

千曲川における河岸防御工法に関する検討（その2）

Studies on River Bank Protection Work Procedures at Chikuma River (Part II)

研究第四部 主任研究員 竹内 義幸
 研究第四部 部長 小川 鶴蔵
 企画調査部 副参事 竹内 わこ
 (株)東京建設コンサルタント 川島 幹雄
 (株)東京建設コンサルタント 野村 秀之

『護岸の力学設計法、(財)国土技術研究センター、1999年』の発行によって、ようやく力学的合理性を持った護岸の設計体系に転換する道筋が見えてきた。しかし、この設計法を具体的に適用するとき、対象河川の様々な蓄積データから有効な情報を的確に読みとり、現場の要求性能に適した合理的な設計を進めていくかが、設計者の判断に委ねられており、設計の現場で新たな混乱をもたらしている。

本検討は、急流河川の千曲川をモデルとして、河岸防御工の設計を進めるとき、同書の適用範囲を見定め、それを補完する河道特性、過去の施工実績、水理模型実験等のデータの活用方策を明らかにすることを目的としている。

その結果、『護岸の力学設計法』を対象河川に適用させる手法が、以下の結果により明らかとなった。

- ①河床材料調査、既存土質調査等の河道特性データを精査することで、護岸の力学的安定性の照査に用いる設計流速や最深河床高等の設計条件を適正に設定するための調査・検討方法を提案できた。
- ②また、千曲川の河岸防御工法（根固工及び水制工）について、簡易な水理模型実験を実施し、現場の施工条件を反映した力学的安定性を検証できた。

キーワード：護岸の力学的設計法、河道特性データの精査、簡易な水理模型実験

With the publication of “Dynamic Designing Procedure for Revetments, National Technological Research Center Foundation, Inc., 1999,” at last the way to making a transition to a dynamically rational design system for revetments is now in sight. However, when using this design procedure in actual concrete applications, the issues of deriving useful and effective information for the many and varied data accumulated over the years on the subject rivers in a precise manner, and how best to move ahead with rational design work that matches the performance capabilities called for at actual work sites, are entrusted to the judgement of the people engaged in the design work, and this in turn is bringing about new confusion in the design arenas.

This study paper uses the Chikuma River in Nagano Prefecture northwest of Tokyo, a river noted for its rapids, as its model, and has as its objective the identifying of the range of application of the aforementioned document in advancing the design work for the river bank protection work, and making clear ways and means to put to use data such as the characteristics of the river, past field-proven results, and hydraulic model experiments that would complement the contents of the document.

As a result, the procedure for applying the “Dynamic Designing Procedure for Revetments” to the subject rivers was ascertained through the results given below.

- (1) It was possible to propose procedures for surveys and studies for the purpose of establishing in an appropriate manner design conditions for aspects such as design flow velocities and maximum river bed heights that are used for collation of the dynamic stability properties of revetments by conducting detailed studies of data on river channel characteristics such as existing soil survey.
- (2) It was also possible to verify the dynamic stability reflecting the work conditions at the work site by implementing simple hydraulic model experiments with respect to the river bank protection work procedures (foot protection work, groin work) of the Chikuma River.

Keywords: Dynamic Design Procedures for Revetments, Detailed Studies of River Channel Characteristics Data, Simple Hydraulic Model Experiments

1. はじめに

護岸に関わる技術は、これまで経験（実績主義）的な技術判断と対処の積み重ねにより発展してきた。

さらに多自然型川づくりや建設コスト削減の流れの中で、より経済的で、設置する場に要求される機能に適した合理的な設計法の確立が強く求められてきた。

『護岸の力学設計法』¹⁾が発行され、護岸もようやく力学的合理性を持った設計体系に転換する道筋が見えてきた。しかし、その一方で、力学的安定性の照査に用いる設計流速や最深河床高等の設計条件、限られた実験等による諸係数を設定する際、個別の現場条件の違いを各技術者が理解し、設計にどう適用させていくかが重要なテーマとなっている。

本検討は、急流河川の千曲川をモデルとして、河岸防衛工の設計を進めるとき、『護岸の力学設計法』¹⁾の適用範囲を見定め、それを補完する河道特性、過去の施工実績、水理模型実験等のデータをどのように有効活用できるのかを研究することにある。

なお、本研究を進めるにあたっては、(財)河川環境管理財団 山本 晃一研究総括職を委員長として、学識経験者、行政委員で構成される『千曲川平成11年度洪水の河岸被災原因と復旧手法評価検討会』を設置し、検討を実施した。

2. 本年度の検討課題

本稿では、昨年度の検討²⁾で課題となった次の2項目についての検討結果について述べる。

- (1) 河道特性データの精査による設計条件の設定方法
- (2) 簡易な水理模型実験による力学的安定性の検討

3. 河道特性データの精査による設計条件の設定方法

3-1 河床材料調査の精査と粗度係数、代表流速の設定

表-1 河床材料の比較(セグメント1:90km付近)

調査方法	ふるい分け試験	線格子法
最大粒径 (mm)	150	204
代表粒径 d_R (mm)	76	150
流速係数 ϕ	11.5	10.0
H_d (m)	4.23	
既存研究成果による粗度係数 n	0.035	0.041

*) ふるい分け試験は、表層の150mm以上の礫を除外した値

(1) 代表流速の算定方法

護岸の力学的安定性の照査に用いる代表流速を設定する際、設計対象区間の河道状況に応じ、粗度係数を適正に評価する必要がある。粗度係数の評価法¹⁾には、a)既往出水時の痕跡水位データに基づき準2次元不等流計算により逆算する方法と、b)既往研究成果を反映させた推定法がある。

このうち既往研究成果による推定法とは、河床材料(代表粒径 d_R)、無次元掃流力 (τ)、設計水深 (H_d) および河床形態から求められる流速係数 ϕ より、粗度係数 n を(1)式より推定するものである。

$$n = H_d^{1/6} / (\sqrt{g} \cdot \phi) \quad (1)$$

前式の流速係数 ϕ は、各セグメントごとに $\tau \cdot H_d/d_R$ の関係から推定することができる。この際、河床材料調査による代表粒径 d_R の妥当性を検証し、適正な粗度係数、代表流速を設定することが重要である。

(2) 礫河床の表層河床材料のサンプリングの適用³⁾

礫河床では通常大粒径のものから成り、表層の礫が除外された通常のふるい分け試験が適用できない場合が多い。また河床の粒度分布も通常深さ方向に異なり、とくにダム等上流からの土砂供給の減少により、表層河床材料がアーミングし、表層の粒径が大きくなる。

平成11年度の現地調査の結果、千曲川上流の扇状地(セグメント1)区間で、表層河床材料のアーミングの進行が顕著に見られ、通常のふるい分け試験では代表粒径および粗度係数が小さめの評価となり、礫河床の表層河床材料を的確に把握する必要があった。

山本³⁾は、アーマコートの粒度特性を把握する礫河床のサンプリング方法として“線格子法”を提案しており、本検討では通常のふるい分け試験とあわせて、線格子法による河床材料調査を実施した。調査の結果、線格子法による代表粒径は、ふるい分け試験の約2倍、粗度係数の推定値で約1.2倍となり、礫河床での適正な粗度係数を設定することができた(表-1参照)

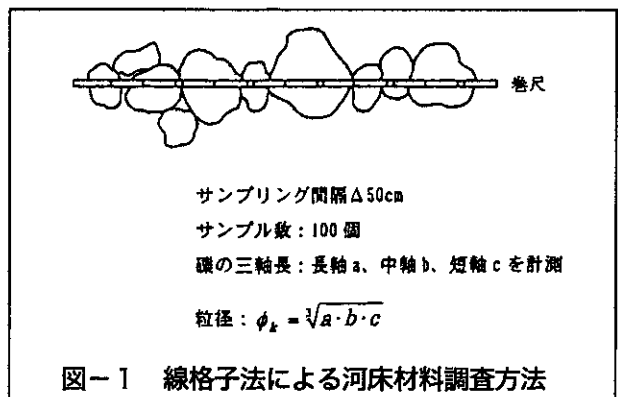


図-1 線格子法による河床材料調査方法

3-2 特異点（区間）の最深河床高の設定方法

最深河床高は、護岸の安定を確保する法覆工基礎高及び根固工の敷設幅を決定する重要な設計条件となる。

最深河床高の設定は、経年的な河床変動データと水衝部河岸の変動特性から一次設定できるが、本検討では図-2に示す特異点の評価も含めた最深河床高の設定フローを提案した。

(1) 露岩箇所の把握

沖積河川の河床に特有現象として、沖積粘土層、洪積層、基石が露出し、河床低下を抑制することがあるので、縦断的な河床の土質状況を把握する必要がある。

本検討では、千曲川沿川での既存土質調査(72箇所)の活用し、地質推定縦断図(図-3参照)を作成し、コントロールポイントとなる露岩箇所を把握した。

(2) 低水路狭窄部の上流区間の評価高

河道平面形状により、みお筋が左右に振れる特性を有する低水路狭窄部の上流区間では、下流の低水路狭窄部がコントロールポイントとなる。本検討では、過去に生じた洗掘深の最大値を当該区間の平均河床高の最深値から差し引いた値を評価高とした。

なお河床縦横断測量結果は、大洪水時の最深河床高を捉えていない可能性があるが、現状では現地の洪水中の河床変動実態は把握されていない。本検討では、この不確実な洗掘深に対しては、根固工で対処、あるいは変形を許容する構造形式、補修修繕で対応する方針とした。

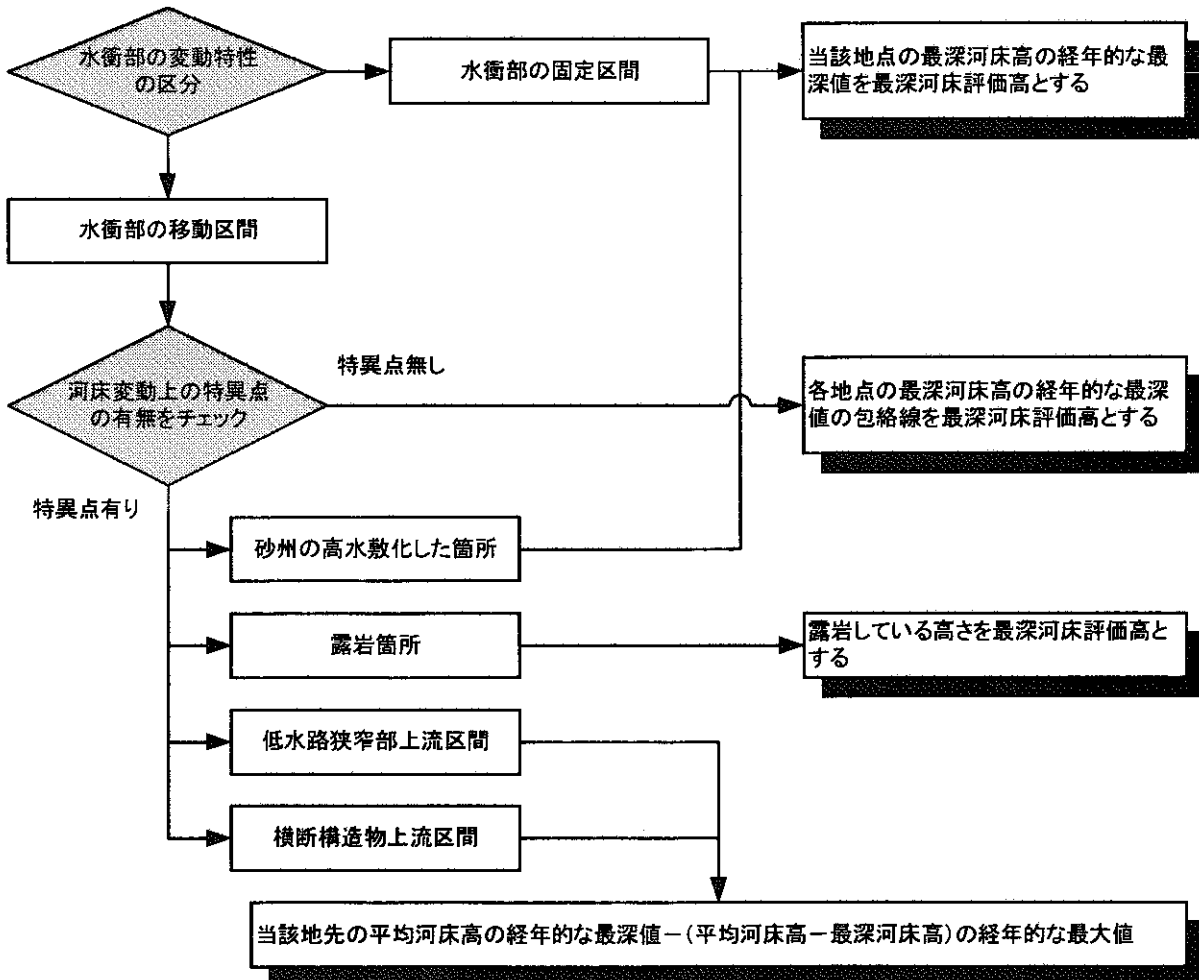


図-2 最深河床高の設定フロー

地質凡例

地質時代	地層名	地層記号	色区分	地質成分
第四紀	沖積地層	A(r)d	砂・砂・粘土	砂・砂・粘土
	扇状地層	A(fa)g1	砂	砂
	扇状地層	A(fa)g2	砂	砂
	扇状地層	D(fa)g	砂	砂
第三紀	礫層	D(Ya)Sl	シルト層	シルト層
	礫層	D(Ya)An	安山岩	安山岩
	礫層	D(Ya)Tb	凝灰角礫岩	凝灰角礫岩
第三紀	小川層	K(J)g	礫・凝灰角礫岩	礫・凝灰角礫岩
	青木層	K(A)g	砂・凝灰岩	砂・凝灰岩
	割所層	K(Be)g	砂	砂
紀	復入層	I(m)Pa	砂	砂

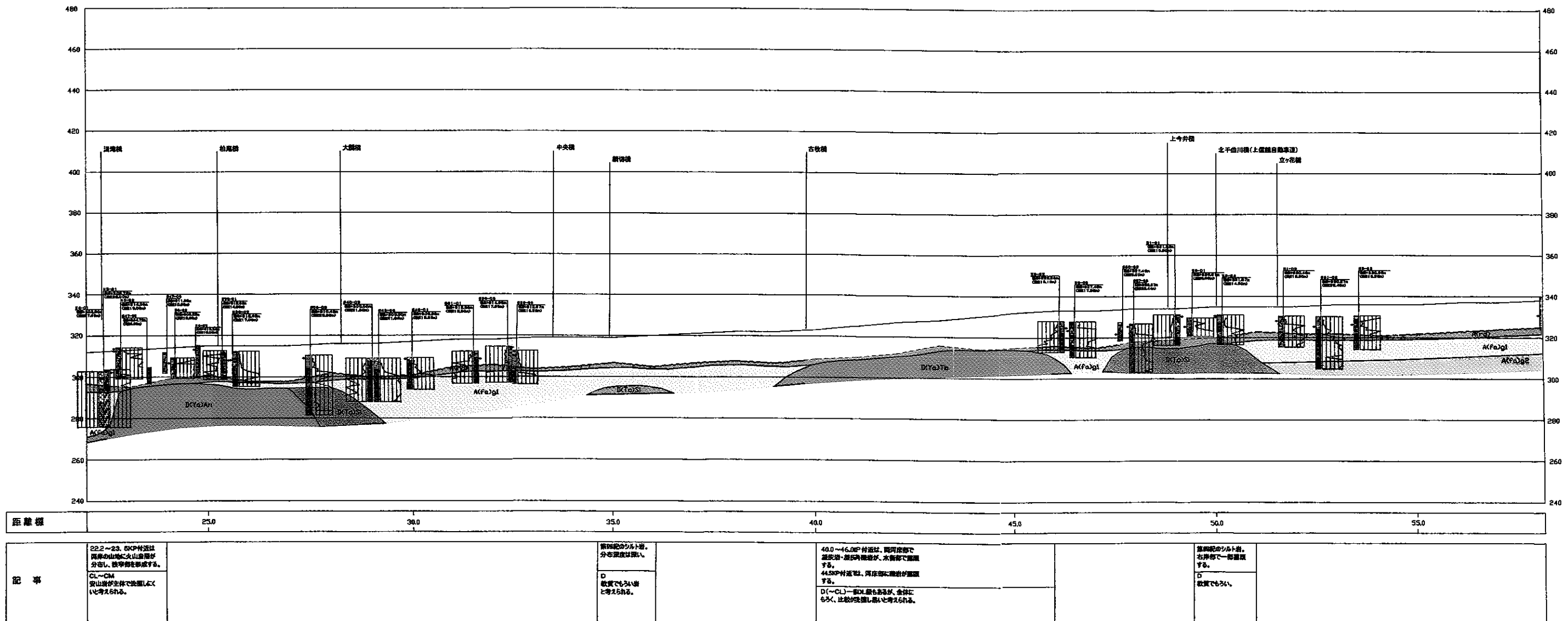
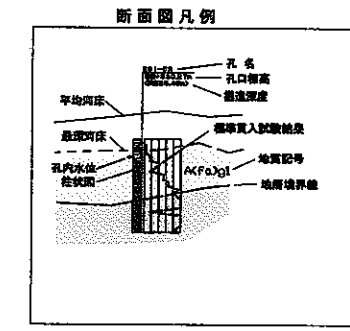


図-3 千曲川の地質推定縦断面図 (22km～55km付近抜粋)

4. 簡易な水理模型実験による力学的安定性の諸係数の設定

4-1 根固工の安定性の検討

(1) 検討の目的

昭和30年代以降、急流河川の千曲川の河岸防御工法は、主として法覆工に根固工を併用する工法が実施されてきた。とくに洪水時の洗掘に対しては、異形ブロック等の根固工により護岸の安定性が確保されてきたものと判断される。

根固工の安定性の検討は、『護岸の力学設計法』¹⁾では、既存工種、過去の被災事例から根固工構造を5モデルに分類し、流体力に対する安定性の照査法が示されている。ただし、この根固工の構造モデルの検討に必要な諸係数が単体、群体の限られた実験データであり、現場で適用するブロックの形状、ブロック相互のかみ合せや連結の効果を構造モデルの諸係数に反映されていない場合が多い。

これらの効果に対する評価は、設置箇所の水理特性に合わせた水理模型実験を行うことにより判断可能である。

そこで本検討では、簡易な部分模型による水理模型実験を行い、現場のブロック形状、施工条件（かみ合せ、連結）の違いによる効果を明確化することとした。

(2) 実験条件・実験ケース

本検討では、千曲川での実績をもとに表-2に示す2タイプ(構造)のブロックを対象として、かみ合せ、連結の効果を反映した力学的安定性の諸係数 a 、 β (表-3、注釈2参照)を検証する実験を試みた。

- ① 実験水路：長さ20m、幅1mの2次元水路、固定床
- ② 模型縮尺：3 t タイプ $\left\{ \begin{array}{l} 1/21 \text{ (対称突起型)} \\ 1/30 \text{ (平面型)} \end{array} \right.$

(3) 実験結果と考察

今回実施した水理模型実験の結果から、根固めブロックの現場での施工条件について以下にとりまとめる。

- ①簡易な水理模型実験による裏付けを通して、現場の施工条件（かみ合せや連結）の効果を評価することができた。
- ②さらに、部分模型の採用により、水理模型実験は高いという既成の概念を払拭し、比較的安価な費用でできることを確認した。
- ③ただし、表-3及び図-4で整理した水理模型実験の値は、今回実施した千曲川の水理条件、河道条件を対象として評価したものであり、個別の河川への適用においては、今回実施したような簡易な水理模型実験を実施して、力学的安定性を確認する必要がある。

表-2 実験ケース

ブロックの状態	A：対称突起型	B：平面型	実験水路の流れ ^{*)}	
			方法1	方法2
a) 単体	●	●	●	—
b) 群体 (連結無)	● (乱積み)	● (層積み)	●	●
c) 群体 (周囲のみ連結)	—	● (層積み)	—	●

*) 方法1：通常の開水路の流れ、方法2：連結の有無によるブロックの移動限界流速を確認するための射出流の状態

表-3 『護岸の力学設計法』¹⁾と本検討での水理模型実験による諸係数 $a \cdot \beta$ 及び移動限界流速

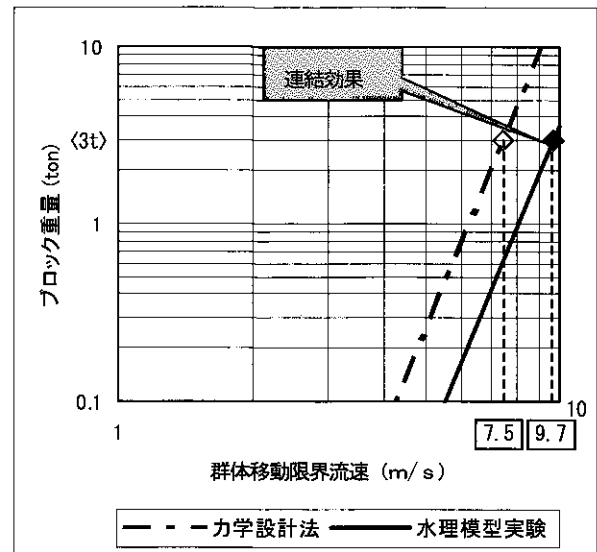
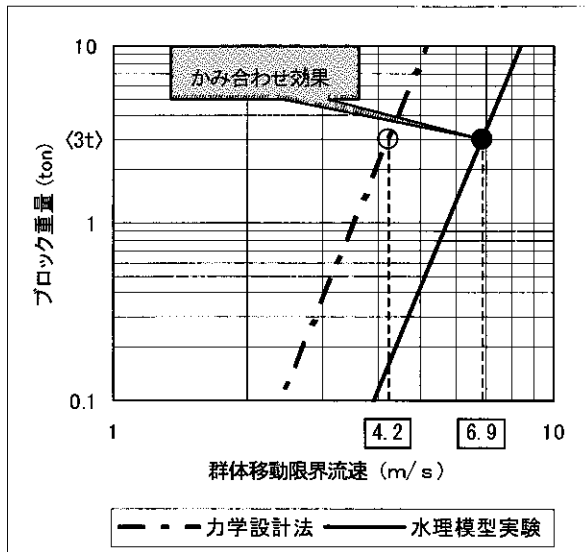
ブロックの形状 (構造)	模型ブロックの比重 (ρ_b/ρ_w)	a	β	単体移動限界流速 3t タイプ (m/s)	群体移動限界流速 3t タイプ (m/s)
A：対称突起型 (乱積み)	2.22	1.20	1.20	3.5	4.2
	2.30	1.70	2.02	3.5	6.9
B：平面型 (層積み)	2.03	0.54	2.00	3.8	7.5
	2.22	1.90	2.99	3.2	9.7

注釈1) 上段：『護岸の力学設計法』、下段：本検討での水理模型実験結果

注釈2) 異形ブロックの必要重量は、形状によって決まる抗力係数、揚力係数に相当する a 、群体配置したブロックの移動限界流速から測定された割り引き係数 β を用いて、(2)式の力学的安定性の照査式¹⁾により算定できる。

$$\omega > a \left(\frac{\rho_w}{\rho_b - \rho_w} \right)^3 \cdot \frac{\rho_b}{g^2} \cdot \left(\frac{V_d}{\beta} \right)^6 \quad (2)$$

ここに、 ω ：コンクリートブロック重量(t)、 ρ_w ：水の密度、 $102 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 、 ρ_b ：ブロックの密度(表-3参照)、 V_d ：設計流速 (m/s)、 $V_d \div$ 代表流速 V_0



(a) タイプA:対称突起型 (乱積み・かみ合わせ効果)

(b) タイプB:平面型 (層積み・連結効果)

図-4 現場の施工条件を反映したブロック必要重量

4-2 巨石水制工の安定性の検討

(1) 検討の目的

千曲川上流部及び支川犀川上流のセグメント1区間では、最近の災害復旧工法のなかで、巨石を用いた根固め水制が施工されてきた(写真-1参照)。しかし各現場への適用にあたっては、実績主義的判断から、その形状諸元が決められてきたが、力学的な安定性の検討は実施されていないのが現状であった。

本検討では、根固め水制の形状諸元のうち、巨石の移動限界流速及び水制工周りの洗掘に対して、根固工設置の有効性とその設置範囲を明確にする水理模型実験を実施した。

(2) 実験条件・実験ケース

水制工の水理模型実験の主な条件・ケースを示す。

- ① 実験水路:長さ20m、幅1mの2次元水路、移動床
 - ② 模型縮尺:1/70
 - ③ 実験ケース:根固工(木工沈床)の有無の2ケース
- なお図-5には、水理実験で対象とした水制工の基本形状、配置間隔等は、現地の施工実績をもとにその平均的な値を採用した。



写真-1 巨石水制工の施工実績(犀川73.5km 右岸)

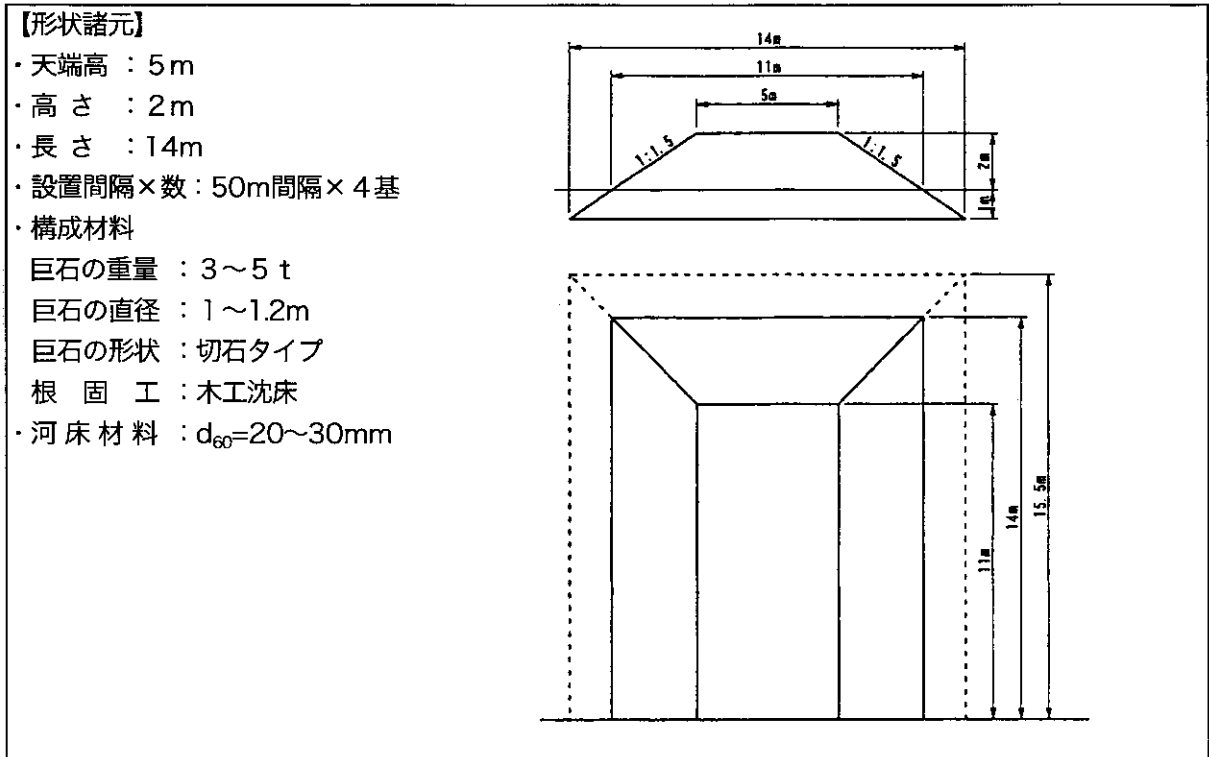


図-5 水制工の基本形状

(3) 実験結果と考察

水理模型実験の結果から、巨石による根固め水制の力学的安定性について以下にとりまとめる。

- ① 巨石の重量は、洪水時に想定される流速に対して安定するよう設計する必要がある。巨石の移動限界流速は、根固工の有無には無関係で、3.7m/sの流速で移動開始することが確認できた。これを上回る現場では、巨石が変形しない工夫として、石材の連結、深目地のコンクリート間詰め等の構造による対応が必要である。
- ② これまでの実績主義的な判断に加え、水制工形状から局所洗掘の範囲を見極め、効果的な根固工の設置範囲を検証する必要があった。根固工を敷設しない

場合の洗掘範囲から、根固工の設置範囲は、水制工高H（天端）に対して、上流・先端は2H、下流はHの範囲で安定性に問題ないことが確認できた。

- ③ 根固工の設置により、法先周辺の巨石崩壊により水制工が半壊となる流速（水制法先部変形流速）は、3.7m/s から7.8m/s となり、根固工を設置することによる有効性は検証できた。許容される変形内で安定性を確保するという設計方針もある。

変形流速	変形状況		
移動限界流速			水制天端内での変形
水制法先部変形流速			水制法先部が洗掘されることにより変形

図-6 水制工の変形過程模式図

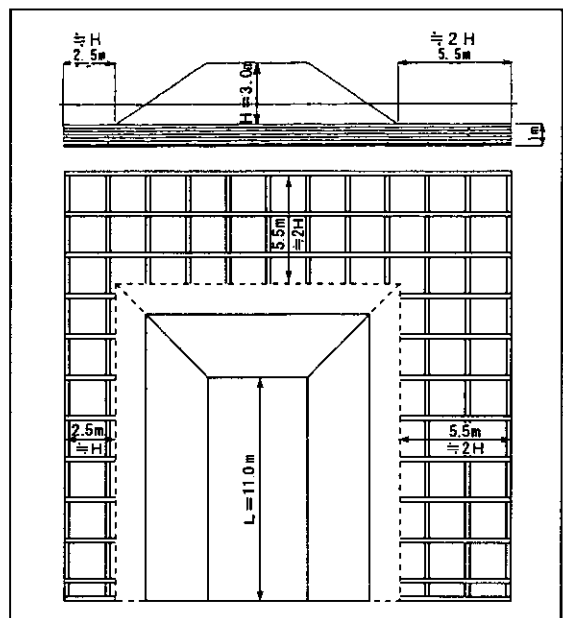


図-7 水理実験による根固工の必要範囲

5. 現時点での技術的評価と今後の課題

(1) 現時点での技術的評価

本検討で明らかになったことは以下のとおりである。

①河道特性データの精査による設計条件の設定方法

河床材料調査の再評価、既存土質調査データの河道特性データを精査することで、護岸の力学的安定性の照査に用いる設計流速や最深河床高等の設計条件を適正に設定するための調査・検討方法を提案できた。

②簡易な水理模型実験による力学的安定性の検討

根固工及び水制工について、簡易な水理模型実験を実施することにより、現場の施工条件を反映した力学的安定性を検証できた。設計手順の中に水理実験を積極的に取り入れていくことの重要性が再確認できた。

(2) 今後の方向性

① モニタリング調査

本検討では、平成11年度洪水による被災箇所のうち、2箇所をケーススタディとし、『護岸の力学設計法』¹⁾とそれを補完する河道特性、簡易な水理模型実験、既存施設の検証等により、護岸の設計条件及び施設諸元を検討した。また洪水中也含めた河床変動を観測するための砂面計⁵⁾(図-8参照)もあわせて設置している。施工後のモニタリング調査により、『護岸の力学設計法』¹⁾への技術判断にフィードバックしていくことが重要である。

② 河道計画と護岸設計

本検討では、河道特性を把握・分析するため、河床勾配、河床材料が同じ河道では、洪水時の掃流力や低水路路幅・深さ等が類似した特徴を持つ“セグメント分類法”^{1) 4)}に従って検討を進めた。

護岸の設計は、本来、河道計画段階での検討結果に大きく依存していることを再認識する必要がある。セグメント単位での河道特性を精査し、河岸防御の必要

性を判断し、河道計画段階から護岸設計段階の視点に立った検討を進めていくことが重要である。

6. おわりに

護岸の設計は、性能仕様への要請が今後益々高まっていくものと判断される。護岸の力学的安全性、設計の実用性を高めていくためには、実現象(破壊現象)をモニタリング調査し、工学的知見からの検証により、設計法の適用範囲の区分(場合分け)を明らかにしていく必要がある。また、力学的安定性を確認する設計手順のなかで、個別の現場での施設形状や施工条件の違いを既存施設や簡易な水理模型実験等の裏付けにより確認するプロセスを取り入れていくことも重要であると判断される。

本研究が、これら護岸設計の議論の一助となれば幸いである。

謝辞

本研究にあたり、国土交通省千曲川工事事務所には各種データの提供を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) (財)国土技術研究センター編集(1999):護岸の力学設計法、山海堂
- 2) 竹内義幸、小川鶴藏、竹内わか、川島幹雄、野村秀之(2000):千曲川における河岸防御工法に関する検討、リバーフロント研究所報告第11号
- 3) 山本晃一(1971):礫河床のサンプリングと統計的处理、土木技術資料 vol.13-7
- 4) 山本晃一(1994):沖積河川学、山海堂
- 5) (社)土木学会(1999):水理公式集(平成11年度版)、丸善(株)

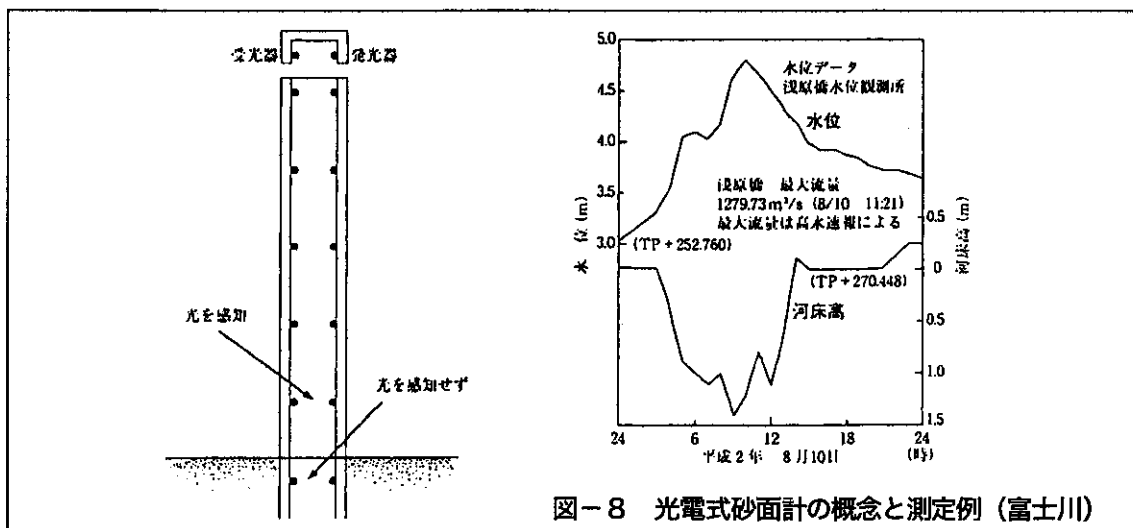


図-8 光電式砂面計の概念と測定例(富士川)