

津波段波の衝撃性および越流を考慮した 設計外力算定フローの提案

水 谷 将*・今 村 文 彦**

本研究では水理実験により、勾配の異なる構造物や越流を前提とした台形構造物に作用する津波段波の波圧、波高等の水理量を詳細に測定し、衝撃性を考慮した段波波圧および越流波圧を提案し、それらの最大値および波力の算定式、発生条件等を検討した。また既往の波力算定式との比較検討を行い、設計上、津波の動的かつ衝撃的な波圧を考慮しなければ、過小評価につながる危険性があることを示した。最後に、本研究で提案された算定式を利用し、津波の性質、越流の有無、構造物の形状を考慮した新しい沿岸構造物の建設費の算定フローを提案した。

1. はじめに

津波に対する防災対策、海岸保全については、1960年に発生したチリ津波の被災以降、全国規模で、本格的かつ積極的に被害抑止策が実施されたが、その設計方法は津波の挙動特性を十分反映したものとなっていない。津波来襲時には、津波段波特有の動的波力により防波堤、防潮堤が破壊され、そこから越流した津波が予想以上の浸水をもたらすことも考えられる。実際、1983年日本海中部地震津波や1993年北海道南西沖地震津波の際には、ケーソンの倒壊や移動、防潮堤や岸壁の倒壊が一部にみられている。一方、沿岸の環境保全、景観への要求の高まりおよび防災予算の緊縮といった時代背景を受けて、従来の防災施設建設を中心としたハード対策の見直しが行われている。ハードに頼る防災対策から情報伝達、避難システムの構築や救助・救命活動といった防災体制によるソフト対策をより補完した総合防災対策を行うことが取り込まれたが、構造物を越える津波が生じた時の安定性の問題や、その津波が構造物およびその背後域にどのような影響を及ぼすのか未だ不明であり、現在のところ効果的な計画、設計手法がなされていないという課題が残されている。

2. 波圧の分類

構造物に作用する波力については、波の伝播過程や越流の有無により、図-1のように分類できると考える。まず、①沖合域は、微小振幅波圧の適用域であり、重複波圧から砕波圧までを対象として利用できる合田式(合田, 1973)が現設計法において最もよく用いられている。次に、②浅海域では、波高が増幅し微小事論から有限振幅波理論が必要となる。さらに、③砕波域では、広井式(広井, 1920)、衝撃砕波力について、Minikin式(Minikin, 1950)がよく知られている。最後に、④構造物の越流を対象とした研究例はない。

一方、津波を対象にした研究を見ると、③砕波域が中心となり、福井ら(1962)が段波の堤体衝突により生じる水位および波圧を詳細に測定し、段波波力の算定式を提案している。その後、日本海中部地震津波における被災原因を検討する際に、直立壁に作用する津波段波の実験を行い、合田式を段波波力に適用した谷本ら(1984)の研究、水路実験により津波による砕波段波の直立壁に作用する際の衝撃波圧分布を詳細に測定し全波力算定式を提案した松富(1991)の研究が報告されているが、いずれも直立壁に限定されている。

以上を踏まえ、本研究では、段波について、越流の有無や構造物勾配の違いに着目して水理実験を行い、段波波圧や越流する際に発生する越流波圧について算定式を提案し、さらには津波段波の衝撃性や越流を考慮した新しい設計外力算定フローの提案を試みる。

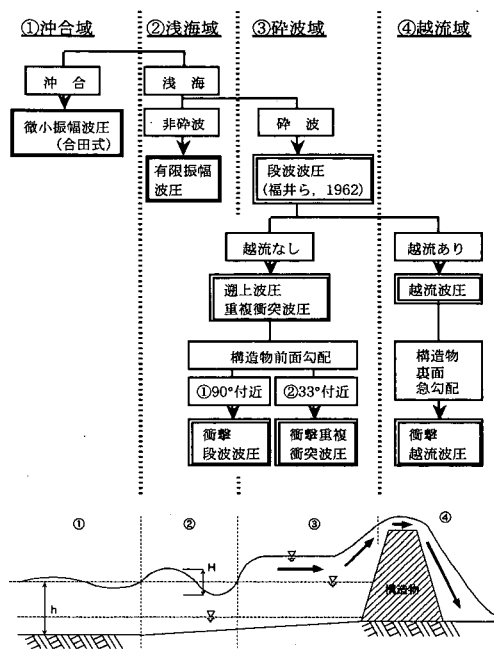


図-1 波圧の分類

* 正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所

** 正会員 工 博 東北大学教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

3. 水理模型実験の概要

使用した装置は高さ0.44 m, 幅0.3 m, 全長12 mの亚克力製矩形水路である。水理実験は①越流なし(図-2), ②越流あり(図-3)の2ケースについて行った。①越流なしの場合, その水路の一端に勾配可変の傾斜板(勾配1:0, 0.3, 0.6, 1, 1.53の5ケース)を設け, この傾斜面の中央部の下端から1 cmの箇所に波圧計を取り付けた。この波圧計設置部分は埋め込み式の板になっており, 上方向に1 cm間隔で測定した。静水深 h は5, 10, 15 cmの3ケースに設定した。

②越流ありの場合, 水路の一端に岩手県田老町の防潮堤を想定し, 台形(前面勾配は1:1, 裏面勾配は1:1, 1.25, 1.5の3ケースを設定), 縮尺約1/30の堤体を設け, このモデルの天端, 裏面, および背後中央部上を移動できる波圧計1基を取り付けた。実験条件は, 静水深 $h=10, 11, 12, 13, 14, 15$ cm(実スケールで $h=3\sim4.5$ mを想定)の6ケースについて天端上の流速および水位を測定し, 静水深 $h=10, 12, 15$ cmの3ケースについて, 天端, 裏面および背後面上に作用する波圧を2~4 cm間隔において測定した。

段波は実験水路端にある鉛直造波板を水路傾斜板方向に平行に約1 m, 一定の速度で移動させることにより発生させた。また, 段波の波形変化, 波速および流速を測定するために, 水位計3~4基, 流速計1基を配置した。衝撃力を測定する際には, 測定間隔の選定に注意が必要である。本研究では衝撃力の測定が可能である2/1000秒に測定時間間隔を設定した(水谷・今村, 2000)。

4. 構造物に作用する衝撃性波力(①越流なしの場合)

(1) 実験結果および考察

a) 衝撃段波波力

水谷・今村(2000)の研究によれば, 段波が構造物に作用する過程において, 時系列的に, 入射波が構造物に衝突する際に発生する段波波圧, 入射波の連続的な到達により著しい水位上昇が発生する際に生じる遡上波圧, さらにその直後, 入射波と反射波の衝突により瞬間的に発生する重複衝突波圧という3つのピークの存在することが示された。

今回の実験結果の一例として, 図-4に勾配1:0(90度), 静水深15 cm, 傾斜板上, 底面より25 cm(静水面上10 cm)の測点における波圧の時間変化分布を示す。この図より, 段波波圧発生と同時に極めて大きな波圧が発生していることがわかる。この波圧は, 静水面付近で最も大きな値を示す段波波圧とは異なり, 静水面の上方で発生し, 前後の測点の波圧と不連続という特徴をもつ。

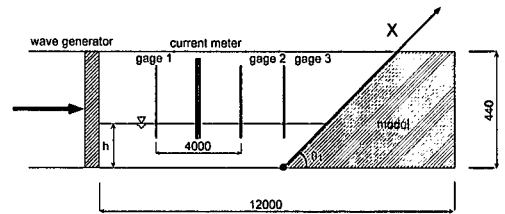


図-2 実験装置(①越流なし)(単位:mm)

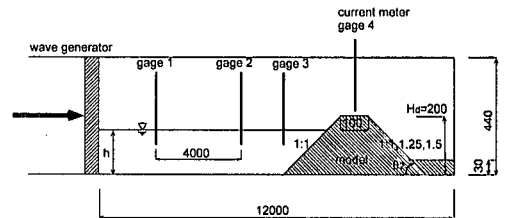


図-3 実験装置(②越流あり)(単位:mm)

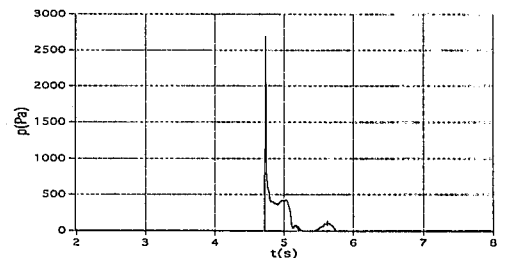


図-4 衝撃段波波圧の時間変化(勾配1:0)

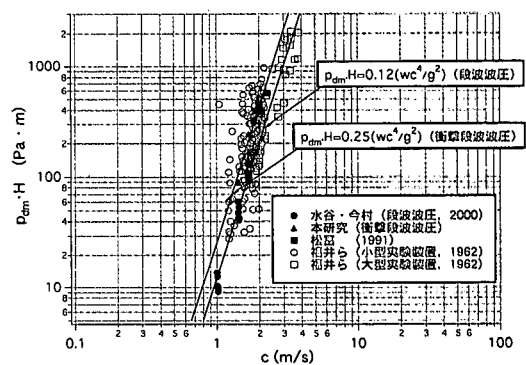


図-5 最大段波波圧

この波圧は構造物前面の勾配に大きく関係し, 勾配が直立壁およびそれに近い場合に発生する確率が高く, 設計上特に注意する必要がある。本研究では, この波圧を新たに衝撃段波波圧と呼ぶ。

b) 算定式の提案

松富(1991)は衝撃的な段波波圧について詳細なデータを獲得している。図-5に本実験と松富(1991), 福井ら(1962)の実験結果を示す。ここに c は波速, H は入射波高, w は水の単位体積重量, g は重力加速度である。本

研究では衝撃段波波圧 p_{dm} について次式を提案する。

$$p_{dm} = 0.25 \frac{w c^4}{g^2 H} \dots\dots\dots (1)$$

衝撃段波波圧は静水面のやや上方で発生することがわかっており、(1)式による波力の算定式についても提案されている(水谷・今村, 2002)。

(2) 各波圧の発生状況

従来の段波波圧、遡上波圧および重複衝突波圧の分類に関する検討結果(水谷・今村, 2000)を図-6に示す。ここで横軸は構造物の前面勾配 θ_1 、縦軸は波速と波高に関する無次元値 (c^2/gH) である。この図では、さらに今回の実験データにおいて、最大波圧が段波、遡上および重複衝突波圧であるかについて着目し、以下の5つの波圧領域に分類している。ここで、①は衝撃段波波圧が発生する領域である。②は段波波圧から遡上波圧への移行領域である。③は最大波圧が遡上波圧の場合である。④は遡上波圧から重複衝突波圧への移行領域である。最後に⑤は衝撃重複衝突波圧が発生する領域である。本研究の衝撃波圧の定義は、遡上波圧との差の波高による無次元値が0.5以上(衝撃段波波圧)、2.0以上(衝撃重複衝突波圧)である。各領域の定義を整理すると表-1のようになる。なお、衝撃段波波圧の発生条件は次式より示される。

$$\frac{c^2}{gH} \leq -0.6 \cot \theta_1 + 3.45 \dots\dots\dots (2)$$

(3) 既往算定式との比較検討

構造物の局所的な破壊や安定検討の際、重要な項目である最大波圧 p_m 、単位幅あたりの波力 F の静水圧に対する無次元値について、既往の波力算定式との比較検討を行った。比較の前提条件を以下に示す。

- ・捨石マウンドなし、海底勾配一定、水深波長比 $h/L = 0.01$
- ・波の卓越方向は防波堤の壁面に対する垂線方向
- ・直立矩形構造物
- ・構造物高は波圧の作用高よりも大きい

波力 F に関する検討結果を図-7に示す。本研究の対象域(波高水深比 $H/h = 0.6$) 近傍に注目すると衝撃段波波圧による算定値は衝撃波力を対象とした松富(1991)を除き、既往式の算定値よりも大きい値を示している。最大波圧についても同様の結果が得られており(水谷・今村, 2002)、設計上、衝撃段波波圧を考慮しないことは設計外力の過小評価につながる可能性があることがわかる。

5. 構造物天端、裏面に作用する波力・越流量 (②越流ありの場合)

(1) 実験結果および考察

a) 衝撃越流波圧

裏斜面勾配 1:1 の場合の測点ごとの波圧最大値の変

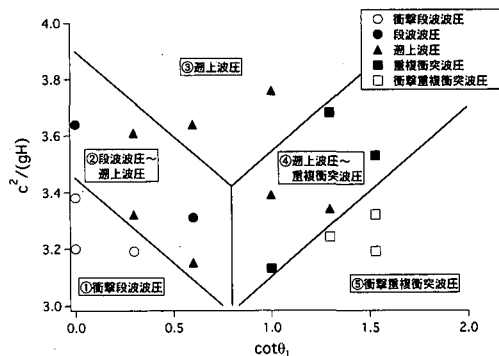


図-6 各波圧の分類

表-1 各波圧域の定義

最大波圧	最大波圧	Δp	$\Delta p/\rho g H$
①衝撃段波波圧	段波波圧 p_d	$p_d - p_s$	0.5 以上
②段波～遡上波圧	段波波圧 p_d or 遡上波圧 p_s		
③遡上波圧	遡上波圧 p_s		
④遡上～重複衝突波圧	遡上波圧 p_s or 重複衝突波圧 p_t		
⑤衝撃重複衝突波圧	重複衝突波圧 p_t	$p_t - p_s$	2.0 以上

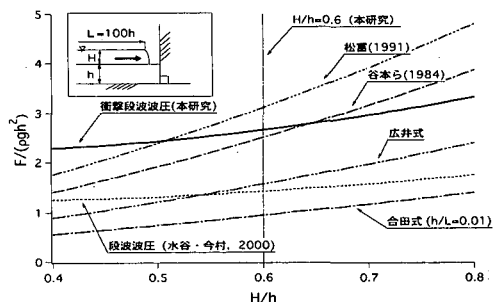


図-7 波力の比較検討

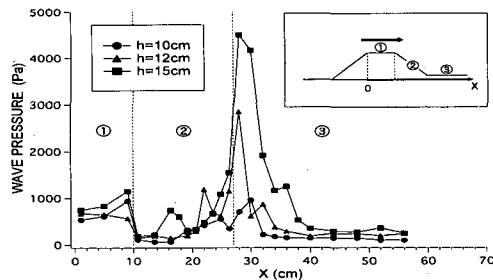


図-8 越流波圧の測点変化(裏斜面勾配 1:1)

化を図-8に示す。ここで、横軸 x はモデル天端前面側端点を起点($x=0$)とし、津波の伝播方向を正とする。モデルを越流した段波が落下し衝突するモデル裏斜面底部から背後域にかかる範囲($x=29$ cm 前後)で衝撃的に大きな波圧が発生している。しかし、裏面勾配 1:1.5 の場合、その値は半分程度であり、衝撃波圧は発生しなかった。

b) 算定式の提案

最大越流波圧 p_{om} と関係が大きいと思われる因子は、モデル天端最大流速 V_m 、モデル天端最大水深 H_w 、モデル裏面高 H_{d2} ($=0.17m$)、モデル裏面勾配角度 θ_2 等である。本研究では越流した段波が構造物背後に衝突する直前の鉛直方向の流速に比して、水平方向の流速は無視できると考え、エネルギー保存則より次式が成り立つとする。

$$p_{om} = A\rho V_m \sqrt{2gH_{d2}} \sin \theta_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 A は実験により決定される係数である。実験データの検討結果を図-9に示す。この図の関係より越流段波による最大波圧の算定式として次式を提案する。

$$\frac{p_{om}}{\rho g H_{d2}} = 2\sqrt{2} \frac{V_m \sin \theta_2}{\sqrt{g H_{d2}}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{p_{om}}{\rho g H_{d2}} = \left(2\sqrt{2} \frac{V_m \sin \theta_2}{\sqrt{g H_{d2}}} \right)^4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。この衝撃性の小さい範囲では、運動量の保存則がそのまま適用でき、(4)式のように流速および裏面勾配の関数として、線形性が保たれる。しかし、波力が増加し衝撃性が大きくなると、線形性が失われ4乗に比例するようになる。本研究では、(4)式の場合を越流波圧、(5)式の場合を衝撃越流波圧と呼ぶこととする。また、衝撃越流波圧の発生条件として次式を提案する。

$$2\sqrt{2} \frac{V_m \sin \theta_2}{\sqrt{g H_{d2}}} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

衝撃越流波圧域の4点について、各測点での波圧の無次元化を行った。測点の無次元値 x/x_m と波圧値の無次元値 p_o/p_{om} の関係を表したものが図-10である。ここに、 x_m は最大越流波圧の発生点である。

(2) 越流量および越流水深

本研究のような台形せきの越流量算定式としては、本間 (1940) が実験により得られたデータをもとに提案した本間式がよく知られている。越流係数 C について、本実験および本間式の比較検討結果を図-11に示す。これより本実験値は、本間式による算定値よりも明らかに大きい値をとり、 $c=4.0$ ($m^{1/2}/s$) 程度であることがわかった。よって、本研究では単位幅あたりの段波の越流量 Q ($m^3/s/m$) について次式を提案する。

$$Q = 4.0 H_w^{3/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

越流水深 H_w 、波高 H 、静水深 h およびモデル前面高 H_{d1} の関係を図-12に示す。この図より、次の関係式を提案する。

$$\frac{H_w}{H_{d1}-h} = 0.8 \frac{H}{H_{d1}-h} - 0.3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

本実験結果より、越流水深 H_w は、波高 H 、構造物高と静水深の差 $H_{d1}-h$ と密接な関係があることがわかる。

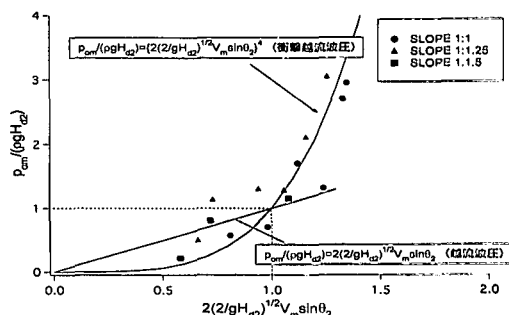


図-9 最大越流波圧

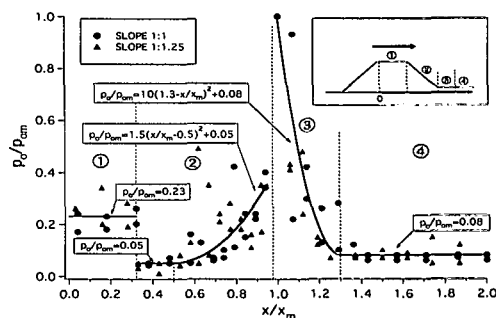


図-10 衝撃越流波圧の空間分布

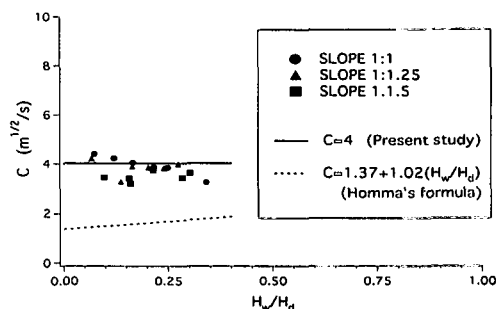


図-11 越流量の検討

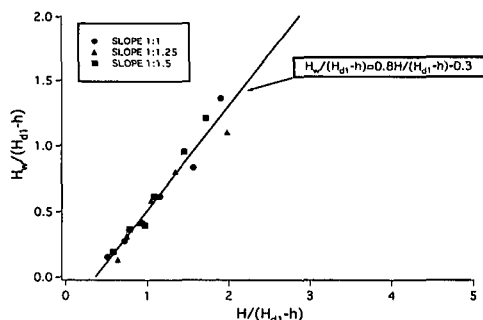


図-12 越流水深の検討

6. 構造物建設費の算定方法

(1) 建設費算定フローの提案

本研究において提案された波圧算定式による津波段波

を考慮した新しい構造物の建設費算定方法を提案する。

図-13 にフロー図を示す。対象とする沿岸海域について、計画津波の構造物設置位置での波高 H 等の水理量を推定するために数値計算により得られた沿岸データをもとに、入力条件として静水深 h 、津波の波高 H を設定する。また、構造物形状の諸元として、前面および裏面の鉛直高 H_1, H_2 、勾配 θ_1, θ_2 を設定する。入力条件から波速 c 、遡上高 R を算定する(水谷・今村, 2000)。構造物の鉛直高と静水面の差である $H_{d1}-h$ と遡上高 R について比較検討を行い、越流の有無を決定する。 $H_{d1}-h < R$ の場合、越流が発生すると想定し、越流波圧 p_{om} 等の外力を算定する。

次に、フロー図に基づき、段波、遡上、重複衝突波圧の各算定式について、最大前面波圧 p_m 、前面波力 F 、その波力による構造物端部まわりの転倒モーメント M を算定し、その中から最大値を選択し、構造物の移動(滑動)、転倒に関して安定検討を行う。その結果より、設計外力を満足する構造物細部を決定し、建設費の算出を行う。建設費が予算を超える場合は、構造物の形状を見直す。

(2) 建設費に関する検討例

検討例として周期 $T=50$ min、波高 $H=3$ mの想定津波が、静水深 $h=4$ m上の構造物に作用する場合を考える。構造物の形状は、前面勾配、裏面勾配がともに 45° 、天端長 3 mの台形状とした。検討は、越流なし(構造物高 $H_d=16$ m)、越流あり①(構造物高 $H_d=6$ m)、越流あり②(構造物高 $H_d=4$ m)の3ケースについて行った。構造物前面に作用する波圧については、本研究式および合田式について行った。検討の結果、越流なし(合田式)の場合を1とすると、越流なし(本研究)は1.13、越流あり①は0.7程度、越流あり②は0.6程度となった。このことは、波圧に津波の段波波圧を考慮すると、建設費は1割弱の割り増しとなり、越流を許容する場合には6~7割程度に建設費を押さえることができることを示している。

7. まとめ

本研究結果により、以下のことがわかった。

- ①津波段波の波力の算定に従来の設計式を用いることは、過小評価につながるがわかった。
- ②津波が構造物に作用する際および越流する際に発生する衝撃的な波圧、越流量および越流水深の算定式を提案した。また、衝撃性の発生条件を示した。
- ③津波の衝撃性および越流を考慮した構造物建設費算定フローを提案した。このフローにより、入射波高およ

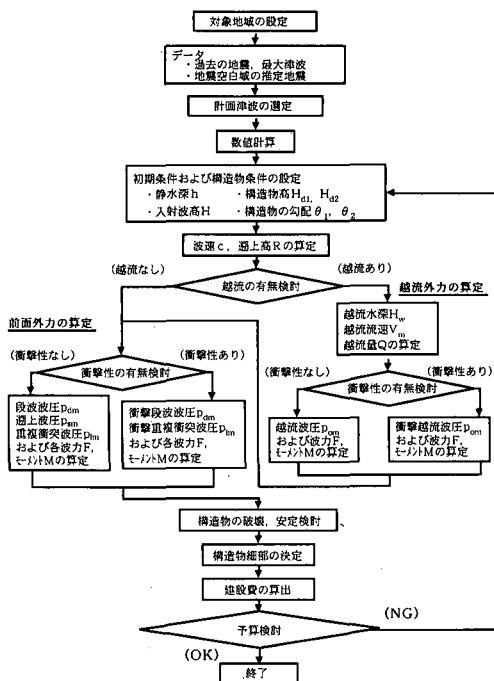


図-13 構造物建設費の算定フロー

び構造物の設置水深、形状から構造物の建設費の算定が可能となった。

最後に、本研究の一部は五洋建設㈱の社会人派遣制度のもとに行われたもので、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告第12巻第3号, 69 p.
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋 (1984): 1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.
- 広井 勇 (1920): 波力の推定法に就て, 土木学会誌, 第6巻, 第2号, pp. 435-449.
- 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄 (1962): 津波の研究 (II) 一段波津波の堤防におよぼす影響一, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 50-54.
- 本間 仁 (1940): 低流速堰堤の越流係数(第2編), 土木学会誌, 第26巻, 6号, pp. 849-862.
- 松富英夫 (1991): 碎波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 626-630.
- 水谷 将・今村文彦 (2000): 構造物に作用する段波波力の実験, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 946-950.
- 水谷 将・今村文彦 (2002): 構造物に作用する段波の波圧算定式の提案, 平成13年度東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 190-191.
- Minikin, R. R. (1950): Winds, Waves, and Maritime Structures, Griffin, London, pp. 38-39.