

ゲートの閉鎖に伴い発生する波状段波の水理特性に関する考察

北海道開発土木研究所 安田 浩保, 中央大学理工学部 山田 正

1. はじめに

河道に設置されたゲートの開口高の操作法によっては段波が発生する。その操作法の違いによって形成される段波面は異なるものの、いずれにしても波高を増幅しながら波状段波に遷移していく。著者ら¹⁾はこのような段波に対して多面的に考察を加えてきた。本文ではそこから得られた知見に基づき、河川工学的視点から見たこのような波状段波の重要性について述べた。

2. ゲート閉鎖に伴い発生する段波の性質

(1) 水理実験から得られた知見

ゲートの閉鎖に伴い発生する段波の性質を調べるために、定常の河川流を模擬した流れの場において、スルースゲートを自由落下させる急閉の実験ケース、およびモーターを利用して等速度でゲートを落下させる緩閉の実験ケースのもとで発生する段波に関する水理実験を行った。実験条件には Froude 数、ゲート降下前の水深、ゲート降下開始位置、ゲート降下速度を種々に組み合わせた 141 ケースを設定した。

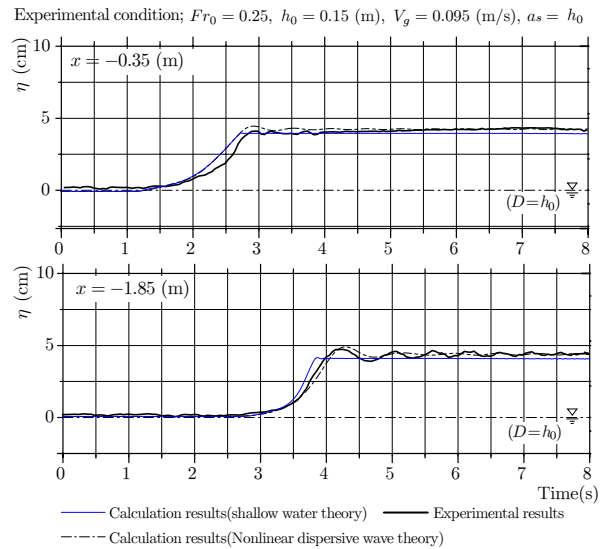
実験装置の制約上、2m 程度の比較的短い区間でしか段波波高を観測できなかったものの、図-1 に示した実験結果の一例のようにその短い観測区間でさえも波状段波へと変形して波高増幅することが多く認められた。図中の η は実験（ゲート降下）開始前の水位の上昇分である。そして、これらの実験結果を整理したところ、図-2 に示したようにその波状段波の最大波高は波状性を無視した場合に比べてゲートの近傍でさえ 20% 以上も大きくなることが多くあった。ここに、 η_b は平均段波波高、 η_{max} は波状段波の波高である。すなわち、このような段波を取り扱う場合には波状性を考慮したうえで議論する必要があると考えられる。さらに、ゲートの閉鎖後の間もない段階から波状性を伴う段波であるか否かの判定は、図-2 に示したようにゲートの操作方法に関するパラメータ $V_g/\sqrt{ga_s}$ を用いることで可能なことを示した。ここに、 V_g はゲートの降下速度、 g は重力加速度、 a_s はゲートの降下開始位置である。

(2) 数値計算とそこから得られた知見

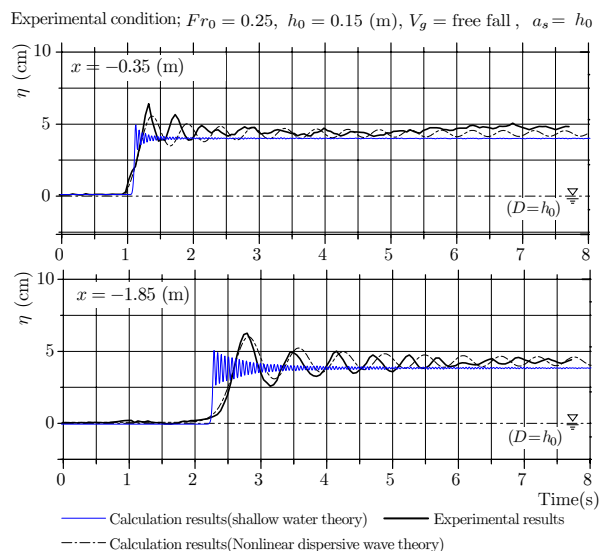
実験装置はその流下方向の延長に制限があったために、長距離伝播した場合における段波の変形過程について考察を加えることができなかった。ゲート閉鎖に伴い発生する段波の性質をさらに踏み込んで調べるために数値解析モデルを構築した。段波の解析を精度良く行うためには、水理実験で示したとおりその波状性を考慮する必要がある。本研究では非線形分散波理論式（分散性を考慮した浅水理論式）のひとつである Peregrine 式²⁾を水深方向に積分した、

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 q}{\partial t \partial x^2}, \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

で表される非線形分散波理論式と運動の式の右辺を無視した浅水理論式を基礎式とする数値解析モデルを構築した。



(a) ゲートを緩閉した場合



(b) ゲートを急閉（自由落下）した場合

図-1 ゲート閉鎖に伴い発生した段波の時間波形 - 実験と計算の比較 - (波高を増幅しながら伝播していることが分かる)

ここに、 η は水位、 t は時間座標、 q は流量フラックス、 x は空間座標、 D は全水深、 h は静水深である。なお、数値解析法には 2 段階混合差分法³⁾を用いた。これにより得た計算結果と実験結果の比較した一例が図-1 であるが、これ以外のいずれの実験ケースも非線形分散波理論式は実験値を良好な精度で再現することができた。その一方で、浅水理論式は最大波高を過小に、段波波速を過大に評価した。

この数値解析モデルを利用して、ゲートの閉鎖方法の違いが伝播に伴う変形過程や終局的な波高に及ぼす影響について考察することを目的とした数値実験を行った。その結果、図-3 に示したように同じ Froude 数の条件下では、ゲートの閉鎖方法によって変形過程は異なるものの、いずれの閉鎖方法によっても最終的には同一波高まで波高を増

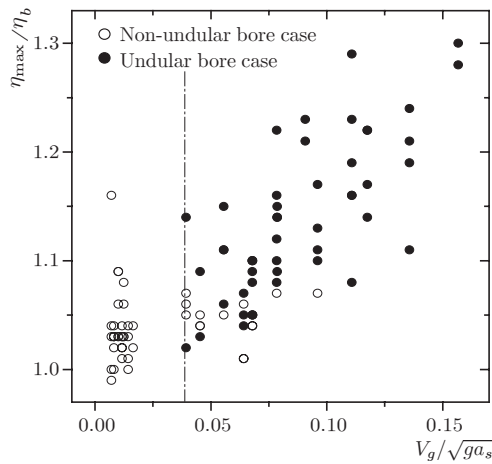
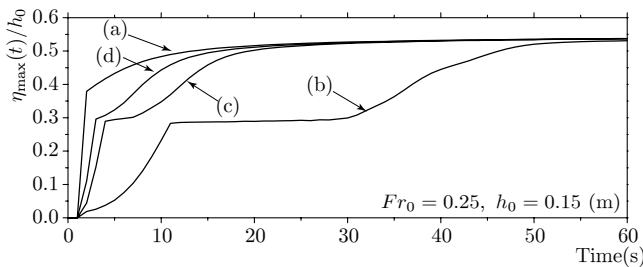


図-2 ゲートを緩閉した場合の波状段波の発生条件



(a); $V_g = \text{free fall}$, $a_s = 0.15$ (m) (c); $V_g = 0.055$ (m/s), $a_s = 0.15$ (m)
 (b); $V_g = 0.015$ (m/s), $a_s = 0.15$ (m) (d); $V_g = 0.095$ (m/s), $a_s = 0.15$ (m)

図-3 ゲートの閉鎖法の違いによる最大波高の時間的変化の差異 (いずれの閉鎖方法であっても最終的には同じ波高にまで到達する)

幅して伝播することが分かった。ただし、分散性による波高の増幅が完了して波形の変形が安定した後は、流れの影響を受けるためその波高は伝播するにしがい減衰して保存波とはならないことを他の数値実験で示した。

3. 河川工学的視点から見た波状段波の重要性

前述までに行った水理実験の結果から、図-4 に示すように波状性を無視した段波波高は Froude 数と良い関係にあることが分かった。また、図-2 から分かるように、ゲートを比較的緩やかに閉鎖して波状性を伴う段波となった場合ですら、その最大波高はこれを無視した段波波高に比べてゲートの近傍であるにもかかわらず 20% 以上も大きくなることが多い。この両者の性質から、水深が 5.0m、Froude 数が 0.30 程度で流下する洪水流を考えると、この流況において段波が発生した際の水深は、図-5 に示すように波状性を無視した場合でさえ 6.5m、波状性を含めて考えた場合では少なくとも 8.0m 程度にまで至ることになる。

河川の堤防の高さは、一般に H.W.L. に計画高水流量から決まる余裕高を加えた高さとなる⁴⁾。例えば、計画高水流量が 2000 ~ 5000 m³/s 程度の河川では余裕高が 1.2m と設定⁴⁾されるが、この堤防高さでは波状性を伴わない段波でさえもそれを河道内に留めることは難しいうえ、波状性を考慮して考えるとやはり河道内にそれを留めることはかなり困難であることが容易に推測できる。太平洋側の河川では高潮対象区間が設定されていることがあるため、このような河川では通常の堤防の設計基準よりも若干の余裕を持つことになるものの、それでもこの問題に対しては不十

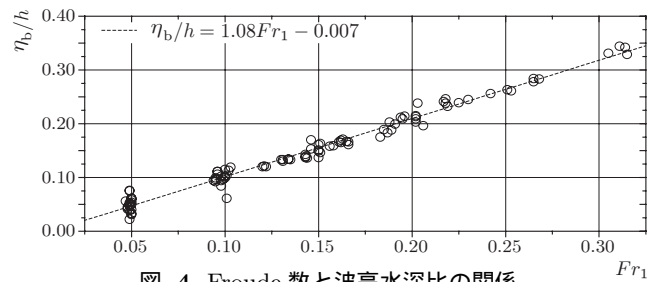


図-4 Froude 数と波高水深比の関係

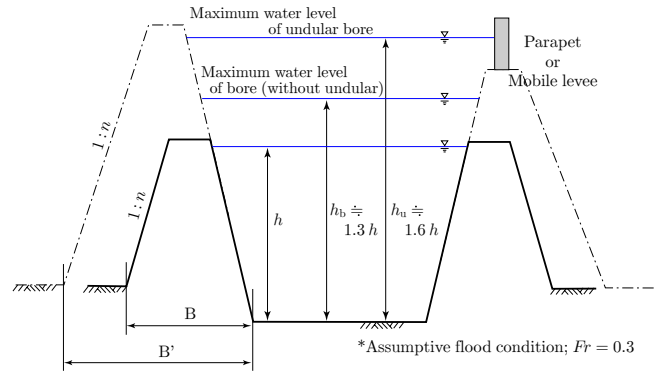


図-5 洪水時に段波が発生した場合のその水深と堤防高の関係 (H.W.L. に達するような洪水時に段波が発生すると、多くの場合、設定されている余裕高だけではその段波を河道内に留めることは難しい。また、波状性により波高はこれを無視した場合の波高に比べて 20% 以上も大きくなることから波状性を考慮した上で検討を進めるべきである)

分である。一方、日本海側の高潮対象区間が設定されていない河川や中流部においてこの問題を考える場合、本格的な対策を講じる必要があるものと考えられる。

ただし、このような段波による水位上昇は洪水流のように長時間にわたり継続するものではない。このため、ゲート近傍の対策は、堤防の高上げによって発生した段波を河道内に留めるようにするよりも、むしろ、パラペットや波返工などの特殊堤を設置することで危険性を軽減させることの方が適当であると考えられる。

4. 結語

ゲートを有する河川ではその閉鎖法が適切でないと波高の大きな段波が発生する。さらにその段波が波状性を伴うとこれを無視した場合と比べて少なくとも 20% 以上もその波高は大きくなること多くあるため、ゲートの周辺の堤防高は慎重に検討しなければならない。このような問題を取り扱う場合には、浅水理論式では波状段波の波高を過小に評価するため、これを正確に評価することができる分散項を含む浅水理論式すなわち非線形分散波理論式を適用することが非常に重要な意味を持つ。

参考文献

- 1) 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, 2003 (印刷中)。
- 2) Pregrine, D.H.: Long waves on a beach, *J. Fluid Mech.*, Vol.27, pp.815-827, 1967.
- 3) たとえば, 岩瀬浩之, 見上敏文, 後藤智明: 非線形分散波理論を用いた実用的な津波計算モデル, 土木学会論文集, No.600/II-44, pp.119-124, 1998.
- 4) 建設省河川砂防技術基準 (案) 設計編 [I], 251p., 山海堂, 1998.