示す。Case 2 では、流量を段階的に増加させ、その他の Case 48, 50 では、それぞれ 315L/min、225L/min で長時間流水させた。なお、流量はポンプの稼働台数を変化させることで調節している。橋脚の不安定化については、橋脚の水平変位を計測することで評価した。図 1 に示すように、水路上流部にレーザー変位計を設置し、橋脚天端から凡そ 100 mm 下の位置において橋脚の水平変位（上・下流方向）を計測した。さらに、橋脚周辺の流況把握のため、電磁流速計を用いて橋脚左岸側側面中央から約 0.13m 左岸側における表面流速を逐次測定した。ここで、橋脚側面の流況に着目した理由は、橋脚側面近傍の河床には圧力勾配に起因した流体力が理論上働かない²⁾ため、後述する無次元掃流力を比較的容易に評価することができるためである。

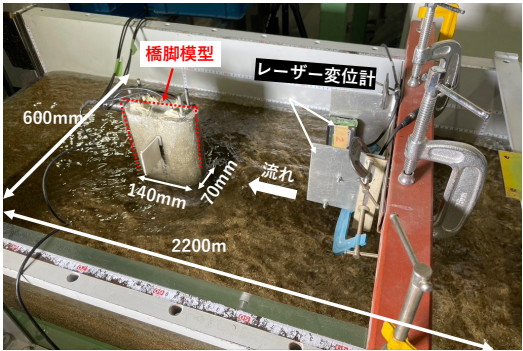


図 1 実験水路の外観

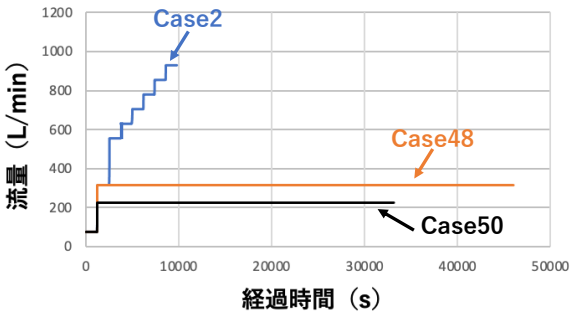


図 2 ハイドログラフ

3. 実験結果

図 3 に Case 2, 48, 50 における橋脚の水平変位（正の値が上流方）の時間変化を示す。同図より、Case 2（段階的）、Case 48（315L/min で長時間流水）では、流水を開始してそれぞれ約 10000、45000 秒後に橋脚が倒壊（橋脚が自立できない状態）したが、Case 50（225L/min で長

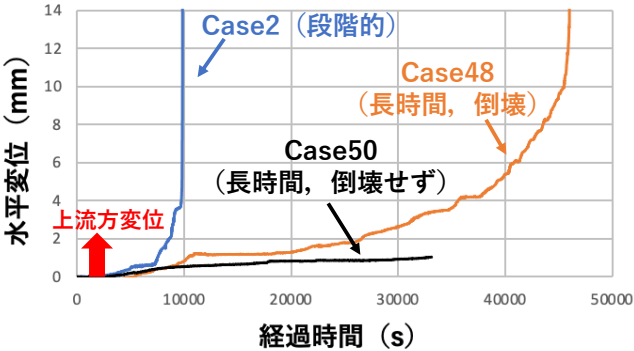


図 3 水平変位の時間変化

キーワード 局所洗掘、橋脚の不安定化、洪水継続時間、無次元掃流力、無次元限界掃流力

連絡先 〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1

東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 TEL 03-5841-6137

時間流水)では18000秒付近で変位の進行が収束した。このことは、橋脚が倒壊に至るまでの流量には閾値があり、本実験条件下では225~315L/minの間に閾値が存在し得ることを示唆している。

4. 実験結果の考察

次に、上述した閾値が存在し得る理由について、時間の経過とともに変位が進行し橋脚が倒壊したCase48と、変位の進行が途中で収束したCase50の実験結果を比較しながら考察を進める。

図4に、Case48, 50における橋脚側面左岸側における表面流速の時間変化を示す。同図より、流量一定に関わらず、2ケースともに、時間の経過とともに流速が低下していることがわかる。これは図5に示すように、時間の経過とともに洗掘孔が拡大することで通水面積が大きくなるためであると推測される。流速の低下は土粒子に作用する掃流力の低下につながる。そこで、掃流力および抵抗力の関係を式(1), (2)に示す無次元掃流力 τ^* および無次元限界掃流力 τ_c^* との関係を求めることで評価した(図6)。

$$\tau^* = \frac{u_s^2}{sgd_{50}f(z_b)^2} \quad (1) \quad \tau_c^* = \frac{4\mu_s}{3C_Df(z_b)^2} \quad (2)$$

$$u_s = \frac{8}{7}U_o \left(\frac{0.5d_{50}}{H} \right)^{1/7} \quad (3) \quad f(z_b) = 5.75 \log_{10} \left(\frac{z_b}{k_s} \right) + 8.5 \quad (4)$$

ここで、 s :土粒子の水中比重、 g :重力加速度(m/s^2)、 d_{50} :50%粒子径(m)、 μ_s :静止摩擦係数($=0.65$)、 C_D :抗力係数($=0.5^3$)

である。なお、静止摩擦係数は、別途河床材料の水中安息角を測定する簡易実験を行うことで求めた。また、式(1)中の河床近傍流速 u_s は、式(3)の1/7乗則を使って算出した⁴⁾。ここで、 U_o :橋脚左岸側側面における表面流速(実測値, m/s)、 H :橋脚左岸側側面における水深(m)である。なお、 H は橋脚上・下流端で測定した水深の平均値を用いた。更に、式(1),(2)中の速度分布関数 $f(z_b)$ は、式(4)を用いて算出した⁵⁾。

ここで、 z_b :土粒子に作用する河床近傍流速の作用位置($=0.5d_{50}^{5)}$)、 k_s :相当粗度($=d_{50}^{5)}$)である。

図6より、2ケースともに時間の経過とともに無次元掃流力が低下しているが、Case48では時間によらず無次元掃流力が無次元限界掃流力を上回っているのに対し、Case50では変位の進行が収束した18000秒付近以降から無次元掃流力が無次元限界掃流力を下回っていることがわかる。このことは、洪水中の無次元掃流力と無次元限界掃流力の大小関係が、変位の進行の有無を決定している可能性を示唆している。

5. 結論

本研究では、流水時間を比較的長く設定することで、継続時間の長い洪水によって橋脚が不安定化する条件について、実験的検討を行った。その結果、低流量下でも長時間流水を継続することで橋脚が倒壊に至る場合と変位が途中で収束する場合があります。洪水中の無次元掃流力と無次元限界掃流力の大小関係が、変位の進行の有無を決定している可能性を示した。

参考文献 1) 中川文人, 渡邊健治: 出水後の中規模水位の継続および河床材料の再堆積が河川橋脚の安定性に及ぼす影響, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会。2) D. Max Sheppard: Overlooked Local Sediment Scour Mechanism, Journal of the Transportation Research Board, No.1890, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 107-111, 2004. 3) 成瀬元, 横川美和, 松島亘志, 今泉文寿, 知花武佳, 東良慶, 佐々真志, 田島芳満: 土砂動態学, 共立出版, 2020. 4) Junke Guo: Pier scour in clear water for sediment mixtures, Journal of Hydraulic Research Vol.50, No.1, pp.18-27, 2012. 5) 関根 正人: 移動床流れの水理学, 共立出版, 2007。

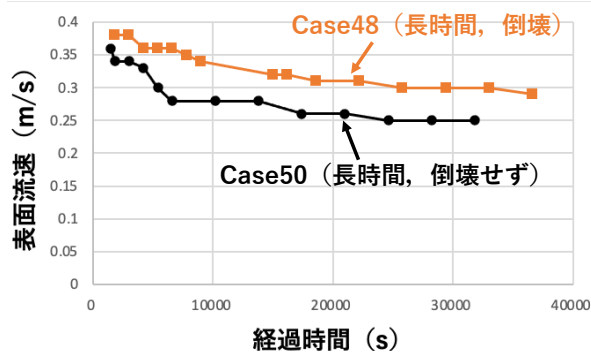


図4 表面流速の時間変化



図5 Case50における洗掘孔外縁の時間変化
(左:1500秒, 右:29580秒)

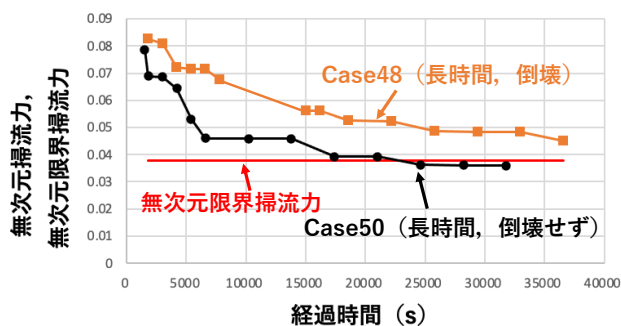


図6 無次元掃流力の時間変化