

流れの遡上に伴う波高減衰に着目した 波状性段波の実験的研究

中村 祐介¹・安田 浩保²・清水 康行³

¹学生会員 北海道大学大学院 工学研究科 北方圏環境政策工学専攻(〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
²正会員 博(工学) 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)
³正会員 工博 北海道大学大学院教授 北方圏環境政策工学専攻(〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

2003 年9月に発生した十勝沖地震津波が複数の河川に浸入して遡上したことが観測されたことを契機に津波 の河川遡上の危険性が強く認識されるようになった.この津波は波状段波を形成して河川を遡ったことが確認 されている.これまでに波状段波に関する複数の研究が行われ,段波波高が最大で2倍程度にまで上昇するこ とが示された.しかし,これらの研究のほとんどは水平床かつ静水中における波状段波に対するものでるため, こうした知見をすぐさまに河川を遡上する津波に対して適用することは難しい.そこで本研究では不等流場を遡 る波状段波の伝播特性を捉えることを目的とした水理実験を行い,段波波高の上昇及び減衰の過程を把握する ことを試みた.実験の結果,波状段波が不等流場を遡る際に最大で2.5倍程度まで水位上昇すること,Froude 数が0.35以上となる区間では急激な波高減衰を生じることが確認された.

Key Words : undular bore, hydraulic experiments, tsunami, river

1. はじめに

2003 年 9 月に発生した十勝沖地震津波が複数の河川 に浸入し河口から数 km 以上も遡上したことが観測さ れ,このことを契機に津波の河川遡上に対する危険性 が強く認識されるようになった¹⁾.この津波は波状段波 を形成して河川を遡ったことが自衛隊の撮影したビデ オにより確認されている.

この問題を扱う際には不等流を遡る波状性段波に関 する知見が要求される. これまでに波状段波に関する多 くの研究が行われている。静水場においてゲートの急 開などにより段波を発生させた場合について Favre²⁾, Keulegan & Patterson³⁾, Johnson⁴⁾⁵⁾, Peregrine⁶⁾, 室田⁷⁾や松冨⁸⁾などが実施している。これらの研究に よると、波頭部では局所的な水位上昇を生じる波状段 波が形成され、入射時の波高に比して2倍程度にまで 水位が上昇することが指摘されている。但しこうした 波状段波が流れを遡る場合の議論にまでは達していな い。また、流れを遡る波動に関する理論解析を佐藤⁹⁾な どが実施している。しかし、これらの理論解析はいず れも静水圧近似の条件下で行われており、波状段波の 形成に伴う水位上昇までは言及されていない。最近に なり安田ら¹⁰⁾は、ゲートが急閉された場合に生じる波 状段波が疑似等流場を遡上する問題に関する水理実験 を実施し、波頭部における波の変形に伴う水位上昇の 規模が1.8 倍程度にまで達することを示した。その後、 安田11)は、不等流場を遡上する波状段波に関する基礎 的検討を実施しているが、同実験でさえ流れ場の伝播 における波高の減衰過程までは捉えきれていない.

このように,流下方向に Froude 数が漸変する不等流 場における検討は不十分であると言わざるを得ない状 況にあるうえ,急勾配河川などの高 Froude 数条件下に おける長波の変形に関する知見は安田¹²⁾が数値的な検 討例があるものの依然として乏しい.こうした実情を 踏まえ、本研究では,流れを遡上する過程における波 高減衰に着目した波状段波に関する水理実験を実施し, その形成に伴う水位上昇から減衰までの一連の過程を 捉え,その規模を言及することを目的としている.

水理実験

(1) 実験装置の概要

本研究で使用した実験装置は、図-1 に示した全長 34m,全幅 0.5m の矩形断面水路である.下流端から 6m の区間は固定勾配区間,そこから 28m の区間は水 平から 1/50 まで無段階に水路勾配を変化させることが できる.水路の上流端に最大給水能力が 80l/s の給水 機構と下流の固定勾配区間に排水機構を備え,不等流 場を形成できるようになっている.ただし,上流端か ら約 2m の区間には,ポンプからの給水を整流するた めの緩衝材を配置した.固定勾配区間には最長周期 10 秒,造波可能最大水深 0.8m のコンピュータ制御のパド ル型造波機を備えている.

水位変化の計測は、図-1のとおり配置された5本の

Q [l/s]	$T_T[s]$	$\eta_{ts} [\mathrm{m}]$	Q [l/s]	$T_T[s]$	$\eta_{ts} [\mathrm{m}]$	Q [l/s]	$T_T[s]$	$\eta_{ts} \mathrm{[m]}$	Q [l/s]	$T_T[\mathbf{s}]$	η_{ts} [m]
0	5.00	0.015	15	5.00	0.015	30	5.00	0.015		5.00	0.015
		0.025			0.025			0.025			0.025
		0.035			0.035			0.035			0.035
	7.00	0.015		7.00	0.015		7.00	0.015		7.00	0.015
		0.025			0.025			0.025	60		0.025
		0.035			0.035			0.035			0.035
	9.00	0.015		9.00	0.015		9.00	0.015		9.00	0.015
		0.025			0.025			0.025			0.025
		0.035			0.035			0.035			0.035





図-1 実験装置の概要

表-2 砕波が確認された実験条件とその概要

D_{rm} [m]	$Q \ [l/s]$	T_T [s]	$\eta_{ts} [\mathrm{m}]$	x [m]	Time [s]
	15	5.00	0.035	15	$16.79 \sim$
	15	7.00	0.035	20	$18.20 \sim$
	15	9.00	0.015	25	$22.96 \sim$
	15	9.00	0.025	20	$19.17 \sim$
0.8	15	9.00	0.035	15	$16.04 \sim$
	30	5.00	0.035	$15 \sim 20$	$13.58 \sim 20.18$ *
	30	7.00	0.035	$15 \sim 20$	14.22~19.81 *
	30	9.00	0.025	15	$13.93 \sim$
	30	9.00	0.035	15	$13.74 \sim$
	60	9.00	0.035	10	$10.87 \sim$

容量式波高計(ケネック製)を用いた.計測時間間隔 は 0.02 秒に設定した.

なお,予備実験の結果,形成された分散波列の波頂 部のみがわずかに砕波することが確認された.この砕 波状況を記録するために入射波の造波開始時刻と同時 に時間計測を始めるプログラムを利用し,入射波の遡上 を目視で追跡して砕波が開始した時刻を記録した.

(2) 実験条件

実験条件は,表-1 に示す 36 通りを設定した.全ての実験条件において,河床勾配 *i* は 1/250,河口部水深 *D_{rm}* は 0.8[m] ある.河川部の条件として流量 *Q* は 0, 15,30,60[1/s] の 4 通りを設定した.想定した現象の規 模は,津波に関しては波高水深比を用い,河口部の定 常水深と最大津波波高から求められる波高水深比が0.3 前後,河川の流量規模に関しては*Fr*数を用い,0.15, 0.35,0.6程度である.なお,同表に示した通り,入射 波が流れから受ける影響を相対的に把握することを目 的に静水時の実験も併せて実施した.

下流端から入射する波の造波には図-1 内のパドル型 造波機を用いた.入射波の波形は \sin^2 の上に凸の半周期 の孤立波型とし、この波形の目標最大波高 H_T を0.015, 0.025, 0.035m,周期 T_T を5,7,9秒とした.なお、本 文における周期の定義は、定常流水位が一度隆起し再 び定常水位に戻るまでの時間である.

なお,この水路底面の材質は敷設された人工芝であ る.今回の実験条件における Manning の粗度係数は 0.020~0.022 である.この値は,各流量毎に縦断方向 に 4m 間隔で 4 点の定常水位をポイントゲージで計測 し,これらの縦断水位分布がそれぞれ再現できるよう に Manning の粗度係数を変化させる不等流計算を行い 推定したものである.

3. 実験結果

実験結果のうち,時間ごとの波形変化の一例として, 周期 7[s] の波を入射させた際に計測された波形に関し て整理したものが図-2 である.縦軸は下流端水位を 0 とした水位 [m],横軸は時間 [s] となっており,図中の網 掛け部分は砕波時間帯を示している.ただし,今回実験 において確認された砕波は,分散波列を形成後にその 形成波の先頭波の波頭部だけがごくわずかに崩れるも ので,一般に言われる気泡を激しく混入するような激し い砕波現象とは全く異質である.

図-3 は、入射波形の流れの遡上に伴う水位変化率を 流量及び入射波の周期ごとに分けて整理したもので、縦 軸は各計測点で計測された最大水位 H_M をx = 5.00 地 点で計測された最大水位 H_{ch2} で除した H_M/H_{ch2} , 横軸 は各観測点における波動入射前の定常状態の Froude 数 である.本実験は一様勾配のもとで行われたものである



から、同一の図面内では Froude 数が大きいほどに上流 に位置する計測地点の値を示している.以降、 H_M/H_{ch2} を水位上昇率と呼ぶ.また、図中の塗り潰しのプロット マークは、それぞれの計測地点の通過時に砕波が目視に より確認されたことを示している.

表-2 は砕波した実験条件に関して整理したものであ る.同表における Time は目視で確認された砕波の開始 時刻を示し,このうち*が付与されている実験条件は 砕波した後に再び砕波前の状態に戻った場合を示して いる.また,同表の *x* は砕波した波頂部が初めて通過 した波高計の設置位置,つまり水路下流端からの縦断 距離を表している.

(1) 時間波形の特性

実施したいずれの実験条件ともに不等流場を遡る過 程において,入射波は同様の変形過程を呈した.まず, 波形は伝播しながら急速に前傾化を強め,その後,一 波峰だった入射波はその波峰が2つ以上に分裂する典 型的な波数分散現象を生じた.その結果,この現象が 主な原因となり入射波の波高は急激に上昇した.

図-2 に示した時間波形図から分かるように、入射時 に一波峰だった \sin^2 波は少なくとも二つ以上の波峰を 生成するとともに、x = 5.00 地点の波高 H_{ch2} に比し て最大で 2.5 倍程度まで急激な水位上昇が発生してい た.流れが強いほどに急峻な波面を有する波列を形成 し、その波峰間距離は長くなることが見て取れる.

つぎに、入射波の伝播速度であるが、これは流れの 影響を受けて低下する.しかも、この伝播速度の低下 は流れの影響に加え、分散波列の形成からも少なから ず影響を受けることがわかる.このことは、KdV 方程 式から導出される波速の式

$$\omega = \sqrt{gh_0} \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\eta}{h_0} + \frac{1}{6} \frac{\eta^2}{h_0} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) - U \qquad (1)$$

において,波形曲率が大きくなり波形の2階微分が小 さくなると波速が低下することから容易に類推される. ここで, ω は波状段波の波速, h_0 は定常水深, η は段 波の分散波の波高,gは重力加速度,Uは流れの平均流 速である.

(2) 波高の増幅過程の特性

一般に浅水波に分類される波動現象では, 伝播過程に おいて浅水変形によって波高及び波形が変化する. さ らに, 波形曲率が大きい条件では波状性を有するよう になる.水平床,静水状態に入射した波状段波は伝播 に伴いその最大段波波高が入射時の2倍程度にまで達 することを Favre が示している.

本研究で実施した不等流場を遡上する波状段波では, 図-3から分かるように,流れが存在するにもかかわら ず2倍程度にまで,実験条件によっては最大で2.5倍程 度にまで水位が上昇することが確認された.同一の整 理が困難のため図面は割愛するが,流れが存在しない 場合にも約2倍にまで水位が上昇することが同様に確 認された.

こうした結果は,まず浅水変形により波形の前傾化 が進み,つぎにこれに伴い波頭部の曲率が増大して波数 分散現象が生じたために引き起こされているものと考



図-3 Fr 数に着目した水位上昇率 (図中の塗り潰しプロットマークは、入射波が観測地点を砕波を伴いながら通過したことを示している)

えられる. 安田¹¹⁾は同様の水理実験を実施してその再 現計算を行った結果, 通常の河川流の解析に適用される 浅水理論式を用いた場合には最大水位は最大で 50%も 過小に評価される可能性があることを指摘している. こ のことからも同現象の工学的な取り扱いにおける波状 性の重要度が伺える.

同一流量で入射波の条件が異なる場合の実験結果を 比較すると、同一周期の波が入射した場合、波高が大き いほど水位上昇率の伸びが大きいことがわかる.これ は同一周期の波の場合、波高が大きいほど初期段階から 入射波前面の水面の曲率が大きい状態にあるうえ、遡 上にしたがい非静水圧効果が卓越する曲率に容易に達 しやすく、その結果、波数分散現象が生じるためであ る.一方で、同一波高で周期が異なる入射波を比較し た場合,周期の短い波ほど水位上昇率が大きいのも同様の理由である.

(3) 波高の減衰過程の特性

本研究において行われた実験では,水位上昇の規模のほかに,ピークを迎えた後の水位の減衰過程を捉える ことにも成功した.

図-3の Froude 数に着目すると,これが 0.35~0.40 を超えた付近から実験条件に関係なく急激に水位が減 少していることがわかる.このことから,波高維持に関 する何らかの限界領域が存在し,この領域内では波高は 急激に減衰するものと考えられる.

また,砕波の発生が確認された実験結果を表-2,お よび同図中に塗り潰しのプロットマークで示した.前述 した通り、本実験において観察された砕波はいずれと も波頂部のみで見られるわずかなものであった.しか し、これが生じると、それ以降は極めて急激に水位が減 衰した. $Q = 15, T_T = 5, H_T = 0.025 \Leftrightarrow Q = 30, T_T =$ 7, $H_T = 0.035 などの実験条件では目視により砕波の発$ 生は確認されていないものの、砕波発生の状態に極めて近い状態を維持しながら流れを遡上していた可能性が高 $い.この他、同図最右列に示したいずれの<math>H_T = 0.035$ の条件では、他の周期に比べ最も波形勾配がゆるやか な周期9秒の条件において、それより周期が短い条件 の水位上昇率に達する前に砕波を生じていたことが観 察された。

現在のところ著者らは急激な波高減衰,および周期 が長い条件における水位上昇率の低下と砕波について 十分に説明するだけの知見を持ち合わせておらず,水 理実験の追加と数値解析の併用によりこのような急激 な波高減衰の機構について言及する準備を進めている.

4. おわりに

本研究により得られた結論は以下の通りである.

波状段波に関する水理実験を行った結果, 流れが存在 しない静水時で最大2倍程度, 流れが存在する条件下に おいては2.5倍程度にまで水位が上昇する結果を得た. この結果はこれまでの知見を上回る結果である.

Froude 数が 0.35~0.40 を超えたあたりから実験条件 に関係なく水位が減少することが示された.これらの ことより,波高維持に関する限界領域が存在し,この領 域では波高は急激に減衰するものと考えられる.今後 は,数値解析を併用するなどしてこのような急激な波 高減衰の機構について言及する予定である.

謝辞:本研究は,国土交通省北海道開発局,北海道 河川防災研究センターからの支援を受けて実施されて いる.ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 安田 浩保,渡邊 康玄,藤間 功司:2003 年9月の十勝 沖地震に伴い発生した津波の河川溯上,土木学会論文集, No.768/II-68, pp.209-218, 2004.
- Favre, H. : Etude theorique et experimental des ondes de translation dans les canaux decouverts. Dunod, p.150., 1935.
- Keulegan, G.H. and Patterson, G.W. : Mathematical theory of irrotational translation waves, J. Res. Nat. Bur. Standards., Vol.24, pp.47–101, 1940.
- Johnson, R.S. : A non-linear equation incorporating damping and dispersion, J. Fluid Mech., Vol.42, pp.49–60, 1970.
- Johnson, R.S. : Shallow Water Waves on a Viscous Fluid - The Undular Bore, *Phys. Fluids*, Vol.15, No.10, pp.1693–1699, 1972.
- Peregrine, D.H. : Calculations of the development of an undular bore, J. Fluid Mech., Vol.25, pp.321–330, 1966.
- 7) 室田 明, 岩田好一朗: 段波の変形に関する研究, 土木学 会論文集, 第 160 号, pp.49–58, 1971.
- 8) 松冨 英夫:移動跳水(波状段波非)発生条件の検討,第 33 回水理講演会論文集, pp.271–276, 1989.
- 9) 佐藤 道郎:不等流を遡る波の波高変化に関する基礎的研究,土木学会論文報告集,第242号,pp.15-29,1975.
- 10) 安田 浩保,山田 正,後藤 智明:スルースゲートの閉鎖に 伴い発生する段波の水理実験とその数値計算,土木学会 論文集, No.733/II-63, pp.89–105, 2003.
- 11) 安田 浩保:不等流場を遡上する波状性段波の水理実験と その数値計算,土木学会 応用力学論文集,2007(投稿中).
- 12) 安田 浩保:急勾配河川を遡上する津波の特性に関する-考察,土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集,2006.

(2007.4.6 受付)

Experimental Study on Undular Bore with Wave Decreases in Non-uniform Flow

You-suke NAKANURA, Hiroyasu YASUDA and Yasuyuki SHIMIZU

When the tsunami ascend the river, it may cause the various disasters along the river, thus many river have equipped the sluice gate for prevention of ascending tsunami. In this paper, laboratory experiments were conducted to investigate the characteristics of undular bore with wave decreases in non-uniform flow. The experimental results are showed that the wave height of undular bore rise 2.5 times than initial wave height. Moreover, the wave height of undular bore mostly decrease over Froude number 0.35.