

河道弯曲部における多自然型護岸の設計

Design of Rich-in-Nature Type of Revetments in a Curved Alluvial Channel

大槻英樹¹・芦田和男²・劉 炳義³・大本雄二⁴

Hideki OTSUKI, Kazuo ASHIDA, Bingyi LIU and Yuji OHMOTO

1. はじめに

空石積み護岸を設計する場合、法面勾配、使用する礫の粒径、護岸範囲、敷設厚さ等を決める必要があるが、現状ではこれらを判断するための資料がなく、現場の技術者が経験的、試行的に決めていることが多い。そこで本研究は、多自然型護岸のうち空石積み護岸の防災機能、安全性を検討し、設計指針を策定するための基礎資料を提示することを目的としたもので、緩傾斜河岸を有する90°単弯曲河道を対象にした移動床水理実験並びに二次元河床変動計算による研究を進めている。本研究では、弯曲部流れの水理特性、特に外力評価のための外岸部での発生流速について、実験、計算の両面から検討を行うとともに、実験においては法面勾配、曲率半径、法覆い粒径、根固めの有無等をパラメータに護岸の安定性、側岸侵食の状況を調べることにより、外力と護岸の安定性の関係を把握することに努めている。現時点で設計に資することのできる成果がいくつか得られており、本稿ではそれらについて報告する。

2. 河床変動を伴った弯曲部流れの水理特性

2. 1 実験の概要¹⁾

90°単弯曲河道の側岸部を法覆い工、法止め工により固定し、低水敷部を移動床として低水路満杯流量を通路して、河床形状が概ね平衡状態に達した後に、河床形状、流速の測定を行い、低水路法面に作用する外力等の評価を試みた。実験に用いた模型装置を図-1に示す。模型は縮尺1/50程度を想定しており、90°の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。実験条件、実験ケースを表-1に示す。(図-2参照)

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、40mm、以下20mm毎に測定可能な高さまで、流向、流速を測定した。流向は流速計(φ=5mmのプロペラ式)の先端にくくりつけたタフトによって測り、流速はその流向での流速値を測定した。また各断面の河床高、水位を、連続式砂面計、サーボ式水位計により測定した。

表-1 実験ケース

No.	河床 勾配 (1/)	法面 勾配	川幅 ^{*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)	法止め の有無	流量 ^{*2} (ℓ/s)
ア	500	1:2	1.0	2.05	2.05	1.13	5.34	9.75	有	40.4
イ	500	1:2	1.0	5.00	5.00	0.70	2.86	5.34	有	40.4

* 1 法面中央間距離

* 2 低水路満杯流量

キーワード：多自然型護岸、側岸侵食、河道弯曲部、移動床水理実験、二次元河床変動計算

1 河川環境管理財団 河川環境総合研究所 大阪研究所 主任研究員(〒540 大阪市中央区大手前1-6-4)

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

3 (株) ニュージェック 河川・海岸部 河川室 課長代理(〒542 大阪市中央区島之内1-20-19)

4 (株) ニュージェック 河川・海岸部 水理実験所(〒611 宇治市槇島槇尾山1-2)

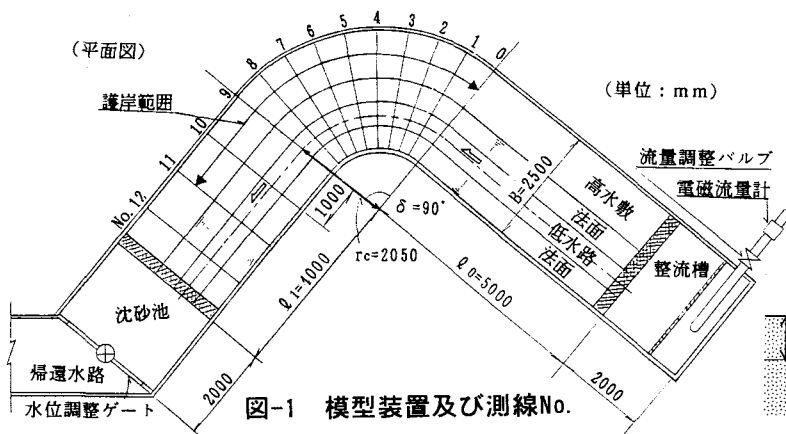


図-1 模型装置及び測線No.

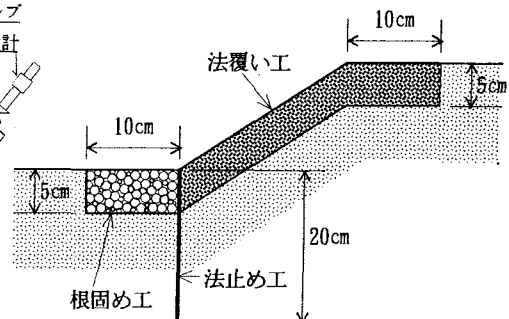


図-2 法面部付近横断形状

2. 2 二次元河床変動計算の概要^{2), 3), 4)}

ここで用いたシミュレーションモデルは、直交曲線座標系を採用し、流れ場を二次元浅水流モデルで解き、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ている。また混合砂を扱うため、河床粒度分布の計算には交換層の概念に遷移層と堆積層を考慮した多層モデルを導入している。

なおここで扱う計算結果は、実験と同様に初期河床から計算し平衡状態となったときのものである。

2. 3 曲率半径 r / 川幅 B の変化と弯曲部水理特性

図-3は、 $r/B = 2, 5$ のそれぞれについて、実験における直線部断面平均流速に対する水深平均流速の割合を平面分布として整理したものである。 r/B 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。一方、図-4は、図-3に対応する計算値である。発生する流速の最大値は実験値よりも計算値のほうが大きくなっているが、弯曲部終端付近及びその下流において外岸へ流れが集中するという傾向は実験と同様である。

図-5, 6は、図-3, 4に対応する河床変動量である。実験では、 $r/B = 2$ に比べて $r/B = 5$ では外岸の深掘れが発生する位置が上流に移行するとともに洗掘量が小さくなっている。計算では、 $r/B = 2$ での実験結果の再現性が十分ではないが、 $r/B = 5$ では外岸の洗掘位置、深掘れの程度等がよく再現されている。

図-7は、最大洗掘深、(外岸側岸部水深平均流速の最大値 $V_{smax}/No. -1$ の断面平均流速 V_0)、(内外岸水位差 Δh /水面幅 B)の縦断変化を整理したものである(いずれも実験値)。同図には、 r/B の変化による水理特性の差異をみるために非平衡状態ではあるけれども $r/B = 1$ (表-2のNo. 0)の結果も合わせて示している。これより、弯曲部の水理特性を以下のように説明することができる。

- 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流れが外岸に達する点のすぐ下流となる。
- 深掘れの程度は、図-7において $r/B = 1$ の実験結果が平衡状態に達していないときの値であることも考慮すると、 r/B が小さいほど大きくなると考えることができる。
- 外岸で最も速い流速が発生するのは、深掘れする断面の更の下流である。
- 最大流速の程度は、 $r/B = 2, 5$ ではあまり変化がなく、断面平均流速の2割り増し程度である。 $r/B = 1$ では1断面の結果であるが、 $r/B = 2, 5$ よりも大きな値となっている。
- 横断水面勾配は、概ね最大洗掘深の縦断変化の傾向と合致し、深掘れする断面で大きな水面勾配がつく。これは2次流の発達程度に呼応していると考えられる。

図-8は、 r/B と V_{smax}/V_0 の関係を調べたものである。計算値は、実験値よりやや大きめの V_{smax}/V_0 の値を示すとともに、実験値は $r/B = 2$ と5でほぼ同じ値となっている。これらの要因として、法覆い工、根固工の存在による側岸部の流速低減効果が考えられる。

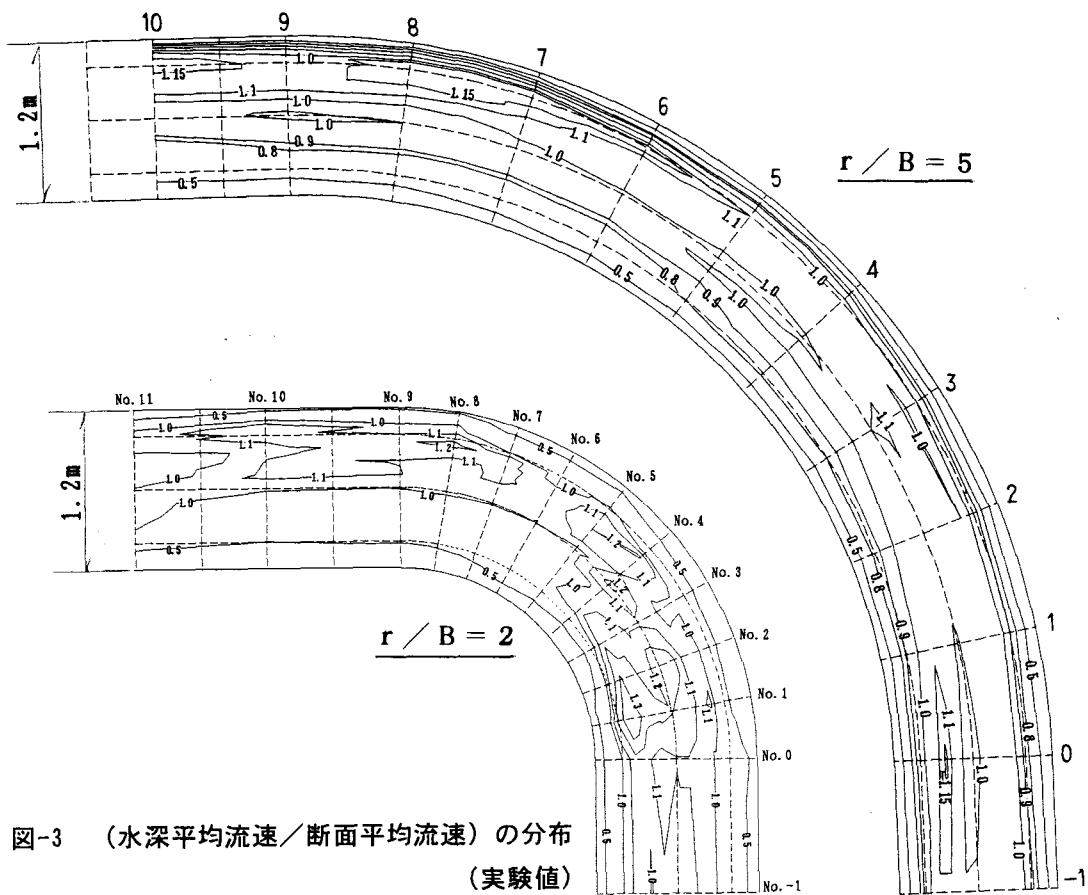


図-3 (水深平均流速／断面平均流速) の分布
(実験値)

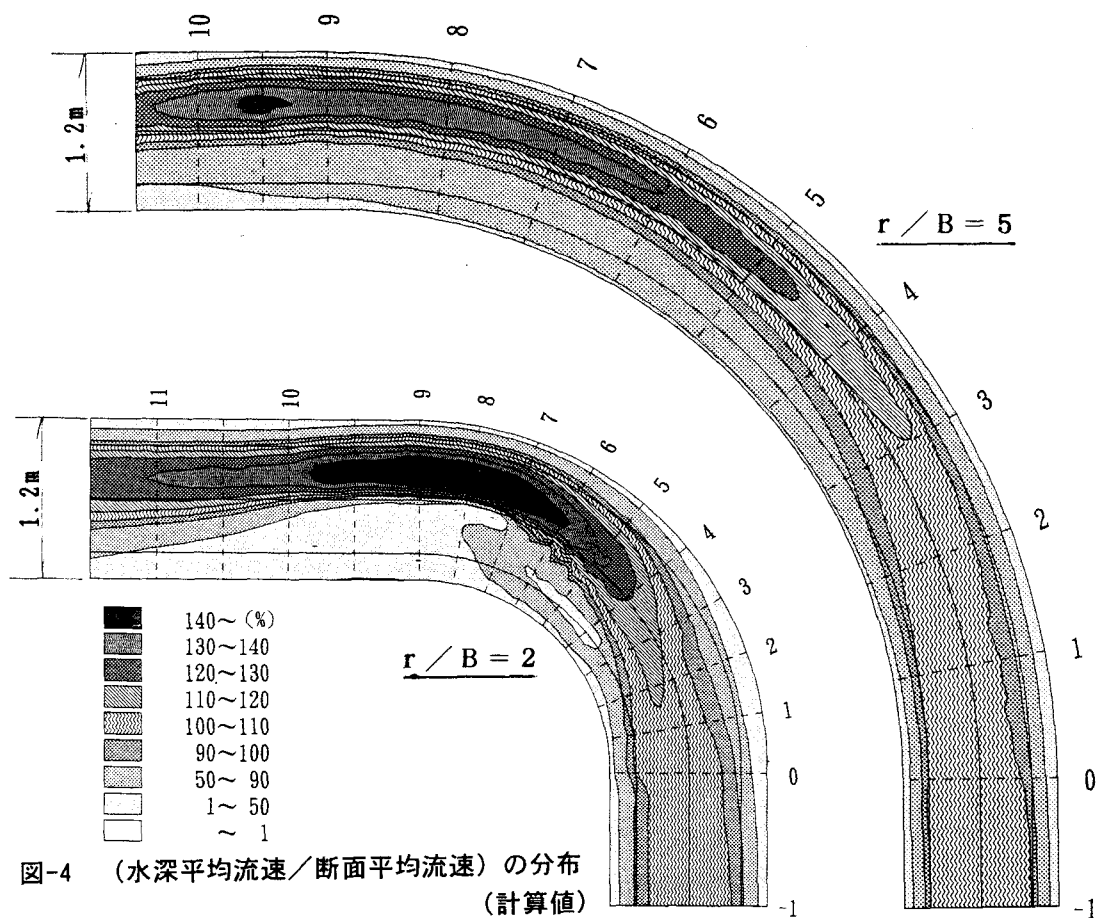


図-4 (水深平均流速／断面平均流速) の分布
(計算値)

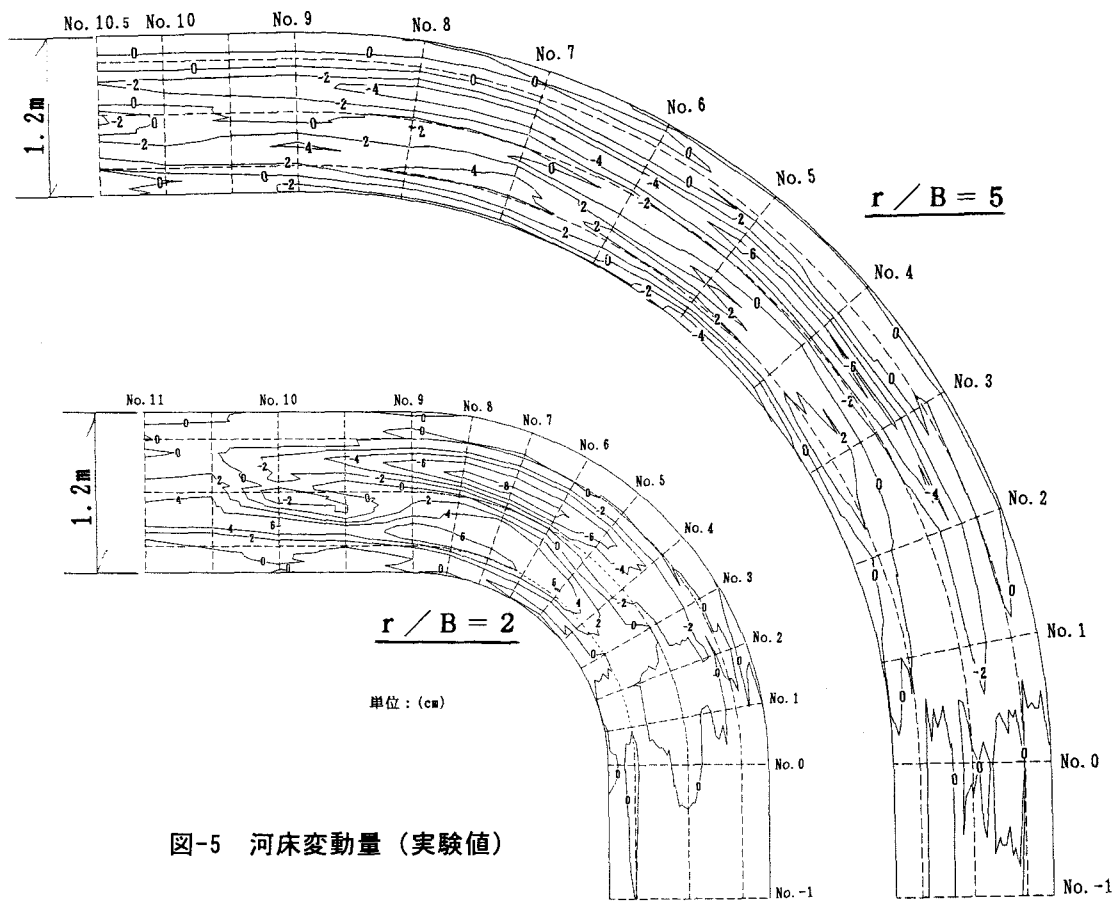


図-5 河床変動量 (実験値)

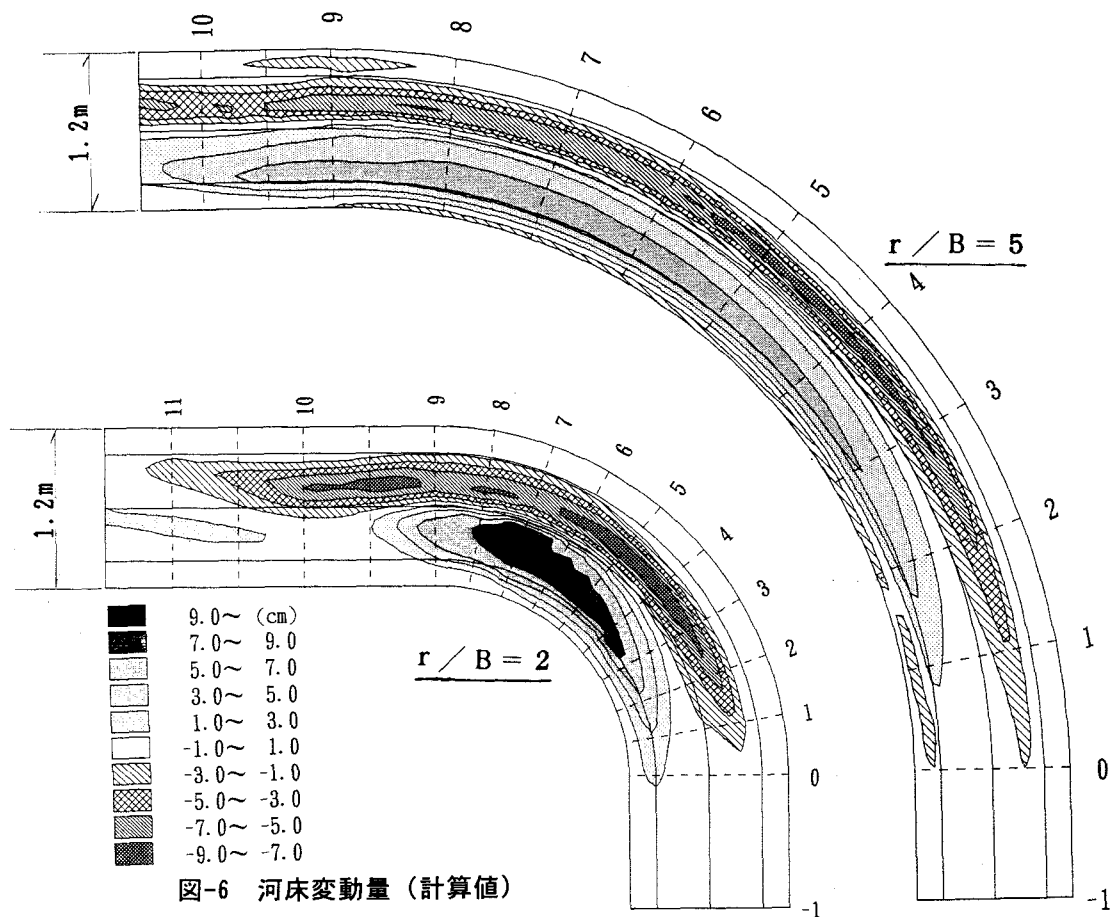


図-6 河床変動量 (計算値)

すなわち、 $r/B=2$ の実験は $r/B=5$ の実験に比べて法覆い工、根固工とも2倍程度の粒径になっているため、粗度の影響により、側岸部周辺の流速は $r/B=5$ の実験よりも小さくなる傾向にあり、仮に $r/B=5$ の実験を $r/B=2$ と同じ法覆い工、根固工粒径の実験としていたら、 V_{smax}/V_o の値は図-8に示すものより小さくなる可能性がある。また計算では一様のマニング粗度 ($n=0.0225$) を与えているため、法覆い工、根固工による側岸部の流速低減効果が再現されていないと考えられる。なお同図には現地の実測データによる (法尻水深平均流速 $V_{1.0e}$ / 断面平均流速 V_{avg}) の値⁷⁾ も合わせて示しているが、概ね今回得られた成果と合致したものとなる。

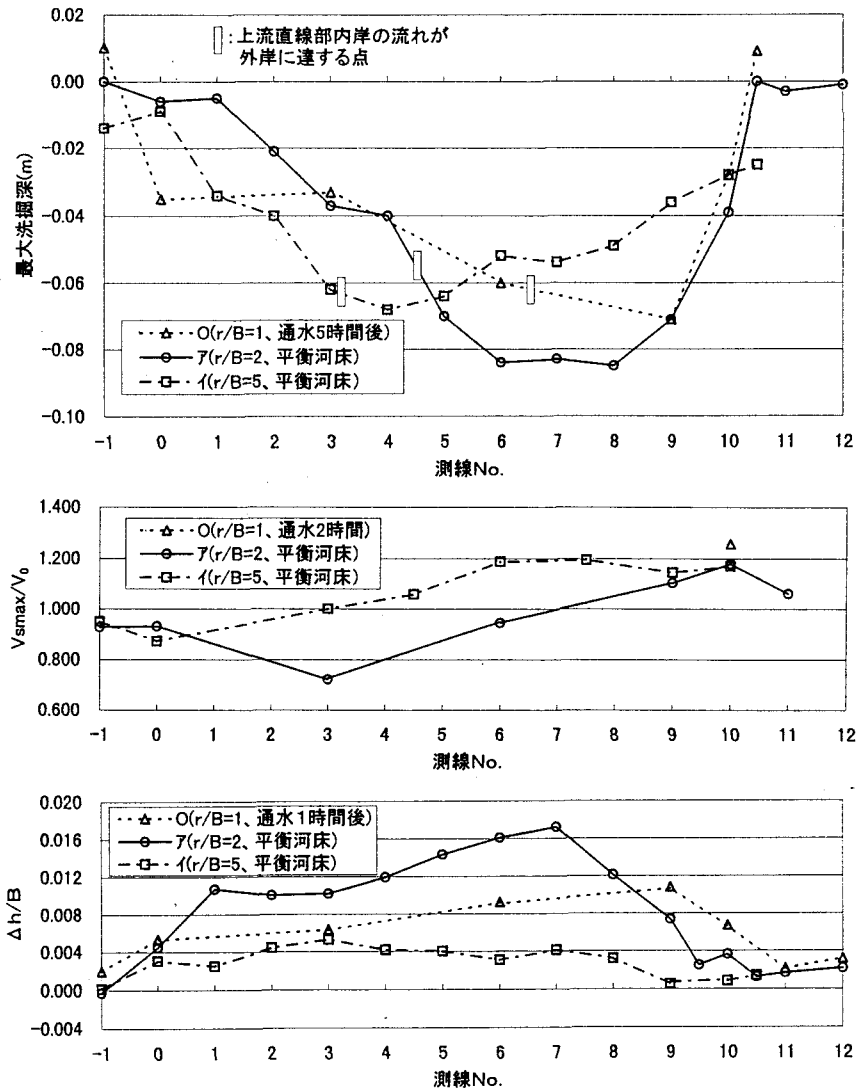


図-7 水理量の縦断変化

3. 空石積み護岸の安定性と法覆い工設計指針⁵⁾

2. 2で用いた模型において、側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 (●) と、ほとんど侵食を受けない場合 (○) と、侵食は受けるが河岸は保護されている場合 (◐) とに分類して記している。

図-9は、これらの結果を (直線部斜面上のLaneの式による限界摩擦速度 u_{*sco} / 直線部の断面平均摩擦速度 u_{*o}) 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、 $u_{*sco}/u_{*o} = \sqrt{0.5} \approx 0.7$ で現われる⁶⁾ とされ、 $u_{*sco}/u_{*o} > 0.7$ でも黒塗りの結果となっているのは、弯曲部における流れの集中や2次流の影響で、弯曲側岸部の 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。

また図-3, 4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には直線部の断面平均流速の1~2割り増し程度の流速が発生する。これは, 図-9の $r/B=2$ 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とおおよそ符合する。このことと前述の弯曲部での流速特性を考え合わせると, 側岸侵食の発生領域が図-9の点線⁷⁾(目盛りは右軸)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のほう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。

4. 護岸範囲

2.での議論のように r/B の変化により, 深掘れの生じる場所, 側岸侵食を受けやすい場所が変化する。したがって合理的な設計とするためにはそれらも考慮した設計とすべきで, 例えば $r/B=2$ の場合, 最も深掘れが起こるのはNo. 6, No. 7付近で, 最も侵食を受けやすいのが更にその下流であることから, その付近を重点的に保護するのがよいと考えられる。そこでケースfに対してNo. 0~No. 6までの法覆い工, 根固工を除去した状態で護岸の安定性に関する実験を行ってみた。その結果, 護岸を除去した部分は若干侵食を受けるものの護岸を施した部分は安定していることが認められた。またその後No. 6~No. 9の護岸を除去し, 通水を続けると護岸を施したNo. 9~No. 11の法面部が大きく侵食を受けた。

これらの結果より, $r/B=2$ の条件下ではNo. 4ないしNo. 5より下流側を保護しておけば護岸部分の安定性は保たれることが確かめられ, 2.での弯曲部の水理特性を考慮すれば r/B が変化した場合でも護岸の上流端は, 上流直線部の内側法尻の流れが外岸法尻に達する付近とするのが河岸の大規模な被災を防ぐひとつの目安となると考えられる。ただし, これは弯曲区間上流部での側岸侵食を防止するものではなく, 全区間にわたって侵食を防止するためには側岸部材料と掃流力の関係を評価して護岸範囲を設定すべきである。また護岸の下流端は, 弯曲の影響による流れの集中が消失するところとするのが適切であると考えられるが, 実験では弯曲下流の直線区間内では外岸への流れの集中が存在しているため, 明確には把握できておらず, 今後数値シミュレーション等で検討していく必要がある。

5. 法覆い工厚さ

実験での法覆い工厚さは5cmで, 縮尺1/50とすると実物で2.5mとなり, かなり安全側の設定となっている。そこで法覆い工厚さを小さくした場合の法覆い工の安定性について実験的に検討した。設定した条件は, ケースeに対して, 法覆い工厚さのみを1.5cmとしたものである(ただしケースeの河床材料は平均粒径1.13mmで, 今回は0.7mmである)。実験の結果, 1.5cmの場合でも外岸法面部は安定していることが明らかとなった。

すなわち, 図-9において十分に安定な粒径の法覆い工としておけば, 法覆い工厚さを粒径の2~3倍(2~3層)としても安定した河岸となることを示している。また混合粒径をも対象とした法覆い工敷設厚さと安定度についてStephen T. Maynard⁸⁾は,

- a) 敷設厚さの最小許容値は $1 D_{100}$ (D_{100} : 100%粒径, 以下同様の意)で, $D_{85}/D_{15} \leq 2$ に関してのみ $1.5 D_{50}$ 。
- b) $1.5 D_{50}$ と $1 D_{100}$ の大きい方より大きい厚さで敷設したとき安定度が増す。
- c) 単一粒径の捨て石を敷設する場合, 大きな厚さで置くと, 必要最小厚さに比較して安定度が増す。
- d) 粒度分布をもった捨て石を大きな厚さで置くと, 最小厚さに比較して安定度がはるかに増す。

ことを報告しており, 今回の実験結果は, a), b), c)の内容と同様の結果が得られたものと判断できる。

表-2 実験ケース及び実験結果

No.	河床 勾配 (1%)	法面 勾配	川幅 ^{*1} B (m)	曲率 半径 r(m)	r/B	河床 粒径 (mm)	法覆 工粒径 (mm)	根固工 粒径 (mm)	法止め の有無	流量 ^{*2} (ℓ/s)	実験 結果
a	1000	1:2	1.0	2.05	2.05	1.13	—	—	無	40.4	●
b		1:5					—	—		38.9	●
c							—	—		35.5	●
d							5.34	9.75		40.4	○
e	500	1:2	1.0	2.05	2.05	1.13	5.34	—	無	40.4	○
f							2.86	5.34		40.4	●
g							2.86	—		40.4	●
h		1:3					2.86	—		40.4	●
i	500		1.0	2.05	2.05	1.13	—	—	無	40.0	●
j		1:5					5.34	9.75		38.2	○
k							2.86	—		38.2	●
l		1:2					2.86	5.34		51.0	●
m	300	1:3	1.0	2.05	2.05	1.13	5.34	—	無	50.0	●
n		1:2					2.86	5.34		60.0	●
o	200		1.0	1.0	1.00	0.70	2.86	5.34	無	40.4	●
p		1:2		5.0	5.00		2.86	—		40.4	●

* 1 法面中央間距離

* 2 低水路満杯流量

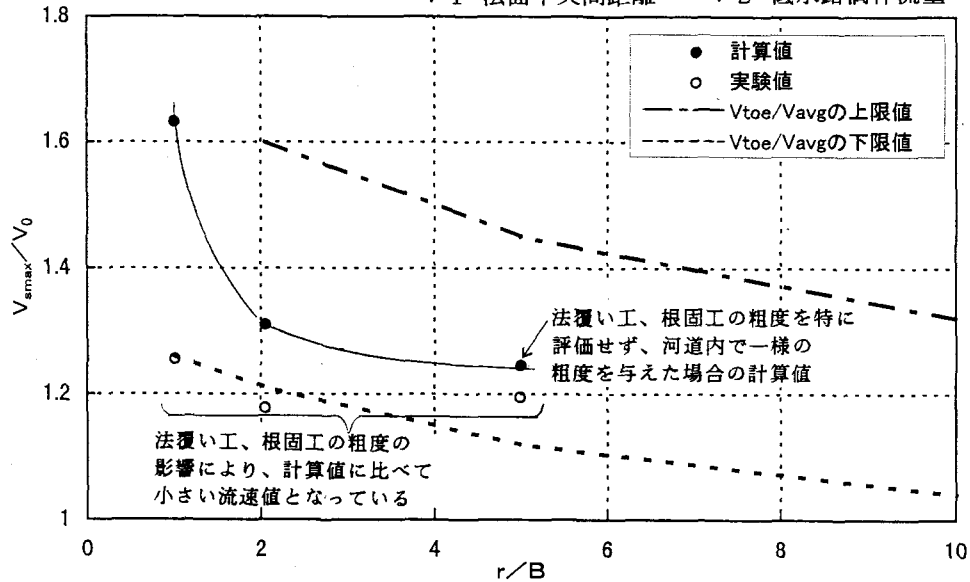


図-8 r/B と V_{max}/V_0 の関係

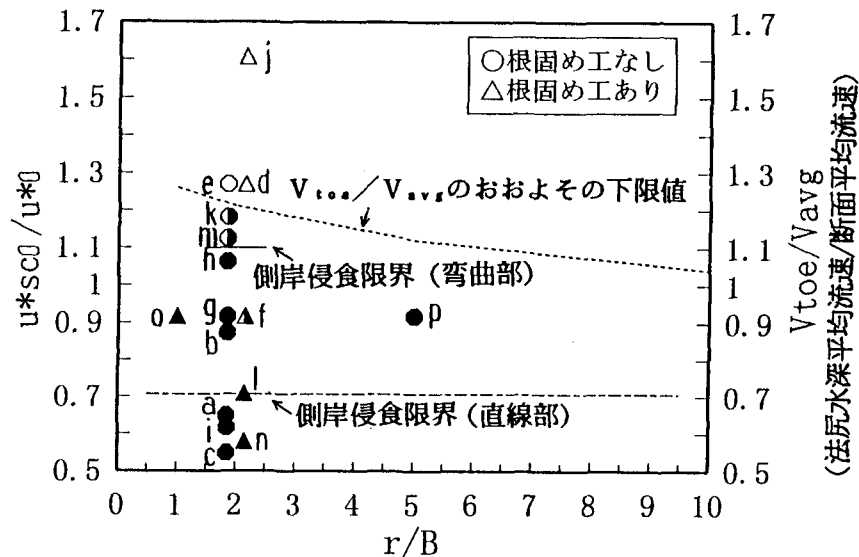


図-9 側岸侵食限界

6. 結論

本研究から得られた主要な結論を列挙すると、以下のようである。

(1) 弯曲部流れの水利特性

- ①弯曲部外岸で発生する流速の最大値は概ね r/B の増大に伴って小さくなる傾向にあると考えられる。その最大値の直線部の断面の平均流速に対する割り増しの程度は $r/B = 2 \sim 5$ の範囲で2～3割り増しとなる。
- ②最大洗掘深が発生する場所、最も流れが集中する場所（側岸侵食が発生しやすい場所）は、河道の平面形状（ r/B ）によって変化する。深掘れの発生する場所は、上流直線部の内岸の流れが外岸に達する位置よりやや下流で、最も流れが集中するのは更にその下流である。換言すれば、 r/B が大きいほど現象全体が上流に、 r/B が小さいほど現象全体が下流に移行する。
- ③深掘れの程度も r/B によって変化し、 r/B が小さいほど洗掘深が大きくなる傾向がある。

(2) r/B を考慮した空石積み護岸の安定性

- ①空石積み護岸の側岸侵食限界粒径は、 r/B によって変化し、概ね r/B が小さいほうがその粒径は大きくなる傾向にあることが窺える。
- ②最終的には河道弯曲部における側岸侵食限界粒径は、断面平均流速に対する側岸部流速の増加割合のようなもので表現できると考えられる。この増加割合は r/B 等の河道形状や流れの慣性力及び流れの抵抗特性に支配されると考えられ、今後検討が必要である。

(3) 護岸範囲、法覆い工厚さ

- ①護岸の大規模な被災を防ぐために目安となる護岸範囲は、弯曲により流れが外岸に集中する範囲であり、護岸の上流端は上流直線部の内岸の流れが外岸に達する付近として決めることができる。
- ②合理的な法覆い工厚さは、十分に安定な粒径であれば2～3層としておけばよい。

7. 終わりに

今後更に研究を進め、成果の一般化を図っていきたい。最後に本研究を実施するにあたり、貴重な御助言を頂いた立命館大学 江頭進治教授、京都大学 防災研究所 戸田圭一助教授、ならびに解析、実験に協力頂いた(株)ニュージェック 河川・海岸部、同水利実験所の諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 1996
- 2) 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, 1996
- 3) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義; 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第35巻, 1991
- 4) 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
- 5) 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, 第52回土木学会年次学術講演会, 1997 (投稿中)
- 6) 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, 1983
- 7) 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
- 8) Stephen T. Maynard; River Coastal and Shoreline Protection Corps Riprap Design Guidance for Channel Protection, River Coastal and Shoreline protection, 1995