

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

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

中村祐介¹・安田浩保²・清水康行³

Yusuke NAKAMURA, Hiroyasu YASUDA and Yasuyuki SHIMIZU

¹ 北海道大学大学院 工学研究科 博士課程前期

² 土木研究所 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ

³ 北海道大学大学院 工学研究科 教授

要 旨

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。この津波は波状性段波を形成して河川を遡ったことが確認されている。

これまでに波状性段波に関する複数の研究が行われ、波状性段波が形成されると段波波高は最大で2倍程度にまで上昇することが示されている。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性段波に対するものであるため、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性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、波状性段波が不等流場を遡る際には、これまでの知見を上回る最大で2.5倍程度まで水位が上昇することに加え、Froude数が0.35よりも大きい条件のもとでは急激に波高が減衰することが確認された。

《キ-ワ-ド：波状性段波；津波；水理実験》

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によりビデオで撮影され、その後、安田²⁾は実現象の再現計算を行い第3波のみが波状段波を形成していたことを示した。

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 Favre³⁾、Keulegan & Patterson⁴⁾、Johnson⁵⁾⁶⁾、Peregrine⁷⁾、室田⁸⁾や松富⁹⁾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。ただし、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¹⁰⁾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¹¹⁾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¹³⁾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数値的な検討例¹²⁾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。

2. 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、不等流場が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。

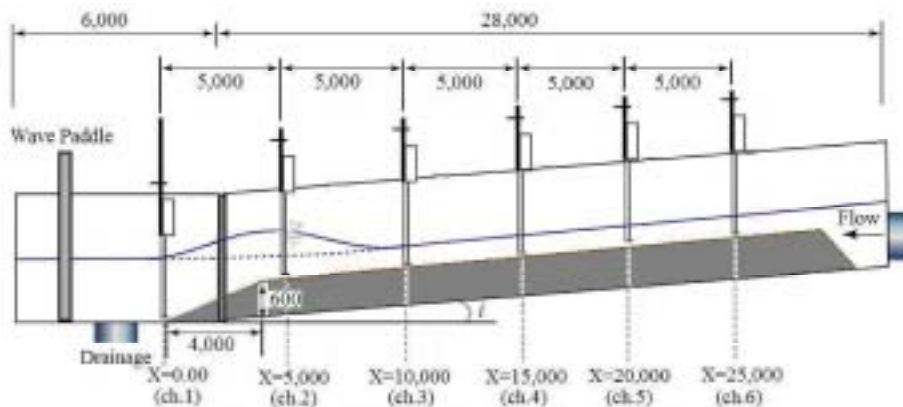


図-1 実験装置の概要

水位変化の計測は、図-1 のとおり配置された 5 本の容量式波高計（ケネック製）を用いた。計測時間間隔は 0.02 秒に設定した。

砕波の確認に関しては、入射波の発生時間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確認しながら、砕波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_m は 0.8[m] である。河川部の条件として流量 Q は 0, 15, 30, 60 の 4 通りを設定した。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。

表-1 実験条件の一覧

Q [Vs]	T_t [s]	η_{ts} [m]	Q [Vs]	T_t [s]	η_{ts} [m]	Q [Vs]	T_t [s]	η_{ts} [m]	Q [Vs]	T_t [s]	η_{ts} [m]		
0	5.00	0.015	15	5.00	0.015	30	5.00	0.015	60	5.00	0.015		
		0.025			0.025			0.025					
		0.035			0.035			0.035					
	7.00	0.015		7.00	0.015		7.00	0.015		7.00	0.015	7.00	0.015
		0.025			0.025			0.025					
		0.035			0.035			0.035					
	9.00	0.015		9.00	0.015		9.00	0.015		9.00	0.015	9.00	0.015
		0.025			0.025			0.025					
		0.035			0.035			0.035					

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。

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。図-3 は縦軸に各計測点で計測された最大水位 H_M を $x=5.00$ 地点に設置された ch.2 で計測された最大水位 H_{ch2} で除した H_M/H_{ch2} を、横軸に各観測点の Froude 数をとったものを流量及び入射波の周期ごとに分けて整理したものである。図中の塗り潰しのプロットマークは、それぞれの観測地点の通過時に砕波が確認されたことを示している。本文では以後、 H_M/H_{ch2} を水位上昇率と呼ぶ。

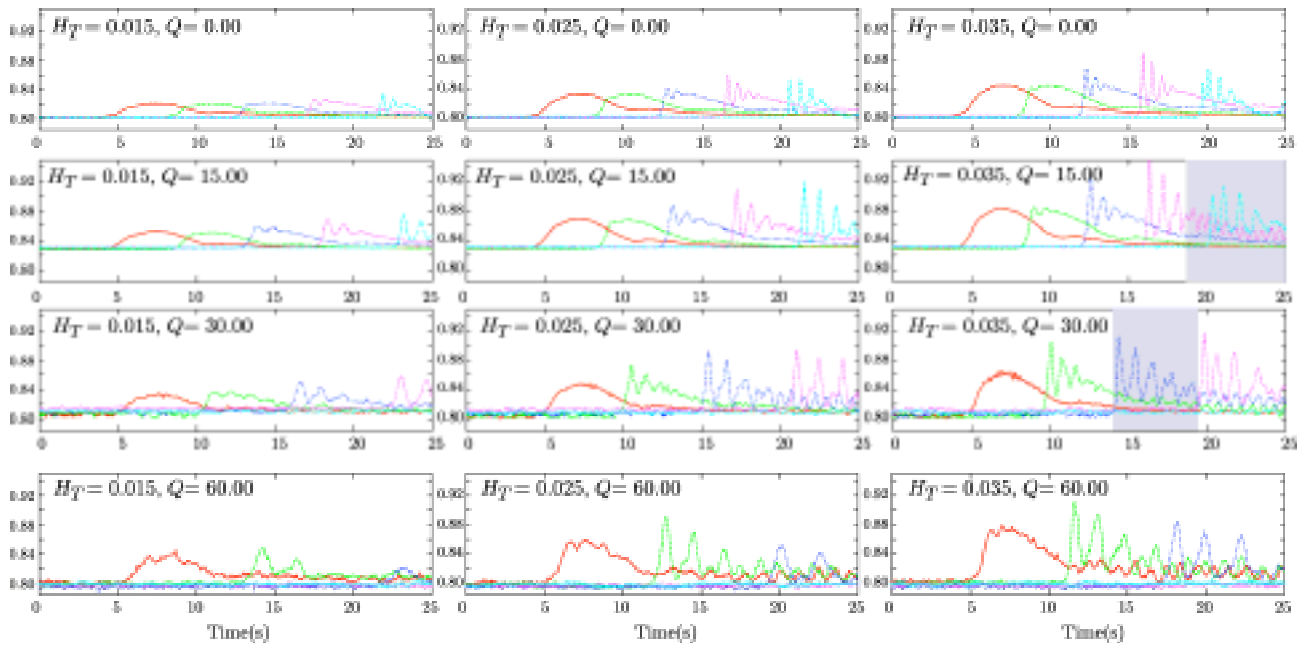


図-2 水理実験の時間波形図 ($T=7.0, i=1/250, D_{rm}=0.80$)

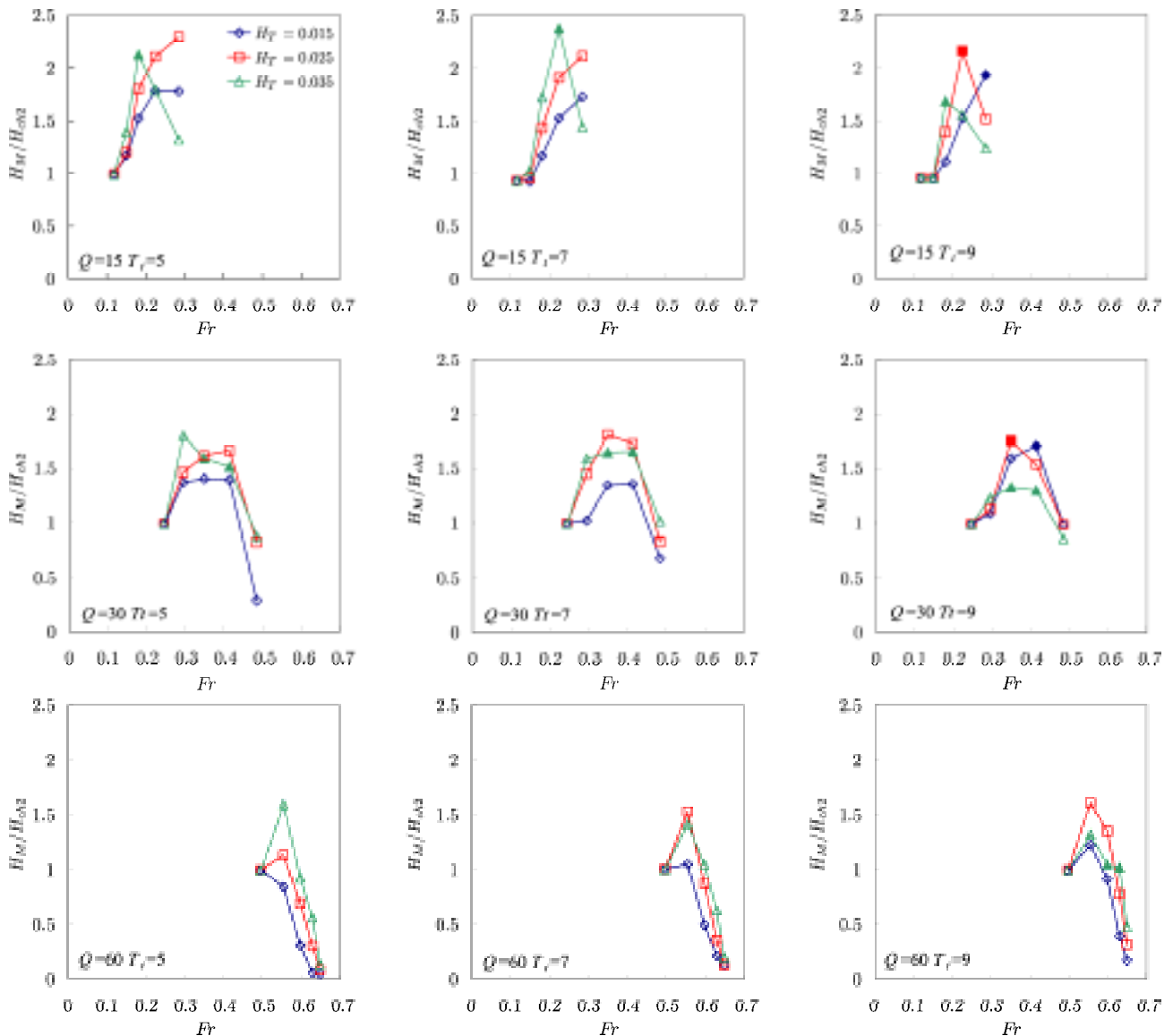


図3 Fr 数に着目した水位上昇率(図中の塗り潰しプロットマークは、入射波が観測地点を砕波を伴いながら通過したことを示している)

表-2 は砕波した実験条件に関して整理したものである。表-2 における x は砕波した際に入射波が通過した波高計の位置を、Time は砕波発生あるいは継続時刻を示しており、* 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。なお、今回観測した砕波は、波頭部に分散波列を形成後にその形成波の波頭部だけがごくわずかに崩れるようなもので、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。

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_r [s]	η_{ts} [m]	x [m]	Time [s]
0.8	15	5.00	0.035	15	16.79～
		7.00	0.035	20	18.20～
		9.00	0.015	25	22.96～
			0.025	20	19.17～
			0.035	15	16.04～
	30	5.00	0.035	15～20	13.58～20.18 *
		7.00	0.035	15～20	14.22～19.81 *
		9.00	0.025	15	13.93～
			0.035	15	13.74～
	60	0.035	10	10.87～	

(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と図-3 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。そのうえ、この伝播速度の低下は流れの影響だけでなく、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。

(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。またその変化の程度は流れの有無によって大きく異なる。それらの特性については図をおって見ることとする。

図-3 に示したとおり、流れが存在する場合には 2.5 倍程度にまで水位が上昇することが確認された。また流れが存在しない場合には約 2 倍にまで水位が上昇することも同様に確認された。また、流量に着目すると、流量が小さいほどに水位上昇の規模が大きいことがわかる。これまでに行われてきた静水中及び水平床条件下での研究では水位上昇が 2 倍程度と言われていたが、今回の実験ではそれらを上回る結果が観測された。こうした結果は浅水変形と波数分散現象の相互作用によって引き起こされているものと考えられる。安田¹³⁾は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この

ような現象の最大水位は最大で 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。このことから同現象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、同一流量の流れに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、波高が大きいほど入射波前面の水面の曲率が大きく、水位上昇を起こしうる水面曲率に容易に達しやすく、波数分散現象が発生しやすい。また、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ている。図-3 内の実験結果のうち、砕波の発生が確認された塗り潰しのプロットマークを有する実験結果から見て取れるとおり、砕波がわずかにでも生じると、それ以後は極めて急激に水位が減衰することが分かる。このことを踏まえると $Q=15, T_T=5, H_T=0.025$ や $Q=30, T_T=7, H_T=0.035$ といった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、砕波発生に極めて近い状態を維持していた可能性が高いと考えられる。

Froude 数に着目してみると、Froude 数が $0.35 \sim 0.40$ を超えたあたりから実験条件に関係なく水位が減少していることがわかる。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。

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 $0.35 \sim 0.40$ 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：本研究の遂行にあたり、北海道大学大学院の清水康行教授および修士課程に在学中の中村祐介氏に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 安田浩保：河川を溯上する津波の 1 次元解析手法の提案と実現象への適用，土木学会水工学論文集，第 50 巻，pp.1417.1422，2006。
- 3) Favre, H. : Etude theorique et experimental des ondes de translation dans les canaux decouverts. Dunod,

p.150., 1935.

- 4) G.H. Keulegan and G.W. Patterson Mathematical theory of irrotational translation waves, J. Res. Nat. Bur. Standards., Vol.24, pp.47.101, 1940.
- 5) R.S. Johnson: A non-linear equation incorporating damping and dispersion, J. Fluid Mech., Vol.42, pp.49.60, 1970.
- 6) R.S. Johnson: Shallow Water Waves on a Viscous Fluid -The Undular Bore, Phys. Fluids, Vol.15, No.10, pp.1693. 1699, 1972.
- 7) D.H. Peregrine: Calculations of the development of an undular bore, J. Fluid Mech., Vol.25, pp.321.330, 1966.
- 8) 室田明・岩田好一郎：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.
- 9) 松富英夫：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 .
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 安田浩保：急勾配河川を遡上する津波の特性に関する一考察，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, 2006.
- 13) 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).