

平成 21 年 6 月 20 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560505  
 研究課題名（和文） 石組み落差工の石工の技術調査とその安定性評価に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on Technical Survey of Falling Works with Natural Stones and Criteria of Its Stability.  
 研究代表者  
 赤司 信義 (AKASHI NOBUYOSHI)  
 西日本工業大学・工学部・教授  
 研究者番号：50098951

## 研究成果の概要：

事例調査により石組み落差工の安定化のためには石組みの主石となる巨石の安定が重要であることが認められた。段落ち部の物体周辺の流れ場の計測結果から圧力分布を設定し、運動量式より、段落ち部の物体に作用する流体力評価式が導かれた。これにより、石組み落差工の単体、又は、全幅堰として流体力を評価でき、巨石の大きさの算定と安定計算が可能となった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,800,000	0	1,800,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

研究分野： 工学  
 科研費の分科・細目： 土木工学・水工水理学  
 キーワード： 石組み落差工，流体力評価，抗力，段落ち流れ，石工技術

## 1. 研究開始当初の背景

自然石を利用した河川整備技術の向上は、環境に配慮した河川整備を進める上で非常に重要であるが、石組み落差工の安定性や環境機能を評価する基準は明らかではない。また、近年、伝統的な河川整備技術の見直しと共に経験的な技術に基づく施工が各地で進められつつあり、石組み(石積み・石張り)による床止めや護岸工など多くの整備事例が見られるが、石工技術者が高齢化し技術の継承が危ぶまれている。

治水利水機能の評価には、洪水時の構造物としての安定性や低水時の貯水機能などの評価に関する水理的検討が必要であり、環境

機能としては、景観デザインや生物保全、水質保全などの観点からの検討が必要である。特に、自然石を利用した工法は、石工技術によってなされていて、伝統的技術の継承を図る上でも、力学的安定性の評価法の確立が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、石工の伝統的技術としての地域の石の文化の継承・普及を図ることを主題として、石工技術者の動向や石組みによる河川整備状況を調査し、石組みによる床止めの施工方法の整理と共にその力学的設計法を提示しようとするを目的としている。具

体的には、石組み落差工の設計に関わる流体力の評価、落差工周辺の流れ特性、河床安定性、構造物の耐久性に影響を及ぼす衝撃力の評価、石工の技術調査、の5項目の解明、特に、設計に関する落差工の流体力評価式を提示することを大きな目的としてとしている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 落差工の流体力評価式

##### ① 室内実験による流体力計測

実験装置は、全長 12m、水路幅 40cm、勾配 1/1000、水路下流に設置されている堰より 2.1m の位置に段落ち部のある開水路である。落差 20cm の段落ち部を落差工とみなして段落ち部に物体を設置し、完全越流、中間越流、不完全越流の流れに応じた流体力を、自作の L 型流体力計で、抗力、揚力を計測した。自然石による落差工との比較を行うため、水路中央部に物体を設置した状態、全幅に渡って物体が設置された状態、について、系統的に実験を行った。

##### ② 現地実験による流体力計測

実験河川には、河床勾配が 1/15 の区間が 30m あり、この区間に落差 80cm の階段式石組み落差工が 3 基設置されている。下流水深を変化させて、完全越流から不完全越流時の落差工の石に働く抗力および、落差工からの落下水のプール部に衝突する流れによる流体力を計測した。計測には、現地計測用の分力計を製作して実験を行った。

#### (2) 落差工周辺の流れ特性と河床安定性

##### ① 室内実験

流体力の評価を行ううえで、段落ち部の物体周辺の流れ場の把握が重要であることから、速度分布、圧力分布、特に、物体周面の圧力分布、水面形状の詳細な計測を行った。流速計測にはピトー管を、圧力計測には物体に埋め込んだピエゾ管を利用した。

段落ち上流面の礫層中の伏流特性を調べるため、段落ち上流にガラス玉による透水層を設置して、ピトー管とピエゾ管により流速分布と圧力分布を計測した。

##### ② 現地実験

現地実験では、落差工越流断面と落差工からの流れが河床物体に衝突した後の水平方向流速をピトー管で計測した。

伏流水の観測として、伏流水が上流貯水池の水門開放直後から計測地点に到達するまでの時間と擬似定常状態になるまでの水位を計測した。

落差工からの流れが下流河床に衝突することによって、石張り河床から砂礫が流出する状況を観測すると共に、落差工上流面のプール形成による砂礫堆積の観測を行った。

#### (3) 耐久性に影響を及ぼす衝撃力の評価

##### ① 室内実験

段落ち部に一辺 5cm のアクリル製立方体

を取り付けた力計を設置している。実験方法は、段落ち部上流 1m の位置に物体転動用の長さ 1m の小さな溝を設け、その上流端より物体を投入して軌跡をビデオカメラで撮影した。実験に用いた物体は、自然石、ゴルフボール、ガラス玉の 3 通りで行った。

##### ② 現地実験

現地実験でも、室内実験と同様に、転動用の溝を物体直前に取り付けて行った。また、現地実験では、自製の流体力計で衝撃力を計測した。計測時のサンプリング周波数は 1000Hz、取得時間は 20sec で、径が 5cm、15cm のほぼ球形の石を投入して行った。

#### (4) 石工の技術調査

自然石を利用した河道整備のうち、石の組み合わせを利用した石組みによる落差工の施工方法と護岸整備等で用いられる石積み工法についての現地調査を行って、施工法や景観性についての検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 落差工の流体力評価式

図-1 は、実験河川の石組み落差工の概略を示し、図-2 はこれをモデル化したものである。

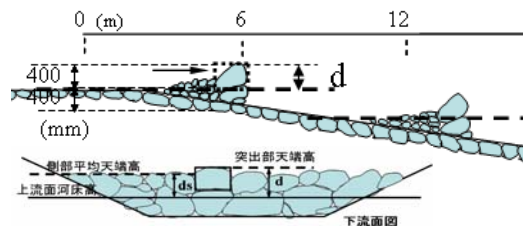


図-1 石組み落差工

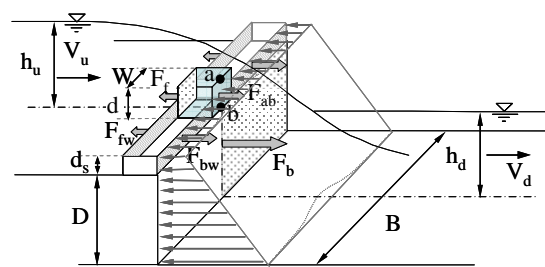


図-2 落差工のモデル化

$$F_M = F_H - F_f - F_{fw} + F_{ab} + F_b + F_{bw} \quad (1)$$

$$F_M = \rho B q V_d - \rho B q V_u \quad (1-1)$$

$$F_H = w_o h_u \frac{B}{2} - w_o h_d \frac{B}{2} \quad (1-2)$$

$$F_f = w_o \frac{V_u^2}{2g} \cdot d W + w_o (h_u - \frac{d}{2}) d W \quad (1-3)$$

$$F_{fw} = w_o \frac{V_u^2}{2g} \cdot ds (B - W) + w_o (h_u - \frac{ds}{2}) ds (B - W) \quad (1-4)$$

$$F_{ab} = (p_a d + \frac{w_o}{2} d^2) W \quad (1-5)$$

$$F_b = (p_b D + \frac{w_o}{2} D^2) B \quad (1-5)$$

$$F_{bw} = (p_a + w_o (d - ds) + p_a + w_o d) \frac{ds}{2} (B - W) \quad (1-6)$$

$$\frac{P_a/w_o}{hc} = (E_{q1} + E_{q2} + E_{q3} - E_{q4}) / E_{q5} \quad (2)$$

$$E_{q1} = hc/hd - hc/hu - (hu/hc)^2/2 + (hd/hc)^2/2 \quad (2-1)$$

$$E_{q2} = W/B \cdot d/hc \cdot \left\{ (hc/hu)^2/2 + hu/hc - (d/hc)/2 \right\} \quad (2-2)$$

$$E_{q3} = ds/hc \cdot (1 - W/B) \cdot \left\{ (hc/hu)^2/2 + hu/hc - (ds/hc)/2 \right\} \quad (2-3)$$

$$E_{q4} = W/B \cdot (d/hc)^2/2 + d/hc \cdot D/hc + (D/hc)^2/2 + \{d/hc - (ds/hc)/2\} \cdot ds/hc \cdot (1 - W/B) \quad (2-4)$$

$$E_{q5} = D/hc + ds/hc + (d/hc - ds/hc) \cdot W/B$$

$$\frac{P_b/w_o}{hc} = \frac{P_a/w_o}{hc} + \frac{d}{hc} \quad (3)$$

$$\text{抗力は、} \quad F_D = F_f - F_{ab} \quad (4)$$

$$\text{抗力係数は、} \quad C_D = 2 \cdot F_D / (\rho \cdot d \cdot W \cdot V_c^2) \text{より、} \quad (5)$$

$$C_D = \left( \frac{hc}{hu} \right)^2 + 2 \cdot \left( \frac{hu}{hc} - \frac{d}{hc} - \frac{P_a/w_o}{hc} \right) \quad (6)$$

$$\frac{h_u}{h_c} = 1.1 + \left( \frac{h_{uw}}{h_c} - 1.1 \right) \cdot ds/d \quad (7)$$

$h_{uw}$ は全幅堰の上流水深である。

図-3は抗力と揚力の実験結果を示している。

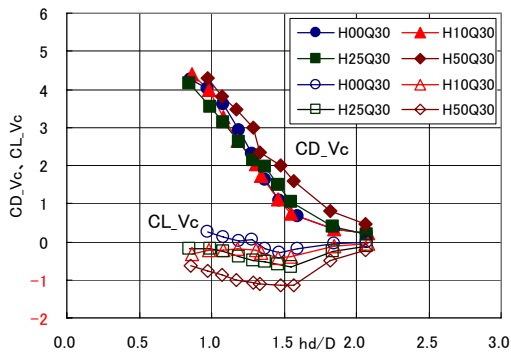


図-3 流体力の実験結果

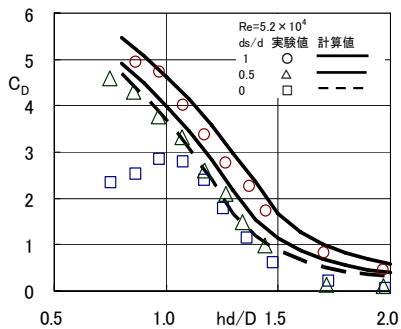
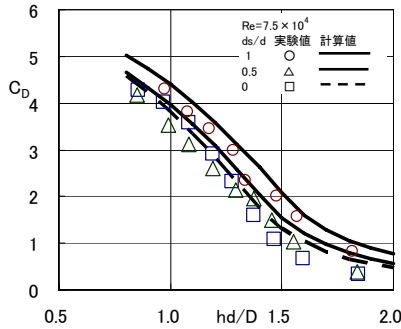


図-4 実験結果と計算結果の比較

図-2に基づいて、(1)式の運動量式により、段落ち部の物体下流面の圧力は(2)、(3)式で

与えられる。抗力係数は(6)式となる。図-4は、この式の計算結果と実験結果を比較したもので、ほぼ一致している。計算結果を使いやすいように、近似式で表したものが(8)式で、図-5は計算結果と近似式を示していて、近似式で十分計算結果を表せる。

自然石による落差工を設計する場合、落差工下流面は不規則な形状となり、空洞が発生することや、本実験のような立方体でなく球体に近く抗力はさらに低下することから抗力の最大値は、 $hd/D=1$ の場合を対象とすることで十分と考える。揚力の最大値は、 $hd/D=1.5$ の時の $C_D$ の0.5倍程度である。洪水時の流れは、 $hd/D$ が1から1.5の状態に、不規則に変動することを考慮すると、抗力の最大値、揚力の最大値を用いて、安定計算することが必要と考える。

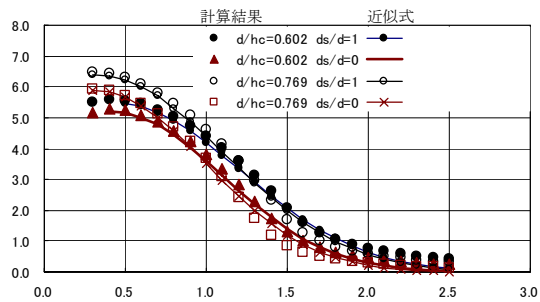


図-5 計算結果と近似式の比較

$$C_D = \frac{C_{Dmax}}{\exp(\alpha \cdot (hd/D - x_0)^{2.1})} \quad (8)$$

$$\alpha = 0.8 \cdot (2 - ds/d)^{0.44}$$

$$x_0 = 0.22 \cdot (d/hc)^{-1.18}$$

$$C_{Dmax} = 6.7 \cdot \left( \frac{d}{hc} \right)^{0.5} \left\{ 1 + 0.14 \cdot \left( \frac{d}{hc} \right)^{1.7} \cdot \left( \frac{ds}{d} \right)^{2.5} \right\}$$

## (2) 落差工周辺の流れ特性と河床安定性

① 物体周辺の流れ場は、段落ち部の上流水深の評価が重要で、全幅堰の流量公式を基にして、上流水深は段落ち部に設置した物体と関係づけて評価された。

② 落差工からの越流水の河床衝突により、河床の表層空隙の砂礫は、突入速度により流出すること、石径を深さ方向に変化させるフィルタ河床構造の有効性が確認された。

③ 段落ち部上流にガラス玉層を設置して浸透流を観測した。段落ち部付近の浸透流量は全流量の2割近くとなり、負圧によって大きくなること、段落ち部付近を除いた負圧の影響のない上流部の浸透流量は従来の知見とほぼ一致し、水面形状も粗度係数の評価によってほぼ評価されることが認められた。

## (3) 耐久性に影響を及ぼす衝撃力の評価

室内実験において、ガラス玉、ゴルフボール、丸い石を溝の上に置いて流下させ、軌跡を観測した。物体への衝突率は、ガラス玉は

全て、自然石は2割、ゴルフボールで4割であった。溝の上を流下するため、ガラス玉はすべて衝突するが、自然石は投入した時点で流れにあおられて直線的に流下することはないこと、また、物体直前でよどみ圧によって跳ね出されること、軌跡は、自然石の形状や設置方法によって転動方向に大きな影響を与えることが認められた。単体の石が流下する場合、物体前面の淀み圧により跳ね出されることから、淀み圧を超える慣性力が必要で、洪水流下時の場合のように、互いにぶつかりながら流下する場合に大きな慣性力が生じて物体に衝突することになる。

図-6は、現地実験での衝撃力Fhの結果で、水中重量Sで割った値を示している。実験河川は、直径1m近くの石張り河床で、直径d cmの石を投入しても自然に衝突させることは困難で、パイプによる溝を物体前面20cmまで設置して、衝突させた結果を示している。大きな石は、溝の上で減速することがあり、実験中の判別は難しい。衝撃力はほぼレイノルズ数に比例することが認められた。

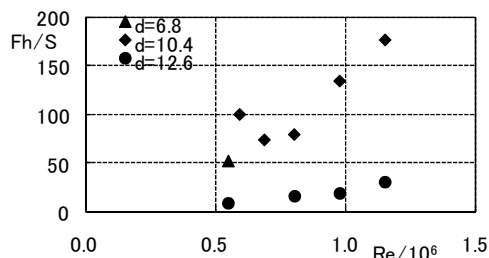


図-6 衝撃力の評価

#### (4) 石工の技術調査

写真-1は、熊本県水俣市、福岡県甘木市の落差工の施工事例で、写真-2は石組みの実地調査の状況である。

写真-1 現地施工事例



写真-2 石組み実地調査



石組みの落差工は流れを集中化させるため、石組みに作用する力を支持し分散させる上で、主石となる巨石の配置が特に重要である。本研究結果により安定であるための主石の大きさの算定が可能となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6件)

- ① 赤司信義, 石川誠, 自然石を利用した落差工の水位評価と設計外力評価基準に関する研究, 西日本工業大学紀要, Vol. 39, pp. 29-34, 2009, 査読無
- ② 赤司信義, 石川誠, 石組み落差工の設計外力評価と安定性に関する研究, 西日本工業大学紀要, Vol. 38, pp. 67-72, 2008, 査読無
- ③ 赤司信義, 石川誠, 河原輝昌, 石組み落差工設計のための流体力評価法について, 河川技術論文集, Vol. 14, pp. 289-294, 2008, 査読有
- ④ 赤司信義, 石川誠, 河原輝昌, 不完全越流時のステップ上の物体に働く抗力の評価について, 第4回流体力の評価とその応用に関する講演集, Vol. 4, pp. 45-50, 2007, 査読有
- ⑤ 赤司信義, 石川誠, 河原輝昌, ステップ部の物体に働く流体力の評価法に関する研究, 西日本工業大学紀要, Vol. 37, pp. 41-48, 2007, 査読無
- ⑥ 石川誠, 赤司信義, 河原輝昌, 自然石を利用した河道整備の事例調査, 西日本工業大学紀要, Vol. 37, pp. 65-70, 2007, 査読無

[学会発表] (計 4件)

- ① 牧原貴之, 富士光喜, 赤司信義, 石川誠, 岡本良徳, 3Dレーザスキャナによる転石河道の河床調査について, 平成20年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2009/3.7, 九州大学工学部
- ② 河原輝昌, 赤司信義, 石川誠, ステップ上の物体に働く抗力の変動要因について, 平成19年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2008/3.8, 長崎大学工学部
- ③ 河原輝昌, 赤司信義, 石川誠, 段落ち部に設置された水没物体に働く流体力の評価について, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2008/9.22, 立命館大学
- ④ 河原輝昌, 赤司信義, 石川誠, 段落ち部の物体に働く不完全越流時の抗力の評価について, 平成18年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2007/3.7, 九州共立大学工学部

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

赤司 信義

西日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：50098951

##### (2) 研究分担者

石川 誠

西日本工業大学・工学部・講師

研究者番号：10168205