

河川堰を透過する津波の挙動 に関する基礎的検討

安田 浩保¹・藤間 功司²

¹正会員 修士(工学) 独立行政法人北海道開発土木研究所 河川研究室(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

大規模な津波が発生してそれが河川に浸入すると、その沿川では種々の被害が発生する可能性が大きい。このため、津波の浸入の可能性のある多くの河川ではゲートを設置し、これを完全に閉鎖することで浸入してくる津波を防御する対策が取られている。しかし、ゲートを完全に閉鎖できない状況も考えられ、このような場合にゲートを透過してくる津波の特性はほとんど明らかにされていない。本研究では水理実験を実施してそのような津波の特性について調べた。その結果、不完全閉鎖の場合でもゲートからの流出形態が著しい渦混合を伴うもぐり流出や跳水を伴う自由流出の場合では入射してくる津波の波高を大幅に低減できることがわかった。

Key Words : river-ascending Tsunami, sluice gate, hydraulic experiments, eddy loss

1. はじめに

海域を震源とした地震が発生すると海底の急激な隆起や沈降が起こりこれに伴い津波が発生する可能性がある。この津波による被害の危険性は沿岸部はもとより、河口部から河川へ浸入してその沿川で越流による氾濫被害や係留物の流出などの被害、さらには地震で脆弱となった堤防を河川に浸入してきた津波が洗掘して2次の災害を引き起こす危険性も考えられる。最近では、2003年9月に十勝沖で発生したM8.0の地震に伴って津波が発生し、北海道の太平洋沿岸部の広い範囲で漁船の転覆や横倒、岸壁に停車中の自動車の流失や冠水などの被害が起きた。十勝川では被害こそなかったもののソリトン分裂して河川を遡上する津波が観測され、それは河口からおよそ11kmの地点にまで到達した。

津波の被災経験地域などでは防災対策のためのゲートを河口部などに設け、津波発生時にはゲートを完全閉鎖してその沿川を防護する対策がとられることが多い。一方、ゲートが設けられているものの閉鎖操作が遅れた場合やゲートの上流側の流量が多く完全閉鎖が難しい場合ではゲートを不完全閉鎖することになる。ここへ津波が入射すると越流あるいはゲートの開口部を通してゲートの上流側において少なからず津波の影響が伝播することになる。

河道内を遡る津波に関する研究は、岩崎・阿部^{1) 2) 3)}ら、後藤・首藤⁴⁾、Tsuji et al.⁵⁾、宮崎・史⁶⁾などによって行われてきた。しかしながら、このようなゲートを透過したり越流したりする遡上津波の挙動に関する研

究は少ない。大規模な津波の場合ではゲートを越流してその上流部に被害を及ぼすことが想定されるが、本研究ではより複雑な水理現象であるゲートを透過する津波の挙動に焦点を当てて議論を展開することにした。このような津波の特性を把握することを目的とした水理実験を実施し、その特性について整理した。

2. 水理実験

(1) 実験概要と設定した条件

ゲートを有する河川に浸入した津波がそのゲートを透過する際の特性を把握することを目的とした水理実験を、図-1に示す造波機と河川流を模擬した水流発生のためのポンプを備えた水路を利用して実施した。

実験形態には、ゲートからの流出形態がもぐり流出、自由流出の2つの場合を設定し、以下の通り実験を実施した。

a) ゲートからの流出形態がもぐり流出の場合

ゲートからの流出形態がもぐり流出の場合の実験は、表-1に示した条件のもとで合計12パターンを実施した。ゲートの開口高さ a と透過波および反射波の波高 $\eta(x)$ の関係のほか、これらの波が流れから受ける影響を明らかにすることを考えてゲートの開口高さ a と河川流量 Q_{rv} をそれぞれ変化させるように各値を設定した。いずれの実験条件においても造波前の静水深 h_0 は0.13mで一定とし、津波に見立てた同一波形の孤立波を造波機によって発生させて入射した。各観測地点での波高の計測には図-1のように配置した容量式波高計を利

表-1 ゲートを透過する津波に関する水理実験の条件

水理諸量	設定値
ゲートの開口高 a (m)	0.025, 0.050, 0.075, 0.100
河川流量 Q_{rv} (m ³ /min.)	0.000, 0.235, 0.294
初期水深 h_0 (m)	0.13

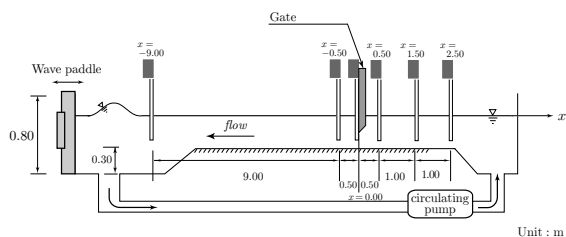


図-1 水理実験に利用した造波および水流の発生が可能な水路

用し、その計測時間間隔は0.05 sとした。

b) ゲートからの流出形態が自由流出の場合

実験に利用する装置、水路、観測機器は前項と同一としながら、河川流量 Q_{rv} を $2.240\text{m}^3/\text{min.}$ でゲートの開口高さを 0.06m 、河川流量 Q_{rv} を $2.000\text{m}^3/\text{min.}$ でゲートの開口高さを 0.05m とした、ゲートからの流出形態を自由流出とした場合の実験を2パターン行った。ただし、波高計の設置位置は、流量とゲートの開口高さによって跳水位置が異なるため、実験条件に応じて適当な観測が可能ないように設置位置を決めた。

(2) 実験結果

表-1 に示した実験条件に基づき、ゲートからの流出形態がもぐり流出の場合の実験を行い、各観測地点における時間波形を得た。その一例が図-2 で、本図は $x = -9.00\text{m}$ の入射波、 $x = -0.50\text{m}$ の水平床部での波、 $x = 0.00\text{m}$ のゲート前面部で発生した反射波、そして $x = -0.50 \sim x = -2.50\text{m}$ の透過波の時間波形を示している。

河川流量 Q_{rv} 、ゲートの開口高 a が異なる他の実験ケースに関しても同じ観測地点では同様の傾向の波形が観測される結果となった。ゲートの直下流では著しい反射波、その上流側では透過波が発生し、いずれともにソリトン分裂が発生していた。これらの反射波、透過波の特性について後述の通り整理した。

一方、ゲートからの流出形態が自由流出の場合の実験からは各観測地点において図-3 に示すような波形が観測された。本図は $x = -9.00\text{m}$ は入射波、 $x = -1.50\text{m}$ は跳水の終端位置、 $x = -1.00$ 、 $x = -0.50\text{m}$ は入射の到達前は射流区間、そして $x = 0.50 \sim x = 1.00\text{m}$ はゲート上流側の時間波形を示している。ただし、図中の $\bar{h}$ はゲート閉鎖前の水深と波を入射する前のゲ

ート閉鎖後の水深の差を示している。

図-3 に示した実験条件では、入射波の到達前においては射流区間の終端位置が $x = -1.25\text{m}$ 付近に、跳水の終端位置が $x = -1.50\text{m}$ 付近に位置していた。しかし、入射波の到達とともに、跳水部の位置は $x = -1.00$ 、 $x = -0.50\text{m}$ の時間波形からも分かるとおり、上流の向かって押し戻された。本研究で設定した2つの条件ではいずれともその押し戻された跳水部はゲートからの流出部に到達することなく、ゲート上流側で透過波を観測することはなかった。なお、これらの自由流出の実験条件では、流れによる乱れ成分が著しく混在して入射波による水位変動を得られた時間波形から直接把握することが困難であった。図-3 に示した時間波形は Fourier 変換によってこのような乱れ成分を除去したものである。

3. ゲート前後での河川遡上津波の特性

ゲートからの流出形態がもぐり流出の場合の反射波と透過波の特性について以下の通り整理した。

(1) 反射波の最大波高 η^* とゲートの開口高さの関係

$x = 0.00\text{m}$ 地点における反射波の最大波高 η^* とゲートの開口高さの関係について図-4 (a) に示すとおり整理した。河川流量 Q_{rv} 、ゲートの開口高 a が図-2 に示したケース以外の実験ケースにおいてもその波高は流量の規模に依存して異なるものの、急激な水位の変化に伴いいずれの実験ケースともに同様にソリトン分裂を生じた。そして、いずれの流量に関してもゲートの開口高さが大きくなるに従ってゲート上流側への通過流量が増加するため、その波高は減少した。最大開口高さ $a = 0.100\text{m}$ の時に生じる波高は、最小開口高さ $a = 0.025\text{m}$ の時のそれと比べて約20%程度まで小さくなった。つまり、反射波の最大波高は、河川流量とゲートの開口高さの両者から規定されることが分かる。

(2) 透過波の最大波高 η^* とゲートの開口高さの関係

ゲートの上流側では透過波の波高を観測するために $x = 0.50, 1.50, 2.50\text{m}$ に波高計を設置してその波高の変化を観測した。図-4 (b) に $x = 0.50\text{m}$ 地点の最大波高 η^* とゲートの開口高さの関係を整理して示した。

まず、透過波の最大波高はゲート前面部の反射波の特性とは異なり、河川流量の規模の違いによる影響は小さく、ゲートの開口高さが支配的な決定要因であることが分かる。

つぎに、各図において $a/h_0 = 0.38$ ($a = 0.050$) に着目するとその左右で現象の傾向が異なることが認められる。これはゲートの開口高さが小さいときほどゲ

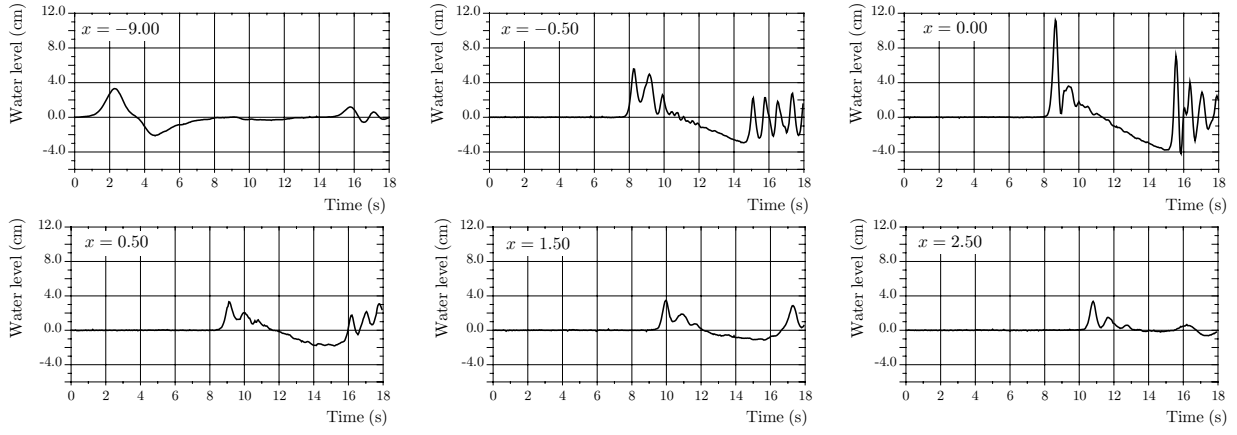


図-2 ゲートからの流出形態がもぐり流出の場合の水理実験から得た時間波形（本図の実験条件は、河川流量 $Q_{rv} = 0.235 \text{ m}^3/\text{min.}$ 、ゲートの開口高 $a = 0.050 \text{ m}$ 、初期水深 $h_0 = 0.130 \text{ m}$ である。ゲートの下流側で発生した反射波、透過波はともにソリトン分裂が発生していることが分かる。なお、河川流量 Q_{rv} 、ゲートの開口高 a が異なる他の実験ケースに関しても同じ観測地点では同様の傾向の波形が観測された。）

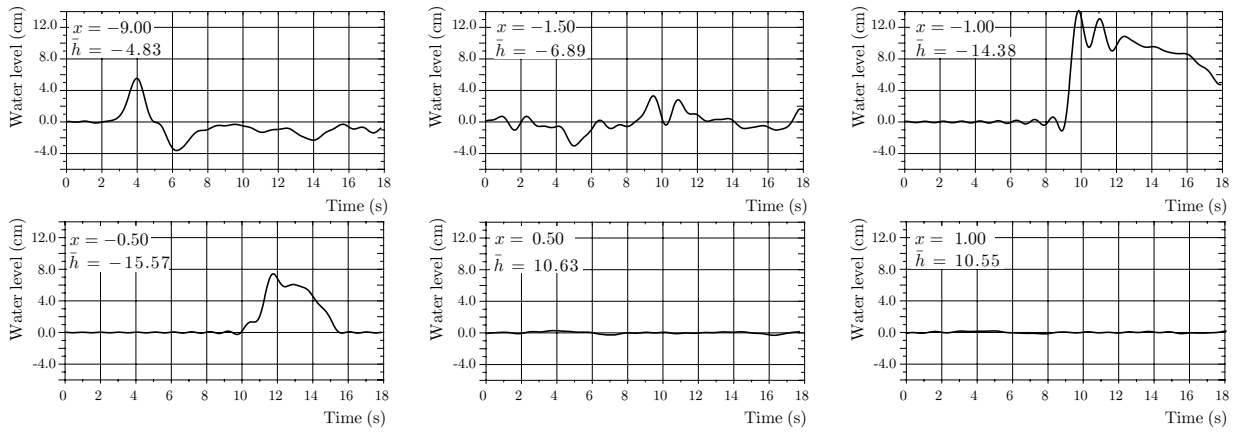


図-3 ゲートからの流出形態が自由流出の場合の水理実験から得た時間波形（本図の実験条件は、河川流量 $Q_{rv} = 2.000 \text{ m}^3/\text{min.}$ 、ゲートの開口高 $a = 0.050 \text{ m}$ 、初期水深 $h_0 = 0.150 \text{ m}$ である。入射波の到達前では射流区間の終端位置が $x = -1.25 \text{ m}$ 付近に、跳水の終端位置が $x = -1.50 \text{ m}$ 付近に位置していた、入射波が到達すると跳水位置が上流に向かって押し戻されていることが見て取れる。なお、これらの時間波形では、流れに伴う乱れ成分を Fourier 変換によって除去した。）

トの通過に伴い発生する渦混合の規模が著しく大きくなり、入射波の波エネルギーが消費されているためと考えられる。すなわち、 $a/h_0 = 0.19$ ($a = 0.025$) の場合では a/h_0 がそれ以上の条件に比べ、より多くの波エネルギーが消費されたために大きな波高減衰を生じたものと推測できる。なお、 $x = 1.50, 2.50 \text{ m}$ 地点におけるこれらの関係も同様であった。

(3) ゲートの通過に伴う入射波の波高減衰率 ϵ

ゲートを透過するに伴って入射波の最大波高がどの程度減衰するかについて調べた。ここでは、波高減衰率 ϵ を、 $x = -0.50 \text{ m}$ における最大波高 η_I^* と 3 地点の透過波の最大波高の平均値 $\bar{\eta}_p^*$ から

$$\epsilon = \frac{\eta_I^* - \bar{\eta}_p^*}{\eta_I^*} \quad (1)$$

と定義した。これは、波高減衰率 ϵ が大きいほどゲート通過前の波高よりもゲートの上流側に発生する透過波の波高は相対的に小さくなり、ゲートの上流側は安全であることを意味する。この波高減衰率とゲートの

開口高さとの関係を整理したものが図-5 である。

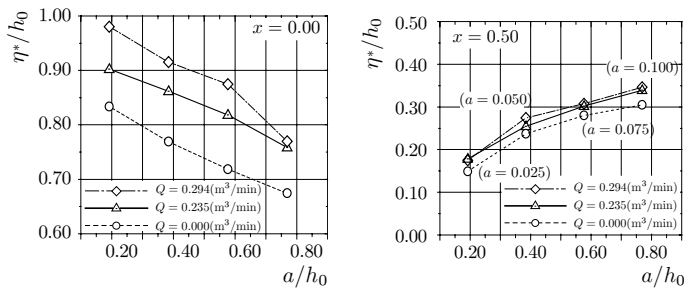
この図から、ゲートの開口高さ a/h_0 が 0.20 程度の場合では入射波の波高に対する透過波の波高は 65% 程度まで減衰させることができる。一方、 a/h_0 が 0.77 程度の場合では透過波の波高はただか 20% 程度しか減衰させることができないということが見て取れる。

前項で指摘したとおり、ゲートの開口高さが小さい場合ではこれが大きい場合と比べて渦混合の規模が大きくなる。図-5 から a/h_0 が 0.38 程度が境界となって双方の領域では現象の傾向が異なることが分かる。これは、このような数値計算を実施する場合ではこの影響を計算に組み込む必要性を示唆するものである。

4. おわりに

これまでほとんど研究されてこなかったゲートを通る津波の特性について水理実験を通して明らかにした。

水理実験の結果に基づき、ゲートを透過した津波の



(a) ゲート下流側での反射波 (b) ゲート上流側での透過波

図-4 ゲート下流側 ($x = 0.00$ m) で発生した反射波, 上流側での透過波 ($x = 0.50$ m) の最大波高とゲートの開口高さの関係 (透過波に関しては, いずれの地点においても $a/h_0 = 0.38$ ($a = 0.050$) を境界に現象の傾向が異なることが見て取れる. この原因はゲートの開口高さ a が小さい場合ほど著しい渦混合が発生したために依るものと考えられる. なお, ここで示した $x = 0.50$ m 地点以外の透過波を観測した $x = 1.50$, $x = 2.50$ m における関係も同様であった.)

相対的な波高減衰率について整理した. ゲートの開口高さ a/h_0 が 0.2 程度の場合では入射波の波高を 65% 程度にまで減衰させることが期待できる. 一方で, a/h_0 が 0.75 を超える場合では 20% 以下の減衰をさせるだけにとどまる. この透過波の波高はゲートの開口高さが支配的な要因となり, 河川の流量から受ける影響は小さい. また, ゲートの開口高さが小さい場合, もぐり流出ではゲートの通過時に著しい渦混合, 自由流出では跳水がそれぞれ発生する. この性質を積極的に利用すれば不完全閉鎖の場合でさえも入射してくる津波の波高をかなり減衰することが期待できる.

なお, 本研究で取り扱ったような河道内における津波の数値計算を実施する場合, 最大波高を正しく評価するためには基礎的に非線形分散波理論式を適用する必要がある. さらに, ゲートの開口高さが小さい場合の透過波の波高を正しく評価するために渦混合による損失項を考慮する必要がある. これらのことを織り込んだ数値解析モデルを用いれば良い精度で計算が可能であると考えられる.

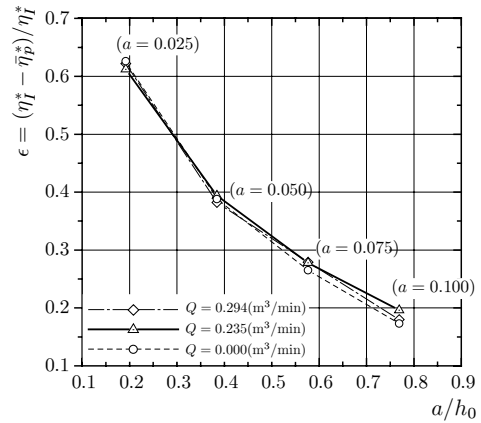


図-5 入射波の波高減衰率 ϵ とゲートの開口高さの関係 (波高減衰率 ϵ が大きいほどにゲート通過前の波高よりもゲートの上流側に発生する透過波の波高は相対的に小さくなり, ゲートの上流側は安全であることを意味する.)

謝辞: 水理実験の実施にあたっては研究当時東海大学大学院生, 東海大学学部生であった諸君に尽力頂いた. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) 岩崎 敏夫, 阿部 至雄, 橋本 潔: 津波の河川遡上に関する数値計算の実際, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp.437-442, 1976.
- 2) 岩崎 敏夫, 阿部 至雄, 橋本 潔: 河川津波の特性に関する研究, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp.74-77, 1977.
- 3) 岩崎 敏夫, 阿部 至雄, 橋本 潔: 湾奥に位置する河川での津波の遡上に関する数値解析, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp.137-140, 1978.
- 4) 後藤 智明, 首藤 伸夫: 河川津波の遡上計算, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp.64-68, 1981.
- 5) Tsuji, Y. and Yanuma, T. and Murata, I. and Fujiwara, C.: Tsunami Ascending in Rivers as an Undular Bore, *Natural Hazards* 4, pp.257-266, 1991.
- 6) 宮崎 知与, 史 亜傑: 1993 年北海道南西沖地震津波の河川遡上痕跡調査とその水位再現検討, 自然災害科学, pp.179-189, 1997.

(2003. 10. 10 受付)

STUDY ON CHARACTERISTICS OF RIVER-ASCENDING TSUNAMI TRANSMITTING ON THE SLUICE GATE

Hiroyasu YASUDA and Koji FUJIMA

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. If the sluice gate can not close completely, the tsunami can transmit on upper side of the gate. In this paper, laboratory experiments were conducted to investigate the characteristics of the transmitted tsunami on the sluice gate. The experimental results are showed that the wave height of transmitted tsunami is governed by the opening height of the gate, is not mostly influenced by discharge. In case of opening height is low, the strong eddy loss or hydraulic jump generate on the part of out flow from the gate, and there eddies cause to considerably decrease the wave height of the transmitted tsunami.