床固め工群における潜り込み流れと水面に沿う流れの境界に関する実験的検討

Experimental investigation on boundary between plunging flow and surface jet flow at ground sills

日本大学理工学部土木工学科　正会員　安田　陽一
日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻　学生会員　○宮川　拓也

1. 研究背景

床固め工は，河床の洗堀を防いで河道の勾配等を安定させ，河川の縦断または横断形状を維持するために，河川を横断して設ける施設である．我が国では計画高水位以下の洪水時などに構造物に作用する外力に対して，安全でなければならない[1]．しかし，従来の床止め工の設計では，下流側護床工が破壊されている事例が多くあり，その原因の一つとして床止め工から越流する流れが，潜り込むように流入されることが挙げられる．ここでは，連続床固工を想定し，潜り込み流れから水面に沿った流れとの境界を知るための解析的および実験的検討を行った．

2. 実験方法

実験には水路幅 0.80m, 水路高さ 0.60m, 水路長さ 18m を有する長方形断面水平水路を用いた．実験模型は，区間距離と堰上げ高さを一定にし，1 つの段落ち流れとみた条件で，**図 1** の模型を用いる．実験条件として，落差高さ D=0.08m，床固め工の天端の段差 D-S=0.021m，床固め工の堰上げ高さ S=0.059m，床固め工の勾配(D-S)/(L+t)=1/90，床固め工間の距離 L=1.8m，限界水深 hc=0.02m，0.03m，0.04m，0.05m，0.06m，0.07m，床固め工袖の長さ T=0.10m，床固め工袖の高さ h=0.021 m，床固め工の幅 t=0.042m である．測定方法は，落差高さの背面から下流側に向けて，0.50m，1.00m，1.50mの 3 ヶ所にて，ポイントゲージで測定する．

3. 床固め工群を段落ち流れと仮定した検討

潜り込み流れから水面に沿う流れの境界を知るために，中央の床固工の落差部を 1 つの段落ち流れと見立て，下流水深を $1.5h_c+S$ と仮定する．与えられた D，S に対して，流量を変化させることによって，h_d/h_c と D/h_c の関係が示される．また，段落上の流れが限界流であるときの射流から常流へ遷移する区間を検査部に選び，水平方向に適用した運動量方程式は次式のように示される．

$$F_r{}^2 = \frac{(h_d/h_1)^2 - k(D/h_1)^2 - 2k(D/h_1) - 1}{2\{1 - 1/(h_d/h_1)\}} \qquad (1)$$

ここに，k は段落背面に作用する全水圧 P_s を対象に静水圧分布を基準とした圧力係数である．すなわち，P_s は次式で示される．

$$P_s = k\frac{w}{2}D(2h_c + D) \qquad (2)$$

下流水位を上げた場合と下げた場合で，潜り込む流れから水面に沿い始める場合と，水面に沿った流れから潜り始める場合の maximum plunging condition の k の実験式が提案されている[2]．実験式から，$F_1 = 1$の場合，段落ち高さ D と限界水深 h_c との比が分かれば k の値が分かる．運動量方程式と k の実験式から，maximum plunging condition が形成されるための下流水深 h_d を算出する．流量を変化させることによって，h_d=1.5h_c+S と比較することによって床固め工群における潜り込み流れから水面に沿う流れに遷移する境界を推定することができる．下流水深を上げた時と下げた場合の maximum plunging condition のh_d/h_cとD/h_cとの関係をそれぞれ実線，破線の線で**図 2** に示す．**図 2** に示されているのは，床固め工間の落差(D-S)が 0.021m の場合であり，解析では他に 0.03，0.04m の場合についても検討した．また，図中の一点鎖線は$h_d/h_c = 1.5 + S/h_c$ と D/h_cとの関係を示す．$D - S = 0.021$，0.03，0.04m を比

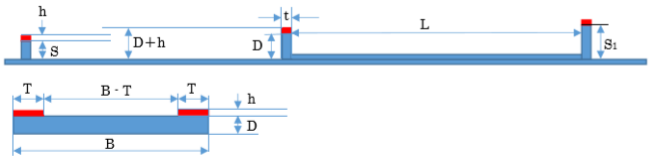

図 1　床固め工の概略図

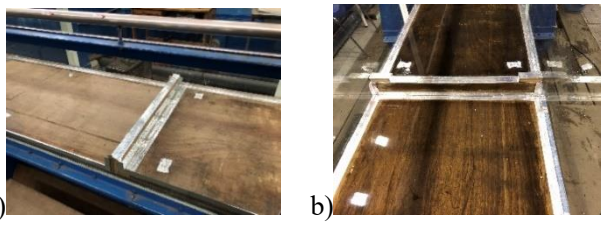

写真 1　床固め工の模型(a)突起なし(b) 突起あり

キーワード　床固工群，下流水深，水面に沿う流れ，潜り込み流れ，突起
連絡先　〒101-0062　東京都千代田区神田駿河台 1-8　TEL.03-3529-0409　Email：yasuda.youichi@nihon-u.ac.jp

© Japan Society of Civil Engineers

較すると，h_d=1.5h_c+Sの値で maximum plunging condition が形成される最小下流水深より大きくなるためには $D-S=0.021$m の場合，h_c≈ 0.036m，$D-S=0.03$mの場合，h_c≈ 0.051m，$D-S=0.04$m の場合，h_c≈ 0.11m となることが推定された．工学的な観点から，潜り込み流れから水面に沿う流れに遷移しやすくすることが，河床保護に繋がりやすいと判断し，$D-S=0.021$m を対象に検討する．

4. 解析結果に基づく実験的検討

写真 1 に示す模型を用いて，**図 1** の設置状態で$D-S=0.021$m の場合の実験を行った結果，h_c≈0.03m では潜り込む流れが形成され，h_c≈0.05m では水面に沿う流れが形成され，h_c≈0.04m では横断方向に流況が異なり，潜り込み流れと水面に沿う流れが混在している．すなわち，h_c≈0.04m 前後で潜り込む流れと水面に沿う流れとの境界となることを判断した．段落ち流れと比較すると，**図 1** に示されるように床固め模型を乗り越えるとき，流線の曲がりが上に凸となるが，段落ち流れでは異なる．床固め工の乗り越え方に違いがあるため遷移の仕方に違いが生じている．仮定した h_d=1.5h_c+S と h_d の実測値との比較を図 3 に示す．図に示されるように，h_c≈ 0.02~0.04m の範囲では，差異は小さいことが分かった．

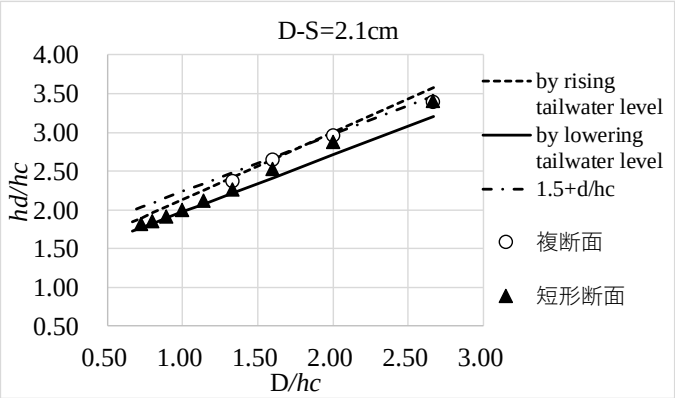

図 2 Maximum plunging condition が形成されるための相対下流水深と仮定され相対下流水深の変化

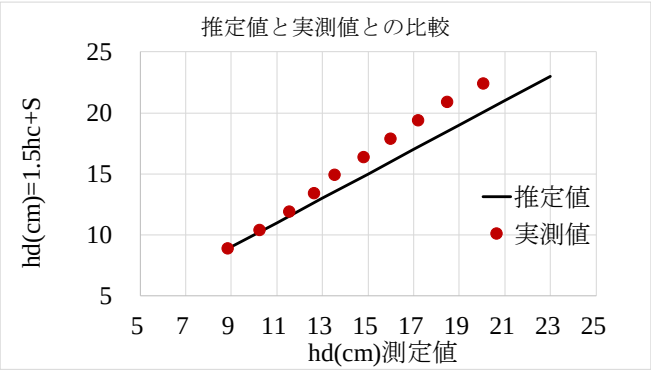

図 3 推定値と実測値との比較

表 1 突起設置と突起なしの場合の下流水深の比較

	突起なし			突起あり		
X(cm)	50	100	150	50	100	150
h_c=3cm	10.00	10.14	10.22	10.08	10.07	10.17
h_c=4cm	11.18	11.49	11.52	11.51	11.75	11.82
h_c=5cm	12.14	12.57	12.61	12.82	13.04	13.15
h_c=6cm	13.15	13.5	13.53	13.79	14.01	14.18

(単位:cm)

5. 突起の有無による境界の比較

床固め工設置区間の護岸保護の観点から床固め工の両側に突起（袖）を設けた場合について検討する．突起は実験方法に記述した大きさを有するものであり，この突起を両側に設置した．突起を設置した場合，**表 1** に示されるように下流水深は 1.5h_c + S より大きくなり，突起の設置($2t/B$ =0.25)によって，床固め工を通過する時には流れが中央部に集中する．このことによって，h_c≈ 0.04m で生じた潜り込み流れと水面に沿う流れとの境界が h_c≈ 0.03m 近くで中央の流れが半潜り状態(床固工を乗り越えた流れが潜り込んだ状態になるが直ちに主流が水面に沿う流れとなる状態)となる．h_c≈ 0.04m では，中央部で水面に沿った流れとなる．また，**図 2** から短径断面(突起なし)より複断面(突起あり)の方が h_c≈0.03~0.05m にかけて測点が上に位置している．これらより，突起を設置した方が潜り込み流れから水面に沿う流れに遷移しやすくなることが明らかになった．

6. まとめ

床固工群における潜り込み流れから水面に沿った流れとの境界を知るための解析的および実験的検討を行った結果，連続床固の一部を段落ち部と仮定し，境界となる相対下流水深を推定すると，床固工間の落差高によってその境界が得られにくいことが分かった．また，床固工の両側に突起（袖）を設置すると，下流水位がより堰上がり，中央に流れが集まることから，潜り込む流れから水面に沿った流れが形成されやすくなることを示した．

参考文献

1） 建設省河川局監修，改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説,設計編[1], pp.48-51,1998.

2） Ohtsu and Yasuda,Journal of Hydraulic Research, IAHR,Vol..29,No3,pp.309-328,1991.

© Japan Society of Civil Engineers