

水門に作用する段波の波圧について

中 村 重 久*・土 屋 義 人**

1. 緒 言

わが国では津波の来襲により、海岸地帯に甚大な被害を蒙ってきた。本研究では、このような問題の解明にあたって重要と考えられるもののうち、特に水門に作用する段波状の津波の衝撃圧を適確に推定する方法について検討する。この場合、湾奥や河口に設置される水門の前面では、津波はダム破壊時の段波に類似していると考えられるので、津波を段波としてシミュレートすることにした。このような場合の衝撃圧の推定に関しては、すでに Cross が水塊の壁面衝突時の衝撃圧に関する Cumberbatch の理論を応用した一つの試みを示しているが、本研究ではこの取扱いを若干修正し、また段波の反射特性との関係から考察するつもりである。

2. 段波の波圧に関する実験

著者らは、その一人中村ら¹⁾がすでに用いたと同様な方法によって段波を発生させ、その段波が水門に作用する衝撃圧の実験を行なった。段波の実験条件を模式的に示すと図-1 のようである。実験で用いた模型の水門

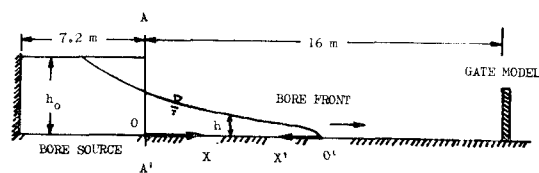


図-1 段波実験模式図

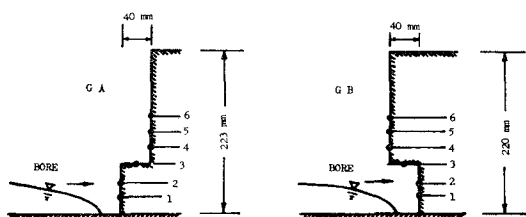


図-2 水門の模型

は、アクリライト製の直立壁と図-2に示すような2種類である。段波の規模と衝撃圧との関係を知るために、水門の前面に圧力計を取り付け、段波の初期水深 h_0 として、0.5、0.4 および 0.3 m の場合の実験を行なった。特に水門 GA の場合、段波の衝撃圧の時間波形は図-3 のようになり、段波が水門に衝突後越水する場合としない場合とでは、初期衝撃圧 p_p と平均的衝撃圧 p_s との大きさに差がある。また、段波が反射し越水をはじめた後、水門に作用する圧力は主として静水圧と考えられるが、この静水圧 h_c より一般に $p_s/\rho g$ は大きい。

3. 段波の変形特性

波の海浜への溯上に関する研究は従来多く、特性曲線法などを応用したものがある。これとは別に、Cross²⁾は dry bed 上を進行する段波の先端付近の運動を検討している。

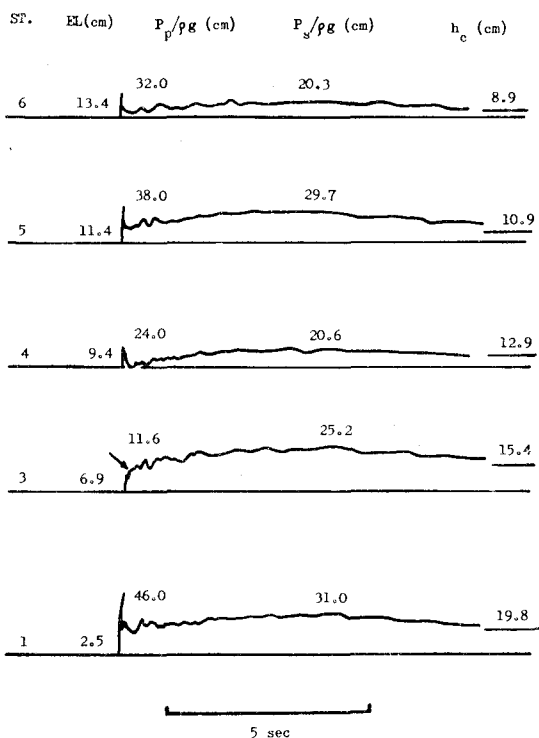


図-3(a) 段波の衝撃圧の時間波形(越水ある場合)

* 正会員 理修 京都大学助手 防災研究所

**正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

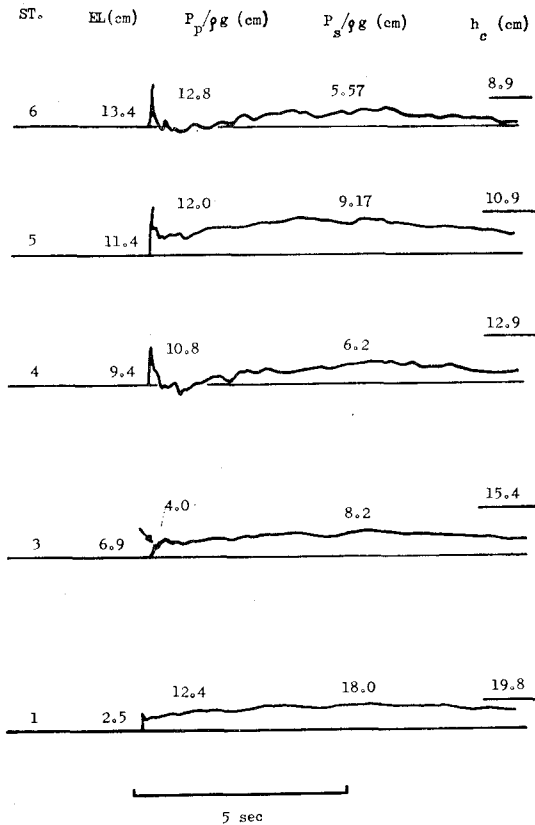


図-3(b) 段波の衝撃圧の時間波形(越水ない場合)

一方、段波に関しては、Ritter 以来、多くの研究が行なわれている^{1),3)}。図-1 の座標系と記号とを用いると、Ritter の与えた水面形は次式で表わされる。

$$u = \frac{2}{3} \left(\frac{x}{t} + \sqrt{gh_0} \right), \quad h = \frac{1}{9g} \left(2\sqrt{gh_0} - \frac{x}{t} \right)^2 \quad (1)$$

ここに、 u および h は時刻 t 、位置 x における流速お

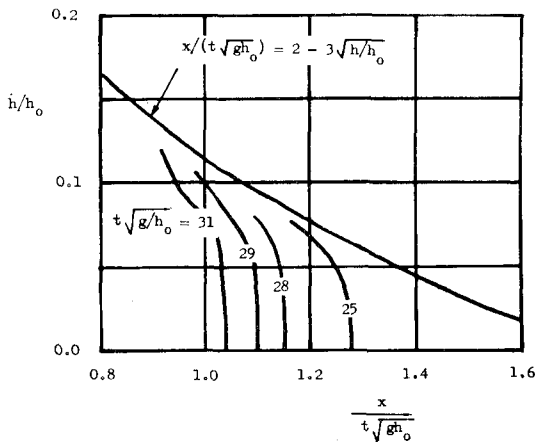


図-4 Ritter の理論と実験結果との比較

よび水深である。底面摩擦を考慮にいれた研究によれば⁴⁾、水面形は先端に丸みがついて 図-1 の曲線のようにになる。Ritter の理論による式(1)と著者らの実験結果とを比較してみると 図-4 のようになる。これから、底面摩擦などによって段波先端に丸みが現われ、段波の規模が小さいほど丸みは顕著であることがわかる。ところで、段波先端の移動速度(以下段波の波速とよぶ)は、底面摩擦のない場合には、 $(u/\sqrt{gh_0})=2$ であるが、底面摩擦があると Dressler や Whitham が示したような傾向を示す(図-5 参照)。

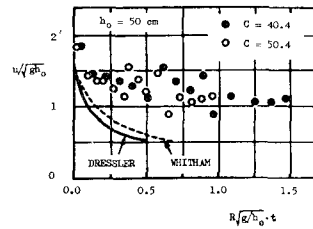


図-5 段波の波速

る傾向がある。

Cross の理論によれば、水平な dry bed 上の段波先端について、加速度が時間的にも場所的にも変化しないならば、次の関係が示される。すなわち、

$$h = (u/C) \sqrt{2x'} \quad (2)$$

ここに、 C は Chézy の定数である。水深 h_0 で段波の波速が決定されるときには、 $u_0 = \sqrt{gh_0}$ を用いると式(2)は

$$\left(\frac{h}{h_0} \right)^2 = 2 \left(\frac{x'}{h_0} \right) \left(\frac{g}{C^2} \right) \left(\frac{u}{u_0} \right)^2 = k \left(\frac{x'}{h_0} \right) \quad (3)$$

と書き換えられる。この式と著者らの実験結果を比較したものが 図-6 であり、図中の破線は k をパラメータとして式(3)で与えられる関係を描いたものであり、実線は実験結果を示す。実験曲線についてはパラメータ k として u の実測値と C の推定値とから算定したものをを用いた。これから、段波のごく先端の部分では、理論と実験と一致しているようであるが、先端部より後部で

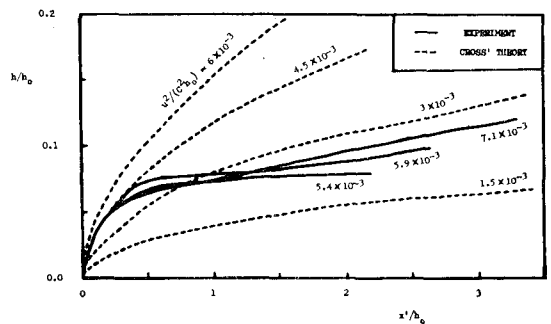


図-6 Cross の理論と段波先端の水面形

は、実際には、この理論で予測されるよりも大きなエネルギー損失を考えないと実験結果を説明できないことがわかる。

4. 段波の反射時の変形

簡単のために、段波が水平な海浜に侵入する場合を考え、水門前面で完全反射する現象を Stoker の方法によって検討する。このとき、入射段波の前後における水深の比 h_1/h_0 を与えると、図-7 のように、反射後の段波

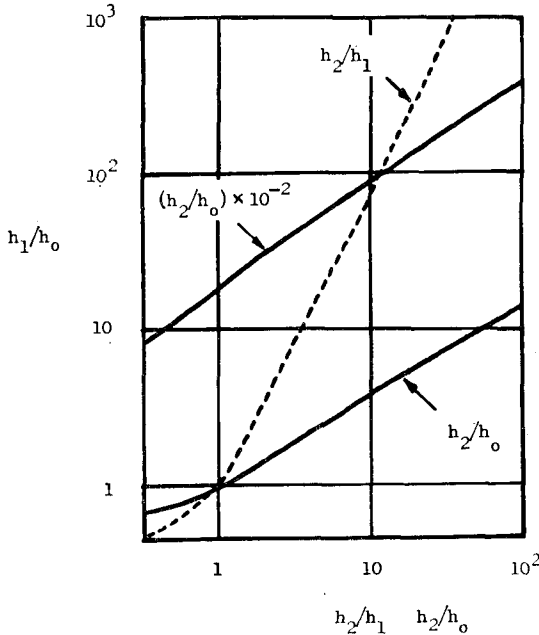


図-7 段波の反射

の前後における水深の比 h_2/h_1 あるいは h_2/h_0 を求めることができる。石原ら⁵⁾ はすでにこの方法を碎波後の波が鉛直壁面に衝突する場合に適用して、実験結果と比較して良好な結果を得ている。

津波が水深 h_0 において段波状になり、波高が $H = h_1 - h_0 = 20$ m とすると、反射時の水深 h_2 は h_0 の値によって定まる。図-8 をみるとわかるように、段波状の津波の峯高を反射時にできるだけ小さくするためには、 h_0 が大きいほどよい。これは、原理的に、 h_0 が小さいところに水門を設けるよりも、 h_0 が大きい湾口に防波堤を設ける方が望ましいことを示しているが、実際には、技術的な可能性、地域的な投資効果、周囲の地形などを十分考慮してやらなくてはならない。

5. 段波の衝突による波圧

前述したように、段波が水門に衝突する場合の段波の変形理論には各種のものがあ

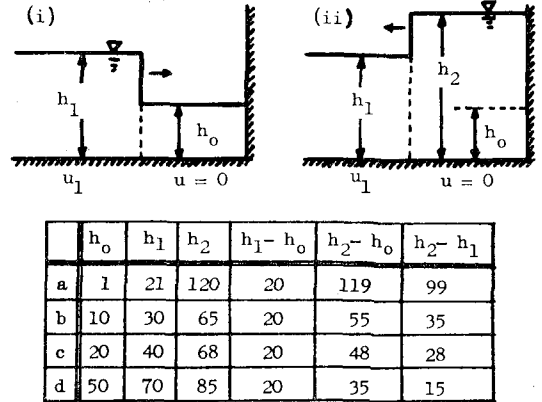


図-8 段波状津波の反射条件

まま適用できるとはかぎらない。段波に関する理論と実験とに立脚すれば、段波の衝突による波圧の推定は2つに分けて取扱うべきであろう。その1つは Cross のように、段波が構造物に衝突するときの衝撃圧を推定するものであり、他の1つは、段波の反射時の静水圧を検討することである。このことは、段波が構造物に作用する衝撃圧と静水圧との大小関係やそれらの持続時間と構造物の機能を考慮にいれて検討すべきであることはいうまでもない。

(1) Cumberbatch の理論⁶⁾

段波の衝撃圧を検討する場合、次元解析による方法も

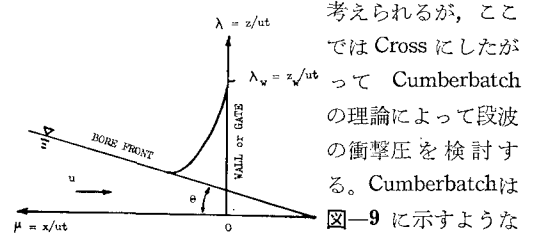


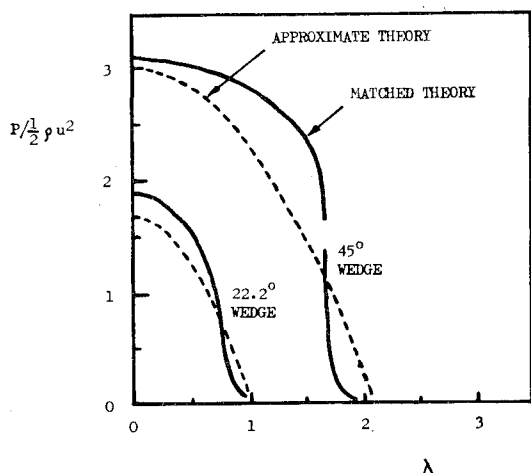
図-9 段波の壁面衝突の模式図

考えられるが、ここでは Cross にしたがって Cumberbatch の理論によって段波の衝撃圧を検討する。Cumberbatch は図-9 に示すようなくさび状の水塊が壁面に衝突するときの

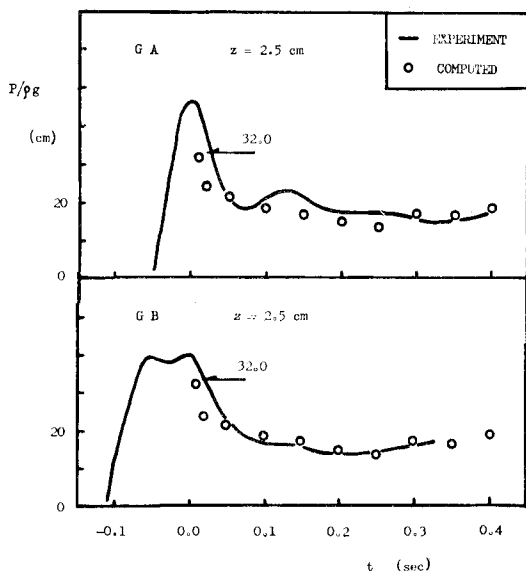
衝撃圧に関する理論を展開した。すなわち、Cumberbatch は、非回転性流体を仮定し、重力の効果を無視し、図-9 のような座標系と境界条件のもとで、段波の衝突による壁面の衝撃圧を理論的に求め、近似解として、

$$\frac{p}{(1/2)\rho u^2} = C_p \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_w} \right)^2 \right\}; \quad \lambda = \frac{z}{ut}, \quad C_p = C_p(\theta) \quad \dots \dots \dots (4)$$

を得ており (図-10 の破線)、また、matched theory として図-10 の実線を得ている。著者らの実験によれば、図-11 のように、段波衝突時の衝撃圧の実測値のピーク時を $t=0$ とすると、それ以降に対しては、実験値と理論曲線とはよく対応している。したがって、段波衝突の初期にみられる最大衝撃圧の算定には、Cross お



図—10 Cumberbatch の理論による衝撃圧分布



図—11 Cross-Cumberbatch による衝撃圧の時間波形の理論値と実験値との比較

および Cumberbatch²⁾ の理論を適用しても妥当な結果が得られるものと期待される。

(2) 段波の最大衝撃圧

Cumberbatch の理論によれば、段波の衝撃圧は、衝突時の段波の先端付近における水面勾配とその水塊の速度との関数として表わされる。衝撃圧が近似的に式(4)で与えられるものと考えれば、衝撃圧の最大値は $z=0$ で現われる。ここで、段波の水面形が式(1)のように、Ritter の解で近似できるものとし、段波が水門に到達するまでの時間 t_0 として $t_0 = a_0 x_0 / \sqrt{g h_0}$ を仮定すれば、その時点における段波先端部の水面勾配は次式で表わされる。

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)_0 = -\frac{2}{9}\left(2 - \frac{1}{a_0}\right)\left(\frac{1}{a_0}\right)\left(\frac{h_0}{x_0}\right) = -\tan \theta \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 x_0 は段波発生地点から水門までの距離である。ところで、式(4)の係数 C_p は水面の傾斜角 θ の関数であるから、式(5)を用いると、 $z=0$ における最大衝撃圧は、次式のように書ける。すなわち、

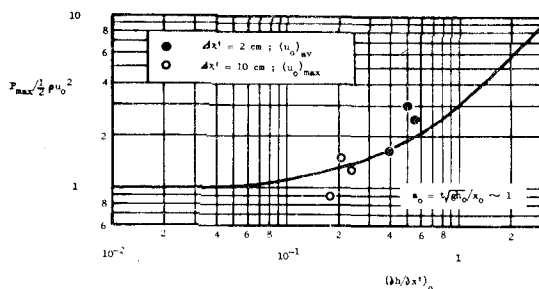
$$p_{\max} = \frac{1}{2} \rho u_0^2 f_1(h_0/x_0) = \frac{1}{2} \rho u_0^2 f_2(\tan \theta) \dots (6)$$

このように C_p は (h_0/x_0) あるいは $\tan \theta$ の関数であるから、式(6)の関係を図示できる。

一方、段波先端付近の水面勾配を Cross の理論によって求めると、次のように表わされる。

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x'}\right)_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{h_0}{x'}\right)^{1/2} \left(\frac{g}{C^2}\right)^{1/2} \dots (7)$$

ここで、段波の衝突時の水面形を実測して、 (h_0/x') 、 a_0 および C を推定すれば、 $\tan \theta$ が求まることになる。著者らの実験では、 $(h_0/x') \approx 3 \sim 5$ 、 $a_0 \approx 0.6 \sim 0.8$ および $(g/C^2) \approx 160$ と考えてよいので、 $\theta \approx 5^\circ$ となり、Cumberbatch の与えた C_p と θ との関係から、 C_p は 1.1~1.2 の値をとることになる。このように、段波による最大衝撃圧は、その壁面への衝突直前における水面勾配に大きく影響される。図—12 に示す実験値が計算値のまわりにばらついているが、段波先端の水面形の決定法を考慮すれば、この図によって以上の傾向がよくわかる。



図—12 段波の最大衝撃圧と段波先端の水面形

(3) 段波の反射時における静水圧

段波が直立壁面で反射する場合、進入する段波の規模 h_1 と前面水深 h_0 との関係によっては、反射によって段波の峯高 h_2 は顕著に増大するので、そのときの静水圧が衝撃圧と同様に重要な問題となる。津波のように、ほぼ周期的に來襲する波の場合については、改めて吟味すべき点があるが、前面水深があらかじめ別の条件によって規定されている場合を考えれば、図—7 および 8 における h_2 の値が静水圧の大きさを与えることになる。

段波の波圧の最大値の推定法を検討するために、実験結果と Cross-Cumberbatch 理論から 図—13 にそれら

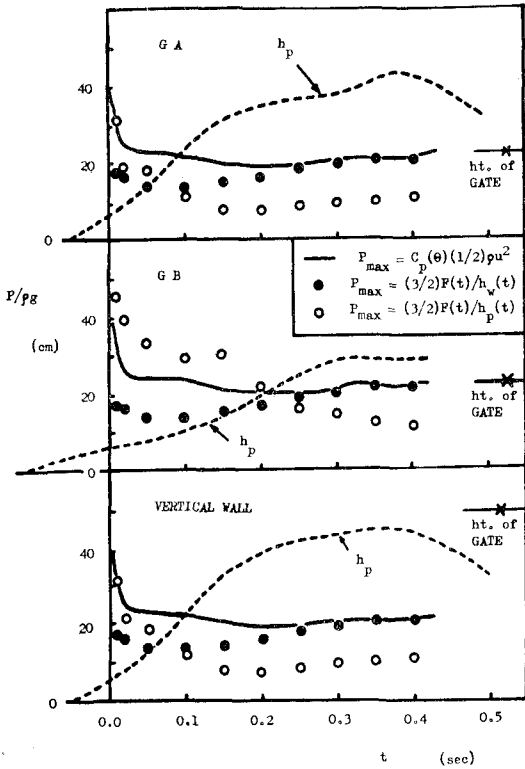


図-13 段波の波圧の最大値

の比較を示す。この図には、これらの理論によって得られた実線で示す最大衝撃圧のほか、式(4)で計算される壁面全圧 $F(t)$ と Cumberbatch の理論で $\theta(t)$ に対して定まる $z_w = h_w(t)$ とを用いてもとめた黒丸で示す最大衝撃圧、写真計測で得られた $h_p(t)$ を $h_w(t)$ のかわりに用いた白丸が示す同様な関係が示されており、さらに、比較のために、 $h_p(t)$ を破線で、水門模型の天端高を星印で示してある。この場合、Cross-Cumberbatch の理論を考えるにあたって、壁面位置を通過して後も段波の水面形は変わらず、段波の波速は一定であるとし、さらに、時刻 t における段波の水面勾配は $x' = ut$ における水面勾配で与えられるものとして、この水面勾配から得られる θ を用いて理論を適用することにした。

Cumberbatch の理論は静水圧を考慮していないから、衝突後の水塊の水門前面における鉛直運動に重力加速度の効果が無視できなくなると、理論と実測とは一致しなくなるものと考えられる。また、写真計測による h_p には、しぶきに原因するよみとり誤差が含まれている。これらを考慮すると、段波の先端が水門に達してから 0.05～0.1 sec 以上時間が経過すると重力加速度の効果が顕著になるものと考えられる。しかし、水門模型で越水がみられ、段波の水面勾配が小さくなるために、最大波圧は 0.1 sec 以後は h_p より小さくなっている。この傾向

は、図-3(a) の記録にも現れている。図-13 で鉛直壁の場合には水門 GA および GB の場合よりも越水しにくい状態であり、静水圧はこれらの場合よりも大きい。

越水のない場合には、図-3(b) のような結果も得られているので、 $(h_p/\rho g)$ よりも $(h_s/\rho g)$ あるいは h_c が大きくなる場合について十分検討しておく必要がある。

6. 結 語

以上、海浜付近で段波状になった津波の水門に作用する衝撃圧に関して、津波を水平床上の段波にシミュレートできるとして、段波の波圧に関する検討を行なった。

本研究で得られた主な成果はつぎのように要約される。

(1) Cross の理論の応用によって、段波の先端部の力学的特性がかなり明らかになった。

(2) Cumberbatch の理論によって、段波の壁面に作用する衝撃圧の推定ができる。実際には、この理論のモデルのような水面形は存在しないので、Cross の方法を応用し、底面摩擦を考慮すると、衝撃圧の時間波形について理論と実験とがかなりよく一致する。この場合、段波先端部の水面形が衝撃圧の大小に関係していることに留意しなくてはならない。

(3) Cross-Cumberbatch の理論によって、段波の波圧の最大値の推定法を検討したが、最大衝撃圧のほかに、段波の反射時の静水圧が無視できない場合のあることを指摘した。

今後、これらの諸点を考慮にいて、段波状津波の波圧を推定する方法を検討すべきであろう。

終に、研究の遂行上多大のご配慮をいただいた豊国工業株式会社好富恒徳技術部長に心から感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Nakagawa, H., S. Nakamura and Y. Ichihashi: Generation and development of a hydraulic bore due to the breaking of a dam (1), Bull. Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 19, Pt. 2, No. 154, pp. 1—17, 1969.
- 2) Cross, R.H.: Water surge forces on coastal structures, Tech. Rep. HEL—9—10, Univ. Calif., Berkeley, pp. 1—106, 1966.
- 3) Stoker, J.J.: Water waves, Intersci. Pub., N. Y., p. 312, 1957.
- 4) Whitham, G.B.: The effect of hydraulic resistance on the dam-break problem, Proc. Roy. Soc., Ser. A, Vol. 227, pp. 399—407, 1955.
- 5) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太: 海岸堤防の設計、特にその有効高について、第2回海岸工学講演会講演集, pp. 57—70, 1955.
- 6) Cumberbatch, E.: The impact of a water wedge on a wall, Jour. Fluid Mech., Vol. 7, pp. 353—373, 1960.