

扇状地河川での『護岸の力学設計法』 の適用性に関する実践的研究

PRACTICAL STUDY ON THE APPLICABILITY OF "MECHANICAL DESIGN METHODS FOR
REVTMENTS" IN RIVERS ON ALLUVIAL FANS

竹内 義幸¹・山本 晃一²・杉本 利英³・川島 幹雄⁴

Yoshiyuki TAKEUCHI, Kouichi YAMAMOTO, Toshihide SUGIMOTO and Mikio KAWASHIMA

¹正会員 株式会社 建設技術研究所 大阪支社 河川部 課長 (〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前1丁目2-15)

²フェロー 工博 財団法人 河川環境管理財団 研究総括職 (〒104-0042 東京都中央区入船1丁目9番12号)

³国土交通省 北陸地方整備局 千曲川工事事務所 調査課長 (〒380-0903 長野市鶴賀字峰村74)

⁴正会員 工博 株式会社 東京建設コンサルタント 総合河川部 課長 (〒171-0014 東京都豊島区池袋2丁目43番1号)

The publication of "Mechanical design methods for revetments" by Japan Institute of Construction Engineering (1999) finally paved the way for a shift to the mechanically rational revetment design system. When applying the design methods, properly identifying effective information based on the various data accumulated on the river, and taking rational design measures that satisfy the performance requirements in the field are left to design engineers.

This study uses the Chikuma River, one of Japan's rapid rivers, as a model, to identify the methods of establishing the design conditions for specific revetments based on channel characteristics surveys and the effectiveness of hydraulic model tests for checking the mechanical stability of revetments. The objective is to improve design procedures for revetments.

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

1. はじめに

『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場合には, 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ことが, 設計者に求められている。

本研究は, 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必要となる河道特性調査を通した具体的設計条件の設定法と, 護岸の力学的安定性照査における水理模型実験手法の有効性を示し, 護岸設計手法の改善を目指すものである。

2. 河道特性調査による設計条件の設定

(1) 河床材料調査の精査と粗度係数, 代表流速の設定

a) 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。

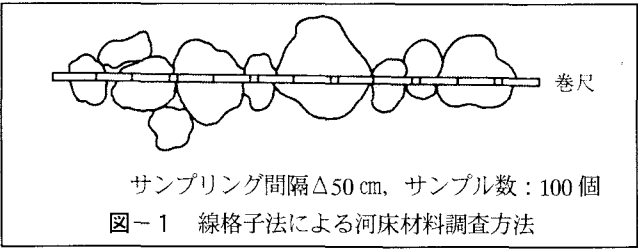
$$n = H_d^{1/6} / (\sqrt{g} \cdot \phi) \quad (1)$$

前式の流速係数 ϕ は, 各セグメントごとに τ_* と H_d/d_R の関係から推定することができる。この際, 河床材料調査により代表粒径 d_R を正確に評価し, 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²⁾

礫河床では河床材料がアーミングされ、表層の礫を除外する通常のふるい分け試験では河床の粗度を推定できないことがある。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。

山本²⁾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（60%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）。



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_{60} (mm)	76	150
流速係数 ϕ	11.5	10.0
設計水深 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

(3) 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概略設定できるが、本検討では図－2に示す特異点における河道特性の相違に応じて最深河床高を設定した。

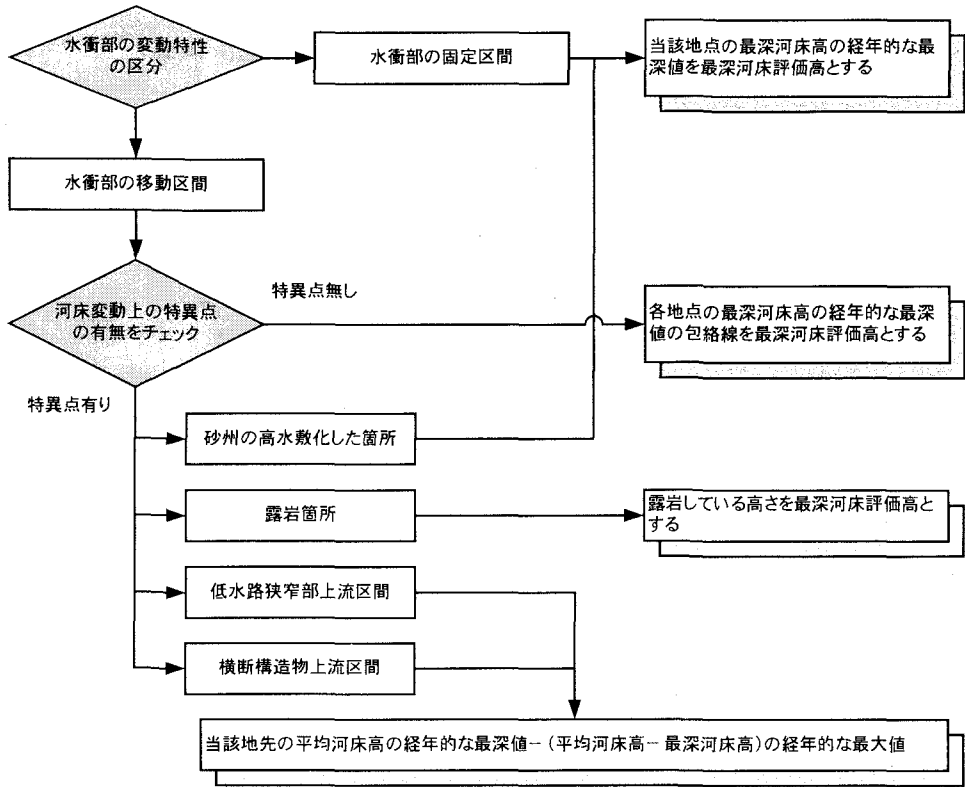
a) 露岩箇所 の把握

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）を活用し、地質推定縦断面図を作成し、コントロールポイントとなる露岩箇所を把握した。

b) 低水路狭窄部の上流区間の評価高

河道平面形状により、下流の低水路狭窄部がコントロールポイントとなり、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、過去に生じた洗掘深（当該測量年度における平均河床高と最深河床高の差）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。



図－2 最深河床高の設定フロー

3. 護岸の力学的安定性照査における水理模型実験手

法の有効性

(1) 根固工の安定性の検討

a) 検討の目的

昭和30年代以降、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。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。

この根固工について『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。

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が可能である。

そこで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。

b) 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 α 、 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タイプの1/21（対称突起型）、1/30（平面型）

③ ブロックの配置と連結法：表-2及び図-3に示す。

④ 方法1：実験最大流速1.5m/s、水深0.47m

（実スケール換算値）対称突起型：流速6.9m/s、水深9.9m

平面型：流速8.2m/s、水深14.1m

方法2：実験最大流速2.5m/s、水深0.28m

（実スケール換算値）対称突起型：流速11.5m/s、水深5.9m

平面型：流速13.7m/s、水深8.4m

c) 実験結果と考察

根固めブロックの現場での施工条件について、今回実施した水理模型実験の結果からまとめると次のようになる。

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 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。

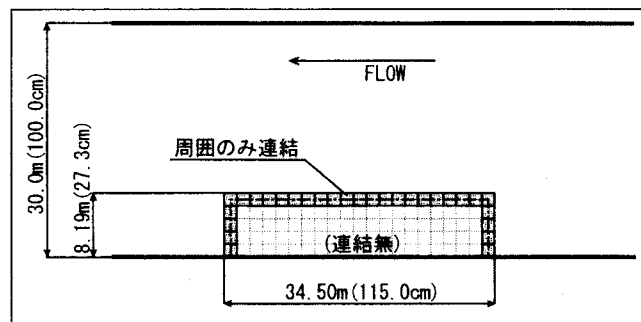
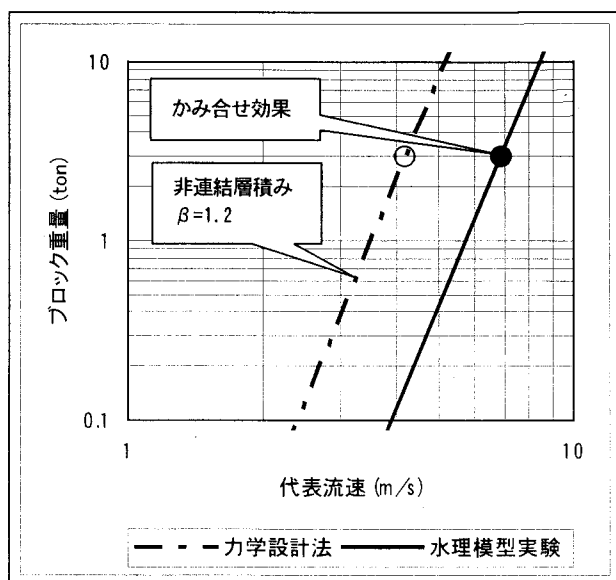
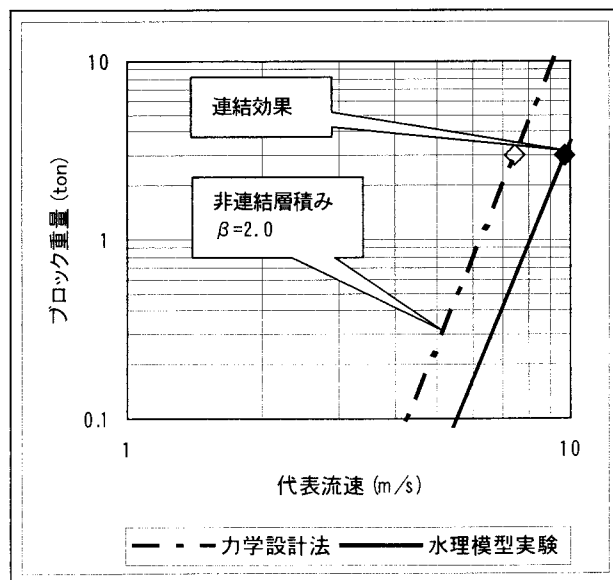


図-3 平面型（層積み）の連結配置図



タイプA：対称突起型（乱積み・かみ合せ効果）



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

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，部材の形状等によって定まる無次元定数 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(tf)， 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－1参照)， V_0 ：湾曲，洗掘，低水路と高水敷の流れの干渉を考慮し，実際に河岸に作用する代表流速， V_d ：相当粗度高さでの設計流速 (m/s)， $V_d \doteq$ 代表流速 V_0 (ブロックサイズが大きく， V_d と V_0 はほぼ等しいため．)

(2) 巨石水制工の安定性の検討

a) 検討の目的

千曲川上流部及び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の施工が行われてきた(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．

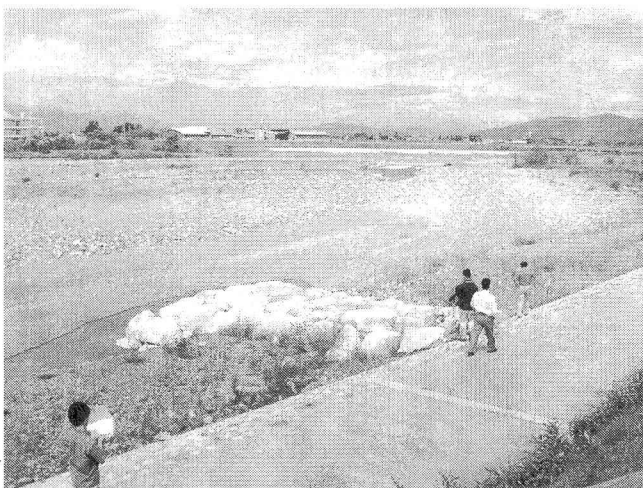
そこで根固め水制の形状諸元のうち，巨石の移動限界流速及び水制工周りの洗掘に対して根固工設置の有効性を検

討する水理模型実験を実施した．

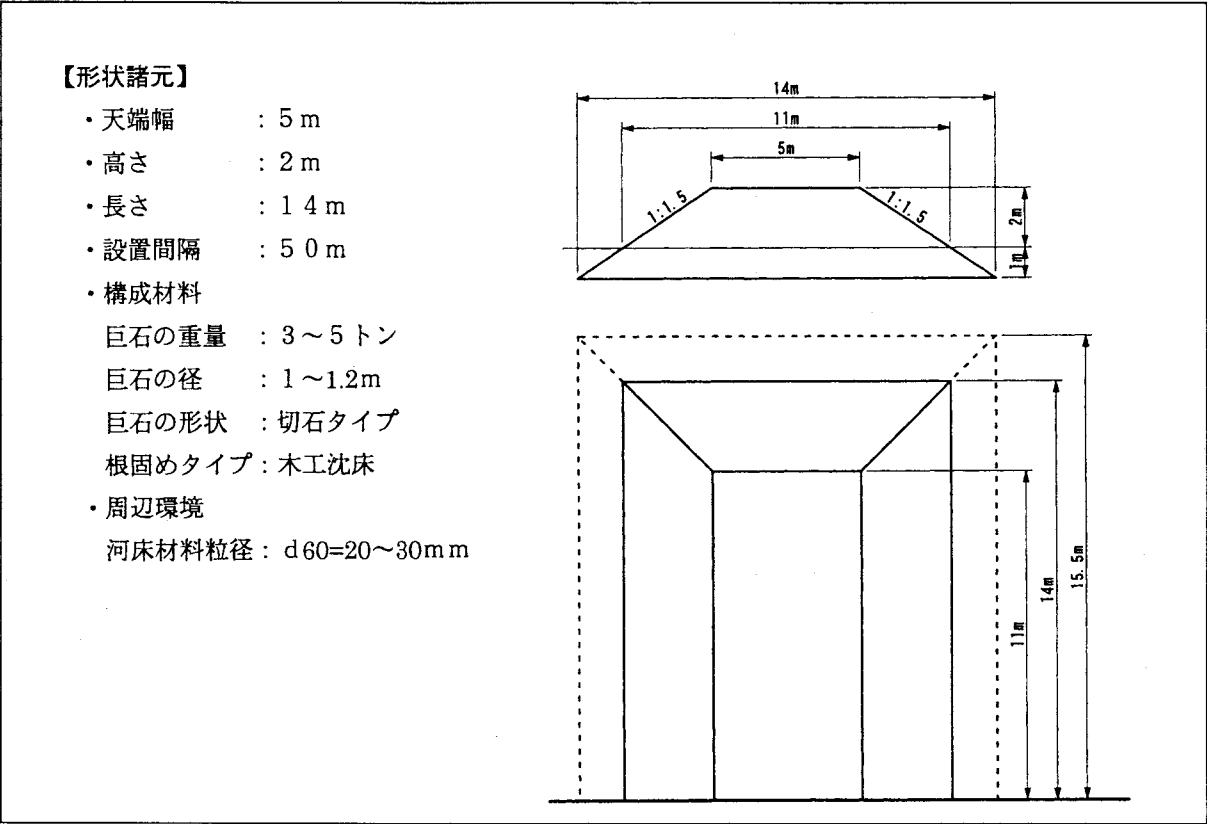
b) 実験条件・実験ケース

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，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）

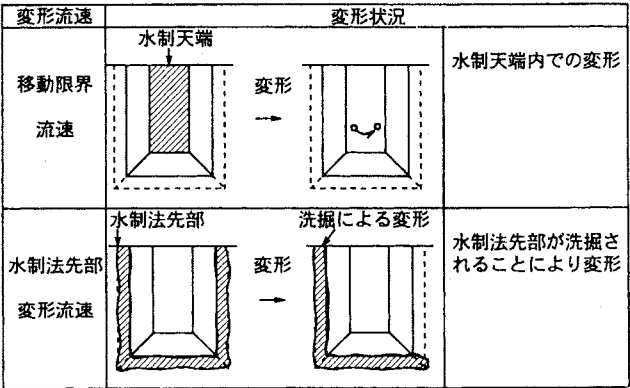


図－5 水制工の基本形状

c) 実験結果と考察

巨石による根固め水制の力学的安定性について、水理模型実験の結果からまとめると次のようになる。

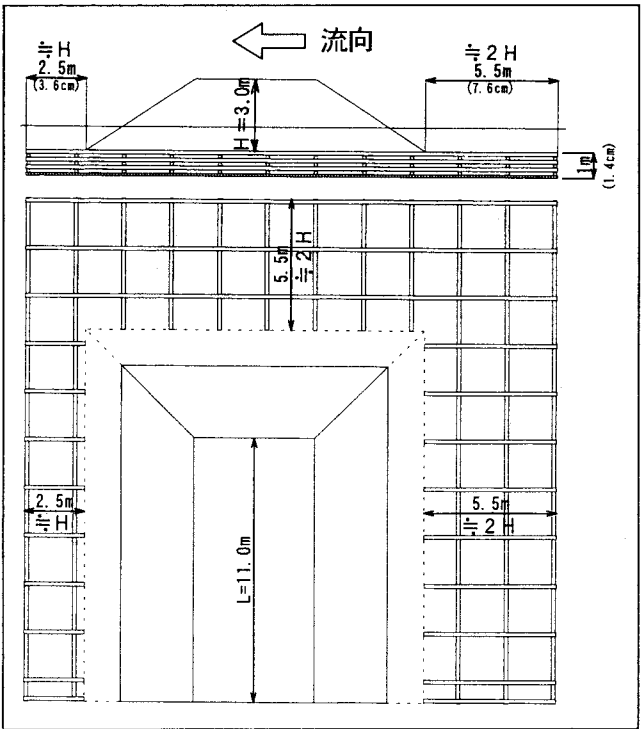
- ①根固工を敷設しない水制は、水制上流側及び先端の法先部の局所洗掘で、法先の巨石が不安定となり、崩落、転動し始め、水制の形状変形が進行し、最終的には基部の変形にいたる。ただし、巨石の移動限界流速は、根固工の有無には無関係で、 3.7m/s で移動開始する。
- ②これまでの実績主義的な判断に加え、模型実験により水制工による局所洗掘の範囲を求め、効果的な根固工の設置範囲を検討する必要がある。根固工の設置範囲は、根固工を敷設しない場合の河床高から、水制工高 H （天端）に対して、上流・先端は $2H$ ，下流は H の範囲とす



図－6 水制工の変形過程模式図

れば安定性が確保し得ることを確認できた。

- ③この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を確認し得た。



図－7 水理実験による根固工の必要範囲

4. 結論

(1) 現時点での技術的評価

本研究で明らかになったことは以下のとおりである。

- ①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に河床材料（表層材料調査）、河岸土質、露岩の状況などの河道特性の精査が必要なこと、また、その調査・検討手法を提案することができた。
- ②千曲川の河岸防御工法（根固工及び水制工）について、部分抽出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の検証を行うことの必要性を確認し得た。

(2) 今後の方向性

a) モニタリング調査

本検討では、千曲川で平成 11 年度洪水により被災した 2 箇所をケーススタディの対象に選び、『護岸の力学設計法』¹⁾と河道特性調査、簡易な水理模型実験、既存護岸・水制の被災状況と洪水時の水理量との関係の検討等により設計条件及び施設諸元を設定した。なお、災害復旧工事において、洪水中も含めた河床変動を観測するため、図-8 に示す砂面計⁴⁾をあわせて設置した。

施工後のモニタリング調査により、『護岸の力学設計法』¹⁾の改良を行う情報としたい。

b) 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“セグメント区分”¹⁾³⁾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する。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。

5. 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。護岸の力学的設計法の実用性を高めていくため、個別の現場での施設形状や施工条件の違いと破壊現象をモニタリング調査し、安定性照査法の適用範囲（場合分け）を明らかにしていく必要がある。本研究を通じて、『護岸の力学設計法』の適用においては、マニュアル的設計ではなく、今回実施したような簡易な水理模型実験等も含め、個別の現場にあわせた具体的な設計を実践していく必要性が確認できた。

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：護岸の力学設計法，山海堂，1999
- 2)山本晃一：礫河床のサンプリングと統計的処理，土木技術資料 vol.13-7，1971
- 3)山本晃一：沖積河川学，山海堂，1994
- 4)(社)土木学会：水理公式集（平成 11 年度版），丸善(株)，1999

(2002. 4. 15 受付)

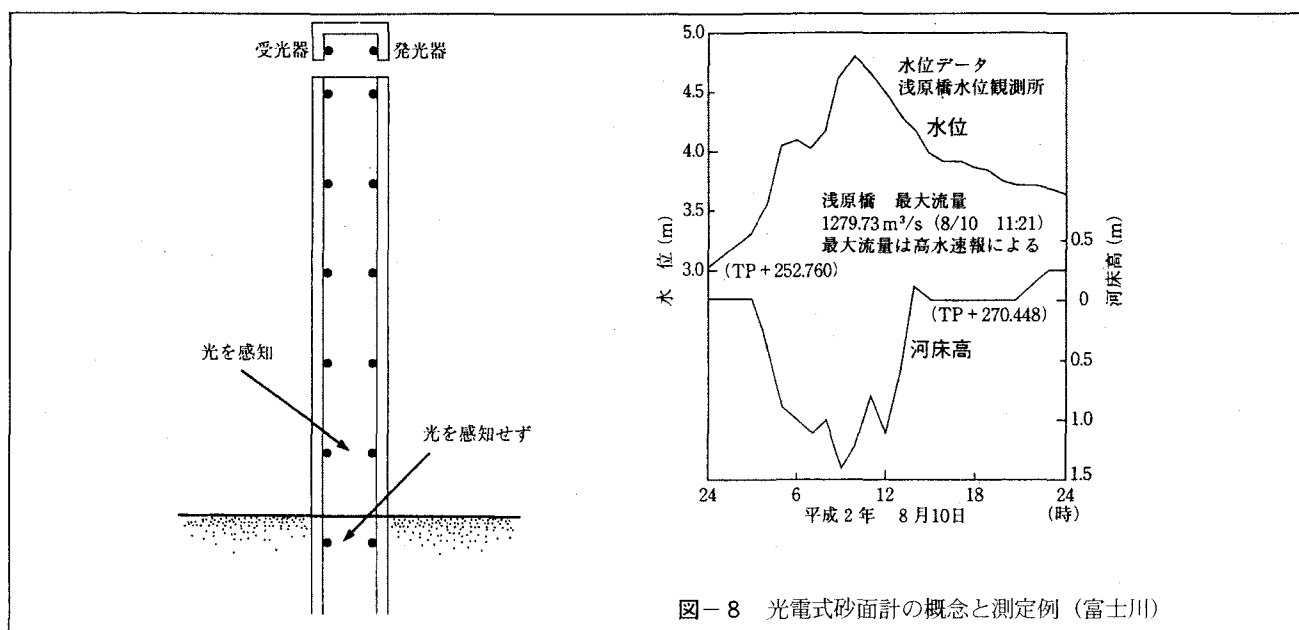


図-8 光電式砂面計の概念と測定例（富士川）