

エネルギー勾配による減勢効率の評価

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF ENERGY DISSIPATORS BY ENERGY GRADIENT

和田 清*・Hesham S. Mohamed Ali**・中村俊六***

By Kiyoshi WADA, Hesham S. MOHAMED ALI and Shunroku NAKAMURA

Energy gradient is proposed as an index for evaluation of the efficiency of energy dissipators in this paper. The energy gradient is defined as the ratio of the total energy dissipation to the length of the dissipator, and can be expected to be a linear function of Froude number. The index was applied for evaluation of some results of the forced jump with spot roughness, baffle and sill. The relations between the energy gradient and the initial Froude number can be approximated to be a straight line in each dissipators, therefore, the energy gradient can be used as an index for evaluating the efficiency of various energy dissipators.

Keywords : forced jump, energy dissipator, energy gradient

1. はじめに

減勢工は、ゲートやダムなどの堰上げによって増大した流水のエネルギーを減殺するための構造物である。減勢工としては、従来多くの形式が提案され、その安全性、施工性、経済性等から、強制跳水型、減勢室型の2形式が一般に採用されている¹⁾。前者は、流れの中に補助構造物を配置し、これに動水圧を分担させて強制的に跳水を発生させる形式であり、後者はコンパクトな減勢室内に水脈を突入させて噴流拡散によりエネルギーを減衰させたり、またバッフル・ウォールへの流れの衝突と攪乱によって減勢を行う形式である¹⁾。

エジプトなどのアフリカ諸国では、灌漑・航行用水路中の堰やゲートにおいて、水平床上の跳水現象を利用した減勢工が広く用いられている。このような水路内で強制的に跳水を起こさせる補助的構造物にはバッフル・ピアやシルなども用いられるが、イボ粗度などの人工粗度上で跳水を起こさせる形式のものも少なくない。この種の強制跳水型減勢工の設計においては、如何に小規模の設備において、如何に大規模のエネルギー減勢を行い得るかが重要な関心事のひとつである。

跳水現象の研究は、1818年の Bidone による研究以来、幾多の研究が行なわれており²⁾、減勢工の応用を目的とした研究に限定しても、バッフル・ピアやシルを設置した、いわゆる強制跳水型にしたものとして、

* 正会員 工博 豊橋技術科学大学助手 工学部建設工学系
(〒441 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

** 正会員 工博 鹿島建設㈱技術研究所研究員 第1研究部第4研究室
(〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

*** 正会員 工博 豊橋技術科学大学教授 工学部建設工学系

USBR³⁾、Rajaratnam⁴⁾などの多くの研究がある。また、イボ粗度上の跳水については、Abdellateef⁵⁾や Mohamed Ali⁶⁾⁻⁸⁾の研究を挙げることができる。しかしながら、それらの減勢効率を同一の評価基準で比較検討した事例はない。

本研究は、こうした現状認識に立脚して、減勢工としてのエネルギー減勢効率を評価する一指標として、エネルギー減勢量/区間長で定義されるエネルギー勾配を用いて、イボ粗度、バップル・ピア、シルなどをもつ水平床上の強制跳水型および減勢室型減勢工の比較を試みたものである。

2. 跳水区間内のエネルギー勾配

簡単のために、図-1のような跳水を考えよう。図中の跳水長 L_j を、跳水始点($x=0$)から、跳水直後の水深、流速、河床せん断力などの水理量が、下流のそれとほとんど同一になるまでの区間長と定義する。図のように、イボ粗度を設置した減勢工は、①跳水の始点位置が固定される、②それがない場合に比して減勢工の長さを短縮できる、③停水時に自然排水が可能である、などの特徴を有している。すなわち、イボ粗度による強制跳水型減勢工は、自然排水が可能なバップルピア状の堰などとの併用により、ある程度の流量変化があっても、跳水位置の制御が可能な構造物であり、それだけ小規模化がはかれるという経済的利点も有している。

減勢工の設計にあたっては、この stilling basin の長さ、あるいは跳水長 L_j を如何に短縮して小規模の設備とし、かつ如何に大きなエネルギー減勢量(h_1 および h_2 におけるエネルギー水頭の差 E_L)を得るかが重要な要素となる。したがって、図の場合、流水抵抗が大きくなるようなイボ粗度をできるだけ短い人工粗度の設置区間長 L_R に配置し、 L_j を短縮しながら、できるだけ大きな E_L を得ることが目標となる。すなわち、跳水区間内のエネルギー勾配(E_L/L_j)をエネルギー減勢効率評価指標として、この指標値ができるだけ大きな減勢工を設計すればよいことになる。

E_L は式(1)によって計算できる。

$$E_L = (\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_1) - (\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_2) \quad (1)$$

α_1 、 α_2 (エネルギー補正係数)を1とみなし、連続式 $q = V_1 h_1 = V_2 h_2$ を用いて式(1)を変形すれば、

$$\frac{E_L}{h_1} = \frac{F_1^2}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{(h_2/h_1)^2} \right\} - \left(\frac{h_2}{h_1} - 1 \right) \quad (2)$$

を得る。ここに、 $F_1 (=V_1/\sqrt{g h_1})$: フルード数である。

さらに、河床せん断断力を τ_b とし、跳水前後での運動量を考えれば、

$$d \left\{ \int_0^h \rho u^2 dz + \rho g \frac{h^2}{2} \right\} / dx = -\tau_b \quad (3)$$

なので、これを $x=0$ から L_j まで積分すれば、

$$\rho g (h_1 - h_2) \left(\frac{F_1^2 h_1^2}{h_2} - \frac{h_1 + h_2}{2} \right) = -L_j T \quad \text{ここに、} T = \frac{1}{L_j} \int_0^{L_j} \tau_b dx \quad \dots\dots\dots (4)$$

を得る。式(4)を変形すれば、次式が得られる。

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\{-1 + \sqrt{1 + 8(F_1^2 - C)}\}}{2} \quad \text{ここに、} C = \frac{L_j T}{\rho g} \frac{h_2}{\{h_1^2(h_2 - h_1)\}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(2)と式(5)から、次式が得られる。

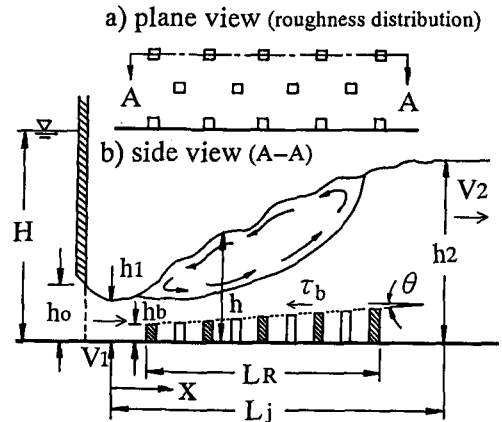


図-1 イボ粗度による強制跳水の模式図

$$\frac{E_L}{h_1} = \frac{\{(h_2/h_1) - 1\}^3}{4h_2/h_1} \left[1 + \left(\frac{2L_j T}{\rho g h_1^2} \right) \frac{(h_2/h_1 + 1)}{\{(h_2/h_1) - 1\}^3} \right] \quad \dots\dots (6)$$

なお、これらの式は、特に滑面 ($\tau_b \approx 0$) の場合を考えれば、周知の次式となる。

$$h_2/h_1 = (-1 + \sqrt{1 + 8F_1^2})/2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$E_L/h_1 = \{(h_2/h_1) - 1\}^3 / (4h_2/h_1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、定常跳水が生起する F_1 の範囲 ($4.5 \leq F_1 \leq 9$)⁹⁾ では、式 (7) において $8F_1^2 \gg 1$ と仮定できるので、

$$h_2/h_1 = (-1 + 2\sqrt{2}F_1)/2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、対応水深 h_2/h_1 と F_1 は 1 次式で近似できる。いま、式 (5) においてもその直線関係を仮定し、

$$h_2/h_1 = aF_1 + b \quad \dots\dots\dots (10)$$

のように近似して、これを式 (2) に代入し、一般的に、 $1 - 1/(h_2/h_1)^2 \approx 1$ であることを考慮すれば、

$$E_L/h_1 = F_1^2/2 - aF_1 - c \quad \dots\dots\dots (11)$$

と表される。ここに、 a 、 b は任意定数、 $c = b - 1$ である。

一方、跳水長 L_j についても F_1 によって支配されるので、同様に、

$$L_j/h_1 = f_1(F_1) \quad \dots\dots\dots (12)$$

が期待できる。ここに、 $f_1(F_1)$ は F_1 の関数であることを示す。

したがって、式 (11) および式 (12) から、結局、エネルギー勾配 (E_L/L_j) は次式となる。

$$\frac{E_L}{L_j} = \frac{F_1^2/2 - aF_1 - c}{f_1(F_1)} = f_2(F_1) \quad \dots\dots\dots (13)$$

3. 各種減勢工への適用

3.1 一定高さのイボ粗度上の跳水

Abdellateef⁶⁾ は、一定高さのイボ粗度上に生起する跳水について、粗度配置、密度等に関する系統的な実験を行い、流体抵抗を高める上でのイボ粗度の配置については、千鳥に配置し粗度が底面積の約 10% を占めるときに、最も効果的であることを見出した。さらに、Mohamed Ali^{6)~8)} は、その粗度配置、密度の条件下で、粗度配置長さ L_R を種々変化させ、 L_R と粗度高さ h_b の比 (相対粗度長さ: L_R/h_b) が約 30 のときに、 E_L/h_1 が最も大きく、 L_j/h_1 が最小となることを明らかにした。

この均一高さのイボ粗度上の跳水に関する実験結果を、提案した指標 (E_L/L_j) で再整理すれば、図-2 のようである。同図から、 $4 < F_1 < 10$ の範囲では、 E_L/L_j は相対粗度長さ L_R/h_b について多価関数となり、 $L_R/h_b = 31$ の場合にエネルギー減勢効率は最大であることが改めて示唆されている。

また、図中には、滑面上の跳水に関する従来の実験結果^{9)~10)} から直線近似した式 (14) および上述のイボ粗度 ($L_R/h_b = 31$) 上の跳水の近似式 (15) が併記されている。

$$E_L/L_j = 0.057F_1 - 0.115 \quad (14)$$

$$E_L/L_j = 0.096F_1 - 0.109 \quad (15)$$

同図から、 E_L/L_j と F_1 の関係は実用上直線と見なすことができ、イボ粗度の高さを水平に配置した $L_R/h_b = 31$ の場合には、滑面に比べてエネルギー減勢効率が約 2 倍程度向上することがうかがえる。

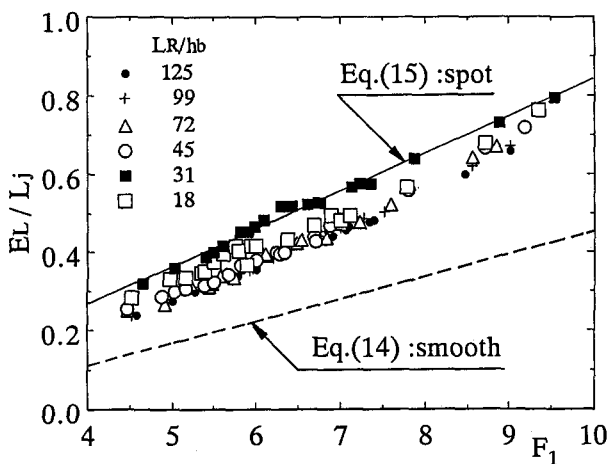


図-2 イボ粗度におけるエネルギー減勢効率

3.2 バッフル・ピアおよびシル上の跳水

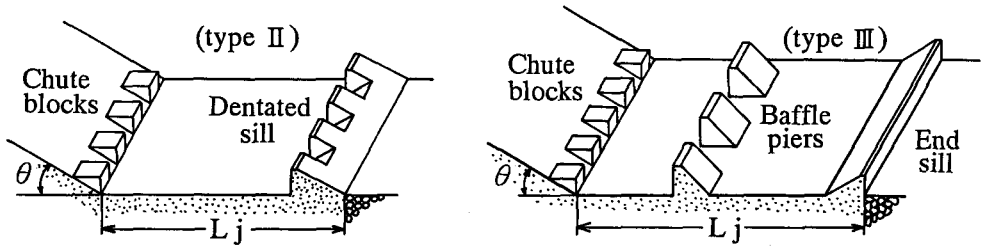


図-3 バッフル・ピアやシルなどによる強制跳水型減勢工の例³⁾

イボ粗度以外の補助構造物として、バッフル・ピアやシルなどを配置した強制跳水型減勢工も多く用いられている。図-3のように、水平水叩きの上流端にシュート、下流端にシル(end sill、dentated sill)を配置したり、またそれらに加えてバッフル・ピアを設置して減勢効果を高めるなどの工夫が行われている。USBR³⁾は、数種類の水路を用いて系統的な実験を行いそれらの設計指針を与えている。図-4は、その実験結果を用いて本指標による整理を試みたものである。ただし、跳水長として水叩きの長さを採用している。なお、同図中にはバッフルやシルのない滑面上での実験値、上述の式(14)および(15)も併記されている。同図から、いずれのタイプにおいても E_L/L_j と F_1 の関係がほぼ直線式で近似でき、しかもすべてのフルード数に対してそれらの直線関係が交差せず、本指標によって各種強制跳水型減勢工のエネルギー減勢効率の大小関係が明瞭に示されることがわかる。

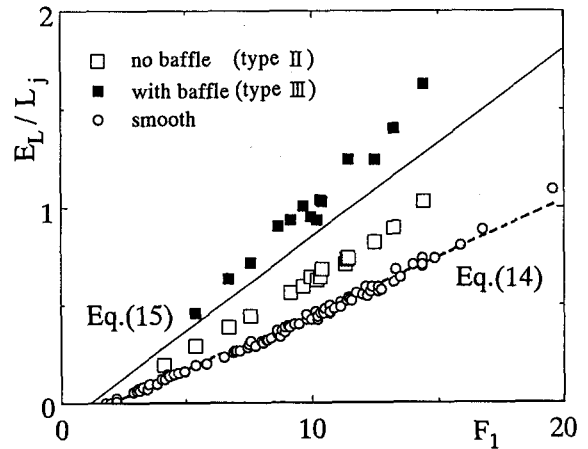


図-4 各種強制跳水型減勢工の減勢効率の比較

3.3 減勢室型減勢工

減勢室型減勢工は、たとえば図-5に示すようにパイプからの噴流の運動量を減勢室内で減衰させ、減勢室を出た流水を常流として流出させるための構造物である。この減勢室の形状や水脈の突入位置や角度によってその減勢効果が異なることが指摘されており、内田ら¹¹⁾は、従来のボックス型減勢工の特徴を生かした上で、流入水の突入位置と角度を変化させ、死水域部分を傾斜底部とするなどの改良を加えて、減勢室内の容積を縮小化するための実験を行った。図-6は、流入水が鉛直に突入する場合の底部傾斜角度 θ による減勢効率の差異を示したものである($L/z = 1.73$ 、 $L_2/L = 0.75 \sim 0.83$ の場合)。

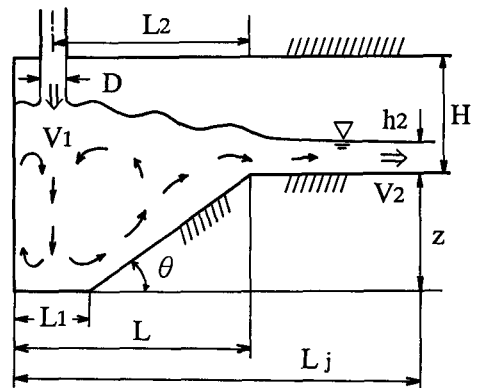


図-5 減勢室型減勢工の模式図

ただし、上流部のエネルギー水頭 E_1 には、パイプからの自由落下を考慮した流速と落下高さ H を考慮し、フルード数の代表長さは突入流水径、 L_j は減勢室上流端から下流水深 h_2 がほぼ一定になるまでの距離を採用している。同図から、いまの場合、減勢室容積が最大の底部傾斜角 $\theta = 90^\circ$ の場合が最もエ

エネルギー減勢効率が高く、 60° 以下では減勢効率はほとんど変化しないことなどがうかがえる（ L/z が異なる条件では、 90° の場合に最大減勢効率が得られないこともある）。なお、使用場所等の条件が大きく異なるので単純な比較を行うことには問題があるが、減勢効率のみについて強制跳水型の減勢工、たとえばイボ粗度を用いた場合と参考のために比較すれば、イボ粗度の場合の実験式 (15) は図中の破線のようにであり、減勢室型減勢工がきわめて高い減勢効果を発揮することがわかる。

3.4 イボ粗度高さが下流方向に変化する場合

イボ粗度のような人工粗度上の跳水を用いるのであれば、粗度高さを下流方向に変化させればより高い減勢効果を得られる可能性がある。こうした考えの妥当性を検討するため以下のような実験を行なった。実験は、豊橋技術科学大学建設工学系の両面ガラス張りの鋼製水路（長さ8 m、幅0.3 m、高さ0.6 m）で行われた。イボ粗度の配置は図-1のようであり、表-1に示す粗度高さ上昇勾配（ $\tan \theta$ ）および粗度密度（ I ）を各々2種類変化させた4ケースについて、それぞれ4モデルの粗度区間長について検討した。これらのデータを整理した結果、均一な粗度高さの場合（図-2参照）と同様、 $L_R/h_b = 31$ 付近で E_L/L_j が最大となることが判明した。そこで、モデルCの場合（ $L_R/h_b = 31$ ）についてのみ、粗度高さを下流方向に変化させた場合の結果を示したものが図-7である。なお、図中には上述の近似式 (14) および (15) が併記されている。

同図から、各ケースごとのエネルギー減勢効率の微妙な差異を読むことができる。すなわち、①同一の上昇勾配（ $\tan \theta$ ）においては、粗度密度（ I ）が10%に近い方が減勢効率が大きい、②粗度高さを下流方向に変化させた場合の減勢効率は、滑面の場合よりも大きいが一様粗度高さの場合を越えない範囲内にあり、一定の粗度高さの場合に得られる効率が最も大きい、などの傾向がうかがえる。換言すれば、一様な粗度高さの場合がエネルギー減勢効率が最も高く、粗度高さを下流方向に変化させてもそれ以上の効果は得られないといえよう。

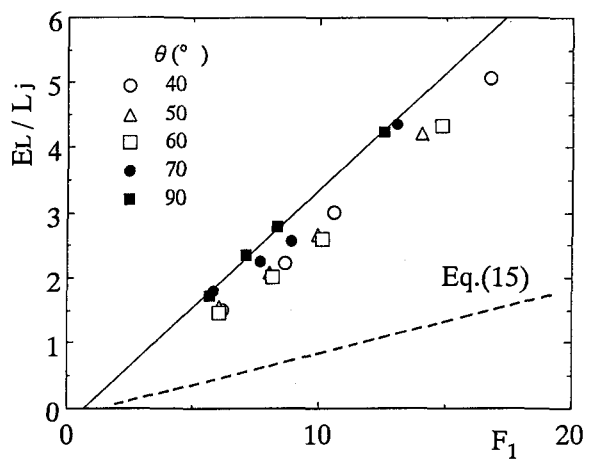


図-6 減勢室型のエネルギー減勢効率

表-1 実験ケース（粗度高さが変化する場合）

Case	Angle of Inclination ($\tan \theta$)	Intensity of Roughness (I %)	Relative Length of Roughness (L_R/h_b)			
			Model			
			A	B	C	D
1	1/200	13.0	125	63	31	13
2	1/200	1.6				
3	1/500	13.0				
4	1/500	1.6				

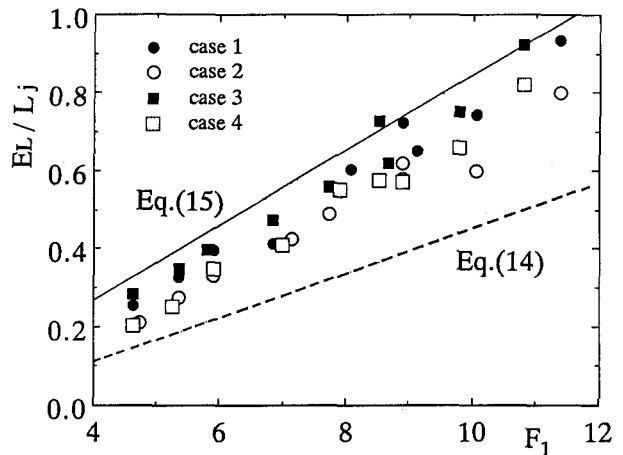


図-7 粗度高さを変化させた場合の減勢効率

4. 結論

以上、減勢工としての効果を評価するための一指標としてエネルギー勾配を用い、イボ粗度、バップル・ピア、シルなどの強制跳水型や減勢室型減勢工に適用した結果を示した。すなわち、

- ①実用上十分な近似において、 $E_L/L_j = \phi F_1 + \phi$ （ここに、 ϕ と ϕ は減勢工の種類によって異なる一定値）の直線関係が得られ、本指標が各種減勢工のエネルギー減勢効率の大小関係を明瞭に比較できる指標として有用である、
 - ②減勢室型減勢工は、強制跳水型に比べきわめて高いエネルギー減勢効果を発揮する、
 - ③イボ粗度による強制跳水型減勢工において、一樣な粗度高さの場合のエネルギー減勢効率が最も高く、粗度高さを下流方向に変化させてもそれ以上の効果は得られない、
- ことなどが示された。

本研究の遂行にあたり、御教示を頂いた石原安雄博士（現滋賀職業訓練短期大学校長、元豊橋技術科学大学教授）、ならびに貴重な実験データを御提供頂いた中部電力㈱電力技術研究所土木研究室に、末尾ながら深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1)土木学会編：水理公式集（昭和60年版）、pp.308～320、1985.
- 2)Chow, V. T.: Open channels hydraulics (Chapter 4), Mc.Graw Hill Book Co., USA, pp. 393～429, 1959.
- 3)U. S. B. R.: Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, Engineering Monograph No. 25, Washington D. C., USA, 1958.
- 4)Rajaratnam, N. : The forced hydraulic jump, Water Power, Vol. 16, pp. 14-19 and 61-65, 1964.
- 5)Abdellateef, M. : Energy dissipation D. S. low head irrigation structures using be droughness, Ph. D. Thesis of Ain Shams Univ., Cairo, Egypt, 1984.
- 6)Mohamed Ali, H. S. : Effect of roughened bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 83-93, 1991.
- 7)Mohamed Ali, H. S. : Contribution of spot roughness to hydraulic jump in irrigation systems, Ph. D. Thesis of Ain Shams Univ., Cairo, Egypt, 1984.
- 8)Mohamed Ali, H. S. ・石原安雄・中村俊六・和田 清：イボ粗度による跳水の制御、土木学会論文集、No. 456/Ⅱ-21、pp. 21～28、1992.
- 9)たとえば、椿東一郎：水理学Ⅰ、森北出版、pp. 139～142、1973.
- 10)Press, M. J. : The hydraulic jump, Engineering Honoers Thesis presented to the Univ. of Western Australia, Nedlands, Australia, 1961.
- 11)内田英雄・松本敏和・新海淳史：コンパクトな余水路減勢工（減勢室型）の開発、電力土木、No. 224、pp. 27～36、1990.