

令和元年6月17日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06518

研究課題名(和文) 階段状水路におけるnonaerated skimming flowの特性

研究課題名(英文) Characteristics of nonaerated skimming flows in stepped channels

研究代表者

高橋 正行 (TAKAHASHI, Masayuki)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：10318363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：水路傾斜角度 $\theta = 19^\circ - 55^\circ$ の階段状水路のnonaerated skimming flowを対象に、乱流境界層の発達について考察を加え、境界層厚を合理的な実験式で示した。この境界層厚を示す式と新たに導いた水面形状を示す式とによって、階段状水路におけるnonaerated skimming flowの水面形状、乱流境界層の発達状態、比エネルギーの算定が可能となった。この結果、階段状水路に対して超過洪水など大流量時に形成されるnonaerated skimming flowの水理量が求められ、階段状水路のエネルギー減勢は平坦な傾斜水路に比べて大きいことが明らかにされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の多発する集中豪雨による超過洪水がダムやembankment damの階段状洪水吐を流下する場合、あるいは階段状の落差工で大流量の越流が生じた場合、階段状水路上の流れが全てnonaerated skimming flowの流況となり、この場合の水理特性の解明が階段状水路の土工設計のために必要である。本研究成果によって、nonaerated skimming flowの水深、断面平均流速、比エネルギーの大きさを定量的に求めることが可能となった。その結果、階段状水路によるエネルギー減勢は平坦な傾斜水路に比べて大きいことが明確にされた。

研究成果の概要(英文)：Stepped channels are effective for dissipating the energy of supercritical flow that occurs at steep channels. For a large discharge and/or small dam height, the nonaerated region occupies a large portion of the skimming flow in stepped spillways. For hydraulic design of stepped channels, it is important to know the depth and the velocity in nonaerated skimming flows in order to estimate the specific energy. However, most experimental studies for stepped channels have focused on aerated skimming flows, and characteristics of nonaerated skimming flows have not yet been clarified. This study shows reasonable equations for estimating the boundary layer development and the water surface profile along the channels for nonaerated skimming flows. The energy head along the channel is obtained, indicating that the energy dissipation for the stepped channel becomes larger than that for the smooth channel.

研究分野：水工水理学

キーワード：階段状水路 エネルギー減勢構造物 skimming flow 減勢工 落差工 nonaerated skimming flow

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

急傾斜水路上の高速流を傾斜面上で減勢させる目的で階段状水路の利用がなされている^{1), 2)}. 階段状水路の流況はステップ高さ, 流量, 水路傾斜角度によって変化し, 水面が直線的で各ステップ隅角部で常に渦の形成される skimming flow (図 1 a), 各ステップ隅角部でエアポケットを伴うナップが形成される nappe flow (図 1 c), skimming flow と nappe flow の混在する transition flow (図 1 b) に分類されている¹⁾. 大流量が階段状水路に流入したときに形成される skimming flow はある程度の距離を流下すると水面から空気が混入しはじめる. この位置を inception point (空気混入開始位置, 以下 I.P. と略す) (図 2) と呼び, その下流側では空気混入流となる (図 2 領域②, ③). この空気混入流は不等流区間を経て各ステップ上の水深と流速が繰り返し同じ大きさになる擬似等流状態となる (図 2 領域③). すなわち, I.P. より上流側では水のみの流れの nonaerated skimming flow (図 2 領域①), I.P. より下流側では空気混入した aerated skimming flow (図 2 領域②, ③) に区分される. 階段状水路の工設計のためには, nonaerated skimming flow と aerated skimming flow の両方の領域における水深, 流速, 比エネルギーの大きさを予測することが必要である.

Aerated skimming flow において, 擬似等流を対象に広範囲な水路傾斜角度 と相対ステップ高さのもとで, 空気混入流の水深, 流速, 空気混入率, 比エネルギーの大きさが明らかにされている²⁾. また, 空気混入不等流を対象に, 高橋・大津³⁾ は広範囲な水路傾斜角度と相対ステップ高さのもとで空気混入流水深, 流速, 空気混入率, 比エネルギーの大きさを明らかにし, 水面形を求める式を提示した. この水面形方程式を求めるためには, 空気混入開始断面までの距離と水深が必要であり, nonaerated skimming flow の水理特性の解明が必要であった.

Nonaerated skimming flow においては, Meireles and Matos⁴⁾ や Meireles et al.⁵⁾ による検討があるものの, 水路傾斜角度や相対ステップ高さが流速, 比エネルギー, およびエネルギー減勢におよぼす影響については明らかにされていない. これらの研究では, 水深と境界層厚の実験結果を示したに過ぎず, nonaerated skimming flow の水理特性について不明な点が多く残されていた.

2. 研究の目的

急勾配水路の傾斜面を階段状にすることで高速流を水路上で減勢できることは直感的には理解される. しかし, 定量的な減勢量とメカニズムは明確とは言えない. 階段状水路に大流量の流れが流入したとき, 水面がほぼ直線状の nonaerated skimming flow となる (図 2 ①). さらに, ある程度流下した後に水面から空気混入し, aerated skimming flow となる (図 2 ②, ③). nonaerated skimming flow における階段状水路によるエネルギー減勢効果は不明である. この流れの水深, 流速, 比エネルギーの大きさを予測することが工設計上重要である. 本研究課題では一般的に利用される水路傾斜角度 $\theta=19^\circ \sim 55^\circ$ と広範囲のステップ高さのもとで nonaerated skimming flow の特性を解明する.

3. 研究の方法

階段状水路における nonaerated skimming flow の水理特性を明らかにするため, 水深, 流速, 乱流境界層の発達状態に対する水路傾斜角度 θ , 相対ステップ高さ S/d_c (S はステップ高さ, d_c は限界水深), 相対流下距離 H_s/d_c (H_s は落差) の影響について検討した. nonaerated skimming flow の流速 u の測定にはレーザー流速計 (L.D.V.) および JIS 型ピトー管を用い, 水深の測定にはポイントゲージを用いた. なお, 空気混入開始断面 (I.P.) 付近においては, 流れに空気が混入しており, L.D.V. での流速測定およびポイントゲージでの水深評価は不正確である. そのため, I.P. 断面付近においては, 2 点電極型ボイド率計を用いて, 流速 u の測定と空気混入率 $C=[\text{空気の体積}/(\text{空気の体積}+\text{水の体積})]$ の測定値に基づいた水深評価を行った.

階段状水路における nonaerated skimming flow の水面形および境界層厚の計算法については, 階段状水路の nonaerated skimming flow を対象に解析的水面形および境界層厚の計算法を流れの連続の式, エネルギー式, および運動量方程式に基づいて導出した. また, 境界層の発達状態の

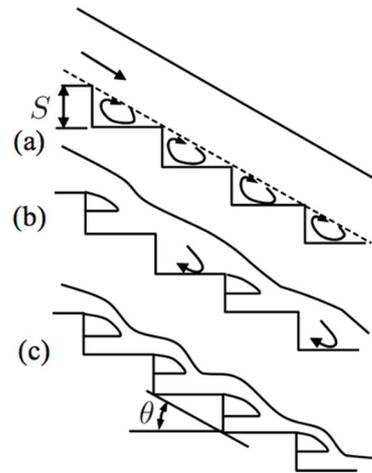


図 1 階段状水路の流況 a) skimming flow, b) transition flow, c) nappe flow

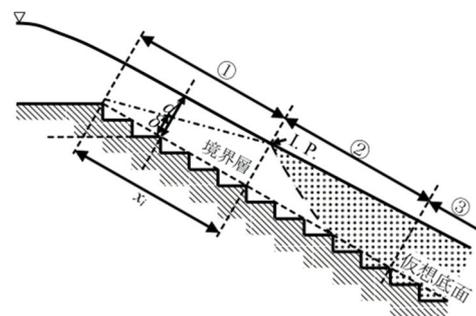


図 2 Skimming flow における流況区分, : Nonaerated skimming flow, : Nonuniform aerated flow, : Quasiuniform aerated flow

実験的検討のためには精度の高い流速測定が必要であるため、L.D.V.を用いた流速測定を行った。

4. 研究成果

(1) 空気混入開始断面 (I.P.) の水理特性
 階段状水路における傾斜始端から I.P. までの距離 x_i (図3参照) は、 $x_i/k = f(F_*)$ の関係で示される。ここに、 k は $k = S \cos\theta$ であり、 F_* は roughness Froude number $F_* = q / (g \sin\theta k^3)^{0.5} = \{(S/dc)^3 \sin\theta \cos^3\theta\}^{-1/2}$ であり、 S/dc と θ の影響が含まれている。測定値をこの関係で整理すると図4が得られる。なお、図4には他の研究者の実測値⁴⁾⁻⁶⁾も含まれている。 x_i/k は、

$$x_i/k = 5.0 F_*^{0.97} \quad (1)$$

によって近似できる⁷⁾。なお、断面平均空気混入率 $C_m = (1/y_{0.9}) \int_0^{y_{0.9}} C dy$ は空気混入開始断面では $C_{mi} = 0.2$ となった^{7), 8)}。ここに、 $y_{0.9}$ は $C=0.9$ となる y の高さである。

空気混入開始断面 (I.P.) では流下方向流速 u を $y=y_{0.9}$ での流速 $u_{0.9}$ を用いて、

$$u/u_{0.9} = (y/y_{0.9})^{1/N} \quad (2)$$

のように無次元化すると、流速分布は $1/N$ 乗則で近似される。Takahashi and Ohtsu²⁾ はレイノルズ数 $Re (= q/\nu; q$ は単位幅流量、 ν は水の動粘性係数) の影響が認められない擬似空気混入流を対象に N の値を求めるための実験式、

$$N = 14\theta - 0.65(S/dc)[(100/\theta)(S/dc) - 0.041\theta + 6.27] \quad (3)$$

を示している。I.P.での流速分布は(2)、(3)式を適用した結果で近似できることを実験的に確かめることができた^{7), 8)}。

(2) Nonaerated skimming flow の流速分布

Nonaerated skimming flow の場合、乱流境界層が発達中のため境界層外側では一様流速分布となっている。また、エッジ断面の乱流境界層内の流速分布は、

$$u/U = f(y/\delta, \theta, S/dc, x/dc) \quad (4)$$

の関係で示されるものと考えられる。ここに、 U は乱流境界層外側の流速、 δ は乱流境界層厚である。エッジ断面の流速 u の実測値を(4)式の関係で整理した結果、エッジ断面における流速分布は乱流境界層内 ($0 \leq y \leq \delta$) は、

$$u/U = (y/\delta)^{1/N} \quad (5)$$

の $1/N$ 乗則で近似され、乱流境界層外 ($\delta \leq y \leq d$) は、

$$u/U = 1 \quad (6)$$

で近似されることを確かめた⁷⁾。また、与えられた θ と S/dc に対して相対流下距離に関わらずほぼ同一な流速分布形状を示すことを明らかにした⁷⁾。

(3) 乱流境界層の発達状態

階段ではない平坦な傾斜水路における境界層厚 δ は

$$\delta/x = a(x/k)^{-b} \quad (7)$$

の関係で示されている⁹⁾。ここに、 a, b は定数、 k は等値粗度高である。

階段状水路の skimming flow の場合、階段による水路の凹凸を $k = S \cos\theta$ で代表させることにする。水路中央面における単位幅流量 q は

$$q = \int_0^d u dy = U(d - \delta^*) \quad (8)$$

によって求められる。ここに、 δ^* は排除厚であり、乱流境界層内の流速分布を(5)式で近似することによって、

$$\delta^* = \delta / (1 + N) \quad (9)$$

で表示される。すなわち、(9)式と(8)式より、

$$U = q / [d - \delta / (1 + N)] \quad (10)$$

の関係が得られる。

I.P.での水深を d_i 、乱流境界層外側の流速を U_i で表すことにする。I.P.では $\delta = d_i$ となることから、この条件を(7)式と(10)式に代入し、

$$d_i = a(x_i^{-b+1}/k^{-b}) \quad (11)$$

$$U_i = [(1+N)/N] q/d_i \quad (12)$$

が得られる。

断面、間 (図3参照) の自由水面に沿う流線ではエネルギー損失を無視して、ベルヌーイの定理を適用し、 $x_i \gg d_i$ を用いると、

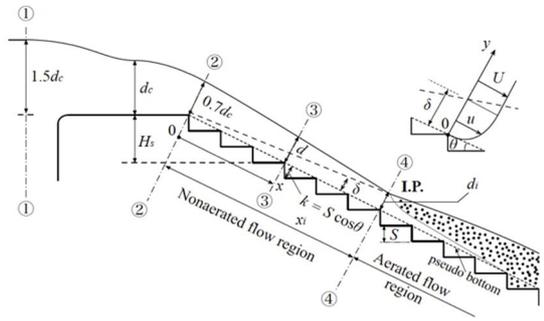


図3 階段状水路の定義図

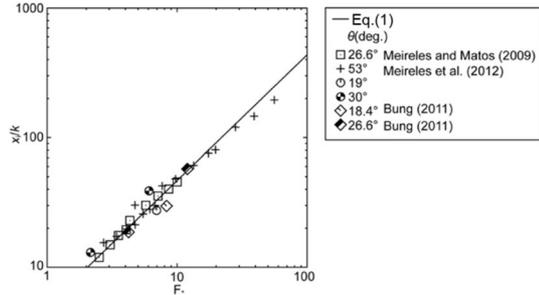


図4 空気混入開始断面までの距離

$$U_i/V_c = [2(x_i \sin \theta / d_c)]^{1/2} \quad (13)$$

となる．ここに， V_c は限界流速である．(11)と(13)式を(12)式に代入すると，

$$x_i/k = [(1+N)/\{Na(2)^{1/2}\}]^{1/(1.5-b)} F_*^{1/(1.5-b)} \quad (14)$$

となる．(14)式と(1)式の x_i は同じ大きさであり，(3)式より N の値が求まるから，

$$a = 0.135(1+N)/N \quad (15)$$

$$b = 0.469 \quad (16)$$

となる⁷⁾．(15)式と(16)式を(7)式に代入すると δ の実験式が得られ⁷⁾，変数変換すると，

$$\delta/d_c = 0.135(1+N)/N \{S \cos \theta / d_c\}^{0.469} (x/d_c)^{0.531} \quad (17)$$

が得られる⁷⁾．(3)式と(17)式より，与えられた x/d_c ， θ ， S/d_c に対して δ/d_c の算定が可能になった⁷⁾．

(4) 水面形

階段状水路の傾斜始端(図3の断面)と nonaerated flow の評価断面($x=x$ ，図3の断面)間の自由水面の流線に沿ってベルヌーイの定理を適用すると，

$$3d_c/2 + x \sin \theta = d \cos \theta + U^2/(2g) \quad (18)$$

が得られる．速度水頭は(10)式より，

$$U^2/(2g) = d_c^3/[2(d-\delta)^2] \quad (19)$$

となる．(19)式を(18)式に代入し，流下方向座標 x で微分すると水面形方程式，

$$dd/dx = [\sin \theta - \{d_c/(d-\delta^*)\}^3 \delta^* dx] / [\cos \theta - \{d_c/(d-\delta^*)\}^3] \quad (20)$$

が得られる．境界条件は $x=0$ で $d/d_c \approx 0.7$ と $\delta^*/d_c \approx 0$ を用い，(20)式を解き，(9)式を代入すると，

$$d/d_c = \delta/[d_c(1+N) + [0.7^{-2} + \{x \sin \theta / d_c - (d/d_c - 0.7) \cos \theta\}]^{-0.5}] \quad (21)$$

が得られる．(21)式と(17)式および(3)式を用いることで， θ ， S/d_c ， x/d_c を与えると相対水深 d/d_c が求められる．

図5に nonaerated skimming flow の水面形と境界層厚の実測値と計算値の一例を示す．図に示されるように， d/d_c と δ/d_c の計算値と実測値とはほぼ一致している⁷⁾．また，図に示されるように，与えられた θ と x/d_c に対して， S/d_c の変化が d/d_c に与える影響は小さい．

(3)，(17)，および(21)式を用いることで，与えられた θ ， S/d_c に対して任意な x/d_c での d/d_c と δ/d_c が求められる．また，(3)，(17)，および(21)式を用いて inception point 断面までの距離 x_i/d_c の予測が可能となった．

(5) 比エネルギー

Nonaerated skimming flow のエッジ断面における比エネルギー E は圧力を静水圧分布と仮定すると，

$$E = d \cos \theta + \alpha V^2/(2g) \quad (22)$$

で示される．ここに，断面平均流速 V は，

$$V = (U/d) \{d - \delta/(N+1)\} \quad (23)$$

で示され， α はエネルギー補正係数であり(5)，(6)，(23)式を用いると，

$$\alpha = \{[1 - 3\delta]/\{(N+3)d\}\} / [1 - \delta/\{(N+1)d\}]^3 \quad (24)$$

で示される．(24)式より，境界層が未発達($\delta/d=0$)のとき $\alpha=1$ である．(22)式と $V=q/d$ より，相対比エネルギー E/d_c は，

$$E/d_c = d/d_c \cos \theta + \alpha/2 (d/d_c)^2 \quad (25)$$

で示される． α および d/d_c は(3)，(17)，(21)，および(24)式より求められ，それらの値を(25)式に代入することで E/d_c の計算値が得られる． E/d_c の計算値の一例を図6に示す．なお，図6の太い実線はエネルギー損失を無視した場合の相対比エネルギー，

$$(E/d_c)_{\text{non-loss}} = 1.5 + x \sin \theta / d_c \quad (26)$$

を示している．図6に示されるように，与えられた θ と S/d_c に対して， x/d_c の増加に伴い E/d_c は増加する．図6に示されるように，平坦な傾斜水路($S/d_c=0$)の場合， $x/d_c \leq 8 \sim 10$ において E/d_c の値は $(E/d_c)_{\text{non-loss}}$ とほぼ同じ値を示しており，エネルギー損失がほとんど生じていない．これは，境界層の発達の程度が小さく，流れの大部分を速度勾配のない乱れの小さい領域が占めているためと考えられる．一方， $x/d_c \geq 5$ になると E/d_c の値は $(E/d_c)_{\text{non-loss}}$ よりも小さくなり，エネルギー損失が生じている．この場合の乱流境界層厚は $\delta/d_c \geq 0.4$ 程度になっている．平坦な傾斜水路の場合と階段状水路とを比較すると，階段状水路は短区間でエネルギー損失が生じており， $x/d_c \geq 5$ の長さを有する階段状水路はエネルギー減勢効果を発揮することが明らかになった⁷⁾．

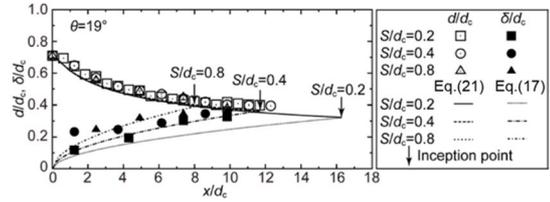


図5 水面形と乱流境界層の発達

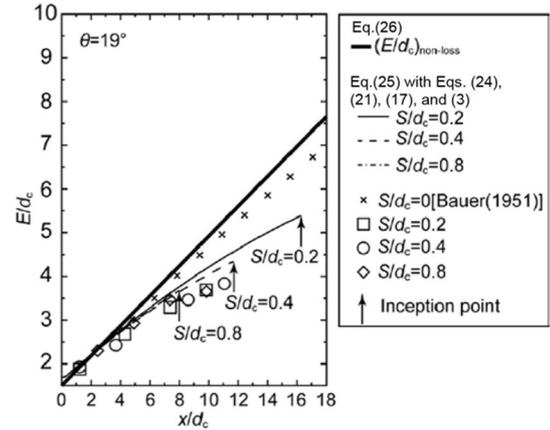


図6 相対比エネルギー

参考文献

- 1) Ohtsu, I., Yasuda, Y., Takahashi, M.: Flow characteristics of skimming flows in stepped channels, *J. Hydraulic Engineering*, 130(9), 860-869, 2004.
- 2) Takahashi, M., Ohtsu, I.: Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes, *J. Hydraulic Research*, 50(4), 427-434, 2012.
- 3) 高橋正行, 大津岩夫: 階段状水路の skimming flow における空気混入不等流解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 69(4), I_913-I_915, 2013.
- 4) Mireles, I., Matos, J.: Skimming flow in the non-aerated region of stepped spillways over embankment dams, *J. Hydraulic Engineering*, 135(8), 685-689, 2009.
- 5) Meireles, I., Renna, F., Matos, J., Bombaredelli, F.: Skimming nonaerated flow on stepped spillways over roller compacted concrete dams, *J. Hydraulic Engineering*, 138(10), 870-877, 2012.
- 6) Bung, D. B.: Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways, *J. Hydraulic Research*, 49(5), 639-648, 2011.
- 7) Takahashi, M., Yamamoto, Y., Ohtsu, I.: Water surface profiles and energy head in nonaerated skimming flows on stepped spillways, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, IAHR, 1287-1295.
- 8) 高橋正行, 竜沢宗一郎, 大津岩夫: 階段状水路の skimming flow における空気混入不等流の水利特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), 73(4), I_721-I_726, 2017.
- 9) Bauer, W. J.: *The development of the turbulent boundary layer on steep slopes*, Ph. D thesis, University of Iowa, 1951.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Takahashi, M., Yamamoto, Y., and Ohtsu, I., Water surface profiles and energy head in nonaerated skimming flows on stepped spillways., Proceedings of the 37th IAHR World Congress, 査読有, pp. 1287-1295, 2017.

高橋正行, 竜沢宗一郎, 大津岩夫, 階段状水路の skimming flow における空気混入不等流の水利特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), 73 巻 4 号, 査読有, pp. I_721-I_726, 2017.

〔学会発表〕(計12件)

梶原大地, 高橋正行, 階段状水路における nonaerated skimming flow の乱流境界層の発達状態, 第61回日本大学工学部学術研究報告会, 日本大学工学部, 福島県郡山市, 2018年12月7日.

田中直哉, 高橋正行, 階段状水路のステップ水平部に設置された棧が skimming flow の水利特性に与える影響, 第61回日本大学工学部学術研究報告会, 日本大学工学部, 福島県郡山市, 2018年12月7日.

梶原大地, 高橋正行, 階段状水路における nonaerated skimming flow の乱流境界層の発達状態, 第62回日本大学理工学部学術講演会, 日本大学理工学部, 東京都千代田区, 2018年12月5日.

田中直哉, 高橋正行, 階段状水路のステップ水平部の棧が skimming flow の流況におよぼす影響, 第62回日本大学理工学部学術講演会, 日本大学理工学部, 東京都千代田区, 2018年12月5日.

田中直哉, 高橋正行, 階段状水路の skimming flow におけるステップ水平部の棧の影響について, 土木学会平成30年度全国大会第73回年次学術講演会, 北海道大学, 北海道札幌市, 2018年8月31日.

田中直哉, 高橋正行, 階段状水路の skimming flow におけるステップ水平部の棧設置の影響について, 第61回日本大学理工学部学術講演会, 日本大学理工学部, 東京都千代田区, 2017年12月1日.

田中直哉, 高橋正行, 階段状水路におけるステップ水平部の棧粗度設置の影響について, 土木学会平成29年度全国大会 第72回年次学術講演会, 九州大学, 福岡県糸島市, 2017年9月12日.

藏重敬輔, 高橋正行, 階段状水路における nonaerated skimming flow の流速特性の実験的検討, 第72回年次学術講演会, 九州大学, 福岡県糸島市, 2017年9月11日.

高橋正行, 竜沢宗一郎, 大津岩夫, 階段状水路の skimming flow における空気混入不等流の水利特性, 第61回水工学講演会, 九州大学, 福岡県糸島市, 2017年3月17日.

竜沢宗一郎, 高橋正行, 階段状水路における nonuniform aerated skimming flow の水利特性, 第59回日本大学工学部学術研究報告会, 日本大学工学部, 福島県郡山市, 2016年12月3日.

竜沢宗一郎, 高橋正行, 階段状水路における nonuniform aerated skimming flow の水面形解析, 第60回日本大学理工学部学術講演会, 日本大学理工学部, 東京都千代田区, 2016年12月3日.

竜沢宗一郎, 高橋正行, 大津岩夫, 階段状水路における nonuniform aerated skimming flow の水面形解析, 土木学会平成28年度全国大会 第71回年次学術講演会, 東

北大学，宮城県仙台市，2016年9月7日．

6．研究組織

該当なし

科研費による研究は，研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため，研究の実施や研究成果の公表等については，国の要請等に基づくものではなく，その研究成果に関する見解や責任は，研究者個人に帰属されます。