

陸上に遡上した津波に対する陸堤の効果について

東北大学工学部 正 員 岩崎敏夫
 " " 〇島根宏由
 " 学生員 橋本孝一
 " " 村山哲夫

I 概 要

従来 陸上に遡上した津波に対する防浪堤 築堤(鉄道 道路)等の陸堤の効果についての理論的研究成果が殆どなかった。例えは防浪堤を築くときは堤高を既成津波の痕跡高にとり、その都度模倣実験を行うといったように設計基準を決めてきた場合が多かった。筆者等は数年来陸上への津波遡上に関する研究を行ってきたが、その一端として、沖波に孤立波を与え、それが鉛直岸壁を越えて水平な陸上に遡上した波の直立堤に衝突したときの遮断効果を実験し、理論解析を行った。理論解析は一次元解析法による近似的なものであるが、実験結果と比較的良好一致が見られた。その結果、陸上に遡上した津波に対する陸堤の効果については、堤背の波高と流量を減少せしめる遮断効果はあるが、流速は殆ど変わらないことがわかった。尚、この論文は前論文⁽¹⁾に続いて記述したものである。

II 理論解析の前提

筆者等は前論文⁽¹⁾で陸上に遡上した津波の波高(h_1)流速(u_1)等が、ある程度理論的に求め得ることを述べ、またそれらの理論の実地への適用の一例を示した⁽²⁾。しかし、依然として流底のまさつ効果と関連して、波の front condition については未だ十分な研究成果が得られていないので、ここでは若干ふれられて深入りせず別の機会に仰することにする。従って、ここでは

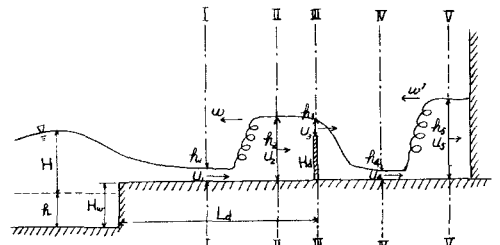


図-1. 断面と記号のとり方

流底まさつを無視して、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(h_1)流速(u_1)がわかり、かつ直立堤高(H_d)が与えられている場合に、その直立堤に衝突したときの現象について検討し、必要な水理量を求めることを考える。陸上の遡上津波は非定常流とみなされるもので、あるか、津波の周期は非常に長いので、反射波と透過領域(断面I-II, II-IV)を除いては水平方向の水理量の変化は小さく、と考えられるから、微小時間 Δt における運動は近似的に定常とみなすことが出来る。 Δt 時間毎の定常流の変化を逐次、全体として近似的に非定常流を分析把握することになるから、図-1のような現象模型の単位中、単位時間当りの解析を行う。

III 理論解析

断面I-II間に shock condition を適用する。

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

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

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、

$$h_2 + \frac{u_2^2}{2g} = H_d + h_0 + \frac{u_2^2}{2g} \quad (3)$$

$$u_2 h_2 = u_0 h_0 \quad (4) \cdot x_2$$

さらに 断面IIIでは限界水深になるとすれば

$$u_3 = \sqrt{gh_3} \quad (5)$$

(1), (2)式より得られる $W < 0$ とし、

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

ところで(1)~(5)式の5個の方程式に対して未知数は、 $h_1, u_1, h_2, u_2, h_3, u_3, W, H_d$ の8個から、そのうち4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 が既知とすれば(1)~(5)式より、 u_2, h_3, u_3, W を消去して、 h_2 (または $x_2 = h_2/h_1$) に関する方程式を得る。

$$Z = x_2 + \frac{1}{2}y^2 - \frac{3}{2}(x_2 y)^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

ここで

$$x_2 = h_2/h_1$$

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

$$Z = H_d/h_1$$

(4)式で越流量の0または正なることより、また(5)式で反射波の相対伝播速度が0または負なることより、 F_1 には次の制限が加えられる。

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

また(7)、(8)式より x_2 が求まるから、(3)~(5)式より u_2, u_3 を消去すれば h_1, h_2, H_d が既知として、 h_3 (または $x_3 = h_3/h_1$) に関する次の方程式を得る。

$$x_3^3 - 3x_2^2 x_3 + 2x_2^2 (x_2 - Z) = 0 \quad (9)$$

従って、侵入波の h_1, u_1 と堤高 H_d が与えられれば(9)~(9)式よりその他の必要な物理量が求められる。

ところで、(7)式を x_2 について解くことは非常に面倒から x_2 または Z のいずれか一方をparameterとして数値計算して $[x_2 \sim F_1]$ 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、 $x_{2(0)} = Z_{(0)}$ は(8)

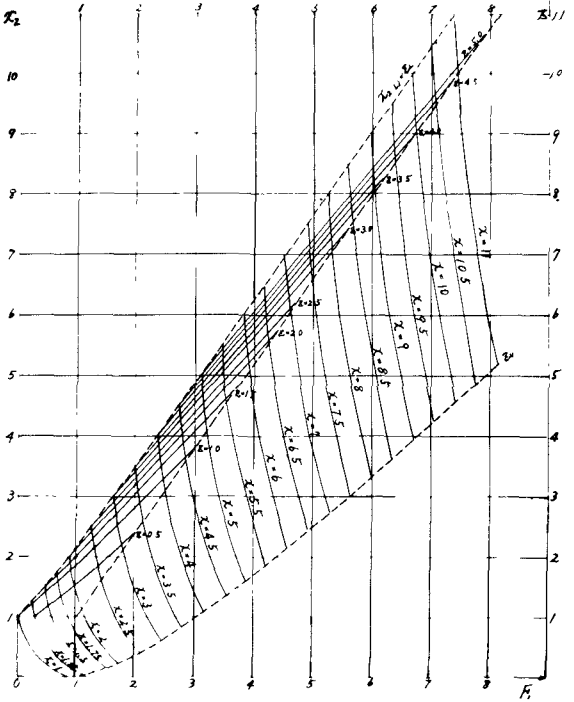


図2. $[x_2 \sim F_1], [Z \sim F_1]$ 数値計算図

式の左側の等号が成立つときで堤頂越流量が0即ち完全反射する場合で x_2 の下限を表わす。また、 $x_{2(0)}$ は(8)式右側の等号が成立つとき、 $W=0$ 即ち跳水現象が起きる場合で、 x_2 の上限を表わす。この $x_{2(0)}$ に相応する $Z_{(0)}$ は、シールド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⁽³⁾と全く同じものである。

次に(9)式について $x_3, Z_{(0)} = Z_{(0)}$ に相応する $x_3=0$ なることより、うねのうねの最小根を求める根であり、次のように解かれる。

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

ただし

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

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

そこで図2にならって例え Z をparameterとして数値計算したとき $[x_3 \sim F_1]$ の関係を図示すると図3を得る。

さて、次に断面III~IVでは、断面II~IIIにおけると同様に、その間のエネルギー損失を監視して、

れと λ_1 (または F_1)の実験値とを比較検討する。 λ_1 は直接測定するのが困難なため、 λ_1 の実験値から(6)式により計算して求めた。図-7はその結果であるが、少しハツキはあらずにしても理論値と実験値は比較的良好一致を示している。しかし、実験値の相違にも拘らず、 $0.5 < F_1 < 2.5$ の範囲

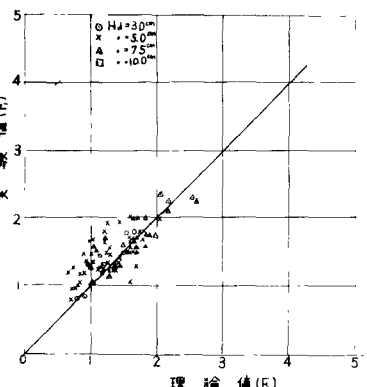


図-7. F_1 の比較

集中している。これは実験範囲が狭かったためと考えられる。むしろ陸上への遡上波の特性を示すものと思われる。Abbott⁽⁴⁾は陸上への遡上波の F_1 数は、特性曲線法を用いたwave front conditionの理論から $1 \leq F_1 \leq 2$ であることを提案しているが、図-7はこれを実証するものではないかと思われる。しかしながら、これについては今後第一層の詳細な実験の検討を要する。

(2) (10)式について

上と同様に、いま h_1, h_2, H_d を既知として、 λ_2 に関する(10)式による理論値と実験値を比較したのが図-8である。図-7と同様に両者はかなりよく一致している。

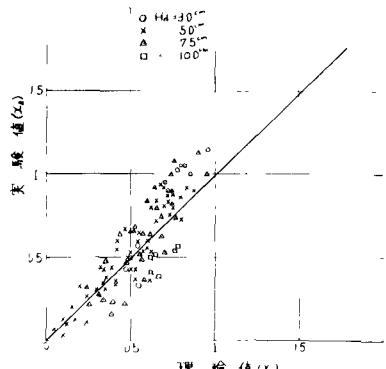


図-8. λ_2 の比較

図-6, 7のように、理論が実験と比較的良好一致を示すのは(9)式で示される F_1 の適用範囲内の実験値でshock conditionが成立する場合についての結果だからである。 F_1 が各点に相応する λ_1 の範囲を越えると、跳水は流され、遡上津波は直立堤を乗り越えて烈しい流速をもったまっ直立堤の背後を走る。この場合については、やはりshock conditionは成立せず、理論の適用範囲外であり、かつ陸堤は津波対策としても効果あるものとはいえないように思われる。

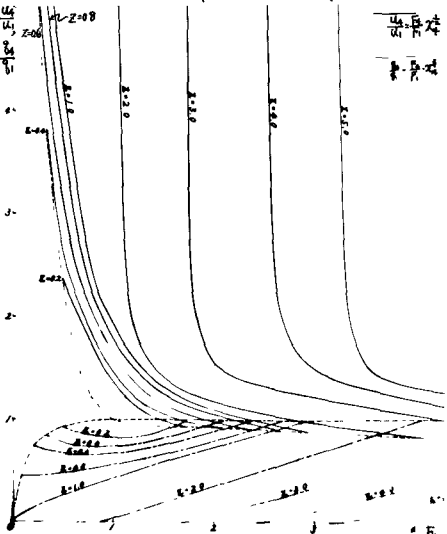


図-9. $[h_2/h_1 \sim F_1], [h_2/h_1 \sim F_1]$ 数値計算図

以上に断面IIIまでの実験結果による考案と近似理論の妥当性の証明されたので、断面IVについては理論的にのみ考案することにする。断面Vについては、前に述べたように前断面の繰返しであるから特に述べる必要はないであろう。

(3) 直立堤の遮蔽効果について

断面-Iに対する断面-IVの水理量の変化をみれば、陸上に侵入してきた遡上波に対する直立堤の遮蔽効果がわかる筈である。かりにいま(1)で述べた理由により、 F_1 を $1 \leq F_1 \leq 2$ に制限して考案してみよう。

$$(1). \frac{h_2}{h_1} = \lambda_2$$

$$Hd + h_3 + \frac{u_3^2}{2g} = h_4 + \frac{u_4^2}{2g} \quad (11)$$

$$u_3 h_3 = u_4 h_4 \quad (12)$$

(5), (11), (12)式より u_3, u_4 を消去すれば h_3, Hd を既知として, h_4 (または $x_4 = h_4/h_1$) に関する3次方程式を得る.

$$x_4^3 - (2 + \frac{3}{2}x_3)x_4^2 + \frac{1}{2}x_3^3 = 0 \quad (13)$$

(9)式の解として(10)式を得たと同様の解の意味により, 3根のうち正の最小根を求めた根であり.

$$x_4 = \frac{1}{3} (2 + \frac{3}{2}x_3) \{ 2 \cos(\frac{\theta}{3} + \frac{4\pi}{3}) + 1 \} \quad (14)$$

より,

$$\cos \theta = \frac{(2 + \frac{3}{2}x_3)^3 - 675x_3^3}{(2 + \frac{3}{2}x_3)^3}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi$$

従って $[x_4 \sim F_1]$ の数値計算図として図4を得る.

また (5), (12)より

$$F_1 = \frac{u_4}{\sqrt{gh_4}} = \frac{h_3 u_3}{h_4 \sqrt{gh_4}} = \frac{h_3 \sqrt{gh_3}}{h_4 \sqrt{gh_4}} = \left(\frac{h_3}{h_4} \right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{x_3}{x_4} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

次に, 断面IV~Vは断面I~IIの堤頂からの越流量が0

で完全反射する場合と同じであるから, 特に解析する必要はない. 結局, 直立堤一つの場合の断面I~IVについて検討すれば, あとは直立堤が幾つあってもその繰返しであるから, 一つの場合について検討すれば十分である.

IV 実験

図5に示すように, 実験装置は前論文⁽¹⁾におけるのと同じであって, 長さ23.0m, 中

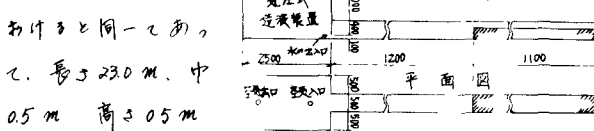


図5 実験装置概略

の二次元波動水槽で

ある. また 長さ10.0m, 中0.5m, 高さ0.312mの全面真鍮製の鉛直岸壁及び陸上模型の上に 直立堤模型として, 高さ0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0mと長さの水槽全中にわたる4種類のL型鋼を用いた. 測定は16mmカメラ1台を用いて 1670/secの速さで直立堤近傍の波形の時間的変化を撮影し profile-projector で1コマずつ読みとった. その一例を図6に示す. 実験波は, 静水位の20~30cmと波高が5~15cmの約50種類の直立堤を与えた.

V 考 察

(1) (7)式について

いま h_1, h_2, Hd の実験値を基礎として u_1 (または $F_1 = u_1/\sqrt{gh_1}$) の理論値を(7)式より計算し, こ

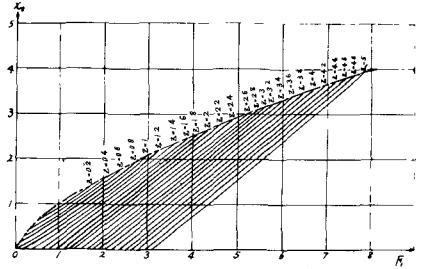


図3 $[x_3 \sim F_1]$ 数値計算図

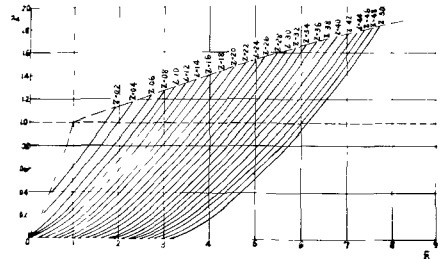


図4 $[x_4 \sim F_1]$ 数値計算図

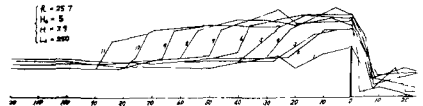


図6. 波形の時間変化
(1)

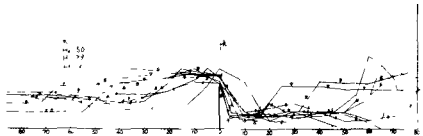


図6. 波形の時間変化
(2)

$$(c) \frac{u_4}{u_1} = \frac{u_4}{\sqrt{gh_4}} \frac{\sqrt{gh_4}}{\sqrt{gh_1}} \frac{\sqrt{gh_1}}{u_1} = \frac{F_4}{F_1} \alpha_4^{\frac{1}{2}}$$

$$(d) \frac{q_4}{q_1} = \frac{u_4 h_4}{u_1 h_1} = \frac{F_4}{F_1} \alpha_4^{\frac{1}{2}} \alpha_4 = \frac{F_4}{F_1} \alpha_4^{\frac{3}{2}}$$

(1) の関係は図4に示す通りである。 α_4 は Z が大きくなるにつれて $1 \leq F_1 \leq 2$ なる F_1 に対しては、 $0.4 < Z < 2.2$ 位かよっている。即ち $Z < 0.4$ では跳水が流される危険性があり $Z > 2.2$ では又さびきで淤積に陥る可能性がある。

(2) と (3) は図9に示されているが、流速と流量を共に出来るだけ小さくするものは (1) と同様に $0.4 < Z < 2.2$ 位の適当である。図4, 9はこのように遮蔽効果を考え、相対堤高 Z を求めるために用いられる。

VI 結 論

(1) 陸上に遡上した津波の陸堤に対する作用は、開水路における非定常流の立場で論じることがより妥当と思われるが、微小時間をとれば定常流とみなした理論解析で近似できることがわかった。

(2) 従って 陸上に遡上した津波の任意の場所と時間における波高 h 、流速 u と陸堤の高さ H の与えられれば、その他の必要な物理量は、例えば是は (7) 式、 h は (10) 式、 u は (14) 式からというように順次求められる。

(3) 本研究の結果 図2の $Z=1$ の曲線で示されるように、従来の防浪堤高に一致して設置された防浪堤は、 $F_1 > 0$ の有る Z の遡上津波に対して越流を許し、例えば $F_1=2$ に対して反射波の波高は侵入波高の約2.8倍に達することかわかる。図2はこの見地から 遡上津波を完全に遮蔽するためにはその波数に応じてとるべき防浪堤の高さ ($H_d = Z h_1$) を求めることに用いられる。

(4) また、同様に図4, 9の $Z=1$ の曲線で示されるように、例えば $F_1=2$ に対して堤岸の波高と流量は約0.7倍、流速は約1.2倍となっていることがわかる。図4, 9はこのように 遡上津波に対する陸堤の遮蔽効果を見積るために用いられる。

(5) しかしながら (3) で述べたように、100% の遮蔽効果を期した防浪堤の高さ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があることは疑いない。従って むしろ小さい堤高の防浪堤を数枚構えて、少しずつでも遮蔽効果を期待した方がより有効ではないかと思われる。

最後に、本研究は文部省試験研究費の助成を受けたことを付記して謝意を表したい。

参 考 文 献

1. 岩崎敏夫、高程宏由：遡上津波に対する陸堤の効果に関する研究；第14回海洋工学講演会講演集、土木学会、昭42 10, pp 221~224
2. 岩崎敏夫、高程宏由：八木・津波遡上について；東北支部技術研究発表会講演概要、土木学会東北支部、昭42 2, pp. 5~8
3. 岩崎敏夫：余水吐の減勢装置について；振野君のための最近の水工学、土木学会東北支部、昭46 11, pp. 62. または 水理公報集, pp. 219
4. Abbott, M B: On the spreading of one fluid over another; Grenoble, La Feuille Blanche, 5, 6, 1961