

越流を考慮した津波段波の波圧算定式の提案

水谷 将*・今村 文彦*

1. 目 的

我が国の沿岸域においては、1960年のチリ津波の被災以降、防潮堤や防波堤などの津波防災施設が精力的に整備され防災対策の一躍を担ってきた。その一方で、沿岸の環境保全、景観への要求および防災予算の緊縮といった時代背景を受け、対象津波高さを十分防ぐことの出来る天端高さを確保する事が年々難しくなっている。対象津波を上回る規模の津波の来襲する可能性もあり、従来想定しなかった「防潮堤を越流する津波」を考慮することが必要となってきた。しかし想定以上の津波が生じた場合、防波堤、防潮堤のような構造物がその津波に対してどの程度の効果を示し、その後背地域にどのような影響を及ぼすのかについては未だ不明であり、越流を許容する具体的な防災対策は行われていない。また、これまでに津波の波力について様々な研究はなされているが、より実用的な構造物形状および性質の異なる圧力全てを満足する算定式は確立されておらず、未だ実用的に用いられる段階には到っていない。このような現況を踏まえ、本研究では、

- ①対象波は段波。
 - ②対象構造物を防潮堤および防波堤とし、断面2次元に限定。
 - ③構造物の形状（勾配）および越流を考慮。
- という3条件のもとで、越流しない場合と越流する場合、各々について水理実験を行い、段波波力、越流波力および衝撃波力を考慮した波圧算定式の提案を試みた。

2. 実験方法

使用した装置は図-1に示すように高さ0.44m、幅0.3m、全長12mの亚克力製矩形水路である。段波は鉛直造波板を水路傾斜板方向に平行に約1m、一定の速度で移動させることにより発生させる。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1cmの箇所には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1cm間隔で測定した。静水深 h は 5, 10, 15cmの3ケースに設定した。

越流ありの場合、水路の一端に岩手県田老町の防潮堤にならい、台形（前面勾配は1:1、後面勾配は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、後面、および背後面中央部上を移動

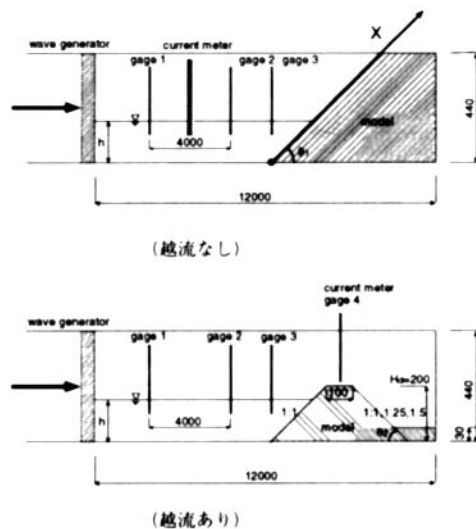


図-1 実験装置

*東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

できる波圧計 1 基を取り付けた。実験条件は、静水深 $h=10, 11, 12, 13, 14, 15\text{cm}$ (実スケールで $h=3\sim 4.5\text{m}$ 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 $h=10, 12, 15\text{cm}$ の 3 ケースについて、天端、後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。

3. 各最大波圧算定式の提案

越流なしの場合、実験結果 (図-2) より、構造物に作用する段波波圧には 3 つのピークが存在することがわかった。まず、入射波が構造物に衝突する際に発生する段波波圧 (Dynamic wave pressure), 次に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 (Sustained wave pressure), さらにその直後、反射波と入射波の衝突により瞬間的に発生する重複衝突波圧 (Impact standing wave pressure) である。特に段波波圧と重複衝突波圧については衝撃性の大きい波圧を衝撃段波波圧, 衝撃重複衝

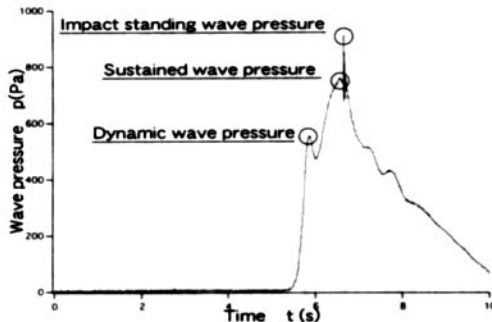


図-2 波圧の時間変化 (前面勾配 1:1.53)

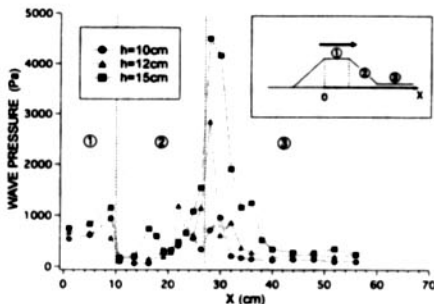


図-3 波圧の空間変化 (後面勾配 1:1)

突波圧と呼び、計 5 個の最大波圧算定式を提案した。

次に越流ありの場合、実験結果 (図-3) より、モデルを越流した段波が落下し衝突するモデル後面底部から背後域にかかる範囲で急激に大きな波圧が発生し、この波圧の大きさは、後面勾配と密接な関係があることがわかった。本研究ではこの点で発生する越流波圧について、特に衝撃性の大きい越流波圧を衝撃越流波圧と呼ぶ。

3.1 段波波圧

図-4 に本実験と松富 (1991), 福井ら (1962) の実験結果を示す。衝撃段波波圧は段波波圧よりも大きい値を示すため、分けて検討する必要がある。段波波圧について福井ら (1962) は $c=2\text{ m/s}$ あたりのデータに影響されて $K=0.33\sim 0.51$ を採用している。しかし本実験結果を考慮すると $K=0.12$ 程度が適当である。また衝撃段波波圧については、本実験結果と松富 (1991) の実験結果より $K=0.25$ を提案する。よって段波波圧および衝撃段波波圧の最大値の算定式は次式ようになる。

(段波波圧)

$$p_{dm} = 0.12 \frac{wc^4}{g^2 H} \quad (1)$$

(衝撃段波波圧)

$$p_{dm} = 0.25 \frac{wc^4}{g^2 H} \quad (2)$$

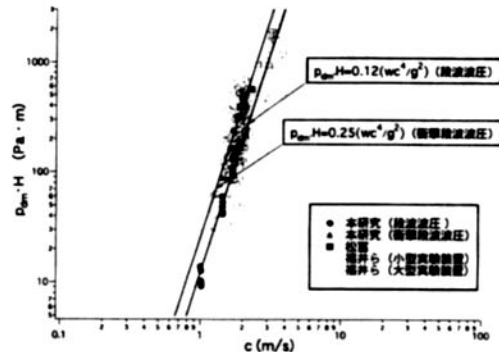


図-4 最大段波波圧

3.2 遡上波圧

図-5に構造物の傾斜勾配角度 $\cos\theta_1$ 、重力加速度 g 、入射波高 H および波速 c による無次元値 $(2+\cos\theta_1)c^2/gH$ と、遡上波圧と段波波圧の最大値に関する比 (p_{sm}/p_{dm}) の関係を示す。この図より、次のような関係式が提案できる。

$$\frac{p_{sm}}{p_{dm}} = 0.14(2 + \cos\theta_1) \frac{c^2}{gH} \quad (3)$$

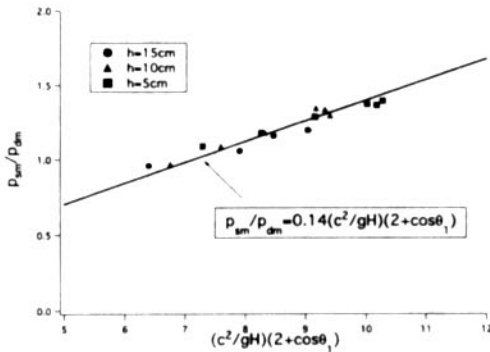


図-5 最大遡上波圧

3.3 重複衝突波圧

可視化によると、この波圧は反射波と入射波の衝突の際に発生していることがわかった。反射波を決める因子としては遡上高、入射波を決める因子としては波速が挙げられ、遡上高は遡上波圧と、波速は段波波圧と密接に関係があると考えられる。そこで図-6に最大段波波圧、最大遡上波圧の和と重複衝突波圧の関係を示す。これらの算定値は次に示す2つの直線式に分類できる。

$$\frac{p_{sm}}{p_{dm} + p_{sm}} = 0.5 \quad (4)$$

$$\frac{p_{sm}}{p_{dm} + p_{sm}} = 10 \cos\theta_1 - 6.6 \quad (5)$$

式(4)は、傾斜勾配が比較的急である場合の直線式である。傾斜勾配が1:1より緩やかになり、かつ静水深が大きい場合、式(5)に移行する。式(4)と式(5)の違いは、反射波と入射波の衝突時間が異なるために生じる。すなわち、式(4)の場合、小規模の衝突が比較的長時間に渡って生じているのに対

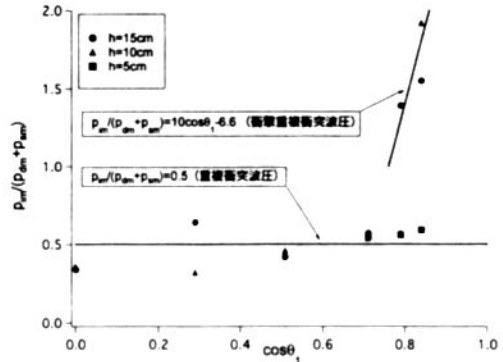


図-6 最大重複衝突波圧

し、式(5)では大規模の衝突が極めて短時間に行われている。

3.4 越流波圧

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モデル後面高 H_{d2} (=0.17m)、モデル後面勾配 θ_2 等である。本研究では運動量保存則をもとに導く。実験データの検討結果を図-7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。

$$\frac{p_{om}}{\rho g H_{d2}} = 2\sqrt{2} \frac{V_m \sin\theta_2}{\sqrt{g H_{d2}}} \quad (6)$$

$$\frac{p_{om}}{\rho g H_{d2}} = \left(2\sqrt{2} \frac{V_m \sin\theta_2}{\sqrt{g H_{d2}}} \right)^4 \quad (7)$$

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、式(6)のように流速および後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

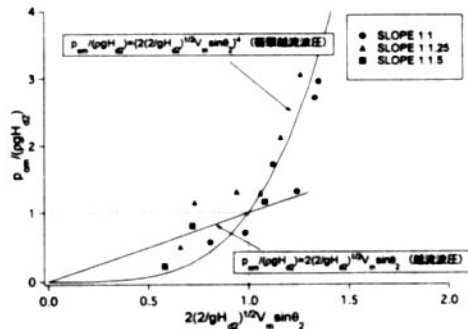


図-7 最大越流波圧

性が大きくなると、衝突時間が極めて短くなるため、線形性が失われ4乗に比例するようになる。本論文では、式(6)の場合を越流波圧、式(7)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。

$$2\sqrt{2} \frac{V_m \sin \theta_2}{\sqrt{gH_d}} \geq 1 \quad (8)$$

4. 各波圧式の適用条件

段波波圧、遡上波圧および重複衝突波圧の適用条件に関する検討結果を図-8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。この図では今回の実験データにおいて、最大波圧が3波圧のどの波圧になるかに着目し、表-1に示す定義に従って、4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り、本研究では衝撃段波波圧の定義として、遡上波圧との差の波高による無次元値が0.5以上である場合とした。②は、最大波圧が段波波圧か遡上波圧で、互いの差の波高による無次元値が0.2以下である場

合である。③は、最大波圧が遡上波圧か重複衝突波圧で、互いの差の波高による無次元値が0.2以下である場合である。最後に④は衝撃重複衝突波圧が発生する領域であり、本研究では衝撃段波波圧の定義として、遡上波圧との差の波高による無次元値が1.0以上である場合とした。

それぞれの境界線は次式により示される。

(衝撃段波波圧域と段波~遡上波圧域の境界)

$$\frac{c^2}{gH} = -0.6 \cot \theta_1 + 3.45 \quad (9)$$

(段波~遡上波圧域と遡上~重複衝突波圧域の境界)

$$\cot \theta_1 = 0.8 \quad (10)$$

(遡上~重複衝突波圧域と衝撃重複衝突波圧域の境界)

$$\frac{c^2}{gH} = 0.6 \cot \theta_1 + 2.5 \quad (11)$$

次に入射条件(c, H)の違いによる段波波圧、遡上波圧および重複衝突波圧の変化を比較するため、各波圧の最大値算定式を以下のように変形し、無次元化を行った。

衝撃段波波圧:

$$\frac{P_{dm}}{\rho g H} = 0.25 \left(\frac{c^2}{gH} \right)^2 \quad (12)$$

段波波圧:

$$\frac{P_{dm}}{\rho g H} = 0.12 \left(\frac{c^2}{gH} \right)^2 \quad (13)$$

遡上波圧:

$$\frac{P_{sm}}{\rho g H} = 0.14(2 + \cos \theta_1) \frac{c^2}{gH} \frac{P_{dm}}{\rho g H} \quad (14)$$

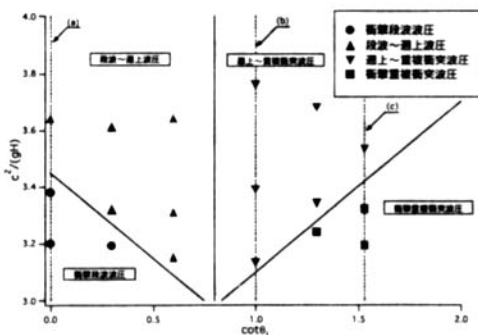


図-8 各波圧の適用条件

表-1 各波圧の適用条件

	最大波圧	Δp	$\Delta p / \rho g H$
① 衝撃段波波圧域	段波波圧 p_d	$ p_d - p_s $	0.5以上
② 段波~遡上波圧域	段波波圧 p_d or 遡上波圧 p_s	$ p_d - p_s $	0.2以下
③ 遡上~重複衝突波圧域	遡上波圧 p_s or 重複衝突波圧 p_i	$ p_s - p_i $	0.2以下
④ 衝撃重複衝突波圧域	重複衝突波圧 p_i	$ p_s - p_i $	1.0以上

重複衝突波圧：

$$\frac{P_{im}}{\rho g H} = \frac{P_{dm} + P_{sm}}{2\rho g H} \quad (15)$$

衝撃重複衝突波圧：

$$\frac{P_{im}}{\rho g H} = \frac{(10 \cos \theta_1 - 6.6)(P_{dm} + P_{sm})}{\rho g H} \quad (16)$$

衝撃段波波圧域，遡上波圧域および衝撃重複衝突波圧域について，各々が最も顕著である勾配1:0，1:1，1:1.53の3ケースに着目すると，式(12)～(16)は，図9～11のように整理することができる。ここで，縦軸は各波圧と波高の比による無次元値 $p/(\rho g H)$ ，横軸は波速と波高の比による無次元値 $(c^2/gH)^2$ である。

この図からまず，すべての波圧が $(c^2/gH)^2$ の関数として示され，段波波圧においては前面勾配と無関係でかつ線形であることがわかる。前面勾配1:0においては衝撃段波波圧が

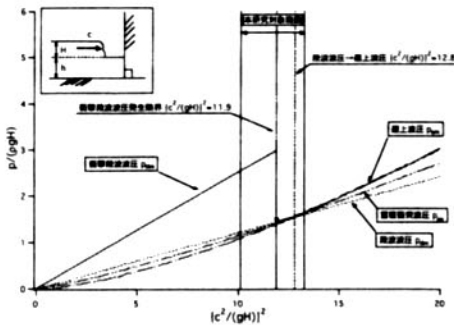


図-9 3波圧の関係 (勾配1:0)

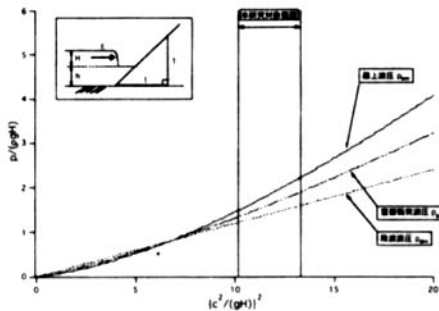


図-10 3波圧の関係 (勾配1:1)

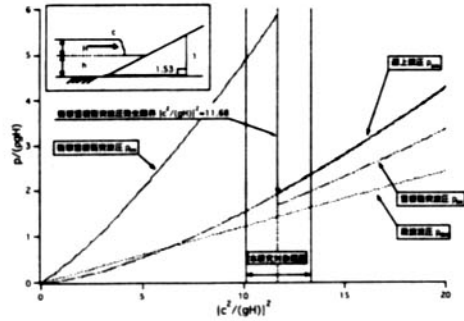


図-11 3波圧の関係 (勾配1:1.53)

発生する可能性が高く，この波圧は他の波圧より極めて大きい値を示すため注意が必要である。その発生条件は図-8より次式となる。

$$\frac{c^2}{gH} \leq -0.6 \cot \theta_1 + 3.45 \quad (17)$$

この場合， $(c^2/gH)^2=11.9$ が衝撃段波波圧の発生限界となり， $(c^2/gH)^2$ がこの値よりも大きい場合は最大波圧は衝撃段波波圧から段波波圧へ移行する。さらに $(c^2/gH)^2=12.8$ で最大波圧が段波波圧から遡上波圧に移行する。前面勾配1:1においては，本研究対象範囲内では遡上波圧が最大波圧となる。前面勾配1:1.53においては，衝撃重複衝突波圧が存在し他の波圧より極めて大きい値をとる。しかし，この波圧は図-8より，次に示す条件のもとでのみ発生する。

$$\frac{c^2}{gH} \leq 0.6 \cot \theta_1 + 2.5 \quad (18)$$

この場合， $(c^2/gH)^2=11.68$ が衝撃重複衝突波圧の発生限界となり， $(c^2/gH)^2$ がこの値よりも大きい場合，最大波圧は衝撃重複衝突波圧から遡上波圧へ移行する。

5. まとめ

主な結果を以下に示す。

- ① 段波波圧，遡上波圧，重複衝突波圧，越流波圧および衝撃段波波圧，衝撃重複衝突波圧，衝撃越流波圧について，既往研究で提案

された算定式について改良等を行い、その最大値の算定式を提案した。

②各波圧算定式の適用条件およびその関係について検討することにより、勾配の緩い場合は衝撃重複衝突波圧、勾配45度付近では遡上波圧、鉛直壁では衝撃段波波圧が最大波圧となる。

③衝撃段波波圧および衝撃重複衝突波圧の存在の有無は、構造物の勾配と密接に関係しており、直角およびそれに近い場合に衝撃段波波圧、勾配が45度よりも緩くなると衝撃重複衝突波圧が発生する可能性が高くなることを確認し、その境界算定式を提案した。

④各最大波圧算定式は、波速の4乗と波高の2乗の比で示されることを利用して、勾配が1:0 (90度), 1:1 (45度), 1:53 (約33度) の場合について、この比の違いによる各波圧の変化状況を示した。

謝 辞

本研究の一部は、五洋建設株式会社の社会人派遣制度のもとに行われたもので、ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 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 -, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 50-54.
- 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.