

## 統計的手法による橋脚の洗掘防止工の安定度判定手法

STATISTICAL JUDGEMENT ABOUT STABILITY OF PROTECTION  
AGAINST SCOUR AROUND PIER

岡田勝也\*・村石 尚\*\*・国広敏彦\*\*\*

By Katsuya OKADA, Hisashi MURAISHI and Toshihiko KUNIHIRO

The stability of concrete-block work for the protection of the pier against the scour at flood is discussed by the way of the multivariate analysis and the judgement method of the stability for the concrete-block work is proposed.

For the work, the discriminant analysis is executed. In consequence, the discriminant function for the stability with the five variables is induced. Their variables are river width-depth ratio, river depth, friction velocity, river channel radius and block weight. While the adaptability limit about the discriminant function is also defined.

Lastly, the experimental heightening countermeasures of the stability is discussed, and the judgement method about the stability on the concrete-block work is proposed.

*Keywords: stability, concrete-block work, scour-protection, discriminant analysis*

## 1. ま え が き

鉄道橋梁の下部工は、その経年が60年を越える旧式構造物が数多く、老朽化が進んでいるのが実情である。このような旧式構造物は、もともと根入れが浅いうえに昭和40年代の河川の砂利採取をはじめとする環境変化による急激な河床低下により、基礎構造物としての安定度が低下しているものが多い。

こうした中で、列車走行の安全性を確保しつつ、地震や洪水などの異常外力に対しても十分な安全性を有するように鉄道橋梁を保守管理するためには、基礎構造物自体の力学的な強度特性や地耐力で代表される土質工学的特性とともに、洗掘や深掘れで代表される水理学的特性も考慮する必要がある。そのとき、橋脚の根入れ不足が問題になり、橋脚の安定性が損なわれる場合には、しばしば橋脚の洗掘防止工の投入が計画される。しかし、橋脚の洗掘防止工に関する設計基準は十分には確立されていない。

本研究は、橋脚の洗掘防止工の1つで、最近数多く用

\* 正会員 工博 鉄道総合技術研究所 主任研究員  
(〒185 国分寺市光町2-8-36)

\*\* 正会員 鉄道総合技術研究所 主任研究員(同上)

\*\*\* 正会員 西日本旅客鉄道(株)副課長(関西高速鉄道(株)出向)(〒530 大阪市北区大深町1-1)

いられるようになってきたコンクリートブロック工に着目し、実際に洪水に遭遇したコンクリートブロック工の実態調査に基づくデータを用いてその安定性を統計的手法によって明らかにし、ブロック工の洪水時の安定度判定手法を提案したものである。

## 2. 橋脚の洗掘防止工に関する過去の研究経過

橋脚周辺の局所洗掘に対する防護工法の1つとして、構造物の形状を改善して流況をよくする軽減工法が挙げられる。これは、橋脚をなるべく流線型にすることによって素因となる圧力勾配を小さくしようとするもので、石原<sup>1)</sup>、Laursen<sup>2)</sup>、Shenら<sup>3)</sup>をはじめ古くから多くの研究がある<sup>14)</sup>。また、橋脚前面の下降流を抑制しようとする目的で橋脚につばや粗度を付けたり、あるいは橋脚前面に杭を打設するような付帯構造物を設置する工法に関する研究は、Laursen<sup>2)</sup>、Shenら<sup>3)</sup>、田中<sup>4)</sup>、吉川<sup>5)</sup>、宇民<sup>6)</sup>らによって行われてきた<sup>14)</sup>。これらの橋脚の形状改善による工法、付帯構造物の設置工法は局所的な流れである渦流を軽減するものである。

これに対し、洗掘される河床領域を直接被覆する工法が洗掘防護工である。これには、コンクリートやアスファルト等で固めてしまう工法と、捨石やブロックで覆う工法がある。前者については、鈴木<sup>7)</sup>が橋脚周辺の領域の

流速などの水理学的検討によりその設計基準を提案するとともに、その有意性を実験によって確かめている。また後者の工法に関する研究は捨石工法に端を発する。Breusers<sup>8)</sup>は、CarstensやHancuの実験なども考慮し、極限洪水流速の2倍に相当する限界流速を有する玉石を捨石工として使用することを提案している<sup>14)</sup>。須賀ら<sup>9)</sup>はコンクリートブロック工の重量と各種の水理量との関係を現地の敷設例から明らかにするとともに、数多くの模型実験を実施し、コンクリートブロック工の重量と移動限界流速の関係をブロックの種類別に提案し、さらにブロック群に対する限界流速の割増率を求めた。村石ら<sup>10)</sup>は鉄道橋梁の実態調査から橋脚の被災事例をまとめ、根入れ比と根固め工の関係を解析した。その後、岡田ら<sup>11)</sup>は橋脚の洗掘防止工の1つであるコンクリートブロック工に着目して、実際に洪水に遭遇した現場データを集積し、洪水時の安定性に影響を与えられ考えられる要因を一変量あるいは二変量解析により抽出するとともに、それらの要因を用いて主成分分析を実行し、コンクリートブロック工の環境条件のパターン化を行った。また村上<sup>12)</sup>はコンクリートブロック工の水理模型実験と統計解析を行い、鉄道橋の洪水時被災機構と安全管理の手法を明確にし、中川ら<sup>15)</sup>は洪水時の橋梁の災害形態、河道形態と発生機構の立場から被災事例の分析を行った。

こうした研究にもかかわらず、橋脚の洗掘防止工として最近多用されるようになってきたコンクリートブロック工の安定性に関する研究は、洪水時の河川環境の多様性と局所流の複雑な水理現象の中で、いまだ汎用的な設計基準が確立されたとはいえないのが実情である。

### 3. 鉄道橋の洗掘防護工の実態調査とコンクリートブロック工の安全性に及ぼす要因の抽出

前述の2. で述べたように、洗掘防止工の設計基準は必ずしも明確にはなっていないので、鉄道橋の橋脚防護工の設計においても、どの程度の洪水に対して安定であるのかという定量的な評価がないまま、多くは経験的な方法によって決定されてきたのが実情である。そのため、洪水時の橋脚の安定性を洗掘防護工に頼らざるを得ないような場合には、その防災強度を把握することは困難であった。

そこで、鉄道橋の洗掘防護工に焦点を絞り、洪水に遭遇した主要な橋梁を中心に全国実態調査を実施した。実態調査の方法としては、鉄道橋梁を保守担当する現地機関にアンケート用紙を配布して、橋梁と防護工の実態に関する記入を依頼した。このアンケート用紙は各鉄道橋梁ごとに作成され、それぞれは、橋梁諸元（上部工、下部工の構造、種類など）、河道状況（河道の種類、河

道変動の傾向、砂州の移動・植生の有無、付近の構造物の有無）、防護工（種類、構造、施工範囲、施工年月など）を記入するとともに、過去の洪水の出水状況（出水年月、出水時の水位、出水時の流量、出水原因など）、そのときの防護工の変状状況（流出、沈下、不陸、変状なし）、変状後の処置を明記し、さらに以上の事項に関する全体略図、平面図、河床勾配断面図、防護工施工図、河床材料調査写真、防護工施工写真などを付加したアンケート用紙から構成されている。これらの用紙を現地機関から回収して、整理した後、後述の多変量解析に使用するデータについては詳細な現地調査を実施し、データの精度を上げることに努めた。

回収した171例のうち、当報告で対象とするコンクリートブロック工は、全数の約45%を占め（なお、その他の防護工は、蛇籠工・ふとん籠工約25%、張りコンクリート工が15%、シートパイル工約10%、捨石工約5%であった）、しかもこれは今後ますます多く用いられることになるものと予想される。

これらのコンクリートブロック工の洪水時の安定性に及ぼす要因としては、(a) 河川工学的、水理学的な性状、(b) 河川の地形地質的な性状、(c) 洗掘防止工の性状、に分けて考えることができる。

(a) に関するもののうち、河川工学的には、洪水中におかれたコンクリートブロック工の変動は、中規模河床変動のスケールである構造物周辺の河床変動が関係しているものと考えられる。一般にそれは式(1)のようになる<sup>16)</sup>。

$$Z_s/D = F(u_* d / \nu, u_*^2 / [(\sigma/\rho - 1)gd], h/d, h/\rho, D/d, \text{shape}) \dots \dots \dots (1)$$

ここに式(1)の右辺第1項は砂粒レイノルズ数、右辺第2項は無次元掃流力 $\tau_*$ とよばれ、 $u_*$ は摩擦速度、 $\nu$ は動粘性係数、 $\sigma$ は砂の密度、 $\rho$ は水の密度、 $D$ は橋脚幅、 $h$ は水深、 $d$ は砂の粒径、 $g$ は重力加速度である。一方、河川の水理学的な条件として、河川の大きさ、洪水の規模などを勘案して、ここでは、河川の幅 $B$ 、単位幅当たりの洪水流量 $Q/B$ 、川幅水深比 $B/h$ 、水深 $h$ 、流速 $v$ などを考慮することにした。その結果、(a)の河川工学的、水理学的な性状に関係するものとして、 $u_*$ 、 $\tau_*$ 、 $h/d$ 、 $h$ 、 $B$ 、 $v$ 、 $Q/B$ 、 $B/h$ と $d$ を選択することにした。

また(b)に関係するものとしては、河床勾配の逆数 $1/I$ 、河川の湾曲度としてその曲率半径の逆数 $1/r$ と交角 $\theta$ を用いることにした。

さらに、(c)の洗掘防護工の性状については、ブロックのかみ合わせの程度を考慮した種類のランク付け $i$ とブロックの重量 $W$ を变量として代表させることにした。すなわち、ブロック工には多くの種類があるが、ブ

ロック工が変状し始めたり、流失する直前には、ブロックのかみ合わせや緊結の程度が大きく現象に左右するはずであるから、かみ合わせや緊結の程度を考慮して分類した。また、コンクリートブロック工の設置状況として、平面的な施工範囲や、河床面からの埋没高（突出高）、層高などが考えられるが、前者は鉄道橋梁を対象にするかぎりはおおむね線路中心から2~3D以内の範囲にあることが多く、また後2者は洪水前の状態を正確に記すデータもないことから、多変量の因子としては扱わないことにした。

結局、上述の (a), (b), (c) から、多変量解析を行うための変量としては、次式に示す14個が選択され、コンクリートブロック工の安定度Zは式(2)で与えられるものと仮定した。すなわち

$$Z=f(u_*, \tau_*, h/d, h, B, v, Q/B, B/h, 1/I, 1/r, \theta, d, i, W) \dots \dots \dots (2)$$

である。ここに、 $u_*$ は摩擦速度、 $\tau_*$ は無次元掃流力、 $h/d$ は水深径径比、 $h$ は水深、 $B$ は川幅、 $v$ は流速、 $Q/B$ は単位幅当たりの流量、 $B/h$ は川幅水深比、 $1/I$ は河床勾配（逆数）、 $1/r$ は河川湾曲度（曲線半径の逆数）、 $\theta$ は河川湾曲度（交角）、 $d$ は河床材料粒径、 $i$ はブロックの種類、 $W$ はブロックの重量、である。

これらの因子に基づいて実態調査表に記された項目を再整理してみると、記載漏れのデータ、明らかに間違いのデータなどがあり、多変量解析の実行に耐え得るデータ数は51例になった。

4. 判別分析の実行

鉄道橋梁のコンクリートブロック工の実態調査において、コンクリートブロック工が洪水中でも流失して逸散することなく、ブロック相互が不陸したり、不等沈下を起こすなどの変状を生じなかったものを安全のグループ $G_1$ とし、洪水中に流失したり、かみ合わせがはずれて洪水前の敷設状況を維持できず、不陸・沈下などの変状が発生したものを流失したグループ $G_2$ と定義する。そして、3.に示した $n=14$ 変量を用いて判別分析を実行し、コンクリートブロック工の安定性解析を行う。なお使用したデータ数は前述のように51例であるが、これらのデータをアンケート調査結果と、個々に実施した詳細調査結果に基づき整理すると、各母集団 $G_1$ と $G_2$ のデータ数 $N$ はそれぞれ34データと17データである。すなわち、判別解析に用いる変状データは全データの33.3%である。一方このデータの原データである3.で述べた全国実態調査に基づく洪水に遭遇した171例の洗掘防護工に対して、被災を受けた防護工の確率は30.4%であった。これは鉄道橋梁における洗掘防護工の洪水時の一般的な被災確率であると考えられるが、上述の判別解

表一 各変量の平均値  $\mu_{ai}$

	$G_1$ (安全)	$G_2$ (流失)	$G_1+G_2$	単 位
$1/I$	$5.13 \times 10^2$	$3.30 \times 10^2$	$4.52 \times 10^2$	1
$h$	4.60	5.62	4.94	m
$B$	$1.44 \times 10^2$	$1.99 \times 10^2$	$1.63 \times 10^2$	m
$d$	$2.92 \times 10^1$	$3.06 \times 10^1$	$2.96 \times 10^1$	mm
$v$	3.81	5.05	4.22	m/sec
$\tau_*$	0.55	0.60	0.56	1
$B/h$	$3.30 \times 10^1$	$4.11 \times 10^1$	$3.57 \times 10^1$	1
$h/d$	$5.23 \times 10^2$	$2.93 \times 10^2$	$4.46 \times 10^2$	1
$u_*$	0.35	0.47	0.39	m/sec
$Q/B$	$1.30 \times 10^1$	$1.86 \times 10^1$	$1.49 \times 10^1$	$m^3/sec/m$
$i$	2.79	3.00	2.86	-
$W$	3.05	2.20	2.77	$\times 10.2$ kN
$1/r$	$2.22 \times 10^{-3}$	$4.60 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-3}$	1/m
$\theta$	$4.97 \times 10^1$	$2.21 \times 10^1$	$4.05 \times 10^1$	°

表二 各変量の標準偏差  $\sigma_{ai}$

	$G_1$ (安全)	$G_2$ (流失)	$G_1+G_2$	単 位
$1/I$	$9.10 \times 10^2$	$4.33 \times 10^2$	$7.87 \times 10^2$	1
$h$	1.38	2.23	1.70	m
$B$	$1.15 \times 10^2$	$1.23 \times 10^2$	$1.17 \times 10^2$	m
$d$	$1.67 \times 10^1$	$1.59 \times 10^1$	$1.64 \times 10^1$	mm
$v$	1.60	2.32	1.87	m/sec
$\tau_*$	1.06	0.57	0.93	1
$B/h$	$2.33 \times 10^1$	$2.84 \times 10^1$	$2.51 \times 10^1$	1
$h/d$	$1.29 \times 10^3$	$4.02 \times 10^2$	$1.08 \times 10^3$	1
$u_*$	0.14	0.24	0.18	m/sec
$Q/B$	8.47	$1.46 \times 10^1$	$1.09 \times 10^1$	$m^3/sec/m$
$i$	1.61	1.62	1.61	-
$W$	2.71	1.26	2.33	$\times 10.2$ kN
$1/r$	$3.14 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-3}$	1/m
$\theta$	$4.39 \times 10^1$	$3.91 \times 10^1$	$4.24 \times 10^1$	°

析に用いる変状データの確率33.3%にはほぼ相当する。

各変量 $x_i$  ( $i=1, n$ )の平均値 $\mu_{ai}$ と標準偏差 $\sigma_{ai}$ は母集団 $G_a$  ( $a=1, 2$ )ごとに表一、2のようにまとめられる。母集団 $G_1$ と $G_2$ において、平均値のみを比較すれば、河床勾配の逆数 $1/I$ 、水深径径比 $h/d$ 、ブロック重量 $W$ 、河道曲率半径の逆数 $1/r$ 、とその交角 $\theta$ は $G_1$ の方が大きく、水深 $h$ 、川幅水深比 $B/h$ 、流速 $v$ 、摩擦速度 $u_*$ 、単位幅流量 $Q/B$ は $G_2$ の方が大きくなっており、また河床材料粒径 $d$ 、無次元掃流力 $\tau_*$ 、ブロックの種類平均値は $G_1$ 、 $G_2$ においてほぼ等しい値を有する。

さて、上述の14個の各変量が洪水時のブロック工の安定性にどのような重みを有しているかは、表一と表二からは判定することはできない。一方、ブロック工の安定度判定法としては、より少ない変量で安定度が判定できれば現場での適用に有効なものとなる。そこで、判別解析の実行においては、変量を逐次選択しながら最適な判別関数を求めていくStepwise-methodの1つである変数増減法を用いることにした。その結果、14個

の变量から5变量が選択され、次の線形判別関数が求められた。すなわち、摩擦速度  $u_*$  (m/s)、河道曲率半径の逆数  $1/r$  (1/m)、ブロック重量  $W$  (10 kN)、水深  $h$  (m) と川幅水深比  $B/h$  を用いて

$$Z = -4.47 u_* + 153/r + 0.177 W - 0.343 h - 0.0218 B/h + 3.465 \dots \dots \dots (3)$$

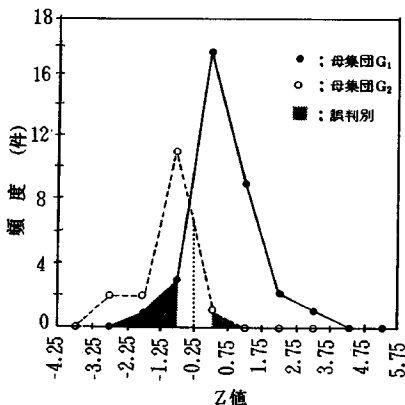
が得られた。式(3)は母集団  $G_1$  と  $G_2$  の全母集団に対する  $Z$  の变量が0、分散が1になるように正規化されたものである。なお、式(3)の右边に示される变量の順に判別式  $Z$  に与える影響は小さくなっていく。すなわち  $u_*$  がマハラノビスの距離に最も大きい影響を与え、選ばれた5变量のうちでは  $B/h$  が最も小さいことになる。これら5变量によって母集団  $G_1$  と  $G_2$  の2群の判別ができるかどうかの検定は、

$$F = (f - p + 1) / pf \cdot n_1 n_2 / (n_1 + n_2) \dots \dots \dots (4)$$

が自由度  $(p, f - p + 1)$  の  $F$  分布をすることをを用いて行われる。ここに  $n_1$  と  $n_2$  は母集団  $G_1$  と  $G_2$  のデータ数、 $f = n_1 + n_2 - 2$  であり、 $p$  は变量数である。式(3)では  $n_1 = 34$ 、 $n_2 = 17$ 、 $p = 5$  であり、自由度(5, 45)に対して  $F = 3.62$  となる。 $F$  分布1%点においては  $F_{0.01} = 3.47$  であり、危険率1%において母集団  $G_1$  と  $G_2$  の2群の判別は有意となる。

さて、式(3)の5变量のうち、 $u_*$ 、 $h$  と  $B/h$  の係数は負であるから、摩擦速度、水深と川幅水深比が大きくなれば  $Z$  の値は小さくなり、コンクリートブロック工の流失の危険が増加することになる。逆に  $W$  と  $1/r$  の係数は正であるから、ブロック工の重量が大きくなり、河道曲率半径が小さくなればなるほど  $Z$  の値は大きくなり、ブロック工の安定性は向上することを示している。こうした傾向は3.で述べた一変量解析の結果と定性的に一致する。

式(3)に基づく安全なグループ  $G_1$  と流失したグループ  $G_2$  の  $Z$  の平均値は  $Z_{G1} = 0.510$ 、 $Z_{G2} = -0.993$  であ



図一 母集団  $G_1$  と  $G_2$  の  $Z$  値の頻度分布

表一 判別分析の正答率

判別 母集団	正答率 (%)	判 別		正規分布 正答率(%)
		安 全	流 失	
$G_1$ 安全	85.3	29	5	81.2%
$G_2$ 流失	94.0	1	16	81.2%
$G_1 + G_2$	88.2	30	21	81.2%

り、その頻度分布は図一1のようになる。 $G_1$  と  $G_2$  の標準偏差は、 $\sigma_{G1} = 0.998$ 、 $\sigma_{G2} = 0.843$  となるから、ミニマックス解による判別点  $Z_k$  は、

$$Z_k = (\sigma_{G1} Z_{G2} + \sigma_{G2} Z_{G1}) / (\sigma_{G1} + \sigma_{G2}) \dots \dots \dots (5)$$

から、 $Z_k = -0.254$  となる。このとき、誤判別の確率は表一3のようになるが、グループ  $G_1$  (安全) でありながら流失と判別されるのは14.7%であり、グループ  $G_2$  (流失) でありながら安全と判別されるのは6.0%である。すなわち正答率でいえば、前者で85.3%、後者で94.0%であり、全体でいえばコンクリートブロック工の51例中、44件は正しい判別解を得ることができ、88.2%の正答率を確保できそうである。なお、図一1を正規分布としたときの正答率は81.2%となる。

図一1では判別点を  $Z_k = -0.254$  としているが、これを  $Z_k = 0$  となるように変形すれば、新しい判別関数  $Z_0$  は、

$$Z_0 = -4.47 u_* + 153/r + 0.177 W - 0.343 h - 0.0218 B/h + 3.719 \dots \dots \dots (6)$$

と置くことができ、

$$\left. \begin{aligned} Z_0 > 0 &\dots\dots\dots \text{安全} \\ Z_0 \leq 0 &\dots\dots\dots \text{流失} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

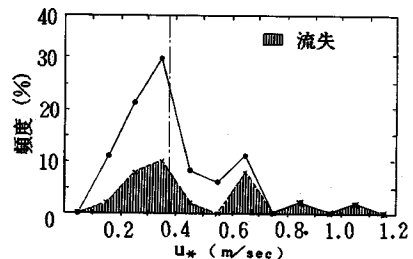
なるコンクリートブロック工の安定性に関する判別関数が得られた。

### 5. 判別関数の適用限界

前述の式(6)の判別関数は統計的に算出されたものであり、おのずと適用限界を有するものである。ここでは各変量の適用限界について考察する。

#### (1) 摩擦速度 $u_*$

判別関数の第1項は  $u_*$  であるがその頻度分布は図一



図二 摩擦速度  $u_*$  の頻度分布

2に示すように、0.1~1.1 m/sに及んでいる。 $u_*$ が大きい橋梁は、急勾配で、水深の大きい領域のものである。図-2に示す統計データとして $u_* > 0.7$ に位置するのは2例しかなく、これら2例のブロックは流失したグループ $G_2$ に属しており、判別結果は正答を示した。一方、流失しなかったグループ $G_1$ はすべて $u_* < 0.7$ であり、データに偏りがみられる。これらを考慮して摩擦速度の適用限界を $u_* \leq 0.7$  m/sとするのがよい。

(2) 河道曲率半径  $r$

判別関数の第2項は $r$ の逆数に比例する。一方、現実に施工されているブロックの重量 $W$ は図-3のよういくつかの例外を除き60 kN程度以下であるが、式(6)の係数を比較することにより、 $W=60$  kNに相当する河道曲率半径は $r=144$  mである。すなわち判別関数の $B/h, h, u_*$ が同じ条件ならば、 $r \leq 144$  mは $W > 60$  kNの重みを有することになる。したがって $r$ が小さくなりすぎると式(6)の $Z_0$ はかなり小さくなり、安全過ぎる傾向を与えることになる。この傾向を判別分析の統計データからみてみると、 $r < 150$  mの例は3例あり、これらすべては安全グループ $G_1$ に属しており、判別結果も安全となっている。以上を考慮しブロック重量 $W$ との兼ね合いから河道曲率半径の適用限界を $r \geq 150$  mとした。

(3) ブロック重量  $W$

ブロック重量 $W$ は、判別関係の中で橋梁を保守する側が変更できる唯一の变量である。図-3によれば、 $W=150$  kNの一例を除き、他は $W < 70$  kNであるが、施工実績によれば場所打ちコンクリートブロックでは一単位が700~800 kN、異型コンクリートブロックでは200 kNに及ぶものがある。一方流失したブロックを後述の式(13)により安全な領域に入れるためにはブロック重量を $W=180$  kN程度にしなければならない。これらの施工実績と判別分析の結果を考慮して、ブロック重量の最大値の限界として一応 $W < 200$  kNとするのがよいと考えられる。

上述の考察は $W$ の最大値に対する適用限界に関するものであるが、 $W$ の最小値についても検討を加える。

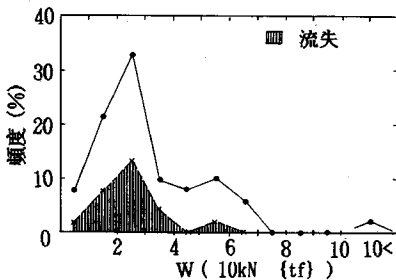


図-3 ブロック重量の頻度分布

それは少なくともブロック重量が限界掃流力以上でなければならないことであり、式(1)の右辺第2項の無次元掃流力が $\tau_* < 0.05$ を満足しなければならない。 $\sigma/\rho = 2.3$ 、ブロックを球であると仮定すれば、

$$W > 4370 h^3 I^3 \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。さらに判別分析に用いた統計データを考慮すれば、式(8)に加えて $W \geq 5 \sim 10$  kNの条件を考慮するのがよい。

(4) 水深  $h$

判別関数の第4項は $h$ に比例するが、水深に関連するものとしてはこのほかに川幅水深比 $B/h$ 、摩擦速度 $u_*$ がある。ここでは $h$ だけの一变量について適用限界を考える。図-4によれば、 $2 \leq h \leq 10$  mに分布しており、特に異常な傾向はみられない。したがってこれを水深 $h$ の適用限界としてよいであろう。

(5) 川幅水深比  $B/h$

判別関数の第5項の $B/h$ も(4)と同様水深に関係する。 $B/h$ の頻度分布は図-5に示すように3例を除いて $B/h < 80$ である。このうち、 $B/h=129$ の橋梁は安全グループ $G_1$ に属しているにもかかわらず、流失と判定し誤判別となったが、 $B/h=100$ 前後の2例は流失グループ $G_2$ に属するものを流失と正しく判別している。これらの実情を踏まえ、川幅水深比の適用限界として $B/h \leq 100$ とすることにした。

(6)  $u_*, h, B/h$ の関連

水深が関連する $u_*, h, B/h$ は上述の(1),(4)と(5)のように一变量として適用限界を定めるとともに、3項を総合した適用限界を考慮する必要がある。いま、式(6)の判別関数を水深の関係する項とそうでない項に分け、判別点を $Z_0=0$ とすれば、

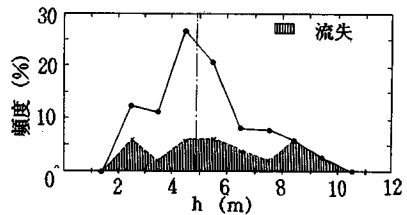


図-4 水深 h の頻度分布

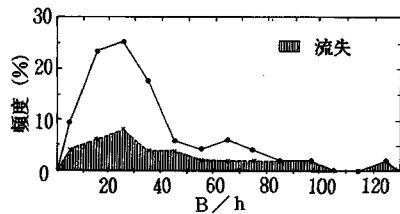


図-5 川幅水深比 B/h の頻度分布

表-4 判別関数の適用限界

$W(\times 10 \text{ kN})$	$2.0 \geq W \geq 0.5 \sim 1.0$ $W > 4.370 h^2 I^3$
$r \text{ (m)}$	$r \geq 1.50$
$u_* \text{ (m/sec)}$	$u_* \leq 0.7$
$h \text{ (m)}$	$1.0 \geq h \geq 2$
	$h > h_c = \frac{0.00190(B/h_c)^2}{(7.00\sqrt{I} + \sqrt{48.9I + 0.0299 B/h_c})^2}$
$B/h \text{ (l)}$	$B/h \leq 100$

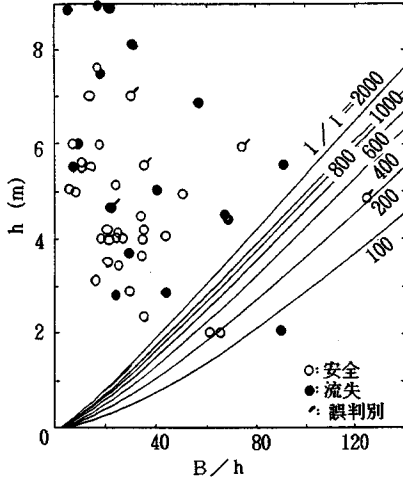


図-6 川幅水深比  $B/h$  と水深  $h$  の関係

$$153/r + 0.177 W + 3.719 = 4.47 u_* + 0.343 h + 0.0218 B/h \dots\dots\dots (9)$$

となる。  $u_*$  において径深  $R$  は  $B/h$  が大きければ  $R=h$  とおくことができることを考慮し、式 (9) の右辺を  $y$  とおいて、  $h$  で微分すれば、

$$dy/dh = 7.00(I/h)^{0.5} - 0.0218 B/h^2 + 0.343 \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここで  $dy/dh=0$  に対して  $h^{-0.5}$  の2次式として解くと、  $y$  の極小値を与える限界水深  $h_c$  は、

$$h_c = 0.019(B/h_c)^2 / [7.00 I^{0.5} + \sqrt{48.9 I + 0.0299 B/h_c}]^{0.5} \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。ここにおいて水深は  $h > h_c$  の場合のみ工学的には意味をもつことになる。なぜならば式 (9) からわかるとおり、左辺の  $r$  が一定の場合、  $h < h_c$  のときには水深  $h$  が大きくなると必要なブロック重量  $W$  が小さくなり、実情に合わなくなるからである。この極小値  $h_c$  は図-6に示すようになり、河床勾配  $I$  の曲線より上方の領域が判別関数の適用範囲となる。

以上の (1)~(6) の考察をまとめると判別関数の適用限界は表-4のようになる。

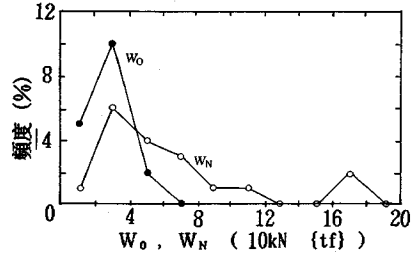


図-7 均衡重量  $W_N$  の頻度分布

## 6. 判別関数によるブロック工の均衡重量

### (1) 流失ブロック工の均衡重量

コンクリートブロック工の洪水時の安定性は式 (6) の判別関数に基づいて決定される。4. で用いた流失したグループ  $G_2$  は17例であるが、これらのコンクリートブロック工 (ブロック重量  $W_0$ ) が流失せずに安全であるためには、式 (6) と式 (7) から、

$$Z_0 + 0.177(W_N - W_0) \geq 0 \dots\dots\dots (12)$$

である必要がある。ここに、  $W_N$  は安全であるための均衡重量である。式 (12) から、

$$W_N \geq W_0 - Z_0/0.177 \dots\dots\dots (13)$$

が得られる。

式 (13) に基づいて均衡重量  $W_N$  を計算すれば、図-7のようになる。これによれば流失した10~50 kNのブロックは、80~100 kNと重くすることにより流失を免れる可能性が生じることになる。

### (2) 台風10号による東海道線富士川橋梁災害への適用

上述の流失したコンクリートブロック工の17例に加えて、昭和57年8月の台風10号による東海道線富士川橋梁災害の際、施工してあったコンクリートブロック工の安定性について判別関数を用いて若干の考察を加える。この橋梁データは本報告で用いた統計データの母集団  $G_1$ ,  $G_2$  のいずれにも入っていないものである。当橋梁の4P橋脚は台風10号のもたらした富士川の洪水により倒壊する大被害を受けた。当橋脚付近には40 kN異型平面積ブロック1層積、80 kNの直方体型ロックの乱積みならびに横積み2層、そして120 kNの直方体型ブロックの乱積みあるいは縦積み (一部2層積) が施工されていたが、  $Q=14400 \text{ m}^3/\text{s}$  の流量に対して各ブロックは一部を残して流失したものである<sup>13)</sup>。平均河床を基準にしたときの水深を  $h=10 \text{ m}$  としたとき、  $B/h=54$  となり、また河床勾配は  $I \approx 1/270$ 、径深  $R=5.0 \text{ m}$  であるから摩擦速度は  $u_* = 0.43 \text{ m/s}$  となる。また  $r=\infty$  とすれば、ブロック重量  $W=40, 80, 120 \text{ kN}$  に対して式 (6) からそれぞれ  $Z_0 = -2.1, -1.4, -0.7$  となり

式(7)の判別点を参照することにより、これらのブロックは流失と判定され、実際の状況と一致することになる。この洪水に対する必要なブロック重量を式(13)から求めると  $W_n=160$  kN が得られる。このように富士川橋梁災害時のブロックの流失についてもきわめて大略の仮定によるものの、式(6)の判別関数は一応正答を与えるが、 $W_n=160$  kN に対する実績はないので、このブロック重量が  $Q=14\,400$  m<sup>3</sup>/s に耐え得るかどうかは明らかではない。

## 7. 判別分析の誤判別の検討

判別関数で誤判別したデータは、母集団  $G_1$  では5橋梁があり、母集団  $G_2$  では1橋梁であった。前者のグループは本来安全であったものが、判別関数により流失と誤判別されたものであり、後者は本来流失しているものが、判別関数により安全と誤判別されたものである。

この誤判別された6橋梁のデータを原データに戻って再調査することは、判別関数に現われない別の因子を抽出できる可能性を残すものである。そこでここでは、この6橋梁について、若干の考察を加えることにする。

### (1) 上越線第1利根川橋梁

昭和57年8月の台風10号の出水 ( $Q=3\,600$  m<sup>3</sup>/s) により、桁下2.2m (徐行水位) となったが、本橋梁(上り線)の2Pと3Pに施行してあった十字ブロックによる根固め工の端部がわずかに沈下した程度で、実質上は変状なしと判断したものである。

しかし判別分析結果は  $Z_0=-1.44$  で、当ブロック工は流失すると判定される。この誤判別になった理由としては、橋脚のまわりには張コンクリートを打っていたため、橋脚周辺に起こる馬てい型渦による河床の剝離現象がこの張コンクリートによって抑制されたことによるものと考えられる。十分な間詰めのない十字ブロックが橋脚周辺に並べてあるだけであれば、判別式の示すように流失していたかもしれないと想像される。

また写真-1に示す十字ブロックの不整はブロック側面の浸食洗掘によって生じた沈下を示しており、ブロックが単体として運動したことを物語っている。したがって、十字ブロックではブロック間の連結を十分施し、ふとん籠などによる間詰りを適時考慮する必要がある。

### (2) 信越本線下碓氷川橋梁

洗掘防止工としては右岸側の11~12Pにはくさび型ブロックを施工し、かつ、左岸側には木工沈床およびふとん籠工を施工していたが、昭和57年8月の台風10号の出水 ( $Q=2\,600$  m<sup>3</sup>/s) により桁下1.5m (停止水位) となり、木工沈床とふとん籠工は一部流失したが、くさび型ブロック ( $W=30$  kN) は流失しなかったものである。

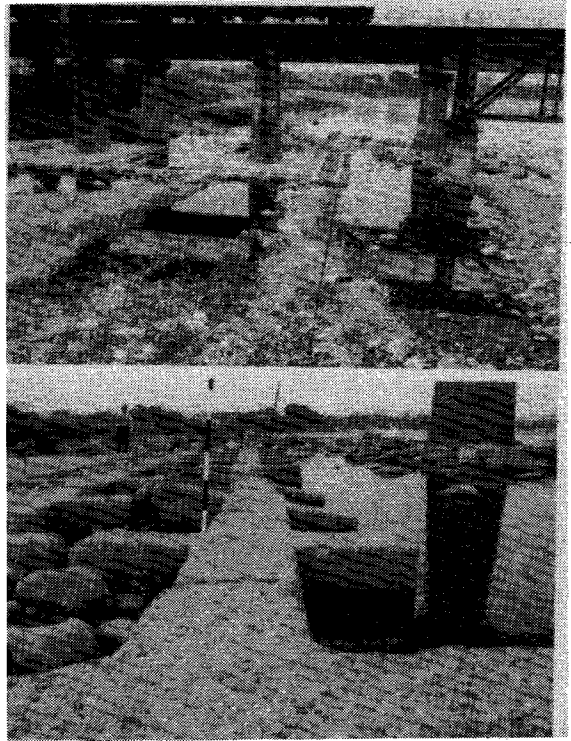


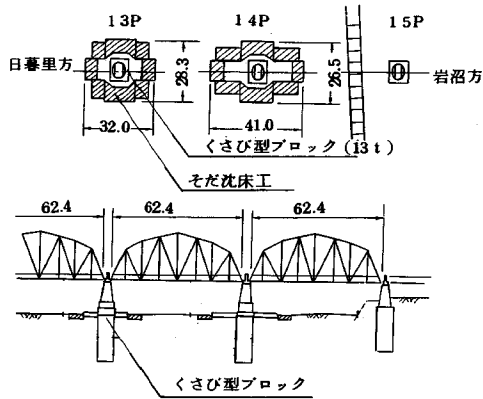
写真-1 上越線第1利根川橋梁3P~4Pの十字ブロック工の不整

コンクリートブロック工に対する判別関数によれば、当くさび型ブロックは、 $Z_0=-0.61$  となり、流失と判別されたが、誤判別となった理由としては次のように考えられる。すなわち、くさび型ブロックの下流側に入っていた十字ブロックがくさび型ブロックの下流端における洗掘を防止したために流失に至らなかったということである。なお、下流端の十字ブロックは不陸を生じているが、河床変動になじんだ形状で沈下したことにより、流失されずにすんだものと判断される。

### (3) 常磐線阿武隈川橋梁

本橋梁付近では川幅が640mになっており、流速も小さく、緩流部 ( $I=1/2\,000$ ) の大河川となっている。洗掘防止工としては、図-8に示すように、昭和47年、48年に根固工としてくさび型ブロック ( $W=13$  kN) が施工され、昭和52年にはそのブロックのまわりにそだ沈床工が施工された。昭和56年8月の台風15号による出水 ( $Q=3\,700$  m<sup>3</sup>/s) に対して桁下4.6mまで水位がきたが、ブロックの変状はなかったものである。

これに対する判断分析結果は、 $Z_0=-1.29$  となり流失と判定され、誤判別となった。判断分析を行った母集団  $G_1$  と  $G_2$  に占める当橋梁の  $d=1$  mm と  $I=1/2\,000$  の関係、あるいは  $B/h=129$  の位置づけは、母集団中



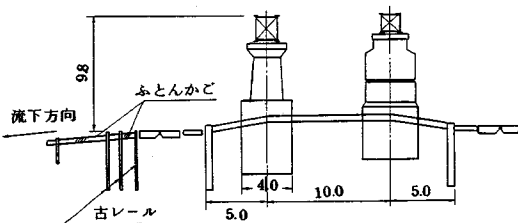
図—8 常磐線阿武隈川橋梁の平面図と側面図

心からかなり離れている。したがって、沖積低地の緩流河川で  $B/h$  がきわめて大きい領域に、式(6)の判別関数を使用することは限界があることを示すものである。5.(5)ではその適用限界を  $B/h \leq 100$  にしたことと呼応している。

#### (4) 中央本線多摩川橋梁

根固め工として昭和42年に直方体型ブロック ( $W=60$  kN) が帯工型式で施工されており、昭和49年9月の台風16号による出水 ( $Q=6000$  m<sup>3</sup>/s) では、大きな変状はなかったものである。

一方、判別分析結果では、 $Z_0=-0.63$  で当ブロックは流失すると判定し、誤判別となった。しかし上述のように昭和49年9月の台風では変状がなかったものの、昭和57年8月の台風10号では桁下水位が前者より0.3 m高くなり、桁下3.0 mまで達しており、18Pと2A下流部のブロックの一部が沈下、流失するに至った(このときの判別関数値は  $Z_0=-0.65$  である)。これらの結果を考慮すれば、洗掘防止工は非常に不安定な領域になっていたものと考えられる。また、ブロック工の施工状況から若干の考察を加えると、橋梁は図—9に示すようにイコス工法で周辺が補強されており、それを取り囲むように直方体型ブロックを施工し、かつその下流方には古レールを  $l=5$  m 打ち込んだふとん箆によってブロックの下流部の洗掘を防止するよう工夫されていた



図—9 中央本線多摩川橋梁の断面図

が、これらが有機的に作用して台風時の出水に大きく抵抗する効果を発揮したものであろう。

#### (5) 山陰本線大屋川橋梁

大屋川の川幅は、本橋梁付近では、200 mに達し、河道は直線である。低水路の幅は90 m程度であるが、河道中央部には植生のある固定化した砂州があり、みお筋は2つに分かれている。中央部の4P~6Pと8Pには昭和46年と48年に十字ブロックが、みお筋にあたる2P~3Pと7P~8Pには昭和54年にくさび型ブロックが投入されていた。

昭和54年10月の台風20号の出水 ( $Q=1800$  m<sup>3</sup>/s) により桁下0.9 mまで水位が上昇した際、8Pの十字ブロックの一部が沈下し、流失したが、くさび型ブロックは流失せず、摩耗したと報告されている。

一方、判別分析結果では、十字ブロック  $W=20$  kN については  $Z_0=-0.65$  と計算され、またくさび型ブロック  $W=15$  kN については  $Z_0=-0.74$  となり、いずれも流失すると判定される。したがって、前者の十字ブロックについては判別結果は正しいが、後者のくさび型ブロックについては誤判別となったものである。誤判別の理由としては、比較的かみ合わせのよいブロックを河床面より下げて施工し、かつ、下流部に十分長く投入していたために、流失を免れ、掃流土砂の多い河川で摩擦程度でおさまったものと考えられる。

#### (6) 身延線第1湯川橋梁

湯川は本橋梁の下流部100 mの位置で富士川に合流しており、富士川の河床低下に伴い、本橋梁付近も河床低下している。そのため、昭和49年には3P~4Pにかけて直方体型ブロックを、昭和52年には1P~2Pと5Pには異型平面型 ( $W=40$  kN) を施工していた。昭和57年8月の10号台風の出水 ( $Q=1000$  m<sup>3</sup>/s) には、停止水位になる桁下2.5 mまで水位が上昇し、1P~2Pの異型平面型ブロックが流失した。現在では流失したところは異型平面型 ( $W=150$  kN) を補充している。

一方、判別分析結果では  $Z_0=0.44$  となり、安全であると判定され、流失した母集団  $G_2$  では唯一の誤判別となった。現場の河床勾配は  $I=1/200$  の急流であり、河床低下の結果、写真—2にみえるようなブロック端部に大きな落差があるが、このような環境条件は、式(6)の判別式では考慮されていない。特に当橋梁で施工されたブロックは、前後左右の緊結は若干あるものの、層積みにした場合の上下のかみ合わせは、ブロックの突起による前後のかみ合わせだけであり、上層のブロックはかなり動きやすく流失しやすかったものと思われる。本例は判別式の適当にあたって1つの限界を示すものと考えられる。





写真-2 身延線第1湯川橋梁のブロック工の落差

### 8. コンクリートブロック工の安定度判定法の提案

コンクリートブロックが洪水中にも安定であるかどうかは、4. の多変量解析の1つである判別関数によって、統計的に判定できることになった。さらに7. の誤判別のデータに関する検討によれば、ブロックの緊結度、ブロックの複合化と可撓性、ブロックの天端高さや層積み、橋脚のまわりの剝離現象などを十分考慮する必要があることも示された。

このような情報を総合的に考慮すれば、より高い精度でコンクリートブロック工の設計が可能となるであろう。コンクリートブロック工の設計のプロセスは図-10のようにまとめられる。まず、河床の変動、深掘れや洗掘条件などの河川特性を勘案して橋脚の根入長を予測し、それに土質・地質特性と構造物の力学特性を考慮して橋脚の安定計算を行う。

その結果、洗掘防止工のあることが橋脚の安定上役に立つことになれば、防止工の設計が行われる。その際、その川、その橋梁で長年にわたって最良の方法で管理されている手法がなければ、ここで述べた統計的な手法によることになろう。

判別関数は、 $u_*$ ,  $B/h$ ,  $h$ ,  $r$ ,  $W$  の5変量によって、ブロック重量  $W$  を仮定して、式(6)と式(7)からコンクリートブロック工の安定性が検討される。ただ判別関数を用いる場合には、5. で示した表-4の判別関数の適用限界に注意しなければならない。

なお、判別関数によって得られたブロック重量  $W$  は統計量として与えられたものであるが、設計に供する場合には線区の防災強度、橋梁の重要度、当該河川における洪水の規模(計画高水流量、洪水の再現期間など)等を考慮して判別関数で得られたブロック重量  $W$  に若干の余裕を有するようにすることが望ましい。

以上のように、統計的な判定に立ったコンクリートブ

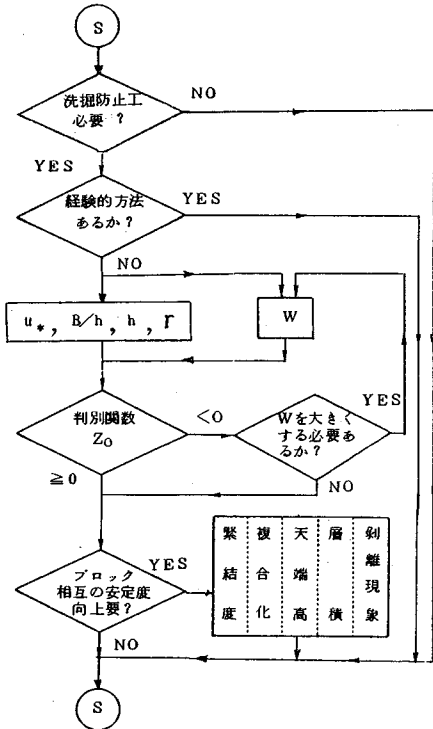


図-10 コンクリートブロック工の設計フローチャート

ロック工の安定性が結論されるに至ったが、これはブロック単体に関するものであって、図-10のフローチャートに示すように、さらに、ブロックとブロックとの相互の安定性について検討を加える必要があるかどうか議論しなければならない。すなわち、ブロックの緊結度、複合化と可撓性、天端高さや層積み、橋脚のまわりの剝離現象なども考慮する<sup>11)</sup>必要がある。

こうして、橋脚の安定性を確保するためのコンクリートブロック工の設計が完了することになる。

### 9. あとがき

本報告は、橋脚の洗掘防止工の1つであるコンクリートブロック工の洪水時の安定性について多変量解析を用いて検討し、コンクリートブロック工の安定度判定手法を提案したものである。

安定度を判定する、川幅水深比、水深、摩擦速度、河川の湾曲度(河道曲率半径)とブロック重量の5変量を用いた判別関数は、統計的手法によって得られたものであり、おのずと適用範囲が制限されるものであるが、コンクリートブロック工の設計のためのこうした判定法がほとんどない現状では本報告は十分活用できるものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎：橋脚による河床洗掘に関する実験的研究，土木学会誌，Vol. 24, No. 1, pp. 23~25, 1938.
- 2) Laursen, E.M. : Scour at bridge crossings, Proc. ASCE, J. of the Hyd. Div., Vol. 86, No. HY2, pp. 39~54, 1960.
- 3) Shen, H.W., Schneider, V.R. and Karaki, S. : Mechanics of local scour supplement, Method of reducing scour, Civil Engrg. Dept. Report, 66, HWS 36, pp. 39~54, Colorado State Univ., 1966.
- 4) Tanaka, S. and Yano, M. : Local scour around a circular cylinder, Proc. 12th Congress of IAHR, 3, Fort Collins, Colorado, USA, pp. 193~201, 1967.
- 5) 吉川秀夫・福岡捷二ほか：橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察，土木学会論文報告集，No. 194, pp. 83~90, 1971.
- 6) 宇民 正：橋脚周辺の流れの機構と洗掘防止工法に関する研究，京都大学学位論文，184, 1975.
- 7) 鈴木幸一：橋脚周辺の局所河床変動に関する研究，京都大学学位論文，126, 1977.
- 8) Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and Shen, H.W. : Local scour around cylindrical piers, J. of Hydraulic Research, Vol. 15, No. 3, pp. 211~252, IAHR, 1977.
- 9) 須賀堯三・高橋 晃ほか：橋脚による局所洗掘の予測と対策に関する水理的検討，土木研究所資料，No. 1797, 1982.
- 10) 村石 尚・村上 温ほか：出水による橋りょう下部工の被災調査について，土木学会年次講演会，1983.
- 11) 岡田勝也・国広敏彦ほか：統計的にみた橋脚の洗掘防止工(コンクリートブロック工)の安定度判定とその適用性，鉄道技術研究報告，No. 1287, 1985.
- 12) 村上 温：鉄道橋の洪水時被災機構と安全管理に関する研究，鉄道技術研究報告，No. 1307, 1986.
- 13) 東海道本線富士川橋りょう対策技術委員会報告書，日本鉄道施設協会，1983.
- 14) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，pp. 313~341, 1985.
- 15) 中川博次：河川構造物の被災形態とその事例集，河川構造物災害調査研究会，1987.
- 16) 芦田和男・高橋 保・道上正規：河川の土砂災害と対策，森北出版，1983.

(1988. 8. 5・受付)