

自立高さを考慮した河岸侵食プロセスの解析法と常願寺川現地実験への適用

中央大学研究開発機構 正会員 ○竹村 吉晴
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 目的

自然堆積河岸は、非粘着性の材料から構成されていても、石礫の空隙に細砂が入り込むため、サクシジョンの発生や植生の根の影響等から、**図-5**のように河岸上部が切り立つことが多い。この影響を受けて、洪水時には河岸際の洗掘、河岸崩落の発生、川底への土砂の堆積と輸送を繰り返しながら、河岸侵食が間欠的に拡大することが明らかにされている¹⁾。このような河岸侵食プロセスは、研究蓄積があるものの、その重要性に反して河川の洪水流・河床変動解析には十分考慮されていないのが現状である。本研究では、自立高さを考慮した河岸崩落の解析法を開発し、これを非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)と非平衡流砂モデル(修正長田・福岡モデル)に基づく洪水流・河床変動解析法²⁾に組み込むことで、**図-1**に示す河岸侵食プロセスの解析法を構築する。そして本解析法を常願寺川現地実験に適用し結果を考察する。

2. 自立高さを考慮した河岸崩落の解析法

式(1)は、Fredlund et.al.³⁾により提案された不飽和土のせん断強度式である。

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi_b \quad (1), \quad u_a - u_w = \gamma_w(z - z_g) \quad (2)$$

ここに、 τ ：土塊のせん断強度、 c' ：粘着力、 ϕ' ：内部摩擦角、 σ ：全応力、 u_a ：空気の間隙水圧、 u_w ：水の間隙水圧、 ϕ_b はサクシジョンによるせん断強度の増加を表すパラメータである。河岸内部のサクシジョンを直線分布で近似して自立高さを求めると式(3)になる。本研究では、式(3)から求まる自立高さ z'_c を考慮し、**図-2**のようにすべり面を設定し、それより上にある土塊に作用する力のつり合いから河岸崩落の発生を判定する。

$$z'_c = \frac{4(c' + H_B\gamma_w\tan\phi_b)\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right)}{2\gamma_w\tan\phi_b\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) + \gamma_t} \quad (3), \quad F = \frac{(W\cos\beta - U + P\sin\beta) \cdot \tan\phi' + S\tan\phi_b + c'l}{W\sin\beta - P\cos\beta} \quad (4)$$

ここに、 W ：崩落土塊の重量、 U ：すべり面に作用する揚圧力 (B_s の範囲に作用)、 S ：すべり面に作用するサクシジョンによる力 (B_u の範囲に作用)、 P ：土塊に作用する河道からの静水圧、 l ：すべり面の長さである。

図-1(右)の解析フローに示すように、河岸近傍の三次元流れと非平衡流砂運動を考慮した洪水流・河床変動解析により崩落土砂の輸送と河岸際の洗掘を計算し、式(4)から河岸崩落が発生すると判定された場合($F > 1$)は、崩落土砂 (**図-2**の□)を連続体として扱い、河床に堆積するまでの過程を解析する。その後、河床に堆積した崩落土砂の厚さと粒度分布を考慮して河岸・河床高、河床粒度分布を更新し、この結果を洪水流・河床変動解析に反映する。この手順を繰り返すことにより、河岸侵食のプロセスが解析可能になる。

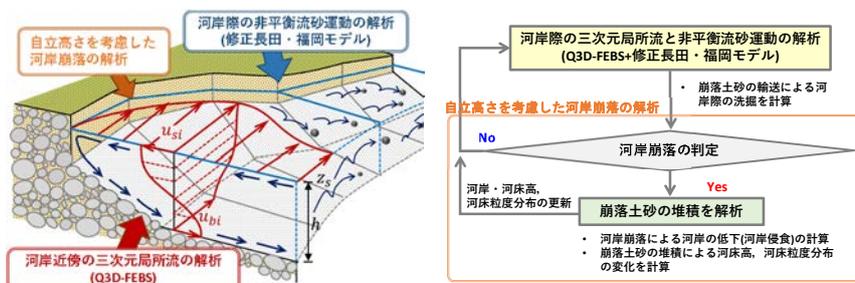


図-1 河岸侵食プロセスの解析法の枠組み (左) と解析フロー (右)

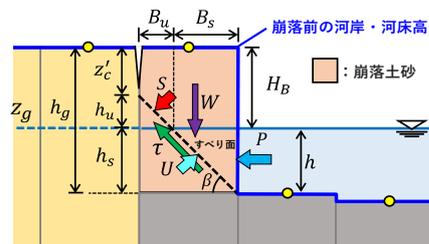


図-2 自立高さを考慮した河岸崩落の判定

キーワード 自立高さ、サクシジョン、河岸侵食過程、河岸崩落、常願寺川

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学研究開発機構 3124 号室 TEL 03-3817-1615

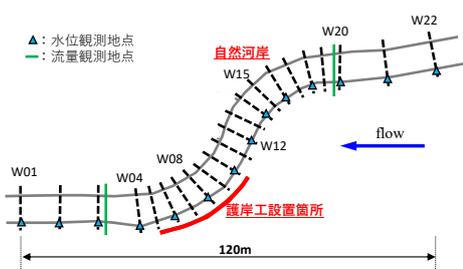


図-3 実験水路の平面形と観測地点

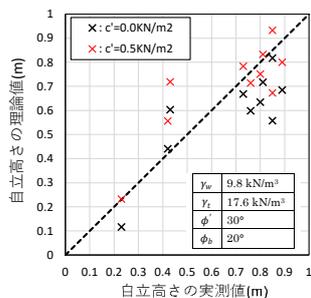


図-4 自立高さの理論値と実測値の比較



図-5 通水後の河岸 (W15断面)

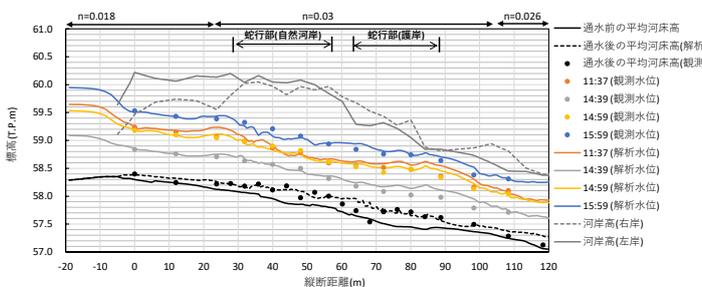


図-6 実測と解析の水面形の比較

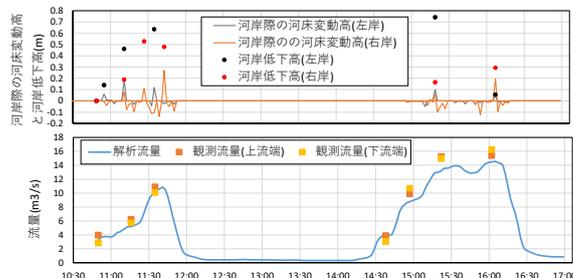


図-7 実測と解析の流量ハイドログラフの比較, 河岸際の河床変動高と河岸低下高 (W15)

3. 常願寺川現地実験への適用と結果の考察

図-3 は、実験水路の平面形と観測地点を示す。常願寺川 11.1km 付近の砂州上に長さ約 120m、幅 6~7m の蛇行水路を掘削し、最大約 $15\text{m}^3/\text{s}$ の流量を通水することで、石礫河川の河岸侵食機構が検討された。図-4 は、通水後の河岸の写真 (図-5) から自立高さを調べ、式(3)から計算した自立高さと比較したものである。式(3)から自立高さを計算するには河岸高 H_B が必要となる。図-3 の各側線の横断測量結果から河岸の地表面高さを調べ、水位観測地点の最大水位との差から H_B を算出した。×は粘着力をゼロとした場合、×は実測値に合うように粘着力を設定した場合である。図-4 から、石礫を主材料とする常願寺川現地実験水路では、粘着力を考慮しなくとも、サクシオンを考慮することで式(3)から自立高さを概ね説明できるものと考えられる。

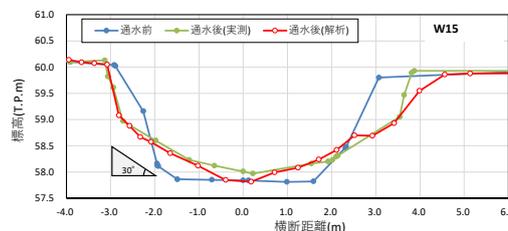


図-8 W15 断面における実測と解析の通水前後の横断面形状の比較

図-3 の W22 と W01 地点の観測水位を上下流端の境界条件に与え、図-1 の本解析法により常願寺川現地実験の河岸侵食プロセスを解析した。河岸崩落の解析では、粘着力をゼロとし、図-4 の表に示した諸量を用いた。図-6 と図-7(下)は実測と解析の水面形と流量ハイドログラフの比較、図-8 は W15 断面における実測と解析の通水前後の横断面形状の比較である。解析は実測を良好に説明できている。図-7(上)は、W15 断面において、2 分毎の解析結果から河岸際の河床変動高と崩落による河岸低下高の時間変化を調べたものである。本解析法では、河岸際の洗掘により河岸崩落が発生することで間欠的に河岸が低下し、河岸際には堆積が生じる。そして再び河岸際が洗掘され河岸崩落が発生するという河岸侵食のプロセスが考慮されていることが分かる。

4. 結論

本研究で提案した手法は、自立高さを導入することで、河岸からの間欠的な土砂供給とその粒度分布を考慮した河岸侵食のプロセスの解析が可能である。これらは、洪水時における河岸侵食速度等を予測する上で極めて重要な要素であり、今後、河岸の構成材料等の異なる場合についても検討を進め、汎用性の高い河岸侵食の解析法の構築を目指す予定である。

参考文献

- 1) 福岡ら：自然堆積河岸の侵食過程，水工学論文集，第 37 巻，pp.643-648，1993.
- 2) 竹村ら：洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構に関する研究，河川技術論文集，第 26 巻，pp.669-674，2020.
- 3) Fredlund et al.: The shear strength of unsaturated soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol.15, No.3, pp.313-321, 1978.