

破堤時の締切での投入ブロック流失防止に用いる鋼製補助工に関する実験

Hydraulic experiments on steel material for trapping rolling block in flood water

一般財団法人 北海道河川財団	正員 山本太郎 (Taro Yamamoto)
一般財団法人 北海道河川財団	正員 東海林勉 (Tsutomu Toukairin)
北海道開発局 帯広開発建設部	正員 飛田大輔 (Daisuke Tobita)
寒地土木研究所	正員 島田友典 (Tomonori Shimada)

1. はじめに

堤防が破堤した時には緊急の復旧作業として締切工事が行われる。写真-1は2015年10月に網走川水系サラカオーマキン川の堤防が破堤した時の様子であり、破堤部が大型土のうで締め切られたが、開口部から流出する流れの水深が1mに満たない程度の状況でも流水中に土のうを設置していく作業は予想以上の時間と労力が必要であることが伺えた。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った記録があるが、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地点にブロックがとどまらず転動して流失することが多い。破堤時の緊急対応で用いられる備蓄ブロックは本来は河川護岸・根固などの構造物として据え付けて使用されるものであり、水中に投入されることを前提にはつくられていない。著者ら³⁾はこのような流水中に投入されたブロックの転動しやすさについて水理模型実験と簡易力学モデルで考察し、ブロックが河床に着地する際の不安定さが転動しやすさにつながっているとの結論を得た。ブロックのタイプを変えれば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水中に投入されても転動しにくいと考えられるが、破堤部を緊急工事で締め切っていくための作業効率も併せて考えれば万能なものが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であり、備蓄ブロックを使いながら作業時間の短縮ができるような技術の確立が必要である。

緊急対応の現場では投入したブロックが何かに引っかかるなどの偶然で止まった時にそれを足がかりにそれ以降に投入するブロックが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ることで製作できる構造物を鋼製補助工として発案し、その形状や流失特性について水理実験をもとに考察した。

2. 鋼製補助工と水理模型実験の概要

(1) 実験模型と実験水路



写真-1 破堤したサラカオーマキン川での締切作業
(2015.10.9 著者撮影)

鋼製補助工は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検討しているものである。水中で流れの抗力を受けて転動しないためには、流れに対する抵抗が小さく、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良い。水中での安定と施工性の良さを考え、写真-2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検討し1/20スケール模型を製作した。

材料はH鋼などの一般的な鋼材を使用することを想定し、模型は単位長さ当たりの重さを近似させている。写真-2左は基本形状としてタイプaの十字型、写真-2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-2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200kg、タイプbが約400kgとなる。同時に使用する模型ブロックは別実験³⁾で使用した写真-2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。実験には図-2に示す幅0.7m、長さ

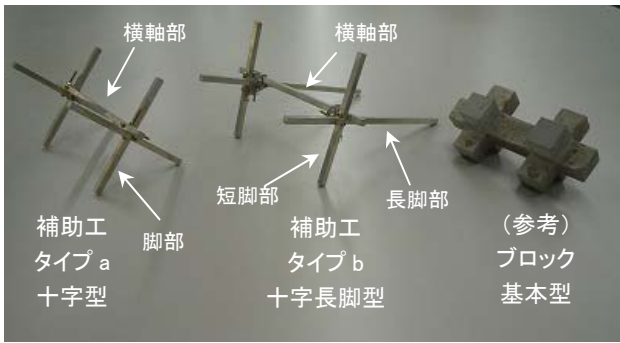


写真-2 鋼製補助工模型

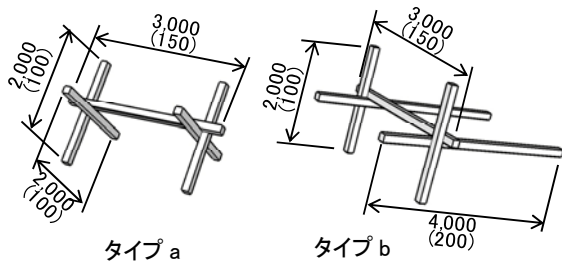


図-1 鋼製補助工の実物大寸法
(単位：mm, カッコ内は模型寸法)

10m の水路を使用し、このうち 5m 部分に中央粒径 $d_{50}=0.943\text{mm}$ 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 LEVEL 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製補助工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実施した。鋼製補助工を投入する際には、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。鋼製補助工を河床に静置させた状態での実験はあらかじ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、鋼製補助工の横軸部の高さ付近の位置の流下方向の流速をプロベ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。

3. 実験結果

(1) 単体実験 (投入・静置)

まず鋼製補助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 には比較として著者ら³⁾によるブロックの単体実験の結果も併せて示した。

十字型の鋼製補助工タイプ a は投入・静置いずれの場合も流速 0.4m/s 程度 (フルード則換算による参考値で実物大 1.8m/s 相当, 以下実物大換算は全てフルード則による) で転動流失した。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低い結果である。

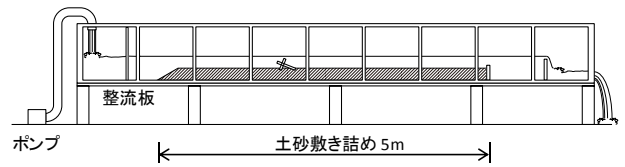


図-2 実験水路の模式図

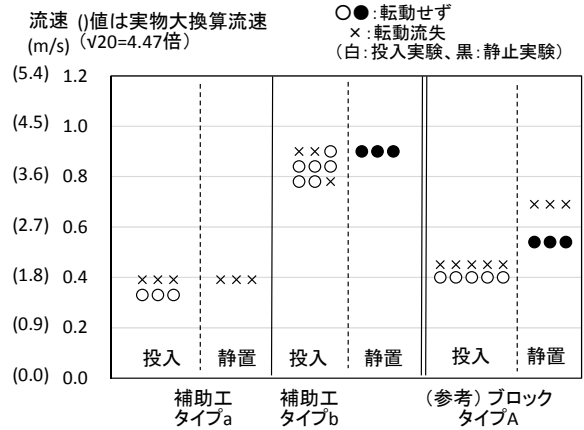


図-3 実験結果 (単体実験)

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。

十字長脚型の鋼製補助工タイプ b は流速 0.8m/s 程度 (実物大 3.6m/s 相当) 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十字長脚型の鋼製補助工タイプ b の転動限界流速が大きく、ブロックが転動して流されるような速い流速の流れでも十字長脚型の鋼製補助工タイプ b の場合は流失しにくい結果が示された。この実験結果から投入したブロックが転動する流れの条件のときにも、タイプ b の形状であれば鋼製補助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、水中に投入された鋼製補助工が河床にあるところにブロックを投入してブロックが鋼製補助工で止まるかを確認するための、ブロック受け止め実験を行った。実験方法は、鋼製補助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製補助工に衝突してとどまるかを確認する方法とした。実験結果を表-1 に示す。流速 0.85m/s (実物大 3.8m/s 相当) でも鋼製補助工は流失しなかった。この状態で河床の土砂移動が激しく流量を増加させることが困難となったため、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製補助工に衝突して停止することが確認できた。

(3) 補助工・ブロック一体実験

河床に静置した鋼製補助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、次に鋼製補助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

表-1 実験結果（ブロック受け止め実験）

流速 m/s	補助工タイプb	補助工タイプb		
		1回目	2回目	3回目
0.66 (3.0)	○	○	○	
0.70 (3.1)	○	○	○	
0.77 (3.4)	○	○	○	
0.80 (3.6)	○	○	○	
0.85 (3.8)	○	○	○	

○: 転動せず
()内は実物換算流速(√20=4.47倍)

表-2 実験結果（補助工・ブロック一体実験）

流速 m/s	補助工タイプb
0.75 (3.4)	○
0.80 (3.6)	○
0.84 (3.8)	○
0.92 (4.1)	○
0.90 (4.0)	○

○: 転動せず
()内は実物換算流速(√20=4.47倍)

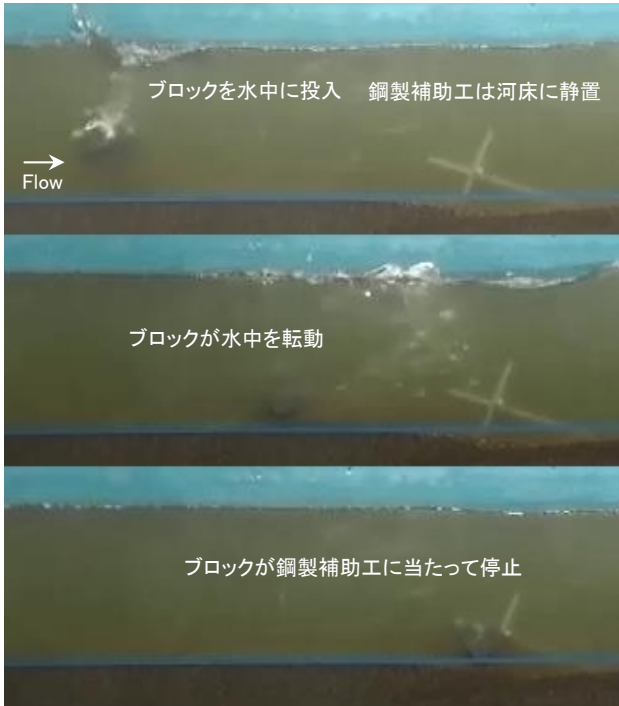


写真-3 実験写真（ブロック受け止め実験）

せて河床にとどまり続けるかを確認する補助工・ブロック一体実験を行った。実験結果を表-2 に示す。この実験でも流速を 0.90m/s（実物大 4.0m/s 相当）まで増加させても鋼製補助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した。転動に対する限界状態は確認できなかったが、ブロック単体が転動流失する条件でも、ブロックが鋼製補助工に捕捉された一体の状態では流失しにくいことが示された。

(4) 横置き実験

鋼製補助工がまだ発案段階であるため様々な状況を想定して有効性を確かめていく必要があるが、このうち鋼製補助工の横軸部が流れに対して垂直でなく平行になった場合に、垂直の場合より流失しやすくなるのではとの疑問が生じた。このため鋼製補助工タイプ a 及びタイプ b を単体で横軸部が流れに対して平行になるよう河床に静置して流失限界を確認する実験を行った。なお、横軸部が流れに対して垂直となる置き方を縦置き、並行となる置き方を横置きとする。

実験結果は表-3 の通りであり、鋼製補助工タイプ b の場合、本来の縦置きでは流速 0.9m/s（実物大 4.0m/s

表-3 実験結果（横置き実験）

横置き実験			参考比較: 単体実験(縦置き静置)		
流速 m/s	補助工タイプa	補助工タイプb	流速 m/s	補助工タイプa	補助工タイプb
0.62 (2.8)	○	○	0.39 (1.7)	×	×
0.64 (2.9)	○	×	0.90 (4.0)	-	-
0.65 (2.9)	○	-		○	○
0.68 (3.04)	○	-		○	○
0.682 (3.05)	×	-		○	○

○: 転動せず, × 転動
()内は実物換算流速(√20=4.47倍)



写真-4 横置き実験（補助工タイプ a の例）

相当)でも流失しなかったのに対して、横置きでは流速 0.64m/s（実物大 2.9m/s 相当）で流失した。流れに対する投影面積、転動方向の回転モーメントに違いが生じるためと考えられる。この結果は、鋼製補助工を流水中に投入する際に、横軸部の向きを出来る限り流れに垂直になるよう作業の工夫が必要となることを示唆している。なお、鋼製補助工タイプ a では横置きの場合、縦置きと比較して転動流失に関する限界流速が高くなる結果となった。

(5) 補強型実験

前項の横置き実験の結果から、鋼製補助工タイプ b は河床で横軸部が流れに対して平行の状態になった場合に流失限界が著しく低下する可能性が高いことがわかった。このため、鋼製補助工タイプ b の補強型として、短脚部及び長脚部を 2 本から 3 本に増やし、長脚部の横軸部から遠い側を横軸部と平行につなぐ部材を追加したものを鋼製補助工タイプ c として流失限界の向上が図れるかを確認した。

実験結果は表-4 の通りであり、補強前の鋼製補助工タイプ b と比較して、静置実験では流失限界は同程度、横置き実験では流失限界が向上する結果となった。ただし、補強型は補強前より大型となり部材重量は実物大で

表-4 実験結果（補強型実験）

静置実験			横置き実験		
流速 m/s	補助工 タイプb	補助工 タイプc 補強型	流速 m/s	補助工 タイプb	補助工 タイプc 補強型
0.80 (3.6)	- - -	○ ○ ○	0.62 (2.8)	○	-
0.83 (3.7)	- - -	○ ○ ○	0.64 (2.9)	×	-
0.90 (4.0)	○ ○ ○	- - -	0.69 (3.1)	-	○
			0.70 (3.13)	-	×

○: 転動せず, × 転動
()内は実物換算流速(√20=4.47倍)

表-5 単体での転動に対する限界流速の計算値

項目	単位	補助工 タイプa	補助工 タイプb	補助工 タイプc	ブロック 基本型
流速	u m/s	0.27	0.61	0.49	0.48
抗力係数	CD	5.11	4.10	5.89	1.62
投影面積	A cm ²	14.57	16.99	24.23	45.25
抗力	D N	1.747	8.703	8.572	7.155
距離(抗力)	L1 m	0.035	0.040	0.047	0.050
	M1 N m	0.061	0.348	0.407	0.358
重力	W N	1.73	2.45	2.86	11.89
距離(重力)	L2 m	0.035	0.142	0.142	0.030
	M2 N m	0.061	0.348	0.407	0.357
	M1/M2	1.00	1.00	1.00	1.00

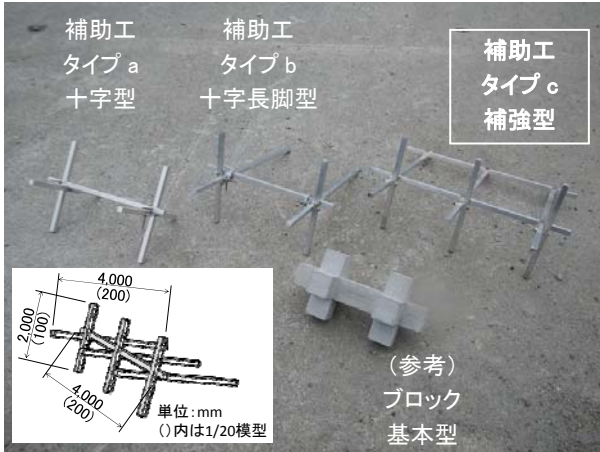


写真-5 鋼製補助工模型（補強型：右上，寸法は左下）

タイプ b が約 400kg に対してタイプ c の補強型が約 800kg となる（H150×150 の H 鋼使用を想定）。重量がほぼ倍増し構造もやや複雑となることから、災害時の作業性を考えれば補強型のタイプ c が良いとは限らず、むしろ単純な構造のタイプ b に対して、水中への投入時の方向維持の工夫を考えることが有効とも考えられる。

4. 転動に関する簡易力学モデルによる考察

流れの抗力 D によるブロック及び鋼製補助工の転動方向のモーメント M₁ 及び重力 W による転動を抑制させる方向のモーメント M₂ 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, L₁ : 代表流速が作用する位置の河床面からの高さ, L₂ : 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。M₁ > M₂ の場合に鋼製補助工が流れ方向に転動するとみなすことができる。なお揚力については山本ら⁴⁾の護岸ブロックの実験で抗力に対して1オーダー程度低いことが示されておりここでは無視した。代表流速が作用する高さは鉛直流速分布の積分からの平均高さとして算定した。別途算定した抗力係数 C_D の値を用い、図-4 に示す抗力 D と重力 W から式(2)による転動方向のモーメント M₁ と重力による転動とは反対方向のモーメント M₂ の値が一致する時を転動する限界状態として、この限界状態を想定したのが表-2 である。転動限界流速は補助工タイプ a が 0.27m/s, タイプ b が 0.61m/s, タ

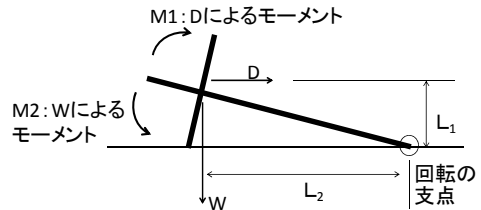


図-4 静止時のブロックに作用するモーメント模式図

タイプ c が 0.49m/s と算定される。十字型のタイプ a より十字長脚型のタイプ b の限界値が高いことは実験結果と同様である。補強型のタイプ c の限界流速がタイプ b より低いのは抗力係数が大きくなり、投影面積も増加することが影響している。補強型は重量増により安定すると想定していたが転動に対しての安定性が必ずしも向上するとは限らないことを示している。

以上の検討は簡易的な力学モデルによるものであり、実験結果についても実験を移動床で行ったことによる脚部の埋没の影響など安定性に関わる不確定な要素が多いため、実験の精度の向上や抗力係数など諸条件の精査などを含めて有効性の検証をさらに進めていく必要がある。

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) 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.