

護岸根固工に関する調査研究

増田 懋隆* 上月 武** 後藤 哲***

まえがき

河川の護岸工は、治水対策として河道安定に重要な構造物であり、また最近、高水敷を公園緑地として高度利用するなどの目的から河川工事の全体に占めるウェイトが急激に増大しつつある。

護岸工法については、従来から経験的な手法による要素が強く、理論的にはあまり究明されていないくらいであった。しかし、先人の苦勞の集積だけに現在の工法に基本的な機能上の欠陥は見いだされない。また従来、北海道の護岸の特徴として広く採用されてきたコンクリートブロック単床工から、さらに強度、耐久性の上でより丈夫な工法に変更されつつあり、この工法の開発が望まれている。

この調査研究では、護岸工法のうち最も重要な部分である根固工について取りあげ、根固工に関する諸問題について現地の実態を調査分析し、これにあわせて実験的、理論的に検討を加えたものである。なお、具体的には、水理条件、河道条件に対しての根固工の施工基面高、布設幅、延長、ブロックの諸元、(大きさ、形状、組合わせなど)などがどうあるべきかを検討して、根固工の合理的、経済的な設計指針を得ることを目標としたもので、北海道開発局技術研究発表会の河川部門の指定課題として、昭和45年から48年までの4ヵ年、調査研究を行ってきたものである。

今回、本調査研究によって、コンクリートブロック根固工に関する諸問題が、統計的、実験的、理論的に追求された結果、これらの問題は実用上さしつかえない程度まで解明され、過日、「護岸根固工設計指針」を発刊するに至った。

本報文は、「護岸根固工設計指針」の根底をなす調査研究の概要を総括的に取りまとめて報告するものである。

1 調査実施概要

調査対象河川は、道内の主要な急流河川である石狩川4区(上流)、豊平川、忠別川、美瑛川、十勝川、札内川、音更川、天塩川上流、名寄川、常呂川、無加川、湧別川、渚滑川、後志利別川の14河川で、過去に施工されたコン

クリートブロック根固工235ヵ所について、次のような調査を実施した。

- i 施工数と年度の関係および種類
- ii 布設延長別施工数
- iii 布設幅および布設幅の計画低水路幅に占める割合
- iv 施工高と河床高の関係および河床勾配、水面勾配と河床材料の関係
- v 掃流力とブロック重量、施工数の関係および現地における流速分布
- vi 根固工付近の流速と河床変動、沈下量調査
- vii 豊平川低水路におけるコンクリートブロックの滑動・転動実験

以上の現地調査のほか、自然河川の蛇行と深掘れ調査を行なったが、一方、現地調査で測定が困難な事項については模型実験によって解明を行なった。それらについては下記のとおりである。

- i 各種コンクリートブロック根固工の持つ水理学的粗さ(根固工の粗度)
- ii 洗掘深とブロック沈下幅の関係
- iii ブロック自体の安定性と根固工による河床洗掘防止効果
- iv ブロックの移動限界流速

以上のような現地調査とそれを補足する模型実験の結果を検討して「護岸根固工設計指針」を作成したが、以下にその検討結果の概要を述べる。

2 河道変動調査

護岸根固工の合理的な設計基準を作るためには、いろいろな河川の河道形状を調べて河道の実態を把握するとともに、あらかじめ河道の変化を推定し、その変化を防止するとともに、その変化に耐え得る根固工を考えなければならない。そのため、ここでは道内の主要な急流河川について河道変動調査を行ない、種々の検討を加えた。

(1) 根固工の布設延長

根固工の合理的な布設延長を設計するためには、自然河川の平面的な河道形態を観察し、河道の蛇行現象を解明することが必要である。すなわち、根固工の線形や延長の設計のためには図-1に示した河道の蛇行形態の一

* 河川研究室長 ** 同室主任研究員 *** 同室員

般的な記号表示図にあるような蛇行長、接岸流部長、移行部長、移動距離などの諸量と各種水理量との関係を検討し、解明しなければならない。ここでは図にあるように記号はそれぞれ $L, l_1, l_2, \phi l$ と表わすことにする。

イ 蛇行長

蛇行の研究としてはこれまでに多くの成果があり、古くはファルグの法則、最近では木下、山岡などの成果がある。ここでは P. Ackers と G. Charton が模型実験から導いた実験式

$$\frac{L}{dm} = 10.33 \left(\frac{Q^2}{g \cdot dm^5} \right)^{0.257} \quad (1)$$

【ここに L : 蛇行長 (ft) $= \frac{1}{2}$ 波長, dm : 河床材料の平均粒径 (mm), Q : 流量 (c. ft/sec), g : 重力の加速度 (ft/sec²)】を参考として、 L/dm と $Qm^2/g \cdot dm^5$ との関係を豊平川、忠別川、札内川、渚滑川の4河川について調べてみたのが図-2である。図によると上記2つの因子の間には良い相関関係があり、次に示す(2)式の関係が得られる。

$$L = 300 \left(\frac{Qm^2}{g \cdot dm^5} \right)^{0.257} \cdot dm \quad (2)$$

ここで Qm : 年平均流量 (m³/sec) であり、他は長さの単位 m としたが、平均粒径のみが mm 単位である。

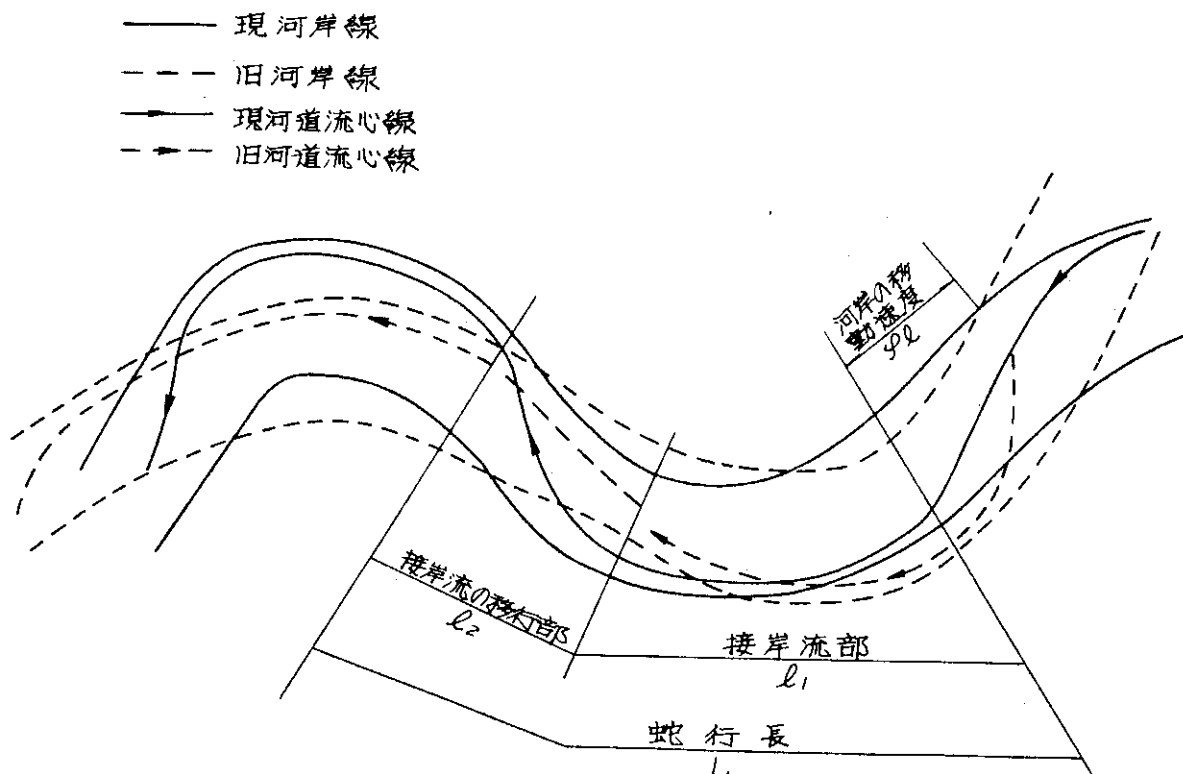


図-1 蛇行部の記号表示図

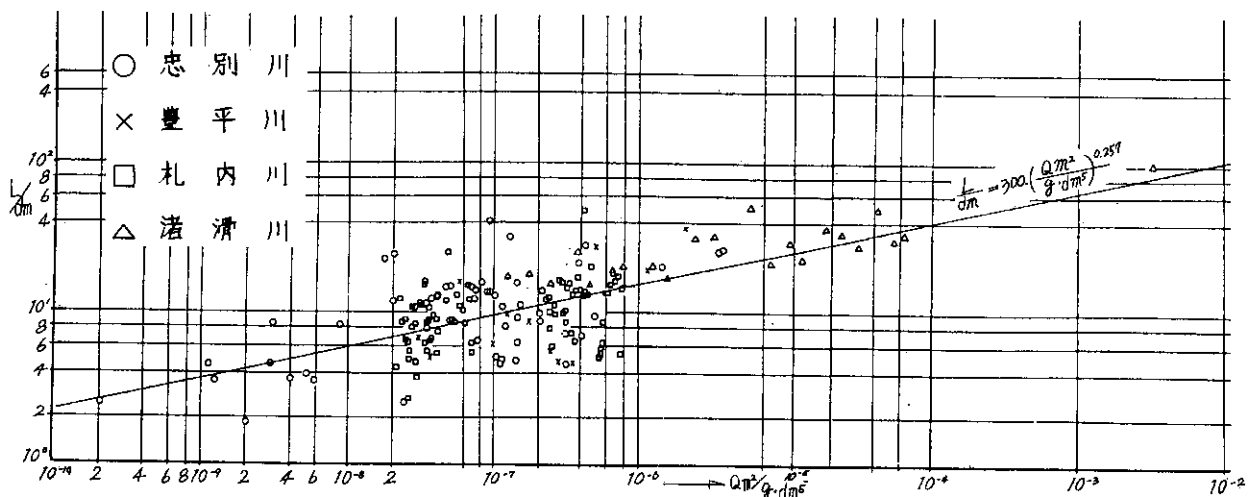


図-2 L/dm と $Qm^2/g \cdot dm^5$ の関係

(2)式をみると ($Qm^2/g \cdot dm^5$) の指数は Ackers の実験式と一致していることがわかる。

□ 接岸流部長とその間隔

図-1の記号を用いると蛇行長は次式で表わされる。

$$L = l_1 + l_2 \dots\dots\dots(3)$$

図-3は、蛇行長と接岸流部長の関係を示したもので、これらには深い相関関係があり、1つの線で表わすことができる。図中の線は次の(4)式のとおりである。

$$l_1 = 0.006 L^{5/3} \dots\dots\dots(4)$$

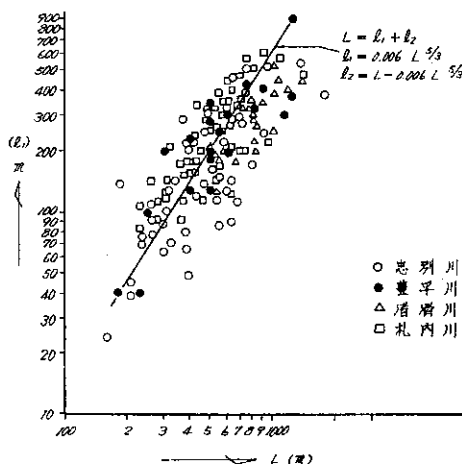


図-3 蛇行長 (L) と水衝部の関係

(2)式の関係(4)式に代入すると次の(4')式が得られる。

$$l_1 = 80.64 dm^{5/3} \left(\frac{Qm^2}{g \cdot dm^5} \right)^{0.428} \dots\dots\dots(4')$$

したがって、河床材料の平均粒径と年平均流量を調べることによって蛇行長を推定することができ、さらに接岸流部長も推定できる。

ハ 根固工布設後の洗掘延長および根固工の沈下延長

根固工の布設延長を設計するためには、以上に述べた蛇行における接岸流部長を推定するとともに、一方、布設後の根固工自体の沈下延長をも推定することが必要である。根固工の沈下延長は、その先端部の洗掘延長に関係があるが、現地調査で先端部の洗掘延長と各種水理量

などとの関係を十分に説明することができなかったの、この点については模型実験によって検討した。

図-4は、4種類の代表的な形状のブロック(六脚、三連、合掌、ホロースクエア)について、縮尺1/50で流量、彎曲部の流入角度、水面勾配を変化させて実験した結果を示したが、 l/B と $\tau_* \cdot \left(\frac{B}{Hw} \right)^{-1}$ との間には良い相関がみられ

$$l = 560 \tau_* \left(\frac{B}{Hw} \right)^{-1} B \dots\dots\dots(5)$$

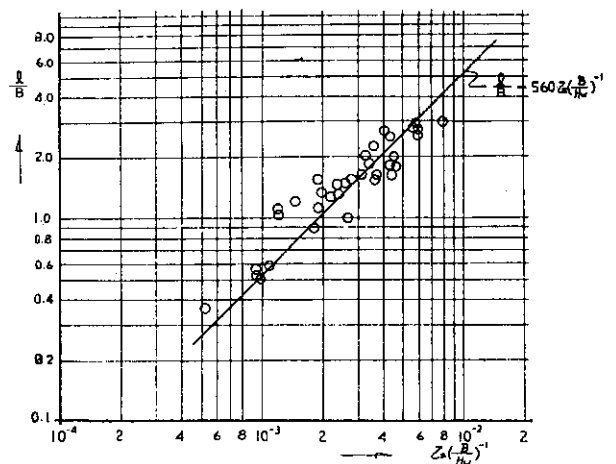


図-4 $\frac{l}{B}$ と $\tau_* \left(\frac{B}{Hw} \right)^{-1}$ の関係

の関係が得られた(記号は図-5参照)。

ここで l : 洗掘延長 (m)

$$\tau_*: \text{掃流力関数} = \frac{U_*^2}{(\sigma/\rho - 1)g \cdot dm}$$

σ : 河床材料の比重

ρ : 水の比重

U_* : 摩擦速度, Hw : 平均水深

また、根固工の沈下延長 l_r は現地調査の結果

$$l_r = \frac{1}{4} l + 50 \dots\dots\dots(6)$$

なる式を得た。

ニ 布設延長と布設間隔の設計

前節までの調査結果を用いると布設延長の設計の指

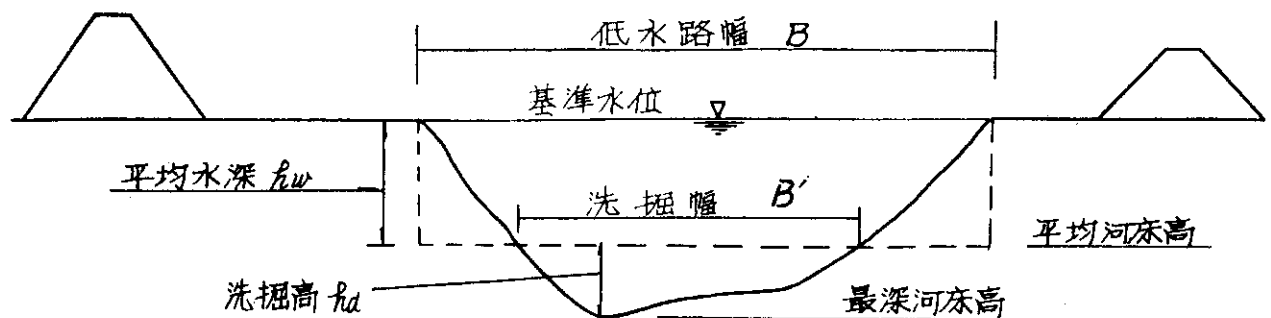


図-5 河道断面諸元

標とすべき長さは、次のようにして求めることができる。

(2)式により年平均流量と河床材料の平均粒径とから蛇行長を求め、その値により(4)式で接岸流部長を求めるか、あるいは直接(4)式から求める。また、沈下延長は、(5)式によって求めた洗掘延長を(6)式に代入すれば求まるから、これら2つの接岸流部長と沈下延長の内で大きなほうの値を布設延長の設計の指標とする。

(3)式を変形すると移行部長 l_2 は

$$l_2 = L - l_1 \dots \dots \dots (7)$$

であり、 L と l_1 はすでに説明したように求めることができるから(7)式により移行部長を求めることができる。この値は相隣りの上下流の根固工の布設間隔を定めるための指標とすることができる。

ホ 実績布設延長と設計布設延長

図-6は、道内の急流河川で施工された根固工の施工延長を25m毎に級別して施工数を示したものである。図によると75~250mの範囲の根固工が大部分で、全体の64%を占めている。一方、年平均流量を20および40 m³/secとし、河床材料の平均粒径を30~60mmの範囲で(2)、(4)、(5)、(6)式によって布設延長を求めると、117.3~152.2mの範囲となり、実績の布設延長のほぼ中央値を示している。なお、ここで用いた年平均流量と河床材料の平均粒径の値は調査を行なった現地河川のおよその範囲を示す値である。また設計布設延長は、式により求めた接岸流部長と沈下延長の大きなほうの値の10%増しとした。

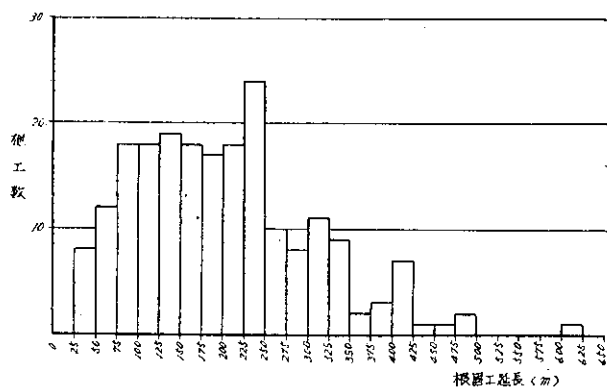


図-6 根固工延長の分布

(2) 根固工の施工順位

図-7は、 ϕl を1年間の蛇行の移動速度、 H_w を図-5に示してある平均水深として、 $\phi l/H_w$ と dm/H_w の関係を示したものである。図によると各河川によりそれぞれ特徴のある傾向を示しているが、概括的には $\phi l/H_w$ は dm/H_w の3乗の形で表わせるようである。したがって根固工の施工順位は他の制約がなければ dm/H_w の

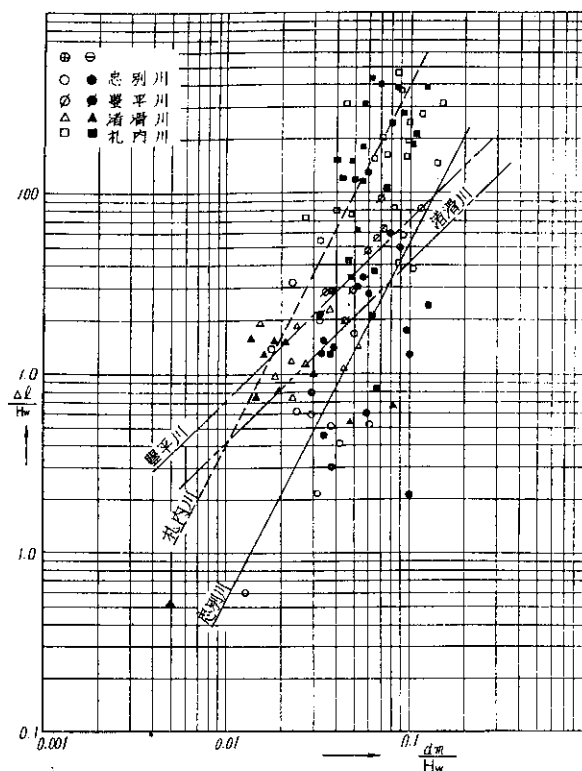


図-7 $\frac{\phi l}{H_w}$ と $\frac{dm}{H_w}$ の関係

値の大きな個所から実施するのが得策である。

(3) 根固工の布設幅

自然河川は、乱流蛇行して流心が偏り、河床、河岸が洗掘されて護岸が必要となる。したがって護岸の設計においては、河道の洗掘やブロックの移動、沈下などの問題に対処できる構造を合理的に決めなければならない。ここでは根固工の布設幅の検討のために行なった諸調査とその検討結果および布設幅の設計法について説明する。

洗掘された河道の一般的な横断面を図-5に示したが、図中の H_w は平均水深、 hd は洗掘深、 B' は洗掘幅を表わす。これらの諸量のうちで hd と B' は布設幅を決めるための重要な要素であり、さらに洗掘の位置や河幅も影響する。また、急流河川では網状河道が発達し、砂れき堆の流水への影響のため普通河道とは異なった様相を呈する。したがって、洗掘深の調査ではこれら2つの河道を区別して考える必要がある。

簡単にこれらの河道を説明すると、流心が単一なのが普通河道であり、流れが砂れき堆に隔てられて複数の流心を有し、平面的に見ると網状の河道を網状河道と呼ぶ。網状河道の一例は写真-1に示した。

イ 普通河道の局部洗掘

普通河道における局部洗掘は、一般に彎曲部において

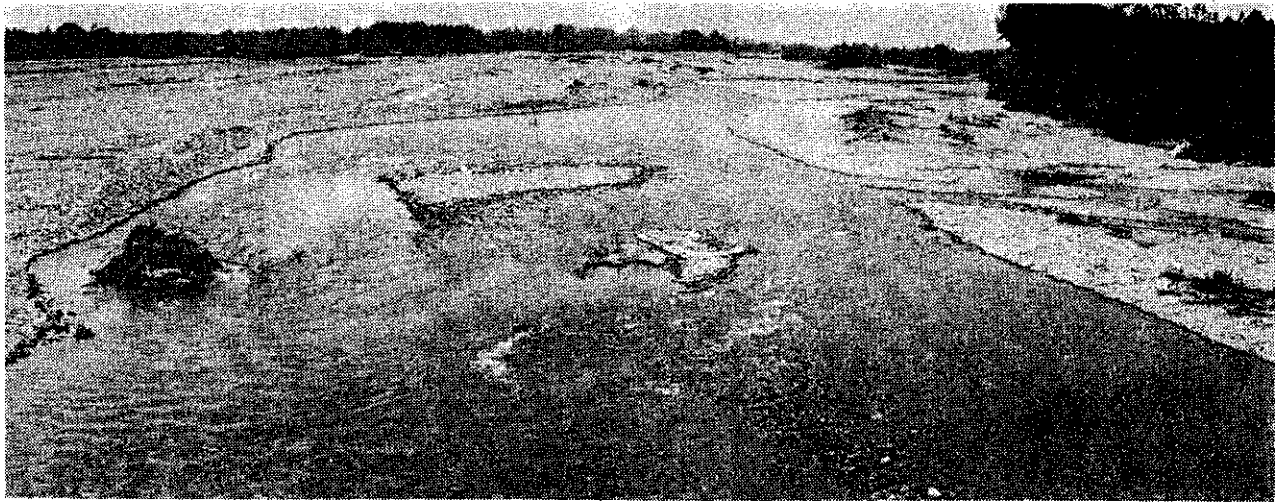


写真-1 網状河道の例（札内川）

顕著であり、根固工の設計には彎曲部における洗掘の度合を定量的に表わすことが必要である。しかし、彎曲部における流れの現象は、すこぶる複雑で、最も特徴的な現象は、遠心力の影響とそれに伴う二次流の発達である。この二次流は流速分布の変形をもたらし、さらにその結果として河道を洗掘して図-5に示したような横断形状をもたらすが、この点については現在までのところ十分に解明されていない。

ここでは各種の水理量など（フルード数、掃流力関数、低水路幅など）およびそれらの組合わせたものと洗掘深との関係を、道内の代表的な4つの急流河川（豊平川、忠別川、札内川、渚滑川）について検討してみた。その結果は図-8にも示したように $(H_w + h_d)/H_w$ と B/H_w との間には良い相関がみられ、次に示す(8)式を得た。式中の B は低水路幅である。

$$h_d = 0.004 \cdot B + 0.5 \cdot H_w \dots\dots\dots(8)$$

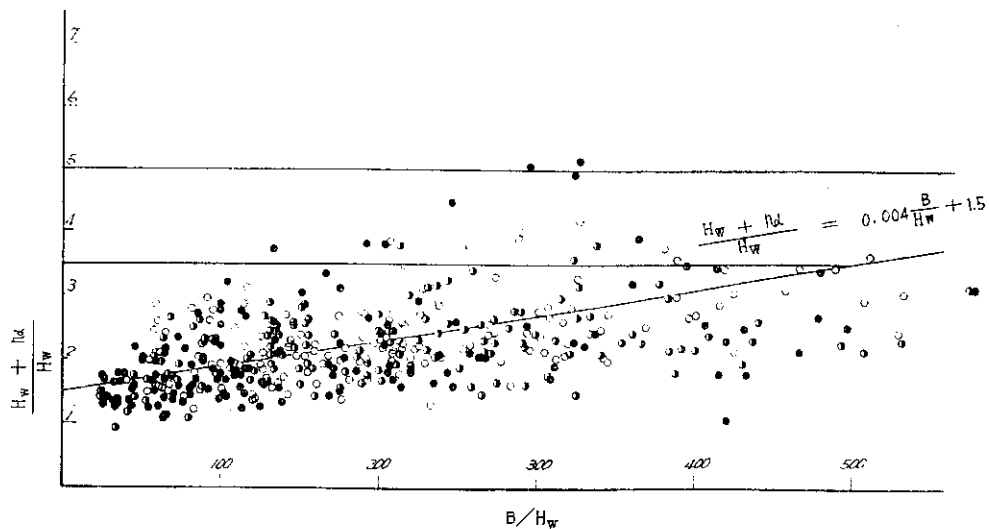


図-8 $\frac{H_w + h_d}{H_w}$ と B/H_w の関係

□ 網状河道の局部洗掘

網状河道の流れが普通河道と異なった様相を呈することは、先にも触れたが、例えば洪水末期においては流れは大きな砂れき堆の高まりを避けて側方にすべり落ちるように流れ、砂れき堆の間を縫うような動きを示すことが多い。このような流れは、流心に沿う流れに作用して二次流の発達を促し、洗掘あるいは蛇行現象に深い関連を持っている。したがって網状河道の局部洗掘の解明に

は、砂れき堆の調査を重点的に行なった。

調査は前記4河川において砂れき堆の平面形状、図-9に示すような横断形状、あるいは水理量を調べ、洗掘深との関連について検討を行なった。その結果は図-10に示したように H_s/H_w と $H_t \cdot B/dm \cdot H_w$ との間には多少のばらつきはあるが相関が良く、 H_s の最大値を H_d として

$$H_d = 0.177 \frac{B \cdot H_t}{dm} \dots\dots\dots(9)$$

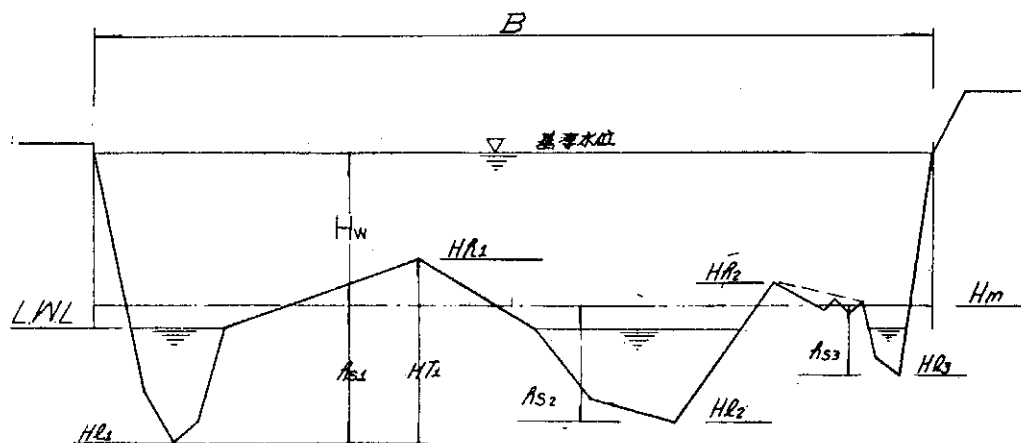


図-9 網状河道における砂れき堆と深掘れ調査モデル図

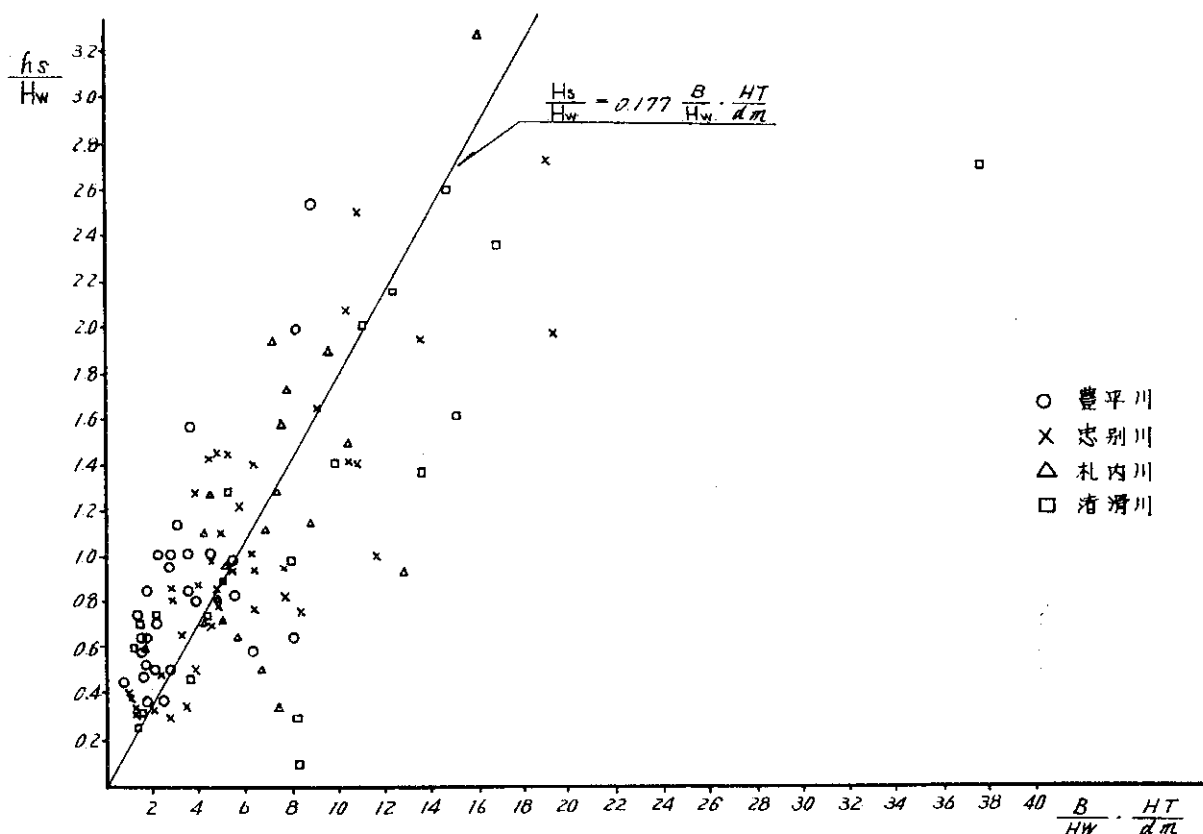


図-10 $\frac{H_s}{H_w}$ と $\frac{B}{H_w} \cdot \frac{H_t}{d_m}$ の関係

なる関係式を得た。[ここで H_d : 最大洗掘深, B : 図-9に示すような低水路幅, H_t : 最深河床からの砂れき堆頂点高] なお, 図の直線から右側に大きくはずれた点は, 橋脚などの特殊な影響を受けているので, このような場所の洗掘深の場合にはこのような特殊な影響を十分考慮することが必要である。

ハ 根固工布設後の最大洗掘深と根固工の最大沈下深
根固工布設後の先端部付近の最大洗掘深については, 現地調査の資料のみでは十分な解明ができなかったの

で, 模型実験を行なって検討を加えた。

実験は, 先にも述べた縮尺 1/50 の模型で4種類のブロックについて実施した。その結果, 最大洗掘深としては図-11に示したように

$$h_s = 4.0 \tau_* \left(\frac{B'}{B} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{B}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot H_w \dots \dots \dots (10)$$

なる関係を得た。

ここで

h_s : 根固工布設後の最大洗掘深

B, B': 図-5 参照

R: 曲率半径

また、根固工先端部付近の洗掘が原因となって起きる根固工の最大沈下深は、現地調査の結果 図-12 を得た。図によるとブロックの最大沈下深 Hsd は最大限ブロック布設後の最大洗掘深にまで達している。すなわち最大洗掘深まで沈下する可能性のあることを示している。

ニ ブロックの沈下深と沈下幅の関係

図-13 は、現地調査の結果から得られたブロックの沈下深と沈下幅の関係で、ばらつきは多いが

$$bs = 2.27 Hsd + 2.00 \dots\dots\dots(11)$$

と表わせようである。なお、bs はブロックの沈下幅で単位は m である。

ホ 計画低水路幅と布設幅の関係

図-14 は、既設の根固工の布設幅と計画低水路幅の比

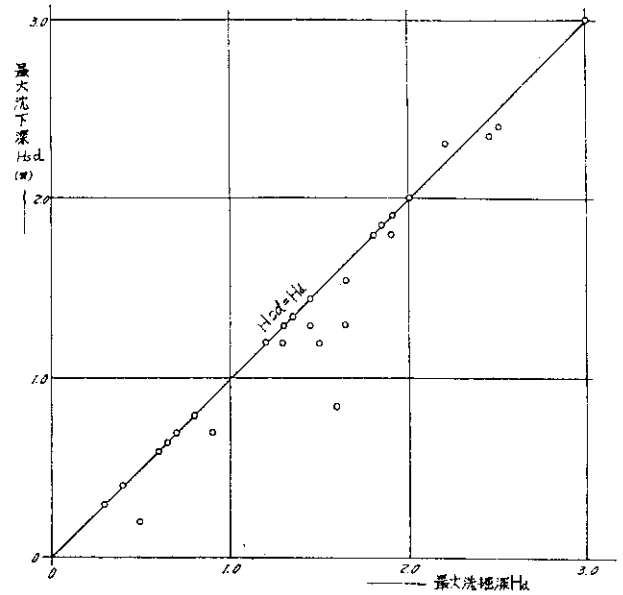


図-12

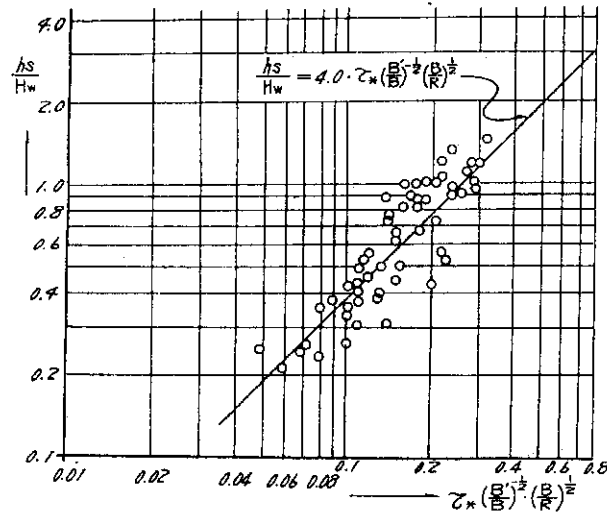


図-11

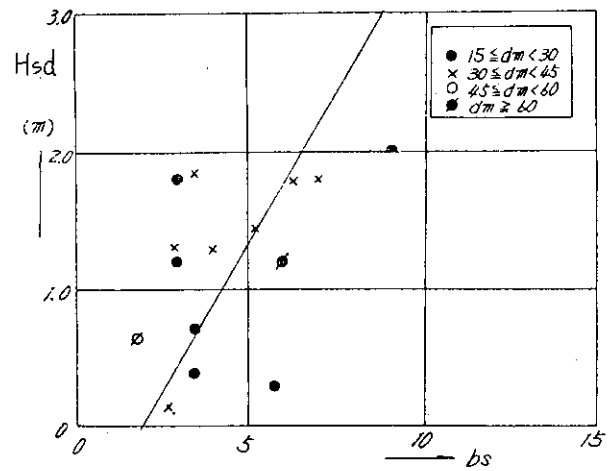


図-13 ブロックの沈下深と沈下幅の関係

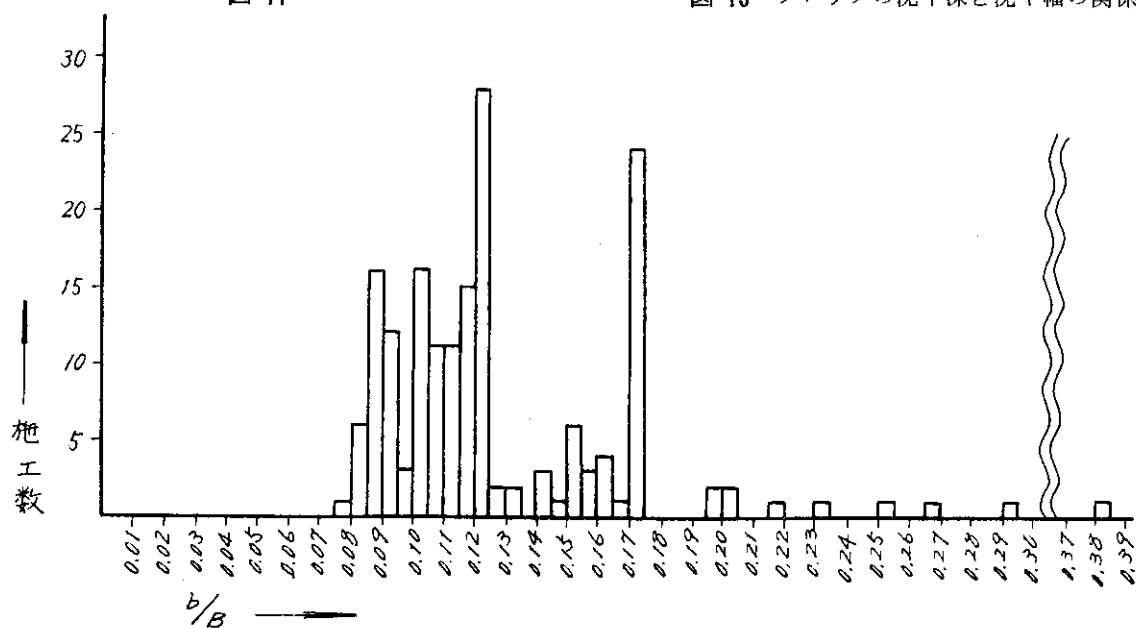


図-14 布設幅(b)と計画低水路幅(B)の関係

を施工数別に表わしたものである。

図によると b/B (b は布設幅, B は計画低水路幅) の値は 0.08~0.17 の範囲に集中していることがわかる。

へ 布設幅の設計法

イ~ホでは根固工の布設幅に直接あるいは間接に関係する各種要素について現地調査の結果を中心に説明してきたが、ここではこれらの成果を利用した根固工の布設幅の設計法を、普通河道と網状河道に分けて概略説明する。

(イ) 普通河道の場合

普通河道における根固工の布設幅を設計するには、まず、(8)式により彎曲部における最大洗掘深を推定し、次いで(10)式を用いて根固工布設後における最大洗掘深を推定する。これらの値の大きな方を最大洗掘深として採用するが、図-12からこの値を最大沈下深とみなせばよいことがわかる。河川の横断方向の沈下幅は、この最大沈下深に関係あることは図-13と(11)式に示されているから、(11)式を用いて最大沈下深から沈下幅を推定する。布設幅は、沈下幅よりも大きくなければならないから、このようにして求めた沈下幅は、布設幅の1つの下限値で、この値に安全率を考慮して第1の布設幅とする。一方、図-14は、布設幅と計画低水路幅の比を施工数別に示したものであることは、前にも説明してあるが、この図から経験的に施工されたものではあっても両者の比の値は示唆に富むもので、第2の布設幅を求めることができる。これら2つの布設幅の大きな値を計画の布設幅とすればよい。「根固工設計指針」では沈下幅に30%の安全率を見込んだ値を第1の布設幅、計画低水路幅の最低8% (標準12%) を第2の布設幅とすることに定めている。

(ロ) 網状河道の場合

この場合には普通河道の場合とほとんど同様であるが、(9)式による網状河道における最大洗掘深の値も計算し、この値も普通河道における(8)式、(10)式で求めた値に追加して、最大洗掘深による沈下幅からの布設幅を求めることが必要となる。

3 根固工の粗度

根固工のブロックの選択にあたっては、その工法の持つ水理学的特性、すなわち水理学的粗さ (粗度) や抗力、摩擦力などの安定性について考慮することが必要である。抗力と摩擦力については後で触れることにし、ここでは各種のブロックについての水理学的粗さ、すなわち減速効果について説明する。

(1) 粗面開水路における流速分布の基本公式

垂直方向の流速分布の基本公式としては、次に示す対数分布則がある。

$$\frac{U}{U_*} = Ar + \frac{1}{k} \log e - \frac{y}{Ks} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 U : 水深 y における流速, U_* : 摩擦速度, Ar : 定数, k : カルマン定数, Ks : 相当粗度, y : 河床底面からの距離一般に、(12)式は $Ar=8.5$, $k=0.4$ とすると実際の水路によく適合することが知られている。また、(12)式を平均流速について表わし、定数の数値を代入すれば

$$\frac{U_m}{U_*} = 6.0 + 5.75 \log \frac{H}{Ks} \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。ここで U_m は平均流速, H は水深である。(13)式の U_m とマンギの平均流速公式の流速が等しいとして、マンギの粗度係数と相当粗度の関係を求めると次のとおりである。

$$n = \frac{H^{1/6}}{g^{1/2} \cdot \left[6.0 + 5.75 \log \frac{H}{Ks} \right]} \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 n : マンギの粗度係数, g : 重力の加速度

(2) 実験の概要と結果

根固工の減速効果すなわち粗度係数は、(14)式で水深と相当粗度によって変化することがわかるが、実際には相当粗度が各ブロックの種類あるいは組合わせによっていかなる値であるかが不明なので、実験結果から(13)式を用いて相当粗度を算出した。

模型実験は、長さ 15 m, 幅 0.5 m, 深さ 0.4 m の鋼製可傾斜水路を用い、合成樹脂製の 1ton 級ブロックの約 1/30 のもの 4 種類について実施した。

以上のような実験の結果から求められた相当粗度の値を(14)式に代入して求めたマンギの粗度係数と相当粗度の関係を示したのが、表-1 および 図-15 である。これらの結果をみると、根固ブロックの粗度係数は、組合わせによって異なった値を示すが、およそ砂れき河床の粗度係数からその 2 倍程度までの範囲の値を得ることができる。

4 根固工の施工高

根固工の施工高が施工当時の河床に対してどのような高さに布設されたかは、施工後の洗掘沈下に当然影響することが予想されるので、ここでは施工高の代表として施工延長の中央における根固ブロックの下面高を選び、この高さと最深河床高との差を Zs として種々の検討を加えてみた。

図-16 は、施工数と Zs の関係を示したもので、図中の斜線の部分は、施工後に沈下したものである。この図

表-1

ブロックの種類		配列 記号	10 m ³ 当 たり個数	空隙率 (%)	単位面積当 たりコンク リート量 (m ³ /m ²)	現地への適用 (1t型ブロックへ換算)			
名	称					Manning の n			
	記 号					H=2 ^m	H=3 ^m	H=4 ^m	H=8 ^m
三連ブロック	S	I	7.85	65	0.35	0.084	0.073	0.067	0.058
〃	〃	II	7.85	65	0.35	0.036	0.035	0.035	0.033
〃	〃	III	7.85	65	0.35	0.047	0.044	0.043	0.041
ホロースケヤ	H	I	6.49	58	0.28	0.055	0.051	0.049	0.046
〃	〃	II	6.49	58	0.28	0.054	0.050	0.048	0.045
六脚ブロック	R	I	8.98	65	0.40	0.068	0.063	0.059	0.053
〃	〃	II	8.98	65	0.40	—	0.080	0.075	0.065
合掌ブロック	G	I	13.32	53	0.58	0.046	0.046	0.042	0.040

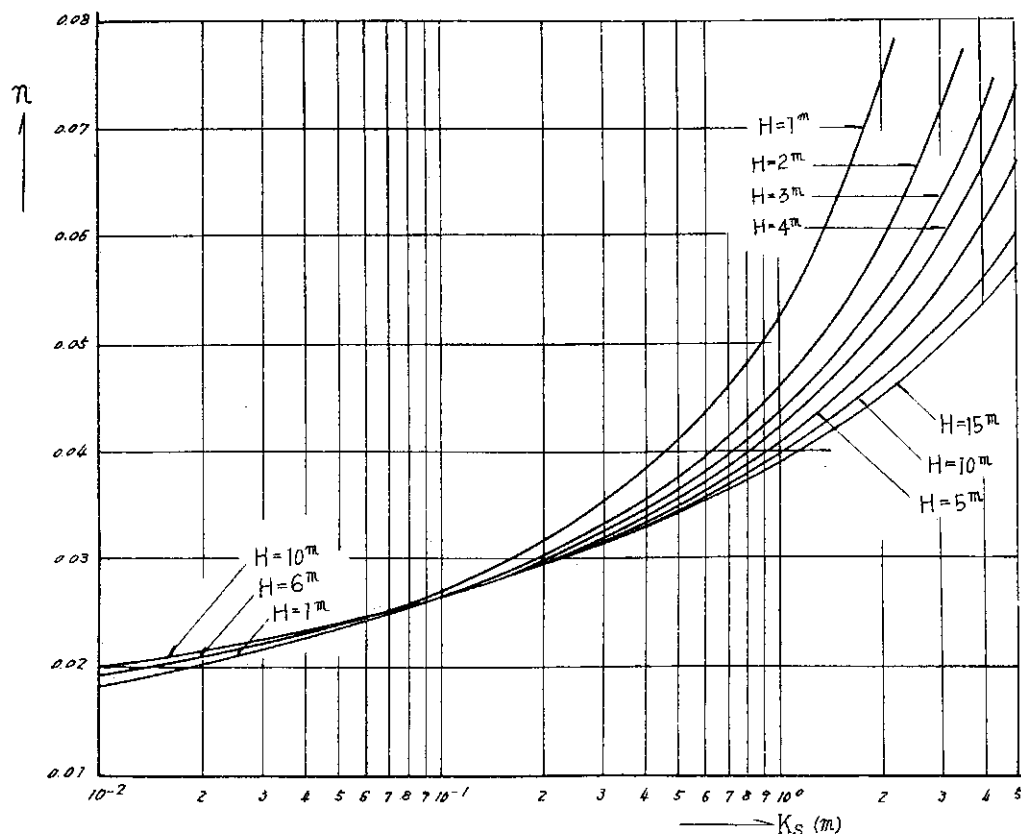


図-15 n と Ks の関係

からいえることは、最深河床より高いもの、低いものはほぼ半数ずつであること、高い低い分布の範囲はいずれもおよそ 2m であること、沈下している 60 例は高いものと低いもののいずれにも分布しているが、そのおよそ 80% は高い場合であるから、最深河床よりも高い施工の場合のほうが洗掘沈下しやすいこと、などである。

また、図-17 は施工後沈下した 60 例の Zs と掃流力関数 τ_* との関係を調べたものである。図によれば、あまり顕著ではないが高く施工されたもののほうが小さな掃

流力で洗掘沈下しやすい傾向がうかがわれる。

以上のようなことと、洪水時には大河川では洗掘深が数 m にも及ぶことがあるといわれていることも考慮すれば、根固工は十分に深い位置に設けることが必要であり、そうすることによってある程度は洗掘沈下に対処することができる。

5 ブロック重量調査

根固工を設計する上で、ブロック自体の安定性を予知

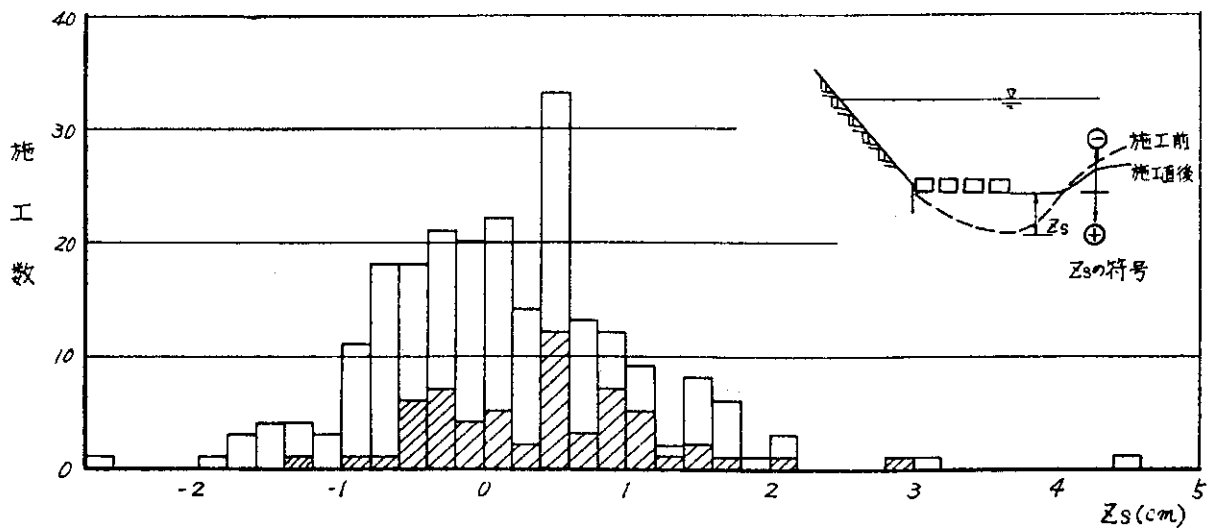


図-16

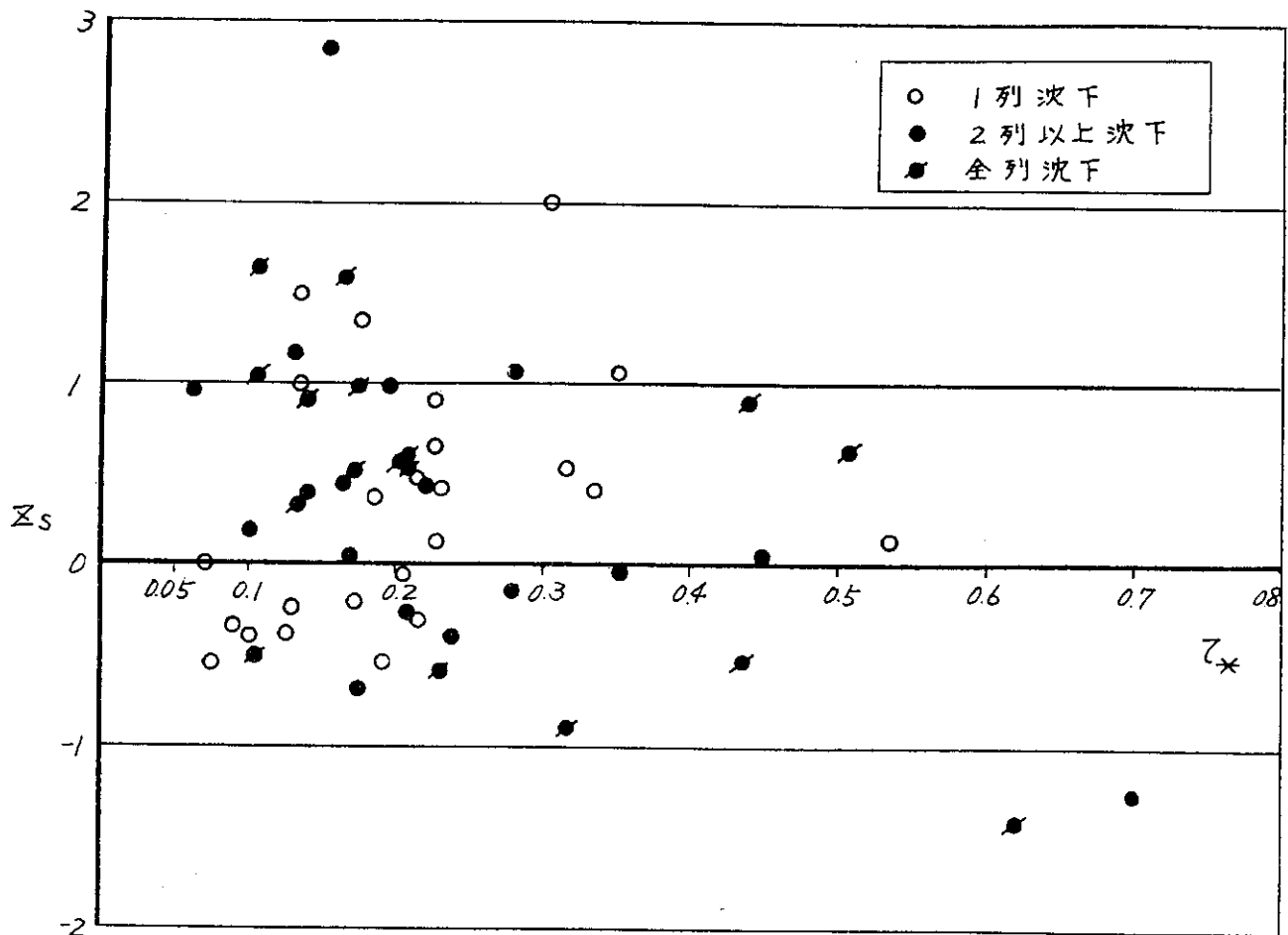


図-17

しておくことは、きわめて重要なことである。ここでは道内の代表的な急流河川に施工された既設の根固工およそ200例について、使用されているブロックの重量と河床材料の平均粒径、計画高水勾配、掃流力等との関係を調査し、種々の検討を加えてみた。

(1) ブロック重量と河床材料の平均粒径の関係

図-18は、ブロックの重量と河床材料の平均粒径との関係を施工数別に示したもので、縦軸に施工数、横軸に10mmごとに級別した河床材料の平均粒径をとり、重量別にプロットしたものである。

図によれば、河床材料が大きくなほど大きな重量のブロックを使用している傾向がうかがわれる。すなわち、河

床材料の平均粒径が 30 mm 程度以下では 1.2 ton 程度, 30~70 mm では 2 ton 以下のもの, 70 mm 以上では 2~3 ton のものをそれぞれの河状にあわせて使用している。

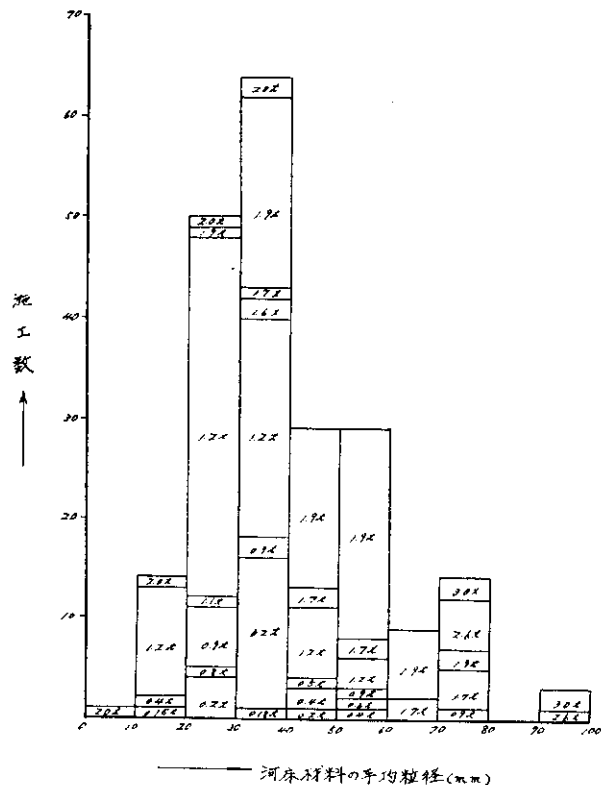


図-18

(2) 計画高水勾配とブロック重量の関係

図-19は、計画高水勾配と根固工の施工数との関係をブロック重量別に示したもので、縦軸に施工数、横軸に1/100ごとに級別した計画高水勾配をとり、重量別に表わしたものである。

この図によると、当然のことながら計画高水勾配の大きなほど重いブロックを使用している傾向があり、1/

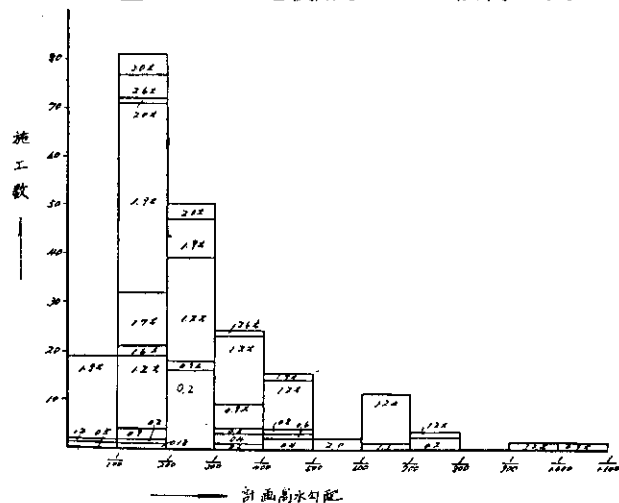


図-19

600よりも緩やかな場合にはほぼ 1.2 ton 以下, 1/200~1/600の範囲では 2.5 ton 以下で, 1/200よりも急な場合には 3 ton 程度というように河状にあわせた使い方をしている。

(3) ブロック重量と掃流力の関係

図-20は、ブロックの重量と掃流力との関係を示したもので、各重量のブロックの掃流力に対する使用範囲を表わしている。なお、本報文における掃流力は、重力の加速度を省略して水深 h と水面勾配 I の積の形で表現してあるので注意を要する。この図によると、ブロックの重量は、0.2~3.0 ton と幅が広く使用されており、掃流力は、0.005~0.055 m の範囲である。また、掃流力とブロック重量の関係は、掃流力の大きな所ほど重いブロックを使用している傾向がみられるが、例えば 2 ton のブロックは 0.01~0.05 m の掃流力に対して使用されているように非常に幅が広い。

次の図-21は、根固工の施工数と掃流力との関係をブロック重量別にまとめたものである。図によると掃流力が 0.01 m 以下ではほぼ 1 ton 程度, 0.01~0.02 m で 2 ton 以下, 0.02~0.035 m で 2.5 ton 以下, 0.035 m 以上では 3 ton 程度までのブロックを使用しているとみなすことができる。

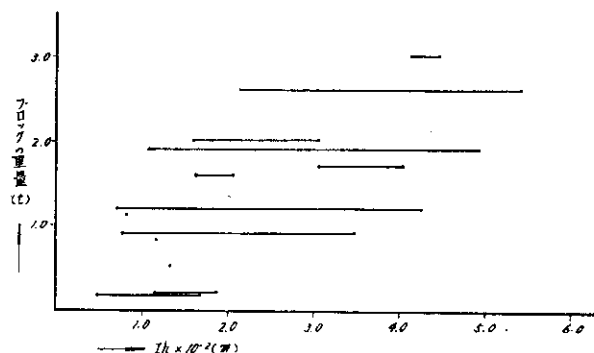


図-20

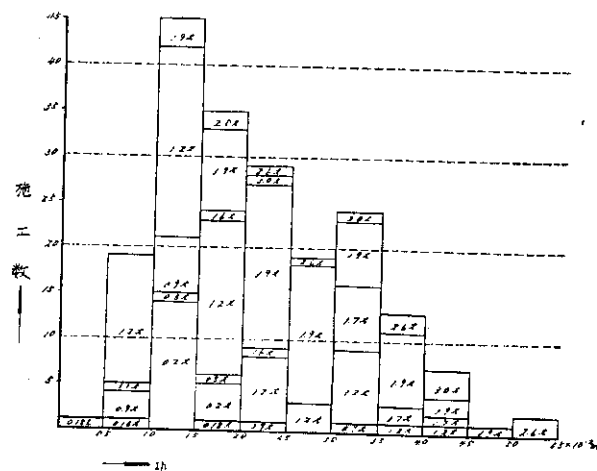


図-21

6 ブロックの移動限界流速

根固工の重量の選定のためには、流水によるブロックの移動開始時の流速、すなわち、移動限界流速がわからなければならない。そのため昭和47年度に現地河川での実験と模型実験によって移動限界流速について検討を行なったので、その内容について説明する。

実験は、豊平川において実物のブロックによる現地実験を行なったが、現地実験で不明の点については模型実験で補足するとともに、これら2つの実験結果を比較検討して模型実験結果の現地への適合性の確認も行なった。

(1) 現地実験

根固ブロックが流水の作用によって移動する形態としては、滑動する場合と転動する場合とが考えられるので、現地実験としてはこれら2つの場合について実験を行なった。

イ 滑動実験

滑動についての実験は、豊平川の高水敷で次のような方法で実施した。

コンクリートブロックは高水敷の砂利河原上に置き、これをブルドーザーで引張り、滑動時の張力をストレーンメータで測定した。根固ブロックは、実際には水中に布設され、流水の力によって動くものであるから、この実験によって求めた摩擦係数を用いて水中でのブロックの滑動限界流速の検討を行なった。

現地実験の結果の1例を図-22に示した。

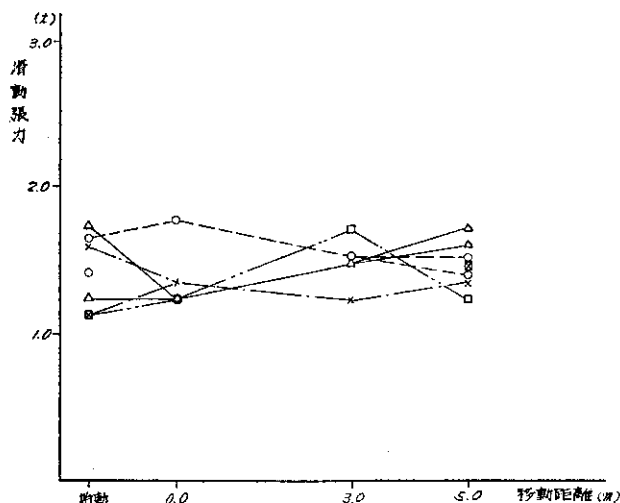


図-22 ブロック滑動試験 (2 ton 級)

ロ 転動実験

転動実験は、出水時におけるブロックの移動の多くは転動によるものと考え、豊平川の低水路に実物のブロックを設置して、出水によるブロックの移動結果と各種水

理量との関係を検討して転動限界流速を推定する目的で実施した。

実験は、低水路幅約 60 m、低水路深約 2.5 m で直線に整形した水路に4種類のブロックを設置して出水を待った。ブロック設置後およそ1ヵ月でピーク流量約 670 m³/sec の20号台風による出水があり、ほとんどのブロックは流下し、一部は埋没した。出水時の水深は約 2.5 m であったが濁流のためにブロックの移動を目視観察することはできなかった。なお、ブロック設置個所におけるピーク流量時の平均流速は、計算の結果によると 3 ton ブロックの設置個所で 5.42, 2 ton で 4.45, 1 ton で 4.69 m/sec であった。

(2) 移動限界流速に関する模型実験

ブロックの移動、特に転動については現地実験でその様子を目視観察できなかったため、十分な解明ができなかった。そのためブロックの転動限界流速を明らかにする目的で、代表的な4種類のブロックについて模型実験を行なった。

実験は、縮尺を 1/30 とし、モルタル製の模型ブロックを使用した。

イ 単体ブロックの場合

ブロックの単体が流水によって転動する限界の状態においては、流水の力によるブロックを回転させようとするモーメントとブロックの自重による抵抗モーメントが等しいから、転動限界流速は次式で表わされる。

$$Vc^2 = \frac{(Ws - w) \cdot W \cdot \cos\theta \cdot Xw \cdot 2g}{Cf \cdot w \cdot A \cdot ht/2} \quad \text{.....(15)}$$

ここで、Vc: ブロックの移動限界流速 (m), Ws: ブロックの単位体積重量 (ton/m³), w: 水の単位体積重量 (ton/m³), W: ブロック単体の体積, θ : 河床勾配, Xw: ブロックの水平重心距離 (m), g: 重力の加速度 (m/sec²), Cf: 抵抗係数, A: ブロック単体の流れの方向への投影面積 (m²), ht: ブロックの高さ (m) (15式の中で未知数は、抵抗係数 Cf のみであるから模型実験によって求めることができる。また、実用的には $\cos\theta = 1$ とし差し支えない。

模型実験の結果と(15式)から求めた 2 ton 級ブロックについての抵抗係数と転動限界流速および 2 ton 級ブロックの抵抗係数を用いて求めた 1, 3 ton 級ブロックの転動限界流速を表-2と図-23に示した。

ロ 敷設ブロックの場合

この場合は理論的に解明することができないのですべて模型実験によって検討を行なった。

実験は、単体の場合と同様に4種類のブロックについ

表-2 ブロックの移動限界流速一覧表

ブロック型	重量 (ton 級)	限界流速 (Vc)	抵抗係数 (Cf)	ブロック型	重量 (ton 級)	限界流速 (Vc)	抵抗係数 (Cf)
平面型	1	3.968	—	枠型	1	3.413	—
	2	4.458	1.589		2	3.856	0.684
	3	4.776	—		3	4.105	—
長方形型	1	3.561	—	六面型	1	3.262	—
	2	3.855	0.863		2	3.477	0.631
	3	4.069	—		3	3.830	—

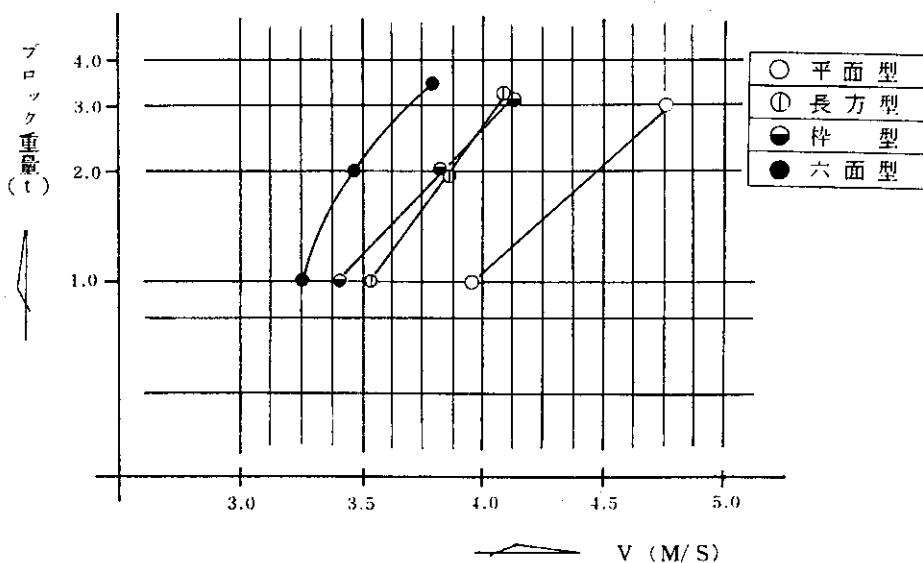


図-23 ブロックの移動転動限界流速

て縮尺 1/30, 延長 1 m, 幅 0.5 m 程度の面積に敷設して流量と河床勾配を変化させて行なった。ブロックの敷設方法は、これら 4 種類のブロックで最も多く使用されている方法によった。

表-3 は、この実験結果の一覧表である。表によると、ブロック相互のかみ合わせが強固と考えられるものは、

根固工の前面に移動してもかみ合わせがはずれないうちは崩壊せず、また、単体では移動しにくくてもかみ合わせが弱いものは移動が著しいといった結果が得られた。

以上のことから判断すると、根固ブロックはかみ合わせて布設することが望ましく、連結して布設すれば単にかみ合わせて布設するよりもより一層移動に対して安全

表-3 根固工移動実験一覧表 (布設の場合)

ブロック名	流量 (l/s)	河床 勾配	最大流下距離	流下時 ブロック 付近流速 (cm/s)	流下 ブロック 数	通水 時間	摘 要
六脚ブロック	45.90	1/200	200 cm	—	4個	—	3個は横に転動
ホロスケーア	74.62	1/200	縦横に滑動 2 cm	91	2個	40分後	
ホロスケーア	74.62	1/200	横に滑動 1 cm	123	1個	40分後	最前面の1個だけが、河床の変化によって傾いている。
三連ブロック	74.62	1/200	—	104	0	30分後	わずかに河床に変化がみられる程度でブロックには異状はない
三連ブロック	74.62	1/200	縦横に滑動 2 cm	100	1個	30分後	前面に1個だけ転動
六脚ブロック	45.90	1/200	横に転動 2 cm	84	3個	30分後	ブロックの最前面の数個が河床面の洗掘で数 cm 前面に転動

ブロック名	流量 (l/s)	河床 勾配	最大流下距離	流下時 ブロック 付近流速 (cm/s)	流下 ブロック 数	通水 時間	摘 要
六脚ブロック	74.62	1/200	∞	112	36個	30分後	ブロックだけ流され、河床の洗掘にはあまり変化がない。
合掌ブロック(1)	74.75	1/200	∞	103	12個	30分後	前面に転動しながら横に移動
合掌ブロック(2)	74.62	1/200	滑動 5 cm	94	3個	40分後	かみあいのはずれ、数 cm 移動
ホロスケーア	50	1/100	∞	109	22個	30分後	前列全部が前面に滑動
三連ブロック(横)	70	1/100	∞	130	8個	30分後	河床が洗掘され、ほとんどが崩壊状態にある。
六脚ブロック	40	1/100	200 cm	114	24個	30分後	河床はあまり変化はないが、やはりブロックだけがほとんど流出される。
合掌ブロック(2)	60	1/100	縦横に 10 cm	117	26個	—	1組列が完全にほぐされ、前面に転動し同時に横に移動

である。

7 ブロック重量の選定方法

根固ブロックは、同一の種類でもその大きさは何種類もあり、したがってそれぞれの現地に最も適した重量のブロックを選ぶことは、根固工の機能のみではなく、経済性の点からも大切なことである。

重量の選定の方法としては上記のようなことを考慮して5のブロック重量調査の結果および6のブロックの移動限界流速についての実験結果とを検討して、表-4に示すように河床材料の平均粒径、計画高水勾配、掃流力の3つの要素からそれぞれ重量を求め、それらの最大値を採用して洗掘沈下あるいは移動に対して十分に安全な重量となるようにした。

8 ブロックの工種別機能表

根固ブロックは、種類が多く組合わせ方法も種々あるため、根固工の設計で重量が定まってもどのような種類のブロックを採用するかは、むずかしい問題である。したがって、ブロックの種類を大別し、各種のブロックの代表的な機能を種類別、工種別に知ることが肝要で、これらの機能を総合的に判断して各現場に最も適したブロックを選ぶことが望ましい。

表-5は、上記のような判断の参考とするための代表的な4種類のブロックの各種の機能の一覧表である。なお、表の地被面積以下の項は、すべて重量が2 ton級のブロックについて比較したものであり、ブロックの諸元の名称は図-24に示すとおりである。また、特に地被面積について説明すると、これはブロックを布設した状態での水平面への投影面積のことである。

表-5は、すでに述べたように代表的な4種類のブロックのみの機能を示したものであるが、これら以外のブロックも多くは4種類のいずれかに類似しているから、他のブロックを採用する場合にも参考とすることができ

表-4

河床材料の平均粒径	ブロックの重さ
30 mm 以下	1.0 ton 級
30~100 mm	2.0 ton 級
100 mm 以上	3.0 ton かそれ以上

(計画高水勾配) ×(計画水深)	ブロックの重さ
$1.0 \times 10^{-2} \text{m}$ 以下	1.0 ton 級
$(1.0 \sim 2.0) \times 10^{-2} \text{m}$	2.0 ton 級
$(2.0 \sim 3.5) \times 10^{-2} \text{m}$	2.0~3.0 ton 級
$3.5 \times 10^{-2} \text{m}$ 以上	3.0 ton かそれ以上

計画高水勾配	ブロックの重さ
1/600 以下	1.0 ton 級
1/600~1/200	2.0 ton 級
1/200 以上	3.0 ton かそれ以上

ht: ブロック高
hw: 重心高
xw: 水平重心位置

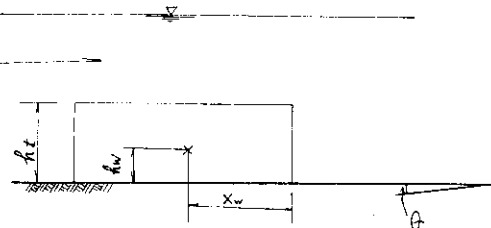


図-24

表-5 ブロック工種別機能表一覧表

効 用	六 面 型	長 方 型	平 面 型	枠 型
粗 度 係 数	配列を変えることにより最大0.080ぐらいのnを得ることができる。	配列を変えることにより砂れき河床のnぐらいから2倍以上のnまで得ることができる。	六面型、長方形よりn値は小さい。最大0.055ぐらいのnを得ることができる。	n値は小さく0.046程度である。しかし配列を粗にすれば大きなnを得ることができる。
種々の組合わせ	単体として種々の組合わせが可能である。特に乱積に適している。	長方形の方向を変えることにより組合わせを変化させる。乱積もできる。	2種類の組合わせがある。	単体として種々の組合わせが可能である。乱積にも適している。
ブロックの転動	単体として転動しやすい。	単体としての転動は設置方向により大きく変化する。	転動に対して最も安定している。	単体として転動しやすい。
屈 撓 性	屈撓性がある。	組合わせにより屈撓性を大きくできる。	ブロックの布設間隔をあけることにより屈撓性を大にできる。	屈撓性がある。
ブロックの前面洗掘	ブロックの先端部の洗掘は大きい。	ブロック先端部の洗掘は小さい。	ブロック先端部の洗掘は最も小さい。	ブロック先端部の洗掘は大きい。
地 被 面 積 (m ²)	1.824	1.600	1.686	1.904
水 衝 面 積 (m ²)	1.824	1.370	1.182	2.006
ブ ロ ッ ク 高 (m)	1.12	1.300	0.86	1.57
重 心 高 (m)	0.53	0.600	0.43	0.79
水平重心位置 (m)	0.35	0.500	0.72	0.69
移 動 転 動 限 界 流 速 (m/sec)	3.477	3.855	4.458	3.856

る。

あとがき

この調査研究は、まえがきにも述べたように、北海道開発局技術研究発表会の指定課題として、昭和45年度から4ヵ年計画でスタートし、今回、最終年度を迎えたものである。この間における調査研究は、河川工事課を中心として各開発建設部の多数の調査結果を在札の関係者が主体となっており、とりまとめ、現地調査を補足する実験は、河川研究室が主として担当して実施してきたものである。

今までの根固工の設計においては、その諸元を決める明確な手法に欠けていたようであり、また、施工後の効果あるいは挙動についての現地調査もおおざりにされていたように思われる。この4年間、種々の問題にどのようなとりくみ方をするか、議論はさまざまであったが、どうにか各種の問題を実用上さしつかえない程度まで解

明できたと思う。

これらの成果をもとにしてすでに「護岸根固工設計指針」を刊行したので、本報文とあわせて検討いただき、改めるあるいは追加すべき点について御指摘いただければ幸いである。

終わりに、長年月にわたり現地において本調査に携わった多くの方々に深く敬意を表して報文を終わる。

参 考 文 献

- 1) 北海道開発局、指定課題A(河川部門)；根固工に関する調査研究 昭和46年2月
- 2) 北海道開発局、指定課題A(河川部門)；根固工に関する調査研究 昭和47年2月
- 3) 北海道開発局、指定課題A(河川部門)；根固工に関する調査研究 昭和48年2月
- 4) 北海道開発協会；護岸根固工設計指針 昭和48年度版

昭和49年6月29日発行 編集兼 相 田 俊 郎

発行所 北海道開発局土木試験所
062札幌市豊平区平岸1条3丁目2番地
電 話 (841) 1111 (代表)

印刷所 興国印刷株式会社
札幌市中央区大通り西8丁目
電話 (241) 4323(代表)