

破堤時の締切で投入するブロックの流失を防止するための鋼組工に関する試行模型実験

TRIAL HYDRAULIC EXPERIMENTS ON STEEL STRUCTURE FOR SHUTOFF WORK TO PREVENT WASHOUT OF BLOCK IN WATER AT DYKE BREAK

山本太郎¹・東海林勉²・飛田大輔³・島田友典⁴

Taro YAMAMOTO, Tsutomu TOUKAIRIN, Daisuke TOBITA and Tomonori SHIMADA

¹正会員 博(工) 一般財団法人北海道河川財団(〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目5-1)

²正会員 一般財団法人北海道河川財団(〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目5-1)

³正会員 北海道開発局帯広開発建設部帯広河川事務所(〒089-0536 北海道中川郡幕別町札内西町73-6)

⁴正会員 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

When dyke breaks, blocks are thrown into flood water to shutoff there temporarily. But as blocks roll down easily in the water flow, it is difficult to shut off there rapidly by blocks for flood prevention. We propose a method made of steel materials to trap a rolling block on bed. It is easy to frame and drop into water, and not easy to washout in intense flow at dyke break. The paper describes the results of trial hydraulic experiments on three situations, dropping one unit into flow, catching a rolling down block and integral state of block and the steel method. The experiments show that the steel structure is effective measure to trap a rolling block in flood condition.

Key Words : dyke break, shutoff work, steel structure for catching blocks

1. はじめに

河川で堤防が破堤した時や破堤の危険性が高くなった時に、緊急対策として流水中にコンクリートブロックを投入して破堤部を締め切る工事を行う時がある。過去の破堤災害でも多摩川水害¹⁾、小貝川破堤災害²⁾などでブロックを投入した記録があるが、破堤部の激しい流れの中にブロックを投入しても容易には投入した場所にブロックがとどまらず転動して流失する。堤防破堤時の緊急対応には災害時用の備蓄ブロックが使用されるが、備蓄ブロックは通常は河川護岸・根固などの構造物に使用するためにつくられたものであり、水中に投入されることを前提にはつくられていない。水中に投入されても転動しにくいブロックとしては例えば平型の根固形状のものや突起型の消波ブロックなど形状が流れに対して抵抗をもちにくいもの、重量が極めて大きいものなどが挙げられる。しかし破堤部を迅速に締め切っていくためには、乱積みして高さを保てること、重機での運搬・吊り上げ・投入作業が容易であることなどが必要であり、既存のブロックでこれらを兼ね備えたものがほとんどないのが現状である。

破堤時を想定すると洪水ピークの河道水位が高い状況でより大きな氾濫被害が生じるため、被害軽減を考える上では河道水位が高い状況すなわち破堤部の氾濫流れが激しい状況のときにいかに効率よく締切に向けた工事を行えるかが重要となる。しかし、破堤部の流れが激しいときに流水に流されずに使用できるブロックが重量の大きいものに限定されるとすれば工事の作業効率が低く、河道水位が高い間の対応そのものが困難であるということになる。最近でも全国で破堤災害が頻発しているなか、現実的には破堤時には水防備蓄ブロックを使って締切作業を行うことになるとすれば、その前提での作業時間の短縮ができるような緊急対策技術の構築が必要である。

さて、緊急対応の現場では投入したブロックが何かの偶然で止まった時にそれを足がかりに止まっていくとも言われる。これをヒントとすれば、投入したブロックが止まるきっかけとなる何かを偶然ではなく意図して先に水中に投入しておく補助的な構造物があれば破堤時の緊急対応に有効である。そこで一般的な鋼材を単純な形状で組み合わせて製作できる構造物を鋼組工として発案し、その形状や基本的な特徴を模型での試行実験と基礎的な力学モデルから考察した。

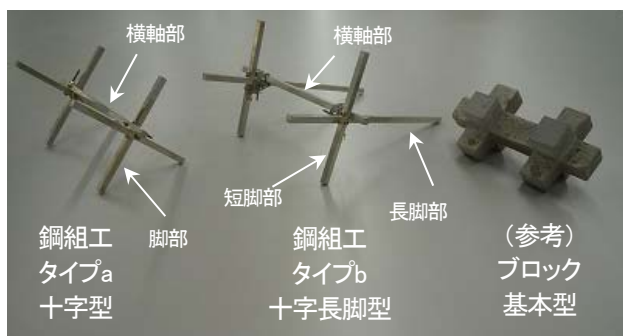


写真-1 鋼組工模型

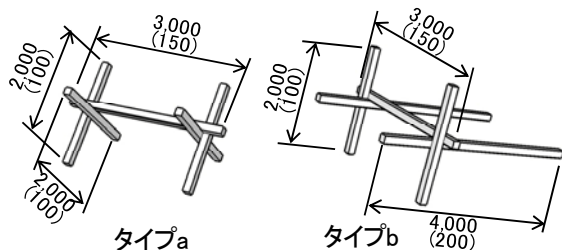


図-1 鋼組工の実物大寸法
(単位: mm, カッコ内は模型寸法)

2. 水理模型実験の概要

(1) 実験模型と実験水路

鋼組工は洪水時に水中に投入したブロックが転動流失しないために水中で一時的にブロックを止められるものとして構造を発案・検討しているものである。流れの抗力を受けて転動しないためには、抵抗が小さく、ある程度の自重を持つ構造及び材料が望まれるが、重量が大きくなると吊り上げて投入するために巨大な施工重機が必要となるため災害時の施工性を考えれば重量が小さい方がよい。水中での安定と施工性の良さを考え、写真-1のような横軸部の両側に十字に脚部をつけた構造のものを発案し1/20スケール模型を製作した。実物はH鋼などの一般的な鋼材を使用することを想定している。写真-1左は基本形状としてタイプaの十字型、写真-1中央は両側の脚部の平行する各一本の長さを伸ばしたタイプbの十字長脚型である。タイプbの長脚部は流れに対して下流側に位置するように水中に投入することで流れによる転動方向のモーメントを小さくして転動しにくくなることを意図している。両側の十字部を脚部、脚部をつなぐ部分を横軸部とし、タイプbの脚部は一本長い脚部を長脚部、その他を短脚部とする。タイプa及びタイプbの寸法は図-1に示す通りである。参考までにH150×150のH鋼で製作した場合の実物の重量はタイプaが約350kg、タイプbが約500kgとなる。比較に使用するブロック模型は前報³⁾で使用した写真-1右に示す2t型ブロックの1/20スケール模型の基本型とした。以下、本論中の実験の説明でのブロックはこの模型ブロックを指すこととする。

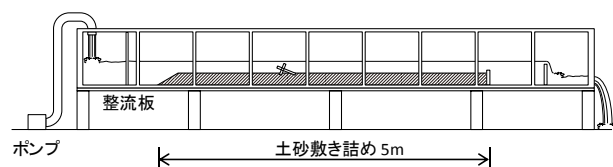


図-2 実験水路の模式図

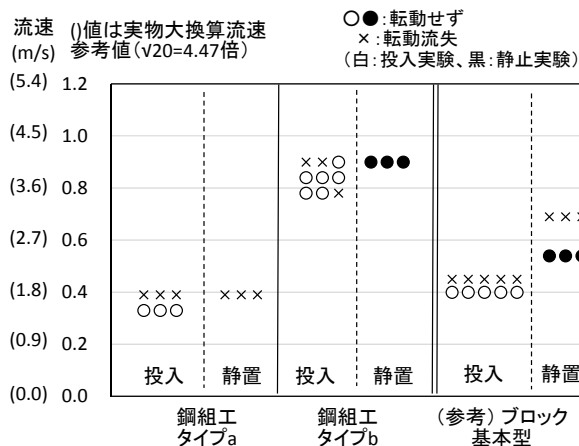


図-3 実験結果 (単体実験)

実験水路は図-2に示すような幅0.7m、長さ10mの前報³⁾と同様の水路を使用し、このうち5m部分に $d_{50}=0.943$ mmの混合粒径の砂を敷き詰め洪水時の移動床を想定した条件とした。水路勾配は水平であり上流端のタンクにポンプで給水した水をそのまま流下させる方法とした。

(2) 実験方法

実験は実験水路に通水した状態で鋼組工及びブロックを水中に投入または静置させて転動するかを確認する方法で行った。鋼組工及びブロックを投入する際には、横軸部が水面と平行かつ流れの流下方向に垂直となるようにして水面直上位置から自由落下させた。この方法で流量を段階的に増加させ転動するかを確認した。鋼組工を河床に静置させた状態での実験は、予め通水している流れのなかに模型を手を持って沈めて河床にできるだけ静置させて手を離し転動するかを確認する方法とした。転動するかの指標となる流速は、鋼組工の横軸部の高さ付近の位置の流下方向の流速をプロペラ流速計で計測した。投入実験及び静置実験は各流量段階で3回繰り返して行った。なお、横軸部が流れ方向に斜めの場合には垂直の場合と比較して転動しやすいことが予備的な実験で確かめられたが、本論では基礎研究としてまず理想状態を想定し流れ方向に垂直の場合について考察することとした。また移動床実験のため河床波の発生や、流砂で脚部が河床に埋没しやすくなるなど実験条件の変化が不可避であったが、できるだけ河床が平坦な位置を選定し、目視で明らかに脚部の埋没が進行したら再静置するなど、実験条件の維持を図り、条件の維持が困難と判断された状況で各実験を終了させた。

3. 実験結果

(1) 単体実験（投入・静置）

まず鋼組工の基礎的特性を確認するため、単体で水中に投入した場合と河床に静置させた場合での転動に対する限界を確認する単体実験を行った。実験結果を図-3に示す。図-3には比較として前報³⁾でのブロックの単体実験の結果も併せて示した。

十字型の鋼組工タイプaは投入・静置いずれの場合も流速0.4m/s程度で転動流失した（参考図・表中にはフルード則を準用した場合の実物大換算の参考値を示した）。2t型を想定したブロックでの実験結果よりも転動に対する限界値がやや低い結果である。なおタイプaでの静置時に転動しない条件は実験で確認していないが、投入時と同程度の低流速で転動していることから、投入時と同じく低流速で転動限界が生じることが明らかであったため省略した。

十字長脚型のタイプbは流速0.8m/s程度まで転動に対する限界値が上がる結果となった。投入実験と静置実験の結果を比較すると静置実験の結果のほうが転動の限界値が高い。ブロックの転動実験の結果と比較しても鋼組工タイプbの転動限界流速が大きく、投入したブロックが転動して流されるような速い流速の流れの中に投入しても鋼組工タイプbの場合は流失しにくい結果が示された。結果として投入したブロックが転動する流れの条件のときにも、鋼組工は転動せずに河床にとどまる可能性があることが示された。

(2) ブロック受け止め実験

次に鋼組工を投入したあとにブロックを投入してブロックが鋼組工で止まるかをみるため、ブロック受け止め実験として、写真-2のように鋼組工を先に河床に静置しその上流側にブロックを投入して転動させブロックが鋼組工に衝突してとどまるかを確認した。実験結果を表-1左に示す。流速0.85m/sでも鋼組工は流失しなかった。この流速の状態で河床の土砂移動が激しくさらに流量を増加させることが困難だったため、この条件を上限に実験を終了した。ブロック単体が水中に投入されると容易に転動する状態の流れの中でブロックが鋼組工に衝突して停止することが確認できた。

(3) 鋼組工・ブロック一体実験

河床に静置させた鋼組工が転動してきたブロックを受け止められることが確認できたため、次に鋼組工がブロックを受け止め一体となった状態で流速を増加させて河床にとどまり続けるかを確認する鋼組工・ブロック一体実験を行った。実験結果を表-1右に示す。この実験でも流速を0.90m/sまで増加させても鋼組工とブロックが流失せず、河床の土砂移動の影響が顕著となったため実験を終了させた。転動に対する限界状態は確認できな

表-1 実験結果（左：ブロック受け止め実験，右：鋼組工・ブロック一体実験）

流速 m/s			鋼組工タイプb			流速 m/s			鋼組工タイプb		
模型	実物換算		1回目	2回目	3回目	模型	実物換算		模型	実物換算	
0.66	(3.0)	○	○	○	○	0.75	(3.4)	○	○	○	○
0.70	(3.1)	○	○	○	○	0.80	(3.6)	○	○	○	○
0.77	(3.4)	○	○	○	○	0.84	(3.8)	○	○	○	○
0.80	(3.6)	○	○	○	○	0.92	(4.1)	○	○	○	○
0.85	(3.8)	○	○	○	○	0.90	(4.0)	○	○	○	○

○：転動せず

流速の実物換算値はフルード則による参考値（ $\sqrt{20}=4.47$ 倍）

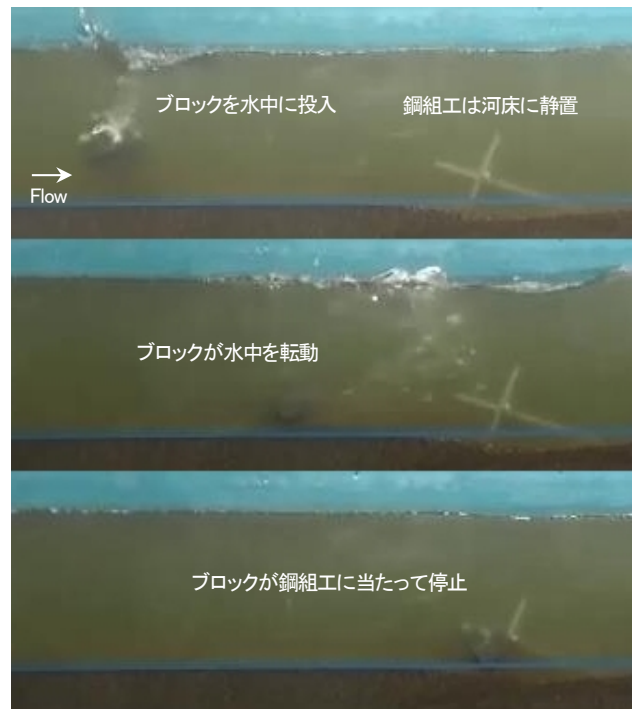


写真-2 実験写真（鋼組工静置・ブロック転動実験の例）

かったものの、ブロック単体が転動流失する条件でも、ブロックが鋼組工に捕捉された一体の状態で流失しにくいことが示された。

4. 転動に関する簡易力学モデルによる考察

流水中での安定性を検討していくには力学的な流失限界を示す必要がある。流れの抗力 D による転動方向のモーメント M_1 と重力 W による転動を抑制させる方向のモーメント M_2 は以下の式(1),(2)で表される。

$$M_1 = \frac{\rho_w}{2} C_D A V^2 \times L_1 \quad (1)$$

$$M_2 = W \times L_2 \quad (2)$$

ここで ρ_w ：水の密度， A ：流れ方向の投影面積， V ：代表流速， L_1 ：代表流速が作用する位置の河床面からの高さ， L_2 ：重力が作用する位置から回転の支点までの水平距離である。 $M_1 > M_2$ の場合に鋼組工が流れ方向に転動すると

表-2 単体での転動に対する限界流速の計算値

項目	単位		鋼組工 タイプa	鋼組工 タイプb	(参考) ブロック 基本型
流速	u	m/s	0.53	1.05	0.48
抗力係数	C _D		0.78	0.81	1.62
投影面積	A	cm ²	24.01	24.77	45.25
抗力	D	N	0.262	1.111	0.856
距離(抗力)	L1	m	0.035	0.047	0.050
	M1	N m	0.009	0.052	0.043
重力	W	N	0.26	0.37	1.43
距離(重力)	L2	m	0.035	0.142	0.030
	M2	N m	0.009	0.052	0.043
	M1/M2		1.00	1.00	1.00
(参考)揚力係数	C _L		-0.076	-0.022	計測なし



写真-3 抗力係数算定実験（通水前，河床下部に分力計）

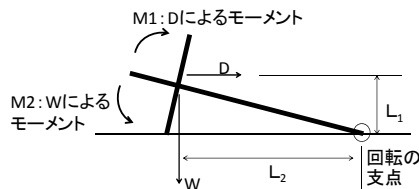


図-6 静止時のブロックに作用するモーメント模式図

みなすことができる。抗力係数 C_D は前記実験とは別に幅1m，長さ26mの直線水路での水理実験を行い定めた。これは護岸ブロックの水理試験を行う場合と同様の方法⁴⁾であり，写真-3のように水路中央部の河床下部に分力計に鋼組工模型を固定して通水時の荷重を直接計測して抗力係数を算定した。なお揚力によるモーメントは，抗力係数 C_D と同時に実験で得られた揚力係数 C_L が抗力係数 C_D に対して1オーダー程度低く，これは山本ら⁵⁾の護岸ブロックでの実験と同様の傾向であり，簡易力学モデルとして鋼組工の安定性を考える場合に揚力の影響は小さいと考え，ここでは考慮しないこととした。また抗力が作用する高さは厳密にはモーメントの微小量の積分から算定すべきであるが構造が3次元的で複雑なため，鉛直流速分布の積分からの平均高さとして算定した。

図-6に示す抗力 D と重力 W から式(1)による転動方向のモーメント M_1 と式(2)による重力による転動とは反対方向のモーメント M_2 の値が一致する時を転動する限界状態として，この限界状態を数値化したのが表-2である。鋼組工タイプaの転動限界流速が0.53m/s，タイプbの転動限界流速が1.05m/sと算定される。実験での転動限界流速は鋼組工タイプaが0.4m/s程度，鋼組工タイプbでは0.9m/sで転動していない結果となっており，この簡易力学モデルで転動の限界が概ね検討できることが示された。また実験で鋼組工タイプaがブロック基本型と同程度の

流速場で転動し，簡易モデルでの鋼組工タイプaとブロック基本型の移動限界流速が同程度であったことから，ブロックと鋼組工の流水中での安定性については，この簡易力学モデルで検討を進められるとみなせる。ただし，実験では実際の河川での適用性を優先するために移動床で行ったため，流速が増加するにつれて河床表層の土砂移動が活発になり鋼組工の脚部の一部が河床に埋もれる状況となった。安定性でみれば，流れに対する投影面積が減少すること，河床土砂により脚部を固定する作用が生じることから，安定性にはプラスの効果が働いていると考えられた。しかし鋼組工の安定性を著しく過大に評価するものではないと考え，今後の実験での検証課題，力学モデルの精度向上の課題として付記するに留めることとする。結果として鋼組工は十字型のタイプaの場合はブロックよりも転動しやすいが長脚型のタイプbはブロックよりも転動に対する限界値が上回り，タイプbの形状であれば流水中に投入されて転動するブロックを受け止め，一体となって流水中にとどまることができると示された。

5. まとめ

破堤時に水中に投入するブロックの転動流失を防ぐための鋼組工について発案し，基本的な形状から水理実験と基礎的な力学モデルで有効性について考察した。

投入方向や河床の状態などが単純な条件で，ブロックが転動する状況でも鋼組工が河床で転動せず，転動するブロックを止め，ブロックと鋼組工が一体となった状態で河床にとどめられる可能性を確認した。

まだ発案段階であり実用には構造の練磨や性能精査，施工での投入方法の確立などを進めることが課題である。

謝辞：鋼組工の転動実験には株式会社建設技術研究所東京本社水理センターの協力を得た。また特性値を得るための水理実験ではパシフィックコンサルタンツ株式会社つくば技術研究センターの協力を得た。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 東京消防庁・多摩川水防記録誌編集委員会編：濁流に挑む—多摩川決壊と水防活動記録—，東京法令出版，1975.
- 2) 社団法人関東建設弘済会：災害復旧記録 小貝川高須地先（ ）小貝川赤浜・豊田地先（ ），2009.
- 3) 山本太郎，東海林勉，土屋大輔，伊藤幸義，川邊和人，島田友典：洪水の流水中にブロックを投入した際の転動しやすさに関する水理実験と力学的考察，土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, I_517-I_522, 2015.
- 4) 財団法人土木研究センター：護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル（第2版），2003.7
- 5) 山本晃一，林建二郎，関根正人，藤田光一，田村正秀，西村晋，浜口憲一郎：護岸ブロックの抗力・揚力係数，および相当粗度の計測方法について，水工学論文集，第44巻，pp.1053-1058, 2000.

（2016.4.4受付）