

# 緩勾配落差工の水理模型実験について

前田 恭弘<sup>1</sup>・坂中 忠孝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>甲賀土木事務所 河川砂防課

<sup>2</sup>琵琶湖環境部 下水道課

本水理模型実験は、天井川の切り下げ区間に落差処理のため設計された緩勾配落差工について、栈粗度および減勢工の減勢効果の検証を行うため実施したものである。水理模型には縮尺1/25の固定床の模型を用い、計画高水流量について緩勾配落差工に設けた栈粗度による減勢効果並びに段上りの強制跳水による減勢効果が、設計で見込まれた通りの水位・流速等となるか検証を行った。実験の結果、緩勾配落差工に設ける栈粗度の高さ及び設置間隔を見直し変更することで、計画高水流量等に対する安全性が確認された。

キーワード 天井川、緩勾配落差工、水理模型実験、跳水、減勢工

## 1. 水理模型実験の背景と目的

由良谷川は典型的な天井川で河積が不足しているため、ひとたび洪水が起こったときの被害は甚大なものが想定される河川である。そのため、由良谷川流域を家棟川流域に編入し、放水路計画により現在の天井川を解消する治水対策が策定され、下流より逐次整備されている。

由良谷川を家棟川に流入させるため、現在の天井川から掘込河道にするための落差処理が必要であり、落差処理の高さが約12mと非常に大きく、河川改修事業による落差工(床止め)形式では対応が難しいことから、原設計では「緩勾配落差工(栈粗度<sup>1</sup>)」形式による落差処理に加え「段上がり<sup>2</sup>(減勢工)」を採用した。

一般的な落差工は落差が2.0m～3.0mであるが、本緩勾配落差工は高低差約12m、延長約120mと非常に規模が大きく、机上の設計では想定できない水理事象が発生する可能性が高いと判断し、水理模型実験を実施した。

水理模型実験においては以下の検証を行い設計の妥当性および洪水に対する安全性を確認した。

- ① 計画高水流量の流下に対し、計画高水位を超えないこと。(Q=40.0m<sup>3</sup>/s)
- ② 護床工設置範囲の妥当性を確認すること。(Q=40.0m<sup>3</sup>/s)
- ③ 超過洪水時の流況を把握すること。(Q=60.0m<sup>3</sup>/s)

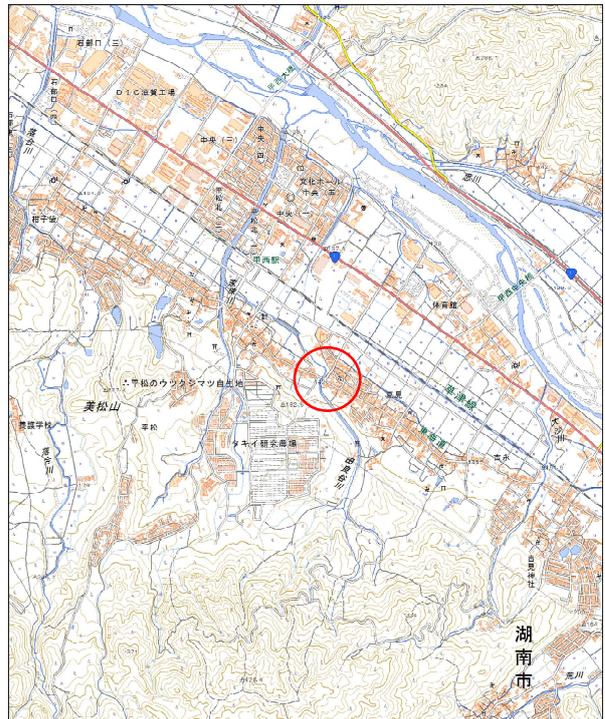


図-1 由良谷川位置図

表-1 フルード相似則による縮尺一覧表

縮尺1/25	縮率	実寸	模型
距離・長さの縮率	1/25	260 m	10.4 m
断面積の縮率 $Ar=Ap/Am=Hr^2$	1/625	15 m <sup>2</sup>	0.024 m <sup>2</sup>
流量の縮率 $Qr=Qp/Qm=Hr^5/2$	1/3125	40 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s
流速の縮率 $Vr=Vp/Vm=Hr^{1/2}$	1/5	2.5 m/s	0.5 m/s
勾配の縮率 $Ir=Ip/Im=1.000$	1/1	1	1
粗度係数の縮率 $Nr=Np/Nm=Hr^{1/6}$	1/1.70998	0.03	0.0175
時間の縮率 $Tr=Tp/Tm=Hr^{1/2}$	1/5	60 sec	12 sec

2. 水理模型

水理模型は、上流の既設河道から計画河道への擦り付け区間40mと落差処理のための緩勾配落差工と落差工直下流に設置する段上りによる減勢工区間160mおよび、下流市道橋交差部までの区間60mの合計約260mについて再現するものとし、その他の諸元は以下の通りとした。図-2に平面図、図-3に縦断面図を示す。

(1) 縮尺

模型縮尺は、本実験で想定される緩勾配落差工部の最小水深が3cm以上となるように模型の縮尺の設定を行った。想定される最小水深は $h = 0.75m$ であることから、模型の縮尺は $1/25$  ( $0.03m/0.75m$ ) と設定した。表-1に縮尺 $1/25$ の場合のフルード相似則による縮尺一覧を示す。

(2) 粗度係数と模型粗度の調整

粗度調整を行っていない原模型の材料であるコルク、モルタル、アクリル樹脂の粗度係数は一般に表-2に示すとおりである。予備実験の結果より、各使用材料の粗度係数は一般に示される値の下限值を採用した。

また、本実験では、河床のコルク版にマップピンを配置し、河道計画で設定している粗度係数を再現することとした。表-3に粗度調整に用いたマップピンの本数を示す。

表-2 模型材料の粗度係数

材料	粗度の縮率 Nr	粗度係数	
		模型	実物量
アクリル樹脂	0.585	0.008(採用値)	0.0137
		0.0085(標準値)	0.0145
		0.009	0.0154
モルタル	0.585	0.010(採用値)	0.0171
		0.013(標準値)	0.0222
		0.015	0.0256
コルク(木)	0.585	0.012(採用値)	0.0205
		0.015(標準値)	0.0256
		0.018	0.0308

表-3 イボ型粗度による模型粗度の調整

項目	下流部	段上り部	斜路部	上流部	上流すり付部	
対象流量	m3/s 40					
粗度係数(計画)	n=0.026					
計算断面	河床幅 (m)	6.50	6.00	6.00	6.00	6.50
	護岸勾配	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:1.0
	等流水深 (m)	1.826	1.923	0.723	1.52	1.359
	河床勾配	1/235	1/235	1/10	1/110	1/110
模型粗度	アクリル粗度	0.0137	0.0137			
	モルタル粗度			0.0171	0.0171	0.0171
	イボ型粗度	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205
	マップピン直径 mm	φ10	φ10	φ6	φ10	φ10
	マップピン個数 個/20m	101	128	144	52	56

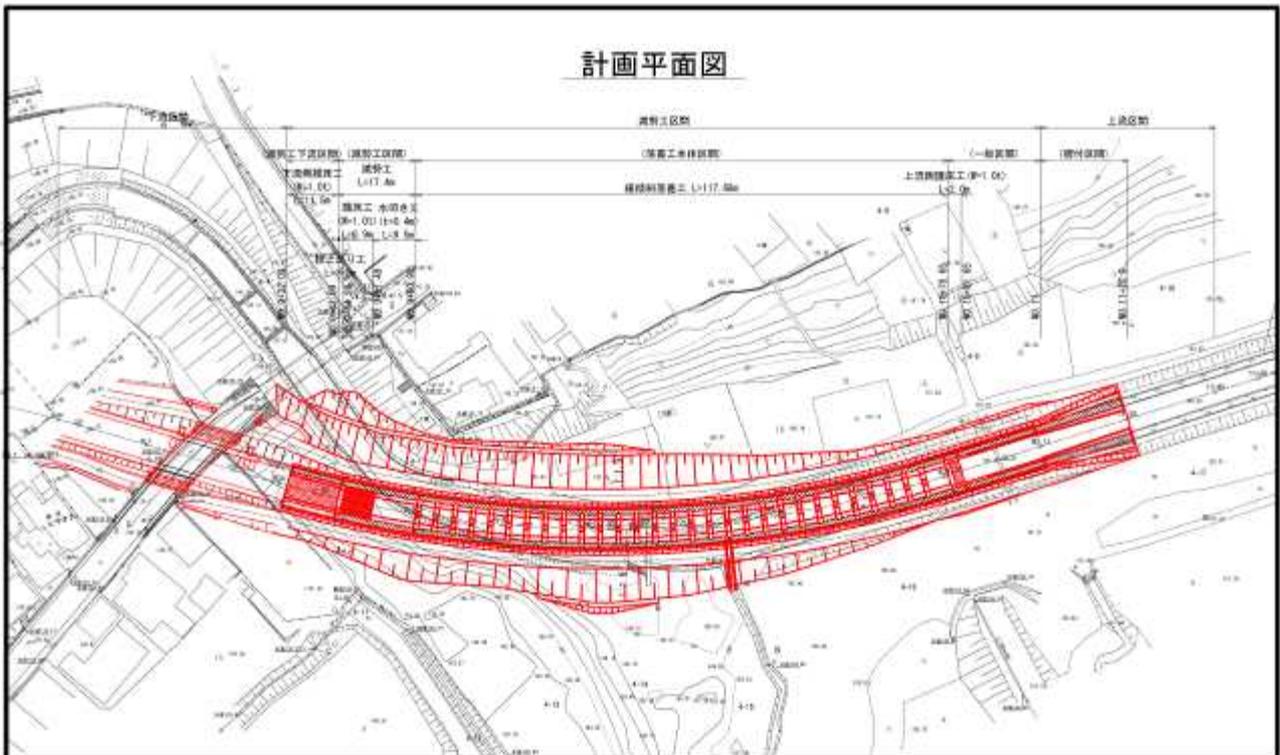


図-2 平面図

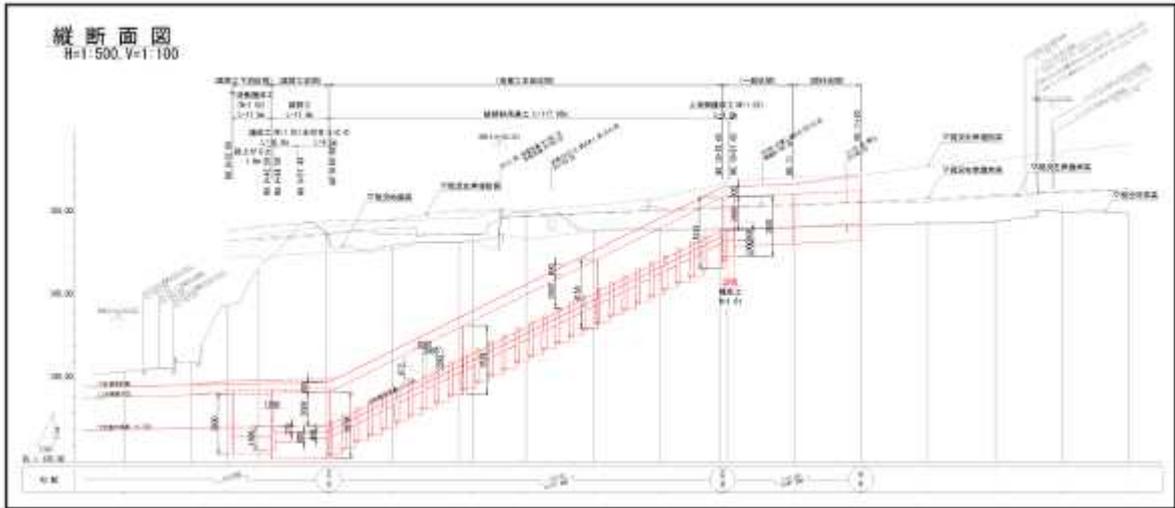


図-3 縦断面図

(3) 実験ケース

(a) 予備実験(粗度係数の検証実験)

制作した原模型(粗度調整前の模型)について粗度係数の算定を行う。算定方法は、原模型の水深観測および観測データ処理を行い、観測水位を用いた等流計算による粗度の逆算を行った。

原模型の粗度係数を把握した後、計画の粗度係数となるように内面加工(河床にイボ型粗度による粗度づけ等)を行い粗度係数を調整した。検証方法は内面加工した模型について上記の等流計算による逆算により粗度係数の確認を行うものとした。

(b) 原設計模型実験

原設計に基づき作成した模型を用いて、「1. 水理模型実験の背景と目的」に示した検証ケース①～③について実験を行った。実験ケースは、棧粗度を設置した場合と設置しない場合、および減勢工を設置した場合と設置しない場合の組合せにより case1.1～case1.4の4ケースに加え、超過洪水時の case2の合計5ケースを設定した。表-4に実験ケースの一覧表を示す。

表-4 実験ケース

実験名(ケース)	目的		流量	粗度係数
予備実験				
予-1	原模型の材料粗度の計測		40m <sup>3</sup> /s	調整なし
予-2	水理模型の粗度調整		40m <sup>3</sup> /s	0.026
現設計模型実験				
	棧粗度	段上がり		
原-case1.1	なし	なし	40m <sup>3</sup> /s	0.026
原-case1.2	なし	有り	40m <sup>3</sup> /s	0.026
原-case1.3	有り	なし	40m <sup>3</sup> /s	0.026
原-case1.4	有り	有り	40m <sup>3</sup> /s	0.026
原-case2	有り	有り	60m <sup>3</sup> /s	0.026

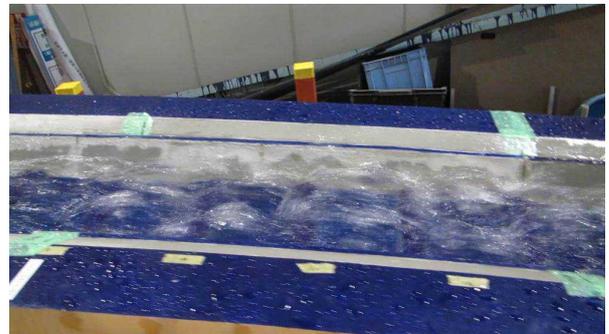


図-4 緩勾配落差工部の棧粗度により生じた「水跳ね現象」

3. 実験結果

原設計模型実験の結果、「緩勾配落差工(棧粗度)」は設計時の水深・流速をほぼ再現できているが、緩勾配落差工延長の上流から1/3の位置にあたる棧粗度以降で流況が乱れ「水跳ね現象」が生じた。また、落差工下流の「段上がり(減勢工)」は、強制跳水による減勢効果が確認できた。

(1) 棧粗度による減勢効果の検証

棧粗度による減勢効果を比較すると、棧粗度がない場合(原 case1.1, 原 case1.2)と棧粗度がある場合(原 case1.3, 原 case1.4)の平均水深は、棧粗度がある場合の  $h = 0.994\text{m}$  に対し、棧粗度がない場合  $h = 0.775\text{m}$  と約 22cm の水深差を観測した。また流速も原設計時の 5.554m/s に対し 5.751m/s とほぼ近似しており、棧粗度がある場合はない場合に比べ棧粗度による減勢の効果が認められる。ただし、図4に示すとおり、流況に関しては

栈粗度をジャンプ台とする「水跳ね現象」が生じており、落差工区間全般にわたり乱れた流況である。

(2) 段上りによる減勢効果の検証

段上りに着目した観測結果について表-5に示す。段上りがある場合は、なしの場合に比べ流速が大きく低減されていることから、段上りによる減勢効果は認められる。ただし、原設計の実験ケースである原一case1.4における観測値と設計値を比較すると、跳水前の水深については、ほぼ設計どおりの水深となっているが、跳水後の水深が設計値の1.801mよりも低い1.611mとなっている。このことより、段上りによる強制跳水は所定の位置で発生しているが、減勢効果が十分発揮されていないため、跳水後の水深が設計値より低くなり、case1.4では、図-5に示すように栈粗度の減勢効果が十分でないことから段上り部で大きな跳水が発生した。

表-5 段上りによる減勢効果

実験ケース	水深H(m)	断面積(m <sup>2</sup> )	流速(m/s)	フルード数
段上り	1.2	1.493	10.27	3.896
有り	1.4	1.611	11.17	3.580
なし	1.1	0.960	6.70	5.969
なし	1.3	1.134	8.01	4.991

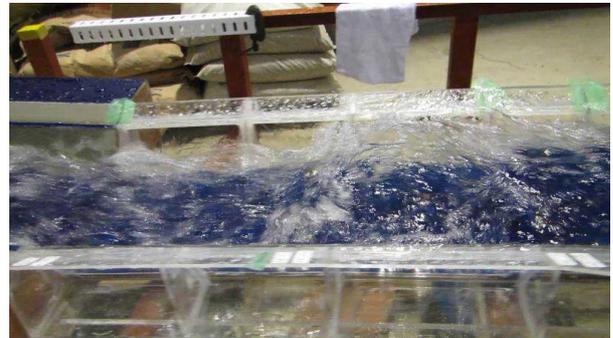


図-5 段上り部の流況

4. 改良模型の実験

(1) 原設計模型における課題抽出

実験結果より原設計模型の課題を以下の通り抽出した。  
 [課題1] 緩勾配落差工部の「水跳ね現象」の発生  
 [課題2] 段上り部の大きな「跳水現象」の発生

(2) 課題の解決

緩勾配落差工部の「水跳ね現象」は、原設計より減勢効果が高い栈粗度への改良を行うことにより課題の解決を図る方針とした。

段上り部の大きな「跳水現象」については、緩勾配落差工部の流況が改善されることで解消されるとの見通しを立て、改良模型の実験結果より判断することとした。栈粗度の改良は以下のとおりとした。

a) 栈粗度の設置間隔・高さを変化（試行実験）

栈粗度の設置間隔4.0mは、栈高を0.25mとした原設計の場合、最も減勢効果が高い（流速が小さくなる）設置間隔3.0mの場合と同等程度の流速となり、栈高0.25mの場合には、減勢効果が非常に高い領域にあることが水理公式集の既往実験結果より導ける。よって、栈間隔を変えるだけでは原設計以上の効果はあまり期待できないことから、栈粗度の設置間隔だけでなく、栈粗度の高さも変更した試行実験を行った。

試行実験の結果より栈高が0.25m～0.8mの範囲で減勢効果が高くなることが分かったが、栈高が0.25mの場合は設置間隔にかかわらず「水跳ね現象」が発生することから、栈高を0.5m～0.8mとし、栈の設置間隔は「設置間隔C/栈高h g = 5.0～8.0」<sup>3)</sup>となる範囲で設定し、さらに試行実験を実施した。試行の結果を表-6に示す。

b) 改良模型実験ケースの設定

表-6 試行実験結果

試行番号	高さhg m	間隔C m	緩傾斜落差工部の流況	
			流況	評価
1	0.50	2.50	水跳ねなし	○
2	0.50	3.00	水跳ねなし	○
3	0.50	3.50	水跳ね若干あり	△
4	0.50	4.00	水跳ね若干あり	△
5	0.60	3.00	水跳ねなし	○
6	0.60	3.60	水跳ね若干あり	△
7	0.60	4.20	水跳ねあり	×
8	0.60	4.80	水跳ねあり	×
9	0.70	3.50	水跳ね若干あり	△
10	0.70	4.20	水跳ね若干あり	△
11	0.70	4.90	水跳ねあり	×
12	0.70	5.60	水跳ねあり	×
13	0.80	4.00	水跳ね若干あり	△
14	0.80	4.80	水跳ねあり	×
15	0.80	5.60	水跳ねあり	×
16	0.80	6.40	水跳ねあり	×

上記試行の結果より改良模型実験は、緩勾配落差工部で「水跳ね現象」の発生しなかった試行実験3ケースについて実施するものとした。表-7に改良模型実験のケースを示す。

(3) ロールウェーブ現象

模型実験を実施する中で、緩傾斜落差工に設けた栈粗度により河道が縦断的に連続したプールとなり、そこに貯まった水が一斉に流れ出すことにより、波のような流れとなるロールウェーブ現象が発生した。

この現象の発生条件は、実験流量が計画高水流量や超過洪水時の流量のように流量が大きい場合には発生しないが、計画高水流量の1/2程度以下となった時に発生す

る。

ロールウェーブ現象の発生原因は、棧粗度によるプール状の河道と流量であることは明らかであったが、流量は自然現象であり不可避の条件である。よって、棧粗度に切欠きを設けることによりプール状になることを回避する対策とした。切欠きの形状・寸法については、ロールウェーブ現象に関する詳細な文献や資料がないことから、実験により改良方法を確認することとした。

ロールウェーブ現象は小流量でも発生することから、プールが極力できないように切欠きを河床まで設けることとし、複数の寸法の切欠きについて実験を行った。切欠きサイズによる実験結果を表-8に示す。

実験の結果より、棧粗度面積の0.25倍以上の切欠きを設けた場合にロールウェーブ現象の発生がないことを確認できた。

**(4) 改良模型実験の結果**

改良模型実験の計測結果は、図-6に示す通り全ケースではほぼ近似する結果となった。緩勾配落差工部の流況及び段上がり部の流況についても、ほとんど差はなかった。

表-7 改良模型実験ケース

改良模型のケース	棧高hg(m)	棧間隔C(m)	試行番号
改case-1	0.5	2.5	1
改case-2	0.5	3.0	2
改case-3	0.6	3.0	5

緩勾配落差工部で発生していた「水跳ね現象」については、試行実験で示したとおり改良模型でも発生が抑えられた。段上がり部の大きな「跳水現象」の発生も見られず、設計値の1.801mに近い1.843mの計測値となり減勢効果が確認できた。

改良模型実験の結果より、緩勾配落差工部および段上がり部の減勢効果での面では3ケースとも大差がないことから、下記の通り経済性で最も有利な改case-2が最適案であるとした。

改case-2は、改case-1と棧高が同じ0.5mであるが棧設置間隔が広く、改case-3より棧高が低いことから、工事費の面で経済的に最も有利となる。

表-8 ロールウェーブ現象の対策実験結果

試行実験1-③ (Case改) Q=40m<sup>3</sup>/s 計測箇所:No.9+51.49

実験Case	切欠きサイズ(幅)			切欠き面積(m <sup>2</sup> )	棧粗度面積(m <sup>2</sup> )	切欠きの面積比	計測水深(cm)	水深(m)	水跳ね状況	ロールウェーブ
	上段	中段	下段							
A①	1.00	1.00		0.50	4.47	0.11	4.45	1.11	若干あり	あり
A②	2.00	2.00		1.00	3.97	0.25	4.85	1.21	大きい	なし
B①	1.00			0.25	4.72	0.05	4.40	1.10	若干あり	あり
B②	2.00			0.50	4.47	0.11	4.27	1.07	あり	あり
B③	3.00			0.75	4.22	0.18	4.47	1.12	大きい	あり
C①		1.00		0.25	4.72	0.05	4.13	1.03	若干あり	あり
C②		2.00		0.50	4.47	0.11	4.28	1.07	大きい	あり
C③		3.00		0.75	4.22	0.18	4.58	1.15	大きい	あり
D①	2.00	1.00		0.75	4.22	0.18	4.62	1.15	大きい	あり
D②	3.00	1.00		1.00	3.97	0.25	4.48	1.12	大きい	なし
D③	3.00	2.00		1.25	3.72	0.34	4.85	1.21	大きい	なし
D④	5.00	3.00	1.00	2.25	4.50	0.50	4.70	1.18	大きい	なし

棧高はD④=1.00m、その他は全て0.75m

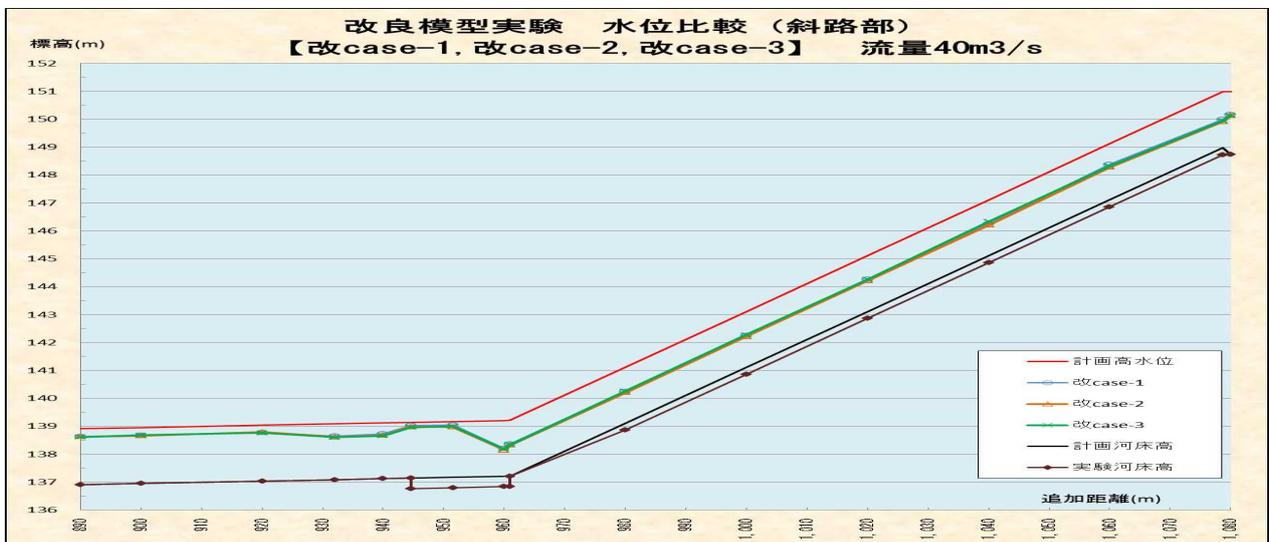


図-6 改良模型実験の水位計測結果

## 5. 設計の妥当性および洪水に対する安全性確認

改良模型実験より以下の事項を確認した。

### (1) 計画高水流量の流下に対し、計画高水位を超えないこと。

前述図-6に示すとおり、改良模型実験の結果はどのケースでも計画高水位を超えないことを確認した。

また、原設計模型で課題となった緩勾配落差工部の「水跳ね現象」および段上がり部の大きな「跳水現象」の発生は見られなかった。

### (2) 護床工設置範囲の妥当性を確認すること。

改良模型実験で最適案とした改case-2において、下流部の段上がりを含む護床工区間 (L=27.9m) の護床工粗度を反映しないケース (合成粗度  $n=0.026$ ) と、護床工粗度を反映したケース (合成粗度  $n=0.028$ ) の水位計測を行った。

護床工区間の下流側において、護床工粗度を考慮しない場合は、水位が0.20m~0.10m低く、流速が早いことを示している。

また市道橋交差点部付近より下流以降は水位がほぼ一致していることから、跳水の影響で流速が早くなる区間は、上記の区間すなわち護床工設置区間と一致する。護床工粗度の考慮の有無による水位の計測結果を図-7に示す。

以上より、原設計で設定された護床工の設置範囲は改良模型実験の結果から妥当であるといえる。

### (3) 超過洪水時の流況を把握すること。

改良模型の改case-2における超過洪水時の水位計測結果は以下のとおりの結果であった。

落差工端部より下流において、余裕高を含めた水深2.6m以上となる箇所はなく、市道橋交差点部において最も高い2.077mを観測した。この結果は、模型粗度を河道計画における粗度係数 $n=0.030$ ではなく、現実的な $n=0.026$ としたことにより河道計画時の水位より低い結果となったと推定されるが、超過洪水時の流況は、粗度に関わらず同様の水位の傾向を示すものと思われる。

すなわち、落差工下流端部及び段上がり部では緩勾配落差工の影響により流速が早く水位は低くなり、市道橋交差点部付近において下流水位の影響を受ける事により水位が高くなる。その結果、最も高い水位となる地点は市道橋下流となることから、計画高水流量より流下流量が大きくなる超過洪水時には、市道橋桁下の水位に留意する必要があるといえる。

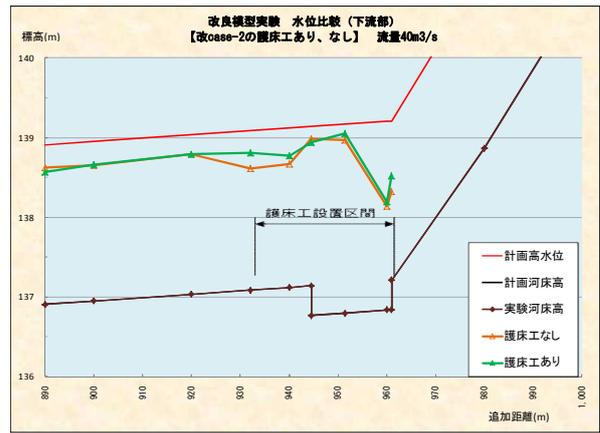


図-7 護床工区間の水位縦断

## 6. まとめ

机上の設計では想定できない水理事象が発生する可能性が高いと判断し、天井川の落差処理のため設計を行った緩勾配落差工について水理模型実験を実施した。

設計で想定した栈粗度および段上がり工では一定の減勢効果を確認することができたが、緩勾配落差工区間の栈粗度が原因とみられる「水跳ね現象」が発生し、緩勾配落差工および下流区間で大きな流況の乱れが見られた。

栈粗度の設置間隔および栈粗度の高さを改良することで、緩勾配落差工部の「水跳ね現象」は収束し、下流区間の流況の乱れを解消する改良模型実験の結果を得た。

このことにより、水理模型実験の目的としていた3つの事項について確認することができた。

県内にはまだ多くの天井河川があり、天井川の落差処理が必要としている河川が多数残っている。本水理模型実験では、落差処理に対する一事例が示せたのではないかと考察する。

**謝辞:** 本水理模型実験は、国立大学法人京都大学との共同研究として防災研究所宇治川オープンラボラトリーにて実施した。

実験の実施にあたっては、防災研究所流域災害センター 中川 一教授に丁寧なご指導を賜り、また同研究所職員の皆様にもご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 栈粗度: 水理公式集 [平成 11 年版] 土木学会, 1) 不透過越流型水制の抵抗, P214
- 2) 段上がり: 床止めの設計手引き (財) 国土技術研究センター編, P66
- 3) 栈の設置間隔 C 栈高  $h_g$ : 水理公式集 [平成 11 年版] 土木学会, 図 2-6.25, P214