

河道弯曲部における空石積み護岸設計の外力評価

EVALUATION OF EXERTING FORCE AS DESIGNING DRY-LAID MASONRY TYPE OF REVETMENTS IN RIVER BENDS

大槻 英樹¹・芦田 和男²・劉 炳義³・大本 雄二⁴・藤田 暁⁵
Hideki OTSUKI, Kazuo ASHIDA, Bingyi LIU, Yuji OHMOTO and Akira FUJITA

¹正会員 工修 (財)河川環境管理財団 河川環境総合研究所 大阪研究所 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-6-4)

²正会員 工博 (財)河川環境管理財団 河川環境総合研究所 大阪研究所 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-6-4)

³正会員 工博 (株)ニュージェック 大阪本社 河川・海岸部 河川室 (〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

⁴正会員 (株)ニュージェック 大阪本社 河川・海岸部 水理実験所 (〒611-0015 京都府宇治市槇島槇尾山1-2)

⁵正会員 工修 (株)ニュージェック 大阪本社 河川・海岸部 河川室 (〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

In order to prepare the guide for designing rich-in-nature type of revetments, we are making some researches into hydraulic characteristics and bank erosion in river bends. In this paper, first, we examine the distribution of flow velocity and the stability of dry-laid masonry type of revetments in river bends by experiments. Then, 2D numerical simulations are carried out to investigate the velocity characteristics under several kinds of conditions. It is shown that the index v_{toe}/v_{avg} (v_{toe} : the maximum depth-averaged velocity over the toe of the outer bank, v_{avg} : the average velocity in the approach channel) is useful for evaluation of exerting force on revetments, and that some kinds of parameters such as r (the radius of curvature)/ B (the width of river), dimensionless shear stress in the approach channel τ_0 , Froude number Fr , etc. have an influence on the value of index v_{toe}/v_{avg} .

Key Words : rich-in-nature type of revetments, bank erosion, river bend, velocity distribution, 2D numerical simulation

1. はじめに

多自然型の川づくりにおいて、河岸を保護する必要がある場合には、できるだけ天然の素材を用い、多孔性・屈撓性に富んだ工法を採用することが望まれる。このような多自然型護岸の安定性については十分検討する必要があるが、現状では河岸に働く外力特性、多自然型護岸の破壊に対する抵抗力等について未知な点が多いため、今後、多自然型護岸を多くの川づくりに普及させてゆくためには、こういった護岸の安定性に関する水理学的な検討に基づいた設計の目安となる情報が切望される。

本研究はこの問題に関して、特に河道弯曲部に設置された空石積みの多自然型護岸を想定し、その合理的な設計指針の作成に資するデータを得ることを目的としたものであり、移動床水理模型実験と数値シミュレーションによって河道弯曲部における流れの水理特性と河床変動特性を明らかにするとともに、護岸の安全性評価に必要となる、護岸に作用する外力(流速)の評価手法を提示したものである。

2. 水理実験による検討¹⁾

本章ではまず、河床変動を伴った河道弯曲部の流れを模型実験により再現し、その水理特性を考察する。次に、種々の条件における実験結果を基に、空石積み護岸の安定条件を検討する。

(1) 実験の概要²⁾

90°単弯曲河道の模型水路(図-1)において、低水路河岸を護岸(法覆い工と根固工、図-2参照)により固定し、低水敷部は移動床として、低水路満杯流量を通水し、河床形状が概ね平衡状態に達した後に、河床形状、流速の測定を行った。模型は縮尺1/50程度を想定しており、弯曲部の上下流にそれぞれ5m、4mの直線区間を設けている。実験ケースを表-1に示す。

実験では、図-1のNo.-1からNo.11の代表的な断面で、横断方向に10cmピッチ(ただし法尻付近は5cmピッチ)、水深方向には、河床から5mm、10mm、20mm、以降20mm毎に測定可能な高さまで、流向、流速をタフトおよびプロペラ式流速計で測定した。また各断面の河床高、水位を、連続式砂面計、サー

(平面図)

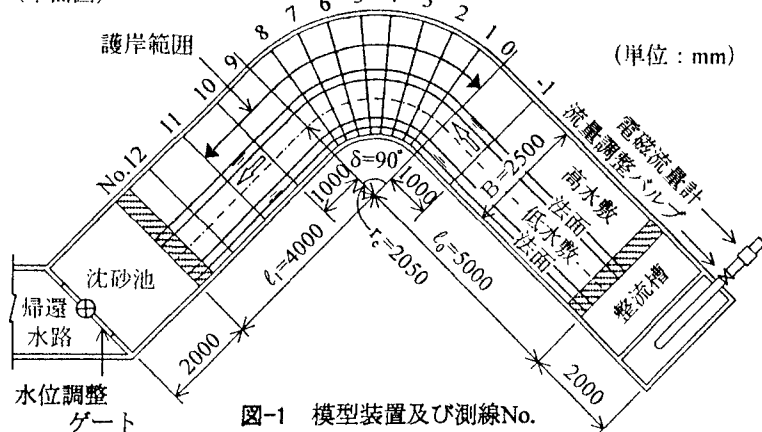


図-1 模型装置及び測線No.

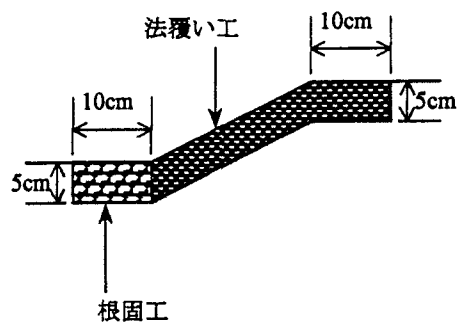


図-2 法面部付近横断形状

表-1 実験ケース

No.	河床勾配 (1/)	法面勾配	河幅*1 B(m)	曲率 半径 r(m)	r/B	河床 粒径 (mm)	法覆い工 粒径 (mm)	根固工 粒径 (mm)	流量*2 (ℓ/s)
ア	500	1:2	1.0	2.05	2.05	1.13	5.34	9.75	40.4
イ	500	1:2	1.0	5.00	5.00	0.70	2.86	5.34	40.4

*1 法面中央間距離 *2 低水路満杯流量

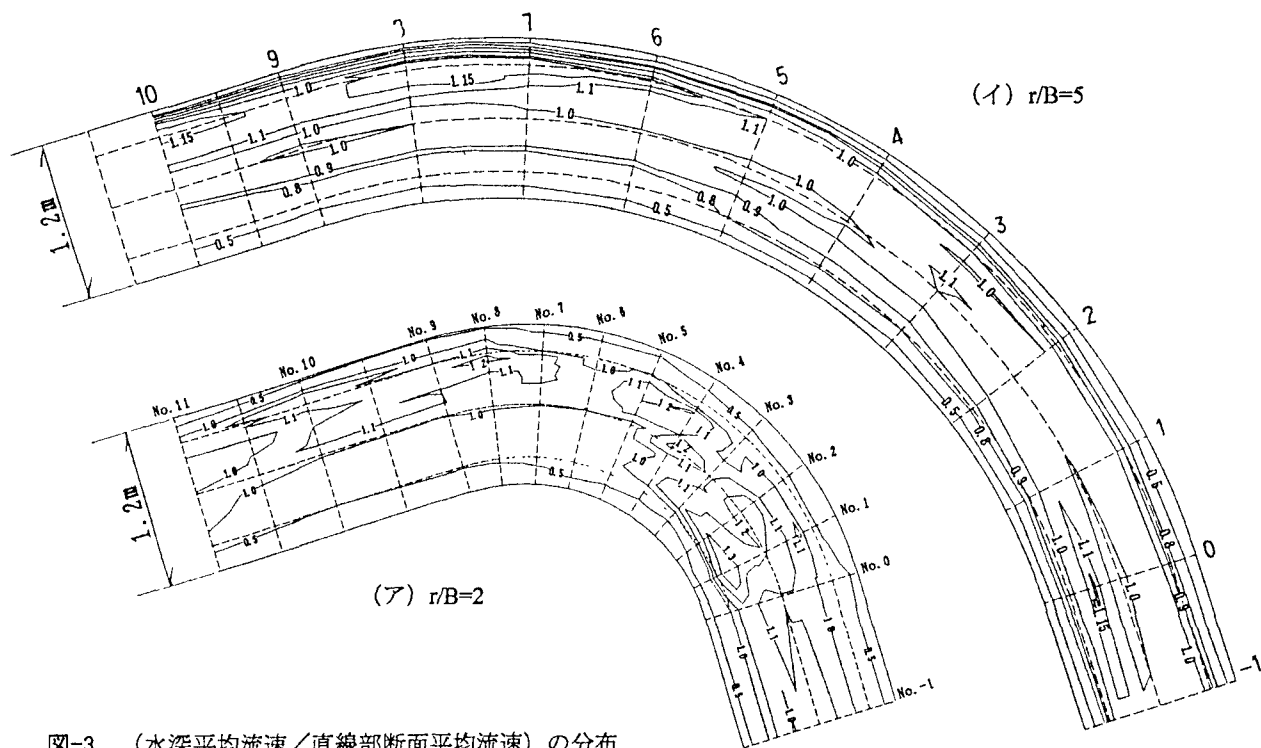


図-3 (水深平均流速/直線部断面平均流速)の分布

ボ式水位計により測定した。

(2) 弯曲部の水理特性

図-3は、それぞれの実験ケースで測定した水深平均流速の分布を、弯曲上流の直線部における断面平均流速に対する割合の値で整理したものである。r/Bの大きさに拘わらず、外岸側に流れが集中している様子が窺えるが、その集中する場所がr/Bによって変化し、r/B=2ではNo.8より下流、r/B=5ではNo.6より下流となっている。

河床変動量についても、r/B=5では外岸の深堀れの発生箇所がr/B=2に比べて上流に位置し、洗堀量

は小さいという結果を得ている。これらの特徴は、後述の2次元数値シミュレーションモデルを用いた再現計算¹⁾でも同様に認められている。水理実験とその再現計算の結果から総合的に考察すると、弯曲部の水理特性を以下のようにまとめられる。

- 最も深掘れが生じる断面はr/Bによって変化し、概ね上流直線部内岸の延長線が外岸に達する点のすぐ下流となる。
- 深掘れの程度は、r/Bが小さいほど大きくなる。
- 外岸で最も速い流速が発生する場所は、最大洗堀深が発生する断面より更に下流である。
- 外岸側岸部における最大流速の程度は、水理実験

表-2 空石積み護岸の安定性に関する実験の実験ケース及び実験結果

No.	河床勾配 (1/)	法面勾配	河幅*1 B(m)	曲率半径 r(m)	r/B	河床粒径 (mm)	法覆い工粒径 (mm)	根固工粒径 (mm)	流量*2 (ℓ/s)	実験結果
a	1000	1:2	1.00	2.05	2.05	1.13	—	—	38.9	●
b		1:5					—	—	35.5	●
c		—					—	—	40.4	●
d	500	1:2	1.00	2.05	2.05	1.13	5.34	9.75	40.4	○
e							5.34	—	40.4	○
f							2.86	5.34	40.4	●
g							2.86	—	40.4	●
h	500	1:3	1.00	2.05	2.05	1.13	2.86	—	40.0	●
i	500	1:5	1.00	2.05	2.05	1.13	—	—	38.2	●
j							5.34	9.75	38.2	○
k							2.86	—	38.2	●
l	300	1:2	1.00	2.05	2.05	1.13	2.86	5.34	51.0	●
m		1:3					5.34	—	50.0	○
n	200	1:2	1.00	2.05	2.05	1.13	2.86	5.34	60.0	●
o	500	1:2	1.00	1.00	1.00	0.70	2.86	5.34	40.4	●
p				5.00	5.00		2.86	—	40.4	●

*1 法面中央間距離 *2 低水路満杯流量

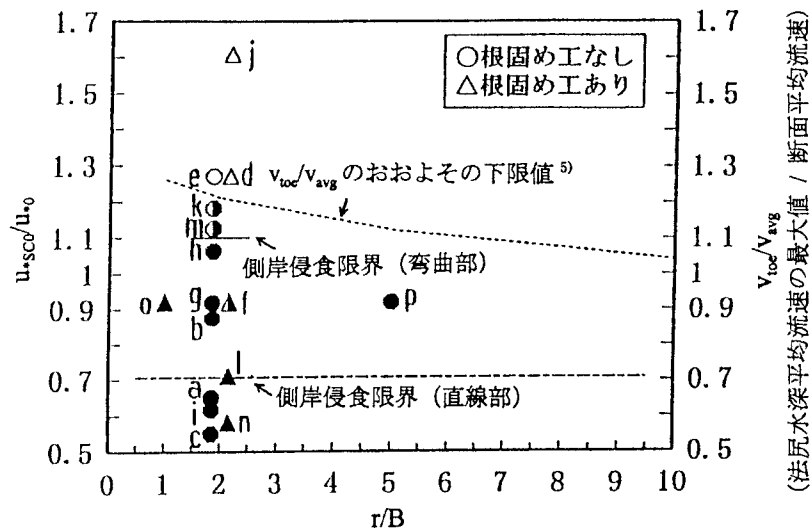


図-4 側岸侵食限界

の結果、 $r/B=2$ と $r/B=5$ であまり変化がなく、直線部断面平均流速の2割増し程度である。なお、再現計算においては、 r/B の増加に伴って側岸部最大流速が小さくなる傾向が認められた。

(3) 空石積み護岸の安定条件³⁾

上述の模型において、護岸が侵食を受ける可能性がある条件を設定し、定常流を3時間以上通水することにより、護岸の安定性を検討した。実験ケースは表-2に示す通りで、法面勾配、法覆い粒径等がパラメータとなっている。同表には実験結果を、側岸侵食が発生し危険とみなされる場合 (●)、殆ど侵食を受けない場合 (○)、侵食は受けるが河岸は保護されている場合 (●), に分類して記している。

図-4は、これらの結果を(直線河道側岸部斜面上のLaneの式による限界摩擦速度 u_{sc0} /直線部の断面平均摩擦速度 u_0)と r/B の平面上にプロットしたものである。直線河道側岸部における土砂の移動限界は、 $u_{sc0}/u_0 = \sqrt{\tau_{sc0}/\tau_{c0}} = \sqrt{0.5} \approx 0.7$ といわれているが⁴⁾、図-4で $u_{sc0}/u_0 > 0.7$ でも黒塗りの結果と

なっているのは、彎曲部における流れの集中や2次流の影響で、彎曲側岸部の u_* が直線河道側岸部のそれより大きくなっていることを示唆するものである。

また、 $r/B=2$ での安全・危険の境界が縦軸の1.1付近に現れていることは、図-3に示したように側岸侵食を受けやすいNo.9付近より下流の外岸側で直線部の断面平均流速の1~2割増し程度の流速が発生していることとおおよそ符合する。

このことと前述の彎曲部での水理特性を考え合わせると、側岸への外力は(外岸法尻における水深平均流速の最大値 v_{loc} /直線部の断面平均流速 v_{avg})の値で評価することができ、側岸侵食の発生領域は図-4の点線⁵⁾(目盛りは右側)で示した流速の現地実測データに基づく流れの集中度合いに対応する傾向をもつ境界線で表現できることが予想される。

またケースf、gにより根固工の効果を検討した結果、根固工を施したfの方が護岸の安定性が高いことが認められ、根固工が重要な役割を果たすことが確認された。

表-3 数値シミュレーション計算ケース

ケース名	水深 h(m)	水路幅 B(m)	h/B	τ_{*0}	曲率半径 r(m)	r/B	河床勾配	河床粒径 (cm)	粗度係数 n *1	流量 (m ³ /sec)	フルード 数 Fr
Case-1A	5	90	0.056	0.1	200	2.222	1/300	10.0	0.035	2,120	0.673
Case-1B							1/1000	3.0	0.030	1,350	0.429
Case-1C							1/5000	0.6	0.025	735	0.233
Case-2A					500	5.556	1/300	10.0	0.035	2,120	0.673
Case-2B							1/1000	3.0	0.030	1,350	0.429
Case-2C							1/5000	0.6	0.025	735	0.233
Case-3A					1000	11.111	1/300	10.0	0.035	2,120	0.673
Case-3B							1/1000	3.0	0.030	1,350	0.429
Case-3C							1/5000	0.6	0.025	735	0.233
Case-1A-細	5	90	0.056	0.2	200	2.222	1/300	5.0	0.035	2,120	0.673
Case-1B-細							1/1000	1.5	0.030	1,350	0.429
Case-1C-細							1/5000	0.3	0.025	735	0.233
Case-2A-細					500	5.556	1/300	5.0	0.035	2,120	0.673
Case-2B-細							1/1000	1.5	0.030	1,350	0.429
Case-2C-細							1/5000	0.3	0.025	735	0.233
Case-3A-細					1000	11.111	1/300	5.0	0.035	2,120	0.673
Case-3B-細							1/1000	1.5	0.030	1,350	0.429
Case-3C-細							1/5000	0.3	0.025	735	0.233
Case-1B-深	10	100	0.100	0.1	200	2.000	1/1000	6.0	0.030	4,580	0.463
Case-2B-深					500	5.000	1/1000	6.0	0.030	4,580	0.463
Case-3B-深					1000	10.000	1/1000	6.0	0.030	4,580	0.463
Case-1B-深細	10	100	0.100	0.2	200	2.000	1/1000	3.0	0.030	4,580	0.463
Case-2B-深細					500	5.000	1/1000	3.0	0.030	4,580	0.463
Case-3B-深細					1000	10.000	1/1000	3.0	0.030	4,580	0.463
Case-2B-法 *2	5	90	0.056	0.1	500	5.556	1/1000	3.0	0.030	1,310	0.416
Case-2B-根 *3	5	90	0.056	0.1	500	5.556	1/1000	3.0	0.030	1,340	0.425

*1 [Case-2B-法], [Case-2B-根]を除いて低水敷と法面に一樣の粗度を与える。

*2 [Case-2B-法]では, [Case-2B]の条件に対して, 法面の粗度を低水敷粗度の1.5倍とする。

*3 [Case-2B-根]では, [Case-2B]の法尻に幅5mの根固め工(侵食されない)を施し, その粗度を低水敷粗度の1.5倍とする。

3. 数値シミュレーションによる検討

前章の検討から, 弯曲部の側岸侵食に係わる外力の評価指標として v_{100}/v_{avg} の値を考慮することが有用であると考えられる。 v_{100}/v_{avg} の値に影響を及ぼすであろう因子として図-4のようにまず r/B が挙げられるが, それ以外にも検討すべきパラメータは存在する。すなわち, v_{100}/v_{avg} は河道の幾何学的形状, 流れの慣性力や抵抗特性等に支配されるものと考えられ, ここでは r/B の他に, 上流直線区間でのフルード数 Fr , 水深と川幅の比 h/B , 直線部無次元掃流力 τ_{*0} といった無次元量に着目し, v_{100}/v_{avg} との関係を数値シミュレーションにより調べる。

(1) 数値モデルの概要

河道流れ及び河床変動に関する数値シミュレーションについては, これまで多くの研究が行われてきた。それらの研究は流れ場の扱い方によって, 大きく2次元モデルと3次元モデルに分けられる。

河道流れを3次元モデルで計算する場合には, 清水⁶⁾が指摘したように境界条件のモデル化の難しさに加えて2次元モデルと比較して約 $10^2 \sim 10^3$ 倍の計算時間を必要とするため, 幅広い検討を行うには現時点においてまだ無理があると思われる。現時点で実用性の観点から見れば, 2次元モデルは, 3次元性の強い局所流れの表現には無理があるものの, 一般的な実河川の河床変動に関してはほぼ十分な精度の解析を行うことができると考えられる。

そこで, 今後の幅広い応用を想定し, 従来の著者

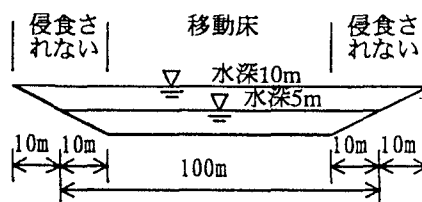


図-5 計算水路横断面図

らの研究成果^{7), 8)}を基に, 平面2次元浅水流モデルを用いた実用性・汎用性のある2次元河床変動シミュレーションモデルを構築した⁹⁾。

このモデルは, 任意の平面形状をもつ河道にも容易に応用できるよう, 直交曲線座標系を採用している。また, 掃流砂量の算定には, 縦・横断勾配の影響を考慮したモデルを用い, 2次流の底面流速についてはEngelundの発達した螺旋流による底面流速式で評価している。

空石積み護岸を施した河道において実施した複断面弯曲部の流れと河床変動に関する実験結果との比較により, モデルの妥当性が検証されている^{1), 9)}。

(2) 検討ケース及び計算条件

計算対象流路は模型実験水路と同様の形態であるが, 現地スケールを想定しており, 川幅 B は100m程度とする。また, 弯曲上下流部に設ける直線区間は上流下流とも長さ500mとしている。計算メッシュの格子幅は, 横断方向5m×縦断方向10m程度である。初期の水路横断面形状は図-5のようであり, 法面は侵食されないものとして計算を行う。河道諸元(特に

凡例		Fr		
h/B	τ_{*0}	0.6~0.7	0.4~0.5	0.2~0.3
0.056	0.10	△	◇	○
	0.20	▲	◆	●
0.100	0.10	—	□	—
	0.20	—	■	—

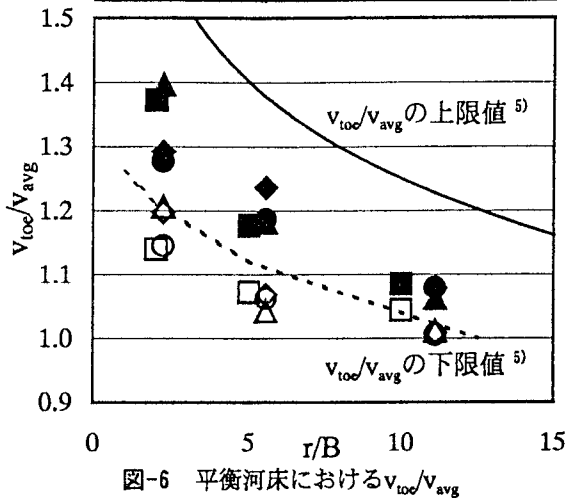


図-6 平衡河床における v_{toc}/v_{avg}

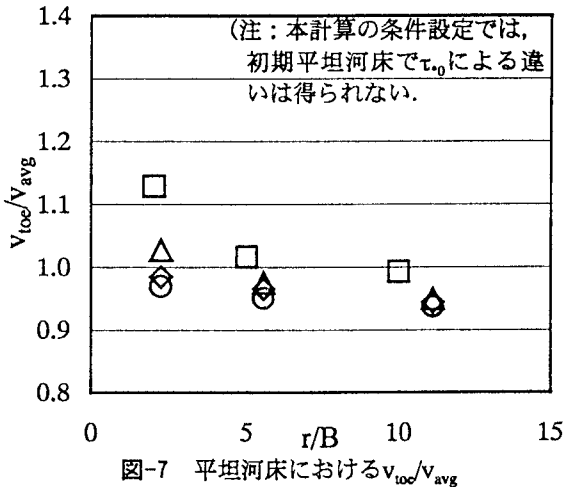


図-7 平坦河床における v_{toc}/v_{avg}

無次元量)は、わが国において多自然型川づくりが適用されると考えられる河道条件の範囲を想定して設定した。計算ケースの一覧を表-3に示す。

なお、Case-2B-法は、空石積み護岸の粒径の効果として、法面粗度の影響を評価するために行う。Case-2B-根は根固工の影響を評価するために行う。

(3) 計算結果及びその考察

図-6は、河床が概ね平衡状態に達した時点での v_{toc}/v_{avg} と r/B の関係を、 h/B 、 τ_{*0} 、 Fr をパラメータとして示したものである。また、河床変動の進行状況に応じた流れ場の変化を見るため、図-7では初期の平坦河床上における流れの計算結果を同様の図式で示している。ただしCase-2B-法、Case-2B-根については、Case-2Bと比較して、表-4に v_{toc}/v_{avg} の値を示している。以下、数値計算の結果に基づいて v_{toc}/v_{avg} に対する各パラメータの影響について考察する。

a) 河床形状による影響

図-6, 7より、全般的に、 v_{toc}/v_{avg} は初期平坦河床

表-4 [Case-2B-法], [Case-2B-根]における v_{toc}/v_{avg}

	Case-2B	Case-2B-法	Case-2B-根
平衡河床での v_{toc}/v_{avg}	1.068	0.945	0.885
平坦河床での v_{toc}/v_{avg}	0.965	0.865	0.853

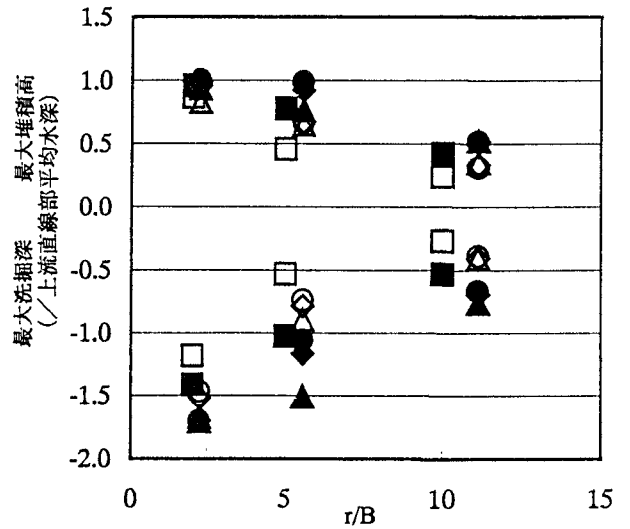


図-8 最大洗掘深と最大堆積高

時よりも平衡河床時の方が大きくなり、砂州の発達や外岸の河床洗掘に伴って流れの外岸への集中度が増す傾向にあることが分かる。

そこで、流れの集中度合いと河床変動の関係を明らかにするため、図-6に対応して図-8に各ケースの初期河床からの河床変動量を整理した。図-8では、最大堆積高と最大洗掘深の値を上流直線部の平均水深に対する割合で表している。

v_{toc}/v_{avg} と同様、河床変動の程度は r/B が小さいほど大きい。また、 τ_{*0} が大きいほど河床変動の程度が大きい傾向も見られる。一般的に、河床変動の程度が大きいと外岸での流速も大きくなると言える。

b) r/B の違いによる影響

r/B が小さいほど v_{toc}/v_{avg} が大きいという傾向は既往の研究成果⁵⁾と一致するが、定量的には全般に文献⁵⁾より小さな値となっている。これは v_{toc} の定義の違いによるものと考えられる。すなわち、本研究では前述のように v_{toc} を外岸法尻線上の水深平均流速の最大値としているのに対し、文献⁵⁾では根固工上の水深平均流速の最大値としている。よって、後者の v_{toc} の定義の範囲は若干広く、河岸の安定性評価に関する外力としてはやや過大評価になると考えられ、その意味で図-6に示す実線と点線の限界値は安全側の目安として評価できる。

c) フルード数 Fr の違いによる影響

r/B が小さいときは Fr による違いがある程度見られるが、 r/B が大きくなると Fr による違いは認められなくなる。

これは、外岸への流れの集中が河床形状に支配されるのに対して、図-8からも推測されるように、 Fr による河床形状への影響があまり顕著でないこ

とによると考えられる。このことから、 v_{100}/v_{avg} の評価にはFrに着目するよりも、むしろ河床粒径との関係で、後述する τ_{*0} 等に着目することが大切と思われる。ただし、 r/B が小さい場合にはFrにも着目するべきであると思われる。

d) h/B の違いによる影響

同じ τ_{*0} 、Frで比較すると、平坦河床では h/B が大きいほど v_{100}/v_{avg} が大きいという特徴が見られる。しかし、平衡河床では h/B による違いは明瞭でなく、少なくともここでの検討範囲ではあまり支配的な要因ではないと考えられる。

e) 無次元掃流力 τ_{*0} の違いによる影響

τ_{*0} が大きい方が、 v_{100}/v_{avg} が大きいという傾向が明確に見られる。

これは、前述したように、 τ_{*0} が大きいと河床変動の程度も大きいという傾向によるものと思われる。 τ_{*0} の違い（粒径の違い）によって河床変動の程度が異なるのは2次流の働きの大きさが影響していると考えられ、2次流の見積もりを適切に行うことが重要であることが確認された。

f) 法面と低水路河床の抵抗係数の差異の影響

法面の粗度を低水路の粗度の1.5倍とすることにより（Case-2B-法）、 v_{100}/v_{avg} の値は小さくなり、平衡河床でみると、外岸流速が1割程度小さくなる。この結果は粗度による影響のおよその目安として有用である。

g) 根固めの有無の違いによる影響

法尻に根固工を置くことにより（Case-2B-根）、洗掘が若干抑制され、法面に流速低減の効果が現れ、 v_{100}/v_{avg} の値の低下がみられる。

水理実験では根固工の設置により護岸の安定性が増すことが確認された。この原因の一つとして、上述のような流速低減効果が挙げられる。

以上より、河道弯曲部外岸に作用する外力は図-4や図-6のような平面上で推定できると考えられる。その際、 r/B の他に、ここで検討した水理パラメータの影響を考慮して、各地点ごとの外力評価を行うことが重要であることが明らかとなった。

今回の検討の結果、 v_{100}/v_{avg} は弯曲部の平面形状と河床形状の影響を強く受けることが明らかとなり、外岸にかかる外力評価は最終的には弯曲部での洗掘や堆積の度合いを予測することにつながる。平面形状は r/B で代表され、また、河床形状に大きな影響を及ぼすパラメータは r/B と τ_{*0} である。したがって、この2つのパラメータに着目することの重要性が明らかとなった。

4. 結論

本研究の主な結論をまとめると次のようである。

- 弯曲部の側岸侵食に係わる外力の評価指標として、 v_{100}/v_{avg} の値を考慮することが有用である。
- v_{100}/v_{avg} の値に影響を与える主な因子として r/B と τ_{*0}

が挙げられ、これらは外岸にかかる外力評価の重要なパラメータとなる。

・ r/B が小さいほど v_{100}/v_{avg} が大きくなる。

・ τ_{*0} が大きいほど v_{100}/v_{avg} が大きくなる。

- 全般的に、弯曲部での堆積・侵食の程度が大きいケースにおいて、 v_{100}/v_{avg} も大きくなる。
- 法面や法尻根固工部の抵抗係数を大きくすることにより、 v_{100}/v_{avg} の値を抑制することができる。

5. おわりに

弯曲部流れの水理特性を検討し、護岸の安定に影響を及ぼす外岸部の洗掘や、外岸部で発生する外力としての最大流速の推定方法について知見を得るとともに、空石積み護岸を設計する場合の法面勾配、使用する粒径等の設定方法について、現時点で得られている情報を提示した。

今後は様々な河道形状に対して汎用的に適用するための検討を行ってゆきたい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、貴重なご意見をいただいた立命館大学江頭進治教授、ならびに実験に協力いただいた（株）ニュージェック水理実験所の諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 大槻英樹、芦田和男、劉 炳義、大本雄二：河道弯曲部における多自然型護岸の設計、第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、pp. 67-74, 1997.
- 2) 芦田和男、大槻英樹、大本雄二：多自然型護岸の実験的研究、河川環境総合研究所報告、第2号、pp. 87-105, 1996.
- 3) 大槻英樹、芦田和男、大本雄二、中川哲志：河道弯曲部における多自然型護岸に関する実験的研究、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、II、pp. 642-643, 1997.
- 4) 芦田和男、江頭進治、加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究（2）、京都大学防災研究所年報、第26号、B-2、pp. 353-361, 1983.
- 5) Colin R. Thorne, et al.: Prediction of Near-Bank Velocity and Scour Depth in Meander Bends Design of Riprap Revetment, *River Coastal and Shoreline Protection*, 1995.
- 6) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究、北海道大学審査学位論文、pp. 1-197, 1991.
- 7) 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、pp. 41-62, 1992.
- 8) 劉 炳義：複断面河道における流砂と河床変動に関する研究、京都大学学位論文、1991.
- 9) 芦田和男、大槻英樹、劉 炳義、大本雄二、藤田 暁：複断面湾曲部の流速分布と河床変動数値シミュレーション、河川環境総合研究所報告、第2号、pp. 107-127, 1996.

(1997. 9. 30受付)