

遡上津波に対する陸堤の効果に関する研究*

岩 崎 敏 夫**・富 樫 宏 由***

1. はし が き

筆者らは一昨年来、長波と構造物との相互作用の究明という一般的視野に立って、遡上津波対策構造物という問題を明らかにするつもりで、まず第一に遡上津波の鉛直岸壁での変形ならびに陸上への遡上に関して研究を行ってきた¹⁾。これについてはある程度の成果が得られたものと思われる。ところで津波対策として、三陸沿岸には越流を許さないというつもりで防浪陸堤を湾岸にめぐらしている例が往々に見られる。その天端高は既往の津波の最高痕跡にとられている。この場合はたしてこれで津波の越流が防げるのかという疑問が生じる。

本論文はこのような陸堤の遡上津波に対する効果について、理論および実験的に研究を行なったものである。

陸上で底面まさつを無視した場合の陸上への遡上津波の波形を求める方法については、砕ける場合に Shen-Meyer²⁾ が一様な傾斜海岸における先端の移動を解析的にくわしく論議し、Amein³⁾ はこれをさらに発展させたかたちで実際に計算して一様な傾斜海岸における波形を求めた。また、砕けないで遡上する場合については、Carrier-Greenspan⁴⁾ は一様な傾斜海岸における波形が解析的に求められることを示し、首藤⁵⁾ はラグランジェ型の方程式を摂動法で解いて、やはり一様な傾斜海岸における波形が求められることを示した。また、陸上で底面まさつを考慮した場合の遡上津波の波形を求める方法については、Freeman-LeMéhaut⁶⁾ の方法があるが、本論文では筆者らの提案した方法で岸壁直前における部分重複波を求めたのちに、上述の Freeman-LeMéhaut の方法を用いて鉛直岸壁から水平な陸上への遡上波形を実際の計算例で図示して実験結果と比較検討した¹⁾。

以上に、津波を有限振幅の長波と見做した場合、非線形浅水理論式の解として遡上波形がある程度理論的に求められることを述べてきた。したがって、津波のような長波が陸上に遡上した場合、任意の場所の波高と流速がわかれば、構造物に対する津波の作用も解明できるものと考えられる。

そこで、上述のように陸上任意の場所、時間における遡上津波の波高、流速がわかっている場合に、それが直立堤に衝突したとき一部は段波となって反射し、一部は堤頂を越流する現象に関して検討した。その結果、理論と実験結果の比較的良好一致が見られたのでここに報告する次第である。

2. 理 論

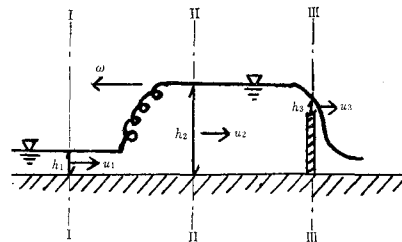
(1) 直立堤に対する遡上津波の挙動

後の実験で示されるように、射流状で侵入してきた遡上波の先端が直立堤に衝突した瞬間、波は高速噴流となって堤面に沿って打上げ、堤頂よりはるかに高く飛沫となって空中に放出されて越流する。ついで、落下した飛沫の一部は後続する衝突波と一緒に初めて反射段波が形成され、もし反射波高より堤高が低ければその一部が堤頂を越流する。反射段波の高さと速度は、段波前面の遡上波と後面の越流量との間で平衡をとりながら変化しているように見える。

(2) 理論的解析

上述のような現象について、図-1 のようなある瞬間における現象模型の解析を行なう。

図-1 断面と記号のとり方



断面 [I-II] 間には shock condition を適用すれば、

$$h_1(u_1 - \omega) - h_2(u_2 - \omega) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$u_1 h_1(u_1 - \omega) - u_2 h_2(u_2 - \omega) = \frac{g}{2}(h_2^2 - h_1^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、断面 [II-III] 間にはエネルギーの式と連続の式を適用すれば、

$$h_2 + \frac{u_2^2}{2g} = h_3 + H_d + \frac{u_3^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$u_2 h_2 = u_3 h_3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

さらに、断面 III では限界水深になるとすれば、

* 本論文の一部は、本年5月の「第22回年次学術講演会講演概要」に同じ題目ですでに発表した。

** 正会員 工博 東北大学教授

*** 正会員 工修 東北大学助手

$$h_3 = \sqrt[3]{\frac{(u_3 h_3)^2}{g}} \dots\dots\dots (5)$$

式(1), (2)より得られる $\omega < 0$ として,

$$\omega = u_1 - \sqrt{\frac{gh_2}{2h_1}(h_2 + h_1)} \dots\dots\dots (6)$$

ところで, 式(1)から(5)までの5個の方程式に対して, 未知数は, $h_1, u_1, h_2, u_2, h_3, u_3, \omega, H_d$ の8個だから, そのうち3個はあらかじめ与えられていなければならない。

いま, h_1, u_1, H_d を既知とすれば, 式(1)~(5)より, u_2, h_3, u_3, ω を消去して, h_2 (または $x_2 = h_2/h_1$) に関する次式を得る。

$$z = x_2 + \frac{1}{2}y^2 - \frac{3}{2}(x_2 y)^{2/3} \dots\dots\dots (7)$$

ここで,

$$x_2 = \frac{h_2}{h_1}$$

$$y = F_1 - Y, \quad \left[Y = (x_2 - 1) \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{x_2} \right)} \right]$$

$$z = \frac{H_d}{h_1}$$

である。

式(4)で越流量が0または正なることより, また式(6)で反射段波の伝播速度が0または負なることより, F_1 にはつぎの制限が加えられる。

$$(x_2 - 1) \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{x_2} \right)} \leq F_1 \leq x_2 \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{x_2} \right)} \dots\dots\dots (8)$$

また, 式(7), (8)より x_2 が求まるから, 式(3)~(5)より, u_2, u_3 を消去すれば, h_1, h_2, H_d を既知として, h_3 (または $x_3 = h_3/h_1$) に関するつぎの3次方程式を得る。

$$x_3^3 - 3x_2^2 x_3 + 2x_2^2 (x_2 - z) = 0 \dots\dots\dots (9)$$

したがって, 式(7)~(9)より侵入波の h_1, u_1 と堤高 H_d が与えられれば, その他の必要な水理量は求められる。

ところで, 式(7)を x_2 について解くことは非常に面倒だから, x_2, z のいずれか一方を parameter として数値計算したときの $[x_2 \sim F_1]$ または $[z \sim F_1]$ の関係を図示すると図-2のようになる。

図中点線で示される曲線のうち, $x_{2(L)} = z_{(L)}$ は式(8)の左側の等号が成立つときで堤頂越流量が0すなわち完全反射する場合で, x_2 の下限を表わす。また, $x_{2(U)}$ は式(8)の右側の等号が成立つときで $\omega = 0$ すなわち跳水現象が起きる場合で, x_2 の上限を表わす。この $x_{2(U)}$ に相応する $z_{(U)}$ は, シルのある水平水路の跳水に対して筆者の一人岩崎が導いた式⁷⁾と全く同じものである。

つぎに式(9)については, $x_{2(L)} = z_{(L)}$ に相応する $x_{3(L)} = 0$ なることより, 3根のうち正の最小根が求める根でありつぎのように解かれる。

$$x_3 = 2x_2 \cos \left(\frac{\theta}{3} + \frac{4\pi}{3} \right) \dots\dots\dots (10)$$

ただし,

図-2 $[x_2 \sim F_1], [z \sim F_1]$ 数値計算図

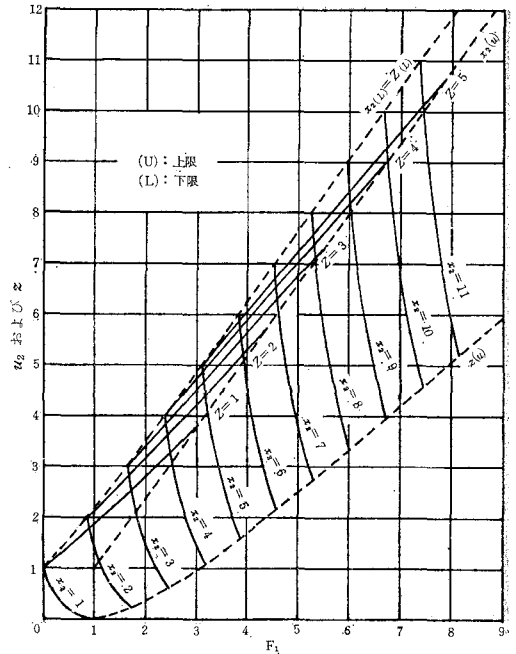
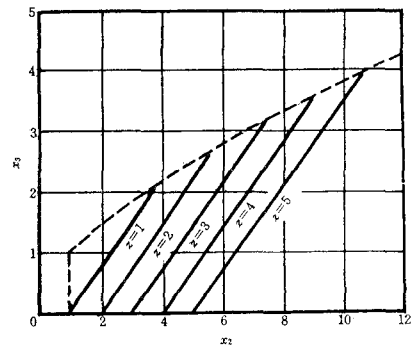


図-3 $[x_3 \sim x_2]$ 数値計算図



$$\cos \theta = -\frac{x_2 - z}{x_2}, \quad \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$$

$$\therefore 0 \leq \frac{x_2 - z}{x_2} \leq 1$$

そこで図-2にならって, たとえば z を parameter として数値計算したときの $[x_3 \sim x_2]$ の関係を図示すると図-3のようになる。

3. 実験

図-4に示すように, 実験水路は前報¹⁾に示したものと同一であって, 長さ 23.0m, 幅 0.5m, 高さ 0.5m の二次元波動水路である。また, 長さ 10.0m, 幅 0.5m, 高さ 0.312m の全面真ちゅう製の鉛直岸壁模型の上に, 直立堤模型として, 高さがおおの 3, 5, 7.5, 10, 12.5 cm で, 長さが水路全幅にわたる5種類のL型钢を用いた。

16mmカメラ1台を用いて, 24コマ/secの速さで直立

図-4 実験装置概略

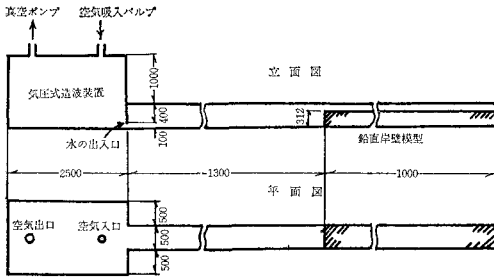
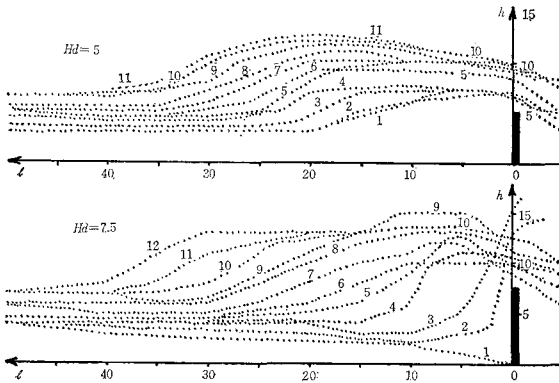


図-5 波形の時間変化



堤近傍の波形の時間的変化を撮影し、profile-projectorで1コマずつの波形を読みとった。その一例を図-5に示す。実験波は波長5~10mの孤立波を与えた。

4. 理論の実験結果による検討

(1) 式(7)の検討

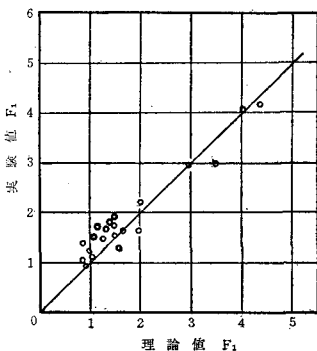
いま、 h_1 , h_2 , H_d の実測値を用いて、 u_1 (あるいは $F_1 = u_1 / \sqrt{gh_1}$) を式(7)より計算し、これと u_1 (あるいは F_1) の実験値とを比較検討することにする。 u_1 は直接測定するのが困難なので、反射段波の相対伝播速度 ω の実測値から式(6)により計算して求めた。

図-6はその結果であるが、理論値と実験値は比較的良好一致を示している。

(2) (10)式の検討

上と同様に、いま h_1 , h_2 , H_d を既知として、 x_3 の式

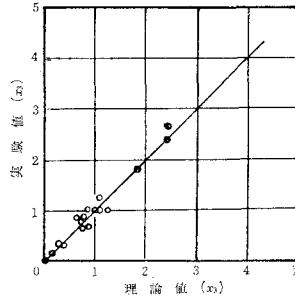
図-6 F_1 の比較



(10)による理論値と実験値を比較したのが図-7である。図-6と同様に、理論値と実験値はかなりよく一致している。

以上は、 H_d が5cm以上でshock conditionが成立する場合について

図-7 x_3 の比較



の結果である。 H_d が3cm程度になると反射波の波頭は波状跳水のような形状を呈し、実験値のパラッキも大きくなった。 H_d がこれより低いとshock conditionは成立せず、遡上津波は直立堤をのり越えて烈しい流速をもったまま直立堤の背後を走る。この場合については、陸堤は津波対策として効果あるものとはいえないように思われる。

5. むすび

陸上への遡上津波の任意の場所と時間における波高 h_1 , 流速 u_1 と陸堤の高さ H_d が与えられれば、その他の必要な水理量は、たとえば h_2 なら式(7)より、 h_3 なら式(10)より、近似的に求められることがわかった。

本研究の結果、図-2の $z=1$ の曲線で示されるように、従来痕跡高に一致して設置された防浪陸堤は、 $F_1 > 0$ のすべての遡上津波に対して越流を許し、反射段波の波高は $F_1 \div 3$ に対し、侵入波高の約3.8倍に達することがわかる。図-2はこの見地から、遡上津波を完全に阻止するためには、そのFroud数 F_1 に応じてとるべき防浪堤の高さ($H_d = z \cdot h_1$)を求めることに用いられる。

しかしながらこの図でわかるように、それはかなり大きくて津波対策上問題であると考えられる。確かに高い防浪堤によって海岸と背後地とを遮断することは、日常の経済活動や生活の便利の上に少なからぬ犠牲であることは疑ない。

最後に本研究は、昭和41年度文部省試験研究費「津波の湾内変形に関する研究」の助成を受けた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 岩崎敏夫・富樫宏由：水平な陸上への津波の遡上に関する研究、第13回海岸工学講演会講演集、昭41.12, pp. 223~229.
- 2) Shen, M.C. and R.E. Meyer: Climb of a Bore on a Beach, Part 3. Run-up, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 16, 1963, pp. 113~125.
- 3) Amein, M.: Long Waves on a Sloping Beach and Wave Forces on a Pier Deck; U.S.-Japan Cooperative Scientific Research Seminars on Tsunami Run-up, 1965. 4, No. 1.
- 4) Carrier, G.F. and H.P. Greenspan: Water Waves of Finite Amplitude on a Sloping Beach; Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 4, 1958, pp. 97~112.
- 5) 首藤伸夫：長波のうちあげ高；第13回海岸工学講演会講演集、昭41.12, pp. 216~222.
- 6) Freeman, J.C. and B.Le. Méhauté: Wave Breakers on a Beach and Surges on a Dry Bed, Proc. of the A.S.C.E., Vol. 90, No. HY2, 1964. 3, pp. 187~216.
- 7) 岩崎敏夫：余水吐の減勢装置について；技術者のための最近の水工学、土木学会東北支部、昭36.11, pp. 62, または、水理公式集, pp. 219.