

橋脚の洗掘防止ブロック工の重量と施工範囲の 統計的手法による設計法

STATISTICAL DESIGN METHOD ABOUT WEIGHT AND CONSTRUCTION WIDTH OF ANTI-SCOUR BLOCK WORK AROUND PIER PROTECTION

岡田勝也*・関 雅樹**・村石 尚***・梶間津洋志****

By Katsuya OKADA, Masaki SEKI, Hisashi MURAIISHI and Tsuyoshi KAJIMA

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.

By using the data on the safety blocks and the flow-out blocks at flood-time, the discriminant analysis is executed.

In consequence, the discriminant function for the stability with the six variables is induced. Their variables are river width-depth ratio, river depth, friction velocity, river channel radius, block weight and construction width of block.

An relation between scour depth around pier and construction width of block, a balanced weight and a balanced construction width are also discussed.

Lastly, the judgement method about the stability on the concrete-block work is proposed with regard to the weight of anti-scour block and its construction width.

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

1. ま え が き

鉄道橋の下部工は経年60年を越える石・煉瓦などで施工されたいわゆる旧式構造物が多く、根入れの浅く支持力の低下したものが多い。そのうえ昭和40年代の砂利採取や急激な環境変化に伴う河床低下と、洪水時の橋脚周辺の局所洗掘は、橋脚の根入れ不足を招く危険性があり、多くの鉄道橋梁では洗掘防止工等の施工によって対処している。

橋脚周辺の洗掘防止工には、橋脚の形状改善や付帯構造物の設置等により流況をよくする軽減工法と、洗掘される河床領域を直接被覆する工法がある。後者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¹⁾。前者にはたとえば鈴木が水理学的検討によってその設計基準を提案しており¹⁾、後者の捨石工についてはBreusersらがその限界流速を求めている²⁾が、本研究は後者の1つであり、コンクリ

ートブロックで洗掘される河床領域を直接被覆する工法に関するものである。

洪水時のコンクリートブロック工の安定性に関する研究は、須賀³⁾、岡田ら^{5),6)}、村上⁷⁾、中川ら⁸⁾などによってなされている。これらのうちコンクリートブロック工の設計に必要な重量に着目した研究としては、須賀がコンクリートブロック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するとともにブロック群に対する限界流速の割増率を求めた³⁾。また岡田らはコンクリートブロック工の洪水時の安定性を統計的手法によって求め、必要なブロック重量を算定する判別式を提案した⁶⁾。この判別式は、川幅水深比、水深、摩擦速度、河道曲率半径、ブロック重量の5変量を用いて表わされたものであり、これによって洪水時に必要となるブロック重量が算定できる。

しかし、実際の設計にはブロック重量のみならず橋脚周りの施工範囲を決定してやらねばならないことが多い。現状では、コンクリートブロック工の施工範囲についても明確な規定はなく、橋脚周辺に経験的に設置されているのが実情である。当研究は、実際に洪水に見舞われた鉄道橋梁の洗掘防止コンクリートブロック工に着目し、その実態調査データに基づいた統計的手法により、コンクリートブロック工の重量と施工範囲の実用的な最

* 正会員 工博 鉄道総合技術研究所 地盤防災研究室
主任研究員 (〒185 国分寺市光町2-8-38)

** 正会員 工修 東海旅客鉄道(株)広報室長
(〒100 千代田区丸の内1-6-5)

*** 正会員 鉄道総合技術研究所 地盤防災研究室 主任研究員
(〒185 国分寺市光町2-8-38)

**** 正会員 工修 四国旅客鉄道(株)工事課副長
(〒760 高松市浜ノ町1-10)

適化手法を提案するものである。

2. コンクリートブロック工の全国実態調査とその定性的評価

(1) コンクリートブロック工の全国実態調査

全国実態調査は鉄道橋に敷設されたコンクリートブロック洗掘防止工に焦点を絞り、洪水に遭遇した橋梁に対して実施した。調査の方法としては、橋梁の保守担当の現地機関にアンケート用紙を配布し、橋梁と防護工の実態に関する記入を依頼した。アンケート用紙は、各橋梁ごとに作成され、橋梁諸元（橋梁長さ、河川と橋梁の交差角、橋脚の阻害率、上部工の形式・支間、下部工の構造、種類）、河道状況（河床勾配、河道の種類、みおすじ・砂洲の変化、河床変動傾向、植生の有無、砂利採取の時期）、防護工の実情（種類、重量、層積、施工年、施工範囲）とともに、防護工の洪水時の変状状況（変状の程度、洪水の時期、防護工天端までの水深など）を記入し、さらに地形平面図、河床縦断勾配図、防護工施工図、防護工と河床材料写真を添付する4枚綴りとなっている。このアンケート調査を統計処理して、コンクリートブロック工の設計に必要な重量と敷設範囲を明確にすることが目的であるので、特にブロック工の重量、層積みや締結の状況、河川方向と線路方向におけるブロック工の施工範囲（図-1参照）も明確にできる記入形態とした。

これらのアンケート用紙を鉄道橋梁を保守する現地機関から回収して整理し、さらにデータの精度を上げるために現地調査も併せて実施した結果、197例のコンクリートブロック工のデータが後述する多変量解析に耐え得るデータとなった。

(2) 全データに対する定性的評価

橋脚周辺の洗掘防止工の安定性を検討するには橋脚の置かれている河川特性についても把握する必要がある。

岡田らは、コンクリートブロック工の安定性に及ぼす要因として、(a) 洪水中に置かれたブロック工の変動に関係する中規模河床変動のスケールと、洪水の規模や河

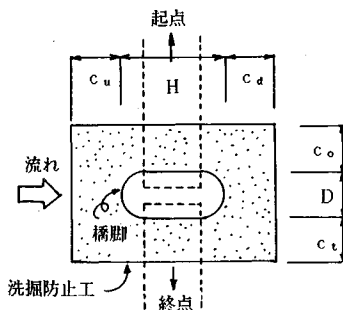


図-1 ブロック工の施工範囲

川の規模などを代表する河川の水理学的条件から、摩擦速度 u_* 、無次元掃流力 τ_* 、水深粒径比 h/d 、水深 h 、川幅 B 、川幅水深比 B/h 、単位幅当たりの流量 Q/B 、を抽出し、また (b) 河川の地形地質的な性状から河床勾配 I 、河川の曲線半径 r 、河川の交角（湾曲度） θ を、さらに (c) 洗掘防止工の性状からブロック工の緊結度 i 、ブロック重量 W を抽出した。そして、これら14変量を用いてステップワイズによる判別解析を実行して、川幅水深比 B/h 、水深 h 、摩擦速度 u_* 、河道曲率半径の逆数 $1/r$ とブロック重量 W の5変量によって洪水時の安定性を論じている⁶⁾。ここでは、新たに実態調査を行って抽出した197データを対象に、これらの5変量と新たに変量として加えるブロック工の施工範囲に関して定性的な評価を述べる。

a) 川幅水深比 B/h 、水深 h 、摩擦速度 u_* とブロック重量 W の分布特性

図-2は水深 h に対する被害率の頻度分布を示す。 $h > 7\text{m}$ になると流失する割合が高くなるが、ブロック工が経験した水深 h のピークは $h=2\sim 3\text{m}$ にある。

一方、ブロック工の経験した川幅水深比 B/h の最大値は $B/h < 140$ であり、そのピークは $B/h=20\sim 30$ 付近であるが、図-3に示す被害率分布によれば、 $B/h \geq 90$ になると流失したブロックの割合は高くなる。

なお、 B 、 h と B/h は洪水時の水位によって大きく変動し、同じ橋梁でも橋脚によって h は異なる。ここ

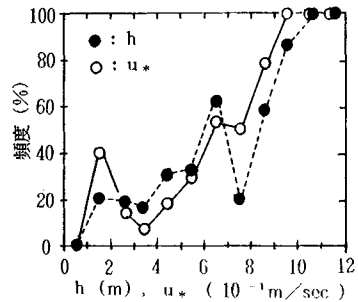


図-2 水深 h と摩擦速度 u_* に対する被害率の頻度分布

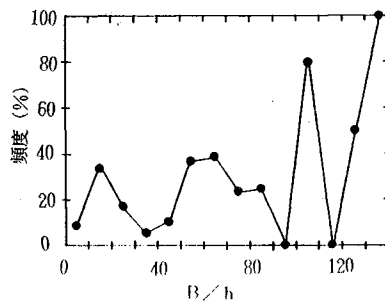


図-3 川幅水深比 B/h に対する被害率の頻度分布

与えた B は当該する洪水時の最高水位に対応した川幅であり、また h はそのときのブロック工天端における水位としてデータを整理したものである。

ブロック工の経験した摩擦速度 u_* は 1.0 m/s を越えるものもあるが、その被害率の頻度分布を示す図-2によれば、 $u_* \geq 0.8 \text{ m/s}$ の領域では流失率が高くなることがわかる。

河道曲率半径 r の頻度分布によれば、平均的には、 $r=1000 \sim 10000 \text{ m}$ の河川が全体の 40% を占め、被害率からみるといずれの曲率半径についても 25% 程度である。

コンクリートブロック工の重量 W の頻度分布を図-4に示す。施工されたブロック重量の平均値は $W=26 \text{ kN}$ (2.6 tf) であるが、このうち安全なブロックの平均値は $W=27 \text{ kN}$ (2.7 tf)、流失したものの平均値は $W=22 \text{ kN}$ (2.2 tf) であり、傾向的には重量の軽いブロックが流失しやすいことを示しているが、図-4からはブロックの安全な限界を明確にすることはできない。これはブロックの流失が単に重量のみならず、その他の要因にも関係していることを意味している。

いま、ブロック重量と摩擦速度の関係を示せば、図-5のようになるが、ブロック重量 W が摩擦速度 u_* に

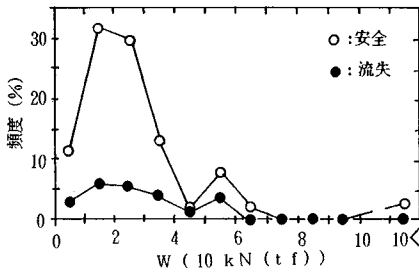


図-4 ブロック重量 W の頻度分布

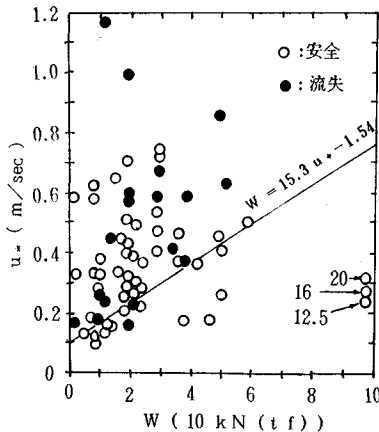


図-5 ブロック重量 W と摩擦速度 u_* の関係

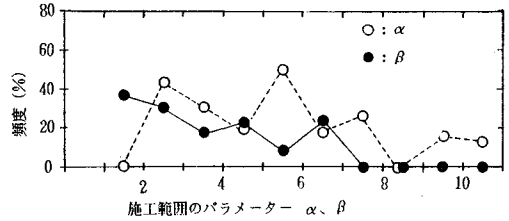


図-6 施工範囲のパラメーター α, β に対する被害率

対して、岡田ら⁶⁾がすでに提示した、

$$W \geq 15.3 u_* - 1.54 \dots\dots\dots (1)$$

を満足するとき、ブロック工は洪水時でも安全であることを示している。逆に式(1)を満たさない領域では、後述するように施工範囲の要素が影響することもあり、必ずしもブロック工が流失するとは限らず、安全なブロック工も存在することを示している。この式(1)に示す u_* の係数 $15 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ は、式(5)における W と u_* の係数比にほぼ等しいものである。

b) 施工範囲のパラメーター α, β の仮定

コンクリートブロック工の施工範囲を表わすパラメーターとして、図-1に示すように、線路方向については橋脚の起点側の施工範囲 c_0 、終点側のそれ c_1 、および河川方向については上流側の施工範囲 c_u 、下流側のそれ c_d をそれぞれの橋脚幅 D, H で除して無次元化し、

$$\alpha = (c_0 + D + c_1) / D \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta = (c_u + H + c_d) / H \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる変数を導入する。

図-6は、施工範囲のパラメーター α と β の被害率の頻度分布を表わしている。これによれば、線路方向については施工範囲を大きくするとブロック工の変状率は下がる傾向が若干みられるものの、ばらつきも大きい。それに対して河川方向については、施工範囲が大きくなるとブロック工の変状率は下がっており、 $\beta > 7$ すなわち橋脚幅の7倍以上施工されたものについてはほとんどのブロックが安全であるようである。

3. コンクリートブロック工の安定性に関する判別分析

(1) 既往の判別関数⁶⁾の適合性

岡田らは、コンクリートブロック工の安定性に影響を及ぼす要因として14変数を選択し、コンクリートブロック工が洪水中でも安全であったグループ G_1 と流失したグループ G_2 に対してステップワイズによる判別分析を実行し、次に示す判別関数を提案している⁶⁾。すなわち摩擦速度を u_* (m/s)、水深を h (m)、川幅水深比を B/h 、河道曲率半径を r (m)、ブロック重量を W (10 kN) とすれば、

$$Z_0 = -4.47 u_* + 153/r + 0.177 W - 0.343 h - 0.0218 B/h + 3.719 \dots \dots \dots (4)$$

ここに示す5変量のうち、 u_* 、 h 、 B/h については係数が負であることから、これらの値が大きくなれば Z_0 の値は小さくなり、流失の危険性は高くなる。また、 $1/r$ 、 W については係数が正であるから、これらの値が大きくなれば Z_0 の値も大きくなり、ブロック工の安全性が向上する。式(4)の判別式を2.(1)で得られた197例のデータに適用してみると、その正答率は、流失した G_2 グループに対して60.4%、安全な G_1 グループに対して74.5%、全体に対して71.7%であった。

いま、2.(1)のデータに対して、式(4)に示す5変量を用いて判別分析を行うことにし、これをCASE-Iとすれば、新たな判別関数として式(5)が得られる。

$$Z_0 = -5.44 u_* + 251/r + 0.289 W - 0.521 h - 0.0441 B/h + 4.770 \dots \dots \dots (5)$$

式(5)の各変量の係数を式(4)と比べると u_* 、 h 、 B/h の係数が負、 $1/r$ 、 W の係数が正で、定性的には同じ傾向を示す。この判別関数による正答率は表-1にまとめられているが、母集団 G_1 については正答率73.2%、母集団 G_2 については72.9%であり、全体では73.1%となり、式(4)よりは正答率は改善されたことになる。

(2) 新しい判別要因の導出

前述の(1)で示した5変量を用いた判別関数によれば、約73%の正答率で洪水時のコンクリートブロック工の安定性を議論することができ、設計条件の1つであるブロック重量 W を求めることはできる。しかし1.で述べたように、実際の設計に際して必要となるブロック工の施工範囲の決定には至らない。そこで、コンクリートブロック工の施工範囲の影響をさらに定量的に把握するために、判別分析の変量としてCASE-Iの式(5)に示す5変量、 B/h 、 h 、 u_* 、 $1/r$ 、 W に加えて、式(2)と(3)に示す変量 α 、 β を含めて、6変量あるいは7変量に対する判別分析を進める。すなわち、上述の5変

量に α を加えた6変量の判別関数をCASE-II、同じく5変量に β を加えたそれをCASE-III、同じく5変量に α と β を加えた7変量の判別関数をCASE-IVとする。

(3) CASE-IIに対する判別関数

この場合の判別関数は式(3)のように表わされる。

$$Z_0 = -5.11 u_* + 250/r + 0.250 W - 0.511 h - 0.0435 B/h + 0.0954 \alpha + 4.158 \dots \dots \dots (6)$$

その正答率は表-1のようにになる。これによれば、全体として73.1%の正答率が得られることになるが、正答率は5変量に対するCASE-Iの表-1と変わらず、 α を加えたにもかかわらず式(6)の係数は式(5)のそれとほとんど変わらないことがわかる。

(4) CASE-IIIに対する判別関数

この場合の判別関数は式(9)のように表わされる。

$$Z_0 = -7.39 u_* + 313/r + 0.33 W - 0.566 h - 0.0419 B/h + 0.526 \beta + 3.407 \dots \dots \dots (7)$$

この場合の正答率は表-1のようにになる。これによれば全体として75.6%の正答率が得られることになり、特に流失した母集団 G_2 の正答率は81.3%と非常によくなる。式(7)の係数の符号はCASE-Iの式(5)と一致しており、その絶対値はオーダーとしてはほとんど同じである。

(5) CASE-IVに対する判別関数

この場合の判別関数は式(10)のように表わされる。

$$Z_0 = -7.30 u_* + 311/r + 0.30 W - 0.554 h - 0.0416 B/h + 0.0568 \alpha + 0.513 \beta + 3.078 \dots \dots \dots (8)$$

この場合の正答率は表-1のようにになる。これによれば、全体として75.1%の正答率が得られることになるが、この正答率はCASE-IIIの β を含む6変量に対する式(7)の正答率と全く同じである。

(6) 各判別関数の評価

上述の(3)、(4)と(5)に示す判別関数において、CASE-IIの式(6)は線路方向の施工範囲のパラメーター α を含んだ6変量による判別関数である。 α の係数は正であり、施工範囲が大きくなるとブロック工の安定性が増すことを表わしている。しかし係数の値は0.0568と小さく、CASE-Iの5変量に対する式(5)と比較しても正答率が向上していない。したがって線路方向におけるブロック工の施工範囲がブロック工の安定性判別に与える影響は統計的には小さいといえる。同様にCASE-IIIの式(7)は河川方向の施工範囲のパラメーター β を含んだ6変量による判別関数である。 β の係数は0.526と、CASE-IIの式(6)の α の係数よりも大きく、判別結果の正答率も向上している。 β の頻度グラフ図-6からもわかるように河川方向の施工範囲がブロック工の安定性向上に与える影響は顕著であり、判別

表-1 CASE-I~CASE-IVの判別関数の正答率

CASE	母集団	判別結果		合計	正答率 (%)
		安全	流失		
I	G ₁ :安全	109	40	149	73.2
	G ₂ :流失	13	35	48	72.9
	G ₁ +G ₂	122	75	197	73.1
II	G ₁ :安全	109	40	149	73.2
	G ₂ :流失	13	35	48	72.9
	G ₁ +G ₂	122	75	197	73.1
III	G ₁ :安全	110	39	149	73.8
	G ₂ :流失	9	39	48	81.3
	G ₁ +G ₂	119	78	197	75.8
IV	G ₁ :安全	109	40	149	73.2
	G ₂ :流失	9	39	48	81.3
	G ₁ +G ₂	118	79	197	75.1

関数の中に新たな変量として取り入れることは有意であると考えられる。

一方 α, β をともに含んだ 7 変量を用いた CASE-IV の判別関数式 (8) は, CASE-III の式 (7) と比べて正答率はほとんど変わらない. 設計フローにおいていたずらに変量が多いことは, 理解度を低下させるばかりでなく, 計算が煩雑になり実用的でなくなる. したがってコンクリートブロック工の施工範囲の影響として河川方向の施工範囲のパラメーター β のみを取り入れた CASE-IV の式 (7) を新たな判別関数として提案することにする. なお, この判別関数が母集団 G_1 と G_2 の 2 群を判別できるかどうかの検定は,

$$F = (f - p + 1) / pf \cdot n_1 n_2 / (n_1 + n_2) \dots \dots \dots (9)$$

が自由度 ($p, f - p + 1$) の F 分布をすることをういて行われる. 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 は変量数である. 式 (9) で, $n_1 = 149, n_2 = 48, p = 6$ であり, 自由度 (6, 190) に対して $F = 5.89$ となる. これは $F_{0.015}$ に相当し, 危険率 1.5% で 2 群の判別は有意となる.

4. ブロック工の安定性に及ぼす重量と施工範囲の関係

(1) 局所洗掘深とブロック工の施工範囲の関係

前述の 2. (2) b) と 3. (6) ではコンクリートブロック工の施工範囲が, その安定性に及ぼす影響について述べた. ここでは, 施工範囲についてさらに定量的な評価を加えるために橋脚周辺の局所洗掘深との関連について述べる.

洗掘深の予測式は, Laursen, Andru, Tarapore, 須賀, 中川をはじめ多くの研究者によって提案されている. この際, 洗掘に影響を及ぼす要因として主に用いられているものは, 橋脚幅 D , 水深 h , 河床材料の粒径 d , フルード数 Fr , sediment number N_s 等がある. 旧来の国鉄の式は洗掘で被害を受けた橋脚の根入れ長 H と橋脚幅 D の関係から洗掘深 Z_s を推定し, $Z_s = 1.5 D$ の関係式を用いてきた. その後村上は過去に提案された洗掘深予測式に実測値をあてはめ比較検討した結果, Tarapore 型の式が最も実用的であるとして, 橋脚周辺の局所洗掘深 Z_s を,

$$\left. \begin{aligned} Z_s/D &= 1.45 h/D \quad (h/D \leq 1) \\ Z_s/D &= 1.45 \quad (h/D > 1) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

のように提案し, このときの橋脚周囲の洗掘範囲 L を予測洗掘深 Z_s , 河床材料の水中安息角 θ を用いて図-7 のように表わされるものと仮定している⁷⁾. 実際には, 橋脚前面の砂粒の巻上げを伴う渦の大きさを考慮した洗掘形状を考慮するべきである⁹⁾が, ここでは厳密な洗掘範囲を仮定しない. 一方, 式 (10) の第 1 式は, $h/D \leq$

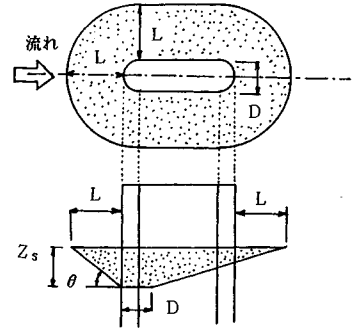


図-7 洗掘範囲と洗掘形状の推定模式図⁷⁾

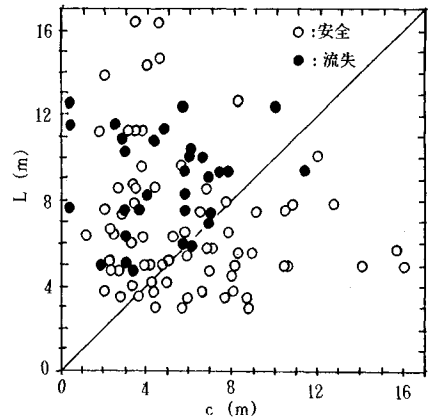


図-8 ブロック工の施工範囲 c と洗掘範囲 L との関係

1 と水深の小さい領域における洗掘深を与えるものであり, 洪水時のコンクリートブロック工の安定性を議論するうえでは最大洗掘深を与える式 (10) の第 2 式を用いる方がよい. したがって洗掘範囲 L は,

$$L = 1.45 D / \tan \theta \dots \dots \dots (11)$$

となる. 久宝¹⁰⁾によると θ は河床材料の平均粒径 d_m に依存し, $\theta = 25^\circ \sim 35^\circ$ 程度であるので, 式 (11) から洗掘範囲 L は, $\theta = 30^\circ$ に対して $L = 2.51 D$ で表わされる.

図-8 は上述の予測洗掘範囲 L と河川方向の実際のブロック工敷設範囲 c との関係を示したものである. 図中の $L < c$ の領域はブロック工が $\theta = 30^\circ$ の予想洗掘範囲よりも広く敷設されているものであるが, 定性的にはブロック工が安全である傾向を有し, 予測洗掘範囲以上に敷設されたブロック工については, そのほとんどが流失されずに残ったことがわかる. したがって, 予測洗掘範囲以上にブロック工を敷設することが望ましく, その必要施工範囲を無次元量で表わせば, 式 (11) と式 (3) から,

$$\beta_2 = 1 + 2.9 D / (H \tan \theta) \dots \dots \dots (12)$$

となる. ここに θ は図-8 の考察に基づき $\theta = 30^\circ$ である.

(2) 均衡ブロック重量と均衡施工範囲

コンクリートブロック工の安全性を向上させるには、式(7)の判別関数に用いた6変量のうち人為的に変えることのできるブロック重量 W 、ブロック施工範囲(河川方向) β を増加させることが必要である。ブロック工が安全であるための限界、すなわち $Z_0=0$ に対する均衡ブロック重量 W_N 、均衡施工範囲 β_N について考察する。

図-9は、流失したブロック工について、現状のブロック重量 W_0 と式(7)で $Z_0=0$ とした次式、

$$W_N = (7.39 u_* - 313/r + 0.566 h + 0.0419 B/h - 0.526 \beta - 3.407)/0.333 \dots\dots\dots(13)$$

によって求めた均衡重量 W_N の分布を示したものである。これによれば、母集団 G_2 に属する流失した10~70 kN (1~7 tf) であったブロック重量 W_0 に対して、 W_N は10~160 kN (1~16 tf) になり、かなり大きい方へ寄っていることがわかる。

ブロック重量 W と同様に、ブロックの施工範囲 β についても次式、

$$\beta_N = (7.39 u_* - 313/r - 0.333 W + 0.566 h + 0.0419 B/h - 3.407)/0.526 \dots\dots\dots(14)$$

により均衡施工範囲 β_N を求める。図-10は母集団 G_2 に対して β と β_N の関係を示したものであるが、従来 $\beta = 1 \sim 10$ 程度であったものが、均衡施工範囲としては $\beta_N = 1 \sim 16$ となり、 β よりも大きい方へ寄っており全体的

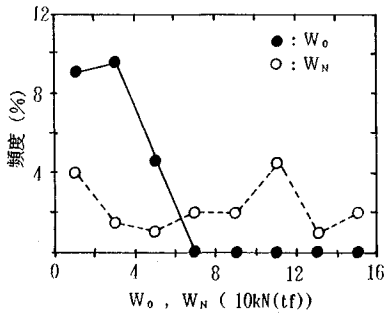


図-9 現状のブロック重量 W_0 と均衡重量 W_N の頻度分布

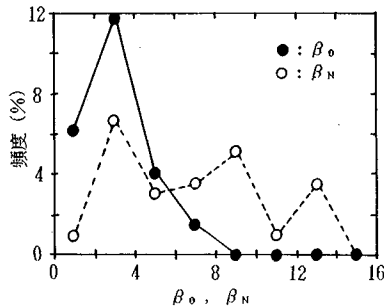


図-10 現状のブロック工の施工範囲 β_0 と均衡施工範囲 β_N の頻度分布

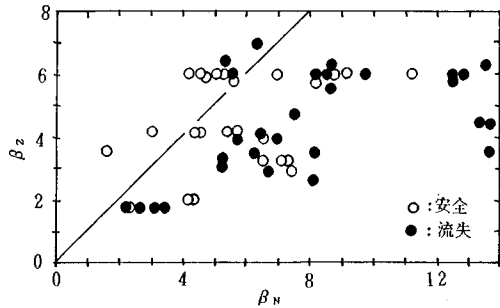


図-11 均衡施工範囲 β_N と洗掘深から求まる必要施工範囲 β_z との関係

にブロック工の施工範囲が不足していたことを示している。

一方、予測洗掘範囲から定まるブロック工の必要施工範囲の無次元量を β_z と均衡施工範囲 β_N の関係は図-11のようになるが、実際に流失したブロック工に対して、洪水時に安定であるための均衡施工範囲 β_N は、洗掘深から求まる必要施工範囲 β_z よりもかなり大きくなるものが多い。これは β_N を算出するときブロック重量 W の小さいものが含まれていることによるものである。すなわち、流出したブロックでは、施工範囲のほかにブロック重量にも問題があると考えられるが、地形的・施工上の制約により、ブロック重量が制限される場合には施工範囲を β_z より大きくとる必要のあることを意味している。したがって、判別関数、式(7)によってブロック工の必要施工範囲を決定する場合、それが極端に大きくなるときにはブロック重量を増して両者のバランスをとることが必要となる。

(3) 洪水時の富士川橋梁への適用例

富士川橋梁の4P橋脚は昭和57年の台風10号のもたらした洪水により倒壊するという大災害を被った。当時、当橋脚付近には40 kNの異型平面形ブロック、80 kNと120 kNの直方体型ブロック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。平均河床を基準としたときの水深を $h=10 \text{ m}$ としたとき $B/h=54$ となり、また $u_* = 0.43 \text{ m/s}$ 、 $r=\infty$ 、 $\beta=3.5$ とすれば、当時施工されていた最大重量のブロック $W=120 \text{ kN}$ に対して、式(7)より判別値を求めると $Z_0 = -1.87$ となる。したがって判別関数からは当ブロック工は流失と判断され、実際の状況と一致することになる。

災害復旧の後、昭和58年には3P~6P橋脚周辺に160 kNの対称突起型ブロック、200 kNの異型平面形ブロックなどが施工された。その後昭和60年の台風6号による $Q=5600 \text{ m}^3/\text{s}$ の洪水では、水深が4.7~5.8 mとなったが、流失には至らなかった。これに関する判別

結果は、3P～5Pについては $Z_0=2.81$ 、6Pについては $Z_0=1.91$ となり、安全と判別され、実情と一致している。

この新しく敷設されたブロック工が、昭和57年の台風10号のときの洪水に対して安全であるかどうかの推定を行う。上述の予測洗掘範囲に基づくブロック工の必要施工範囲は式(12)で表わされたが、 $D=5.0\text{ m}$ 、 $H=10\text{ m}$ 、 $\theta=30^\circ$ を代入すれば、 $\beta_z=2.25$ となる。現状での施工範囲パラメーターは $\beta=3.5$ であるが、これは β_z よりも大きく想定される洗掘範囲をカバーしていることになる。また式(13)による均衡重量 W_0 を求めると、 $u_*=0.43\text{ m/s}$ 、 $r=\infty$ 、 $h=10\text{ m}$ 、 $B/h=54$ 、 $\beta=3.5$ から、 $W_0=176\text{ kN}$ が得られる。したがって、現在敷設されている200 kNのコンクリートブロック工についてはおおむね安全性が確保できるものと推定される。

5. コンクリートブロック工の安定度判定手法の提案

(1) 設計フローチャート

コンクリートブロック工の洪水時の安定性を検討するための判別関数、式(7)に用いられる6変量のうち、人為的に変えることのできる変量は、2変量すなわち、ブロック重量とブロック工の施工範囲である。ここではこれらの決定手法の考え方について述べる。

コンクリートブロック工の安定性を検討する前段階として橋脚自体の安定性を検討する必要があることはもちろんである。その結果、橋脚の安定性に問題があり洗掘防止工が必要であるとの結論に達した場合にこの手法が使われることになる。

その設計フローチャートを図-12に示す。ここでは、ブロック工を敷設する状況として、ブロック工を補強する場合と新たに敷設する場合に分けて考える。

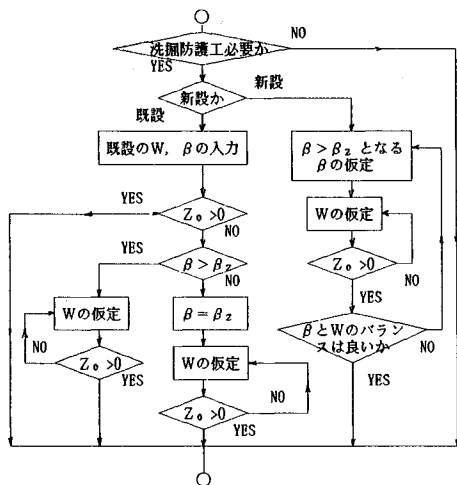


図-12 コンクリートブロック工の設計フローチャート

(2) ブロック工を補強する場合

すでに施工されているブロック工が想定される洪水に対して式(7)の判別関数により「流失」($Z_0 < 0$)と判別された場合、あるいは現実にそのブロック工の安定性が失われている場合には、それを補強し橋脚自体の安定性を確保する必要がある。この際、判別関数の Z_0 値を大きくするためにブロック重量を増すか、施工範囲を広げるかの施策をとらなければならない。このフローではまず施工範囲 β が予測洗掘深より求まる必要施工範囲 β_z を下回っているかどうかの検討を行う。上回っている場合には現状のブロック工の施工範囲についてブロック重量 W の検討を行う。一方下回っている場合には β を β_z に広げ、次にブロック重量 W の検討を行い、必要なブロック重量を決定する。しかしながら計算より求まるブロック重量が極端に大きい場合には施工範囲とのバランスをとる必要のあることはもちろんである。

(3) 新たに敷設する場合

新たにブロック工を施工する場合は、施工範囲 β としては予測洗掘深から求められる必要施工範囲 β_z よりも大きい値を仮定し、次にブロック重量 W を仮定し、判別値 Z_0 を求める。そして $Z_0 > 0$ を満足するブロック重量を決定することになる。実際には、 $\beta > \beta_z$ 、 $Z_0 > 0$ の条件のもとで、施工性と経済性を十分考慮しながら、ブロック重量 W とその施工範囲 β を決定してやらねばならない。なおこのフローによるブロックの施工範囲はすべて河川方向に対するものである。河川直角方向についても予測洗掘深より求まる必要施工範囲を満足することが望ましい。

6. あとがき

本論文は、鉄道橋梁の洗掘防護工として投入されたコンクリートブロック工の実態調査データに基づく多変量解析によって、そのブロック工の洪水時の安定度判定法を提案したものである。これは先に岡田ら⁹⁾が提案したブロック工の重量の決定法にブロック工の施工範囲を算定できるよう発展させたものである。すなわち、従来判断基準の乏しかったブロック工の重量とその施工範囲を、鉄道橋梁の防災強度に応じて、川幅水深比、水深、摩擦速度、河道曲率半径の河川工学的なパラメーターによって定量的に決定することができるようになった。しかしこの手法はあくまでも統計的に求められたものであり、提案された判別関数による判別値ですべてを判断することは避けなければならない。たとえば、ここでは言及しなかったが、必要施工範囲は予測洗掘深からだけでなく河床波の状況やみお筋の発達などの河道特性によっても異なるほか、ブロック敷設後の2次的な副流が洗掘を助長することも考慮に入れる必要がある。このため

既往の実験的・理論的な水理公式を考慮しながら、従来からそれぞれの橋梁で用いられている経験的工法の実績を十分に把握して総合的に判断することが必要である。

ここに用いた統計データの原資料は、著者らのうち岡田が当時の国鉄・鉄道技術研究所防災研究室に、関と梶間が本社施設局土木課に、村石が東京南鉄道管理局構造物検査センターに在職中に、全国の鉄道管理局の協力を得て収集したものである。お世話になった各鉄道管理局構造物検査センターの方々に、また計算の一部をお手伝いいただいたパシフィックコンサルタントの川村勝宏氏に、深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，pp. 313～341，1985.
- 2) Breusers, H. N. C. *et al.* : Local scour around cylindrical piers, *J. of Hydraulic Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 211～252, IAHR, 1977.
- 3) 須賀堯三，ほか：橋脚による局所洗掘深の予測と対策に

関する水理的検討，土木研究所資料，No. 1797，建設省土木研究所，1982.

- 4) 村石 尚・村上 温：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.
- 5) 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.
- 6) 岡田勝也・村石 尚・国広敏彦：統計的手法による橋脚の洗掘防止工の安定度判定法，土木学会論文集，第 403号/VI-10，1989.
- 7) 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.
- 8) 中川博次：河川構造物の被災形態とその事例集，河川構造物調査研究会，1987.
- 9) 中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理（新体系土木工学 23），土木学会，1986.
- 10) 久宝 保：土砂の水中傾斜角について，土木技術，Vol. 6，No. 5，p. 2/4，1951.

(1989. 6. 30・受付)