水理模型実験における稲葉川合流部処理 及び瀬・淵環境の保全について

名村 圭司1

1近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 調査第一課 (〒668-0025兵庫県豊岡市幸町10-3)

円山川直轄区間上流部の稲葉川合流部付近では河川整備計画に基づく河道整備が進められて おり、稲葉川の付け替えと本川左岸堤防の整備により堤防法線が大きく変化している。当該地 区は魚類等の良好な生息場となっているが、稲葉川合流点には背割堤の整備が予定されており、 背割堤が完成した場合、現在の良好な淵環境が維持できるか課題となった。本論文では、背割 堤整備に伴う河床の変化傾向、特に淵の挙動を調べるために実施した水理模型実験の成果と、 それを再現し得る数値解析モデルを構築したので報告する。

キーワード 水理模型実験,背割堤,瀬・淵の保全,砂州,河床変動解析

1.はじめに

円山川は兵庫県朝来市生野町円山(標高640m)を源と し、稲葉川、出石川、奈佐川などの支川を合わせて日本 海に注ぐ幹川流路延長約68km、流域面積約1,300km²の河 川である(図-1)。下流部ではコウノトリをはじめとす る多様な生物が生息し、ラムサール条約湿地に登録され るなど、自然豊かな環境を保っている¹⁾。

一方、昭和34年9月の伊勢湾台風や平成16年10月の台 風23号などによって、円山流域は大きな災害を被ってい る。特に、平成16年洪水では、豊岡市の立野地点 (13.0k)で観測史上最高水位を記録し、堤防決壊や随所 での越水が生じた。こうした災害を踏まえ、平成16年以 降、河川整備計画に基づく河道掘削や堤防整備が進めら れ、平成25年に稲葉川の合流点が約250m下流へ付け替 えられた。

新しく合流点となった周辺には、図-2に示すように4 か所の淵が形成されて、魚類等の良好な生息場となっている。特に、No.2の淵は新合流点の直下流で、付け替え



図-1 円山川流域位置図

による影響が心配されるとともに、地元関係者からその 保全が強く求められている。

円山川では河川整備計画河道の完成後、治水安全度を より向上させるため、基本方針河道の整備を行うことに なるが、背割堤の建設によってNo.2淵が消失することが 予想されている。そこで、背割堤の形状がNo.2淵の代替 地に対して所要の効果を有するか確認するため、移動床 模型実験実施した。また、今後の淵保全対策工を効率的 に検討するために、実験結果を再現し得る数値解析モデ ルの構築を行った。

2.水理模型実験の概要

(1)実施施設

実験は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラト リーで実施した。模型実験対象範囲は稲葉川の合流点の 上下流約1kmで、円山川24.2k~26.4k、稲葉川-0.2k~ 1.1kの範囲である。模型縮尺はフルードの相似則、実験 施設の広さ、およびコストを考慮して1/60とした²。



図-2 検討対象範囲(稲葉川合流部)

最新の横断測量成果、深浅測量成果、LPデータ、計画 縦横断図等を活用して昨年度製作した整備計画河道の移 動床模型をもとに、基本方針河道で実施する河床掘削部 分を移動床に変更し、さらに背割堤模型を配置した。

(図-3)。円山川および稲葉川の上流端には四角堰を有 する量水槽を、水路下流端には流量規模に対応した水位 調節をするためのゲートを設置した。

(2)実施条件

実験流量は定常および非定常のケースを設定し、非定 常における流量は、図-4に示すように流量ハイドログラ フを階段状に与えた。

河床材料には一様珪砂を使用し、現地河床材料調査結 果より得られた代表粒径(d₆₀=40mm)を模型縮尺 (1/60)で縮小した粒径(0.67mm)に近い粒径に調整さ れた4号珪砂(0.60~0.85mm)を用いた。なお、現地の 淵部の河床材料は平均粒径よりも大きな粒径(50~ 100mm)で形成されていたため、模型水路で淵が形成さ れることを想定した箇所には、実態に合うように平均粒 径(40mm)より大きな河床材料(玉石)を水路底部に設 置した。



図-3 円山川河道水理模型

表-1 模型実験実施条件

項目	実施条件				
縮尺	フルードの相似則等より水理量の妥当性を確認し、1/60を採用				
下流端	模型下流端地点の準二次元不等流計算による HQ 式を用いて、				
水位	流量規模に応じた水位を下流端ゲートを操作して設定				
粗度係数	基本方針河道の粗度係数と整合するように、固定床部にイボ型 粗度を設置				
給 砂 量	円山川上流端断面における平衡流砂量				
河床材料	現地河床の代表粒径等から、一様珪砂(4号珪砂:0.60~ 1.18mm)を採用。淵底の大粒径を考慮				



(3)実験ケース

実験ケースを表-2に示す。背割堤の形状が淵や流況に 及ぼす影響を確認するため、背割堤形状は図-5に示す現 計画案と背割堤先端を直線とした変更案の2ケースとし た。変更計画案で背割堤先端を直線とした理由は、流向 の変化に伴い、背割堤先端付近に位置するNo.3淵の拡大 を期待したものである。

定常実験の流量を1,500㎡/sとしているのは、図-6に示 すように過去10ヶ年の流量規模毎の継続時間に、流量規 模毎の掃流砂量を掛け合わせて算出した総掃流砂量が最 も多い流量規模であるためで、円山川の河床形成に支配 的な流量といえる。

○現計画案



○変更計画案



図-5 背割堤の検討ケース

実験 (ケース)		流量規模 (m³/s)※1	定常•非定常 ※2	備考	
Р	0	4,800	非定常	予備実験 平坦から通水し、本実験の初期河道を整形	
Α	1	1,500	定常	ケース0実験後の河床形状から通水	
	2	5,000	非定常	ケース1実験後の河床形状から通水	
в	3	1,500	定常	背割堤先端部を変更し、ケース2実験後の河床形 状(先端部周辺は再現)から通水	
	4	5,000	非定常	ケース3実験後の河床形状から通水	

表-2 模型実験ケース

※1:表中の流量は現地スケール

※2:通水時間は模型スケールで110分×2回(現地スケールで14時間×2回)、ケースP0のみ110分×4回通水



図-6 総単位幅掃流砂量

(4)実験方法

実験は**表-2**の上→下の順番で行い、予備実験P0の後に 本実験A1~B4を行った。いずれのケースにおいても、各 ケースの最終河床形を次のケースの初期河床としている。

予備実験P0では、河床を平均河床高で平坦に敷きなら した状態から通水を開始し、本実験のための初期河床の 形成を行った。現況河道の澪筋や砂州等の形状を十分に 形成するため、4回通水した。

本実験での通水時間は設定した流量ハイドログラフの 継続時間110分(現地スケールでは14時間)を2回通水し ている。2回の通水は、1回目に水位・流量を計測し、2 回目に計測機器を外して流況撮影を行うためである。

また、実験ケースAからBに移る際に、背割堤先端部の 形状を変更したが、変更作業時に乱した背割堤先端部周 辺の河床は、変更作業前に計測した河床形状を参考に再 現している。

給砂は通水開始と同時に上流端からはじめ、芦田・道 上式により算出した流砂量を投入した。

なお、支川の稲葉川は、現地調査や関西電力、兵庫県 への聞き取り調査の結果から、円山川本川への流砂の影 響が小さいことが判断されため、給砂は行わないものと した。

(5)計測方法

通水中の水位は水路断面中央でサーボ式水位計によっ て測定し、流速は電磁流速計によって、流量ピーク時に 測定した。図-7は実験風景で水位計測中のものである。 また、染料(ウォーターブルー)や発泡スチロール片を 流して流況をビデオカメラで撮影し、撮影したビデオ画 像を解析して、表面流速の分布を計測した(図-8)。さらに、河床形状は3次元レーザースキャナーを用いて、 通水後の河床形状を点群データとして計測した。3次元 レーザースキャナーを用いることで、鋼製物差を使用し て人力で計測していた従前と比べ、計測時間が大幅に削 減できた。加えて、河床の平面的な変化を評価すること、 任意の測線で河床形状を評価することが可能となった (図-9)。



図-7 河道水理模型の現地写真



図-8 流速分布計測 PIV (Particle Image Velocimetry)



図-9 3次元レーザースキャナ計測結果

3. 予備実験

河床を平坦にした模型水路に流量ハイドロを4回通水 し、水面形の検証を行うとともに、本実験のための初期 河床の形成を行った。予備実験の結果、水面形は概ね不 等流計算と同様であり、河床形状は平坦河床から現況河

調査·計画·設計部門:No.14

床形状(砂州や澪筋)に近づく変化が見られ、現況No.1、 3、4淵の位置で洗掘傾向が確認された。ただし、背割堤 建設後のNo.2淵地点は稲葉川の死水域となり、現況河道 で存在する淵が形成されなかった。このため、No.2淵は 現況地形を参考に人為的に整形した。

基本方針河道で背割堤の形状を評価するための初期河 床は、背割堤建設後の河床変動によって砂州や澪筋が形 成した状況を想定し、予備実験で平坦河床から通水して 土砂が再堆積した河道を用いた。



図-10 水位·河床高計測結果縦断図



図-11 初期河床の整形

4. 本実験

(1)背割堤現計画案の実験(ケースA1、A2)

背割堤の建設によって円山川の水域から分離され、稲 葉川の水域となるNo.2淵や背割堤先端部に位置するNo.3 の淵が維持、再生可能か確認した。

ケースA1では、通水後、No.2淵にほとんど変化はなかった。P0で既に侵食傾向を確認していたNo.3淵では侵食が拡大していた。ケースA2後も、No.2淵の形状は維持されていた。No.3の淵は縦横断方向に侵食が拡大することを確認できた。

(2)背割堤変更計画案の実験(ケースB3、B4)

背割堤の形状が淵や流況に及ぼす影響を確認した。現 計画案を変更計画案(先端部直線)にすることで次の点 が確認された。①No.3淵部の河床高低下と位置が上流側 への移動、②背割堤先端部下流に直線状に堆積が発生、 ③流水幅が狭くなり流速が増加



図-12 No. 3淵の変化





図-13 淵地点の横断図



図-14 背割堤形状の違いによる比較 (5,000m³/s通水時)



図-15 先端部の流速変化 (PIV計測結果)

調査·計画·設計部門:No.14



図-16 河床高差分図(B4-B3:変更計画案5,000m³/s通水の変化)

なお、現状の稲葉川合流部(護床工下流端)から背割 堤にかけて川幅が急激に広がる平面形状となっており、 模型実験では著しい河床洗掘が生じた。洗掘は、稲葉川 の流量が小さいハイドロ立ち上がり時に顕著に現れた。



図-17 稲葉川急拡部の洗掘状況

5.実験結果の評価

(1)背割堤形状の評価

背割堤先端付近の平面形を河道の線形に沿ってカーブ させた現計画案と直線化した変更計画案の2ケースの通 水実験を実施し、背割堤先端付近を直線化することによ って、次の現象が確認できた。①現計画案に比べ本川側 の河積が狭められるため、流速の大きな流れが本川右岸 側に集中する。②従来のNo. 3淵より上流側に深い淵が形 成される。③背割堤先端付近に大きな砂州が形成され、 稲葉川の合流点が砂州で閉塞される。④稲葉合流点の水 位が砂州でセキ上げられるため、稲葉川合流部~No. 2淵 区間の流れがかなり緩くなる(図-19)。

このため、本川No.3淵上流で懸念される河岸洗掘や稲 葉川合流点の閉塞の問題、No.2淵の維持の観点から、背 割堤については現計画案の方が望ましいと考えられる。



図-18 背割堤下流の状況(ケース B4 通水後)



図-19 水位縦断図(1,500m³/s通水時)

(2)淵保全の評価

河床を平坦にして通水した予備実験では、背割堤建設 後のNo.2淵は死水域となり、淵は形成されなかった。た だし、現況の淵を人為的に整形しておくと稲葉川の水流 のみでも渦が発生し、淵がある程度、維持されることが 確認できた。



図-20 稲葉川No. 2淵周辺の状況(ケースB4通水後)

6. 河床変動に関する数値解析

背割堤の建設に伴う淵の挙動や今後、淵保全のための 対策検討を実施するために、その都度模型実験をするこ とは、コスト的にも時間的にも負担が大きい。このため、 河床変動に関する数値解析モデルの構築を行い、模型実 験の再現計算と現地への適用が可能なモデルを検討した。

(1)支配方程式

流れ:平面二次元浅水流方程式

河床変動:掃流砂と浮遊砂を考慮した河床位方程式 掃流砂量式:芦田・道上式に斜面勾配を考慮した芦 田・江頭・劉式³⁾

浮遊砂量式:板倉·岸式

模型実験の再現計算では掃流砂量のみを扱っているが、 モデル構築にあたっては、現地への適用を考慮して浮遊 砂量式も組み込み、流砂を混合粒径とした粒度分布を考 慮している。

(2)計算ケースと条件

計算は、4ケース設定し、水路模型実験では背割堤の 効果を確認するため、背割堤現計画案と変更計画案の2 ケースを選定した。

計算流量は模型実験と同様に1,500m³/s定常流と 5,000m³/sのハイドロを与えた2ケースである。 計算は一般曲線座標系によるものとし、メッシュ分割 は縦断方向10m、横断方向5~10mを基本とした。なお、 計算対象区間は模型実験の範囲とした。ただし、境界条 件の影響を避けるため、対象区間の上下流端を延伸させ、 約1km程度の助走区間を設定した。また、下流端(24.2k 地点)水位は、不等流計算によって得たH-Q 式で与えた。

(3)実験結果の再現計算結果

図-21に、背割堤変更計画案における実験結果と計算 水位との比較を示す。軸のスケールは現地スケールで表 している。水位について、計算結果と実験結果はよく一 致している。また、図-22に示す流速ベクトル図より、 背割堤先端部で生じた流速の増大や模型実験での流向等 が再現できており、図-23に示す河床変動高図より、 No. 2淵の再現精度には課題があるものの背割堤先端部で の洗掘を概ね良好に再現できている。







図-22 流速ベクトル図 (変更計画案)



7.おわりに

基本方針河道での背割堤建設による瀬・淵への影響を 1/60 スケールの移動床模型実験で確認した。得られた 結果をまとめると次のとおりである。

- ・背割堤の形状を現計画案と先端を直線化した変更計画 案で比較した。本川No.3淵上流の洗掘や稲葉川合流点 の閉塞問題、No.2淵の維持の観点から、背割堤につい ては現計画案の方が望ましいと考えられる。
- 河床を平坦にして通水した場合、背割堤建設後のNo.2 淵は死水域となり、淵は形成されなかった。ただし、 現況の淵を人為的に整形しておくと稲葉川の水流のみ でも渦が発生し、淵がある程度、維持されることが確 認できた。

また、今後の課題をまとめると次のとおりである。

- ・現状の稲葉川合流部(護床工下流端)から背割堤にかけては、川幅が急激に広がる平面形状となっており、 模型実験では著しい河床洗掘が生じた。背割堤を整備する際は、護床工下流端の河床洗掘対策の検討が必要である。
- ・今回構築した数値解析モデルは、水位や流向、淵の形 成場所等をよく再現できたが、No.2淵の最深河床高の 再現精度に課題がある。今後、湾曲部における流水の ねじれ現象を実験結果と数値解析で比較することや二 次流のモデルを再検討するなど、精度向上を図る必要 がある。

謝辞:実験を視察していただいて有益な助言をいただい た岐阜大学藤田裕一郎名誉教授ならびに京都大学防災研 究所竹林洋史准教授に深謝します。また、実験施設の使 用について協力していただいた京都大学防災研究所流域 災害研究センター長中川一教授に深謝します。

参考文献

1)近畿地方整備局:円山川水系河川整備計画, 2011.

- 2)名村圭司:水理模型実験及び数値解析モデルの併用による円山川河道整備に伴う瀬・淵環境の保全に関する考察,平成27年度近畿地方整備局研究発表会論文集,2015.
- 3) 芦田和男・江頭進治・劉炳義:二層モデルによる複断 面河道の流れおよび河床変動の数値解析,京都大学防 災研究所年報第35号 B-2,1992.