

図-2-a 砕波のない波状段波

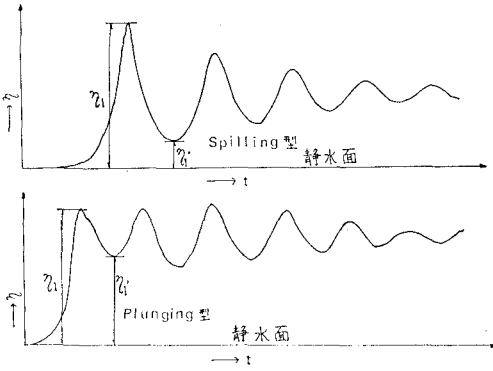


図-2-b 砕波のある波状段波

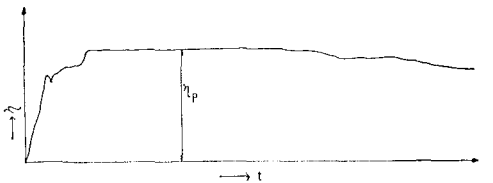


図-2-c Bore 状段波

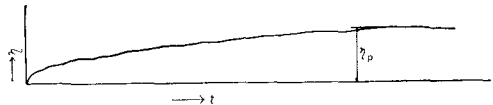


図-2-d 陸上における楔形段波

(1) 波状段波のうちあげ高

上記の a), b) の場合には, 段波は曲率項の影響をうけて分散し波状段波が現われる. 分散波は伝播に伴ない成長し, 砕波しない場合には前方の波ほど波高が大きい. 本実験では水路長が短かいので分散波は完全には整形しないうちに鉛直壁に衝突するが, 分散第1波をみるとそれが鉛直壁直前の No. 4 の波高計に到達するまでに波高がかなり安定することがわかった. 砕波する場合には分散第1波が砕けて, 第2波, 第3波の方が波高が過渡的に大きくなることもあった. 分散波が生じた実験結果について, No. 4 波高計で測定された分散第1波の波高を η_1 とし, 鉛直壁への静水面上のうちあげ高を H_R とし, 横軸に η_1/h_0 を縦軸に H_R/h_0 をとって示すと図-3 のようである. 図中の実線は孤立波の重複波高に対する Benny の理論解を岩崎・真野・小杉が修正したものであり⁹⁾, 実験値の下限値を示している. 岩崎等は先に $\eta_1/h_0 < 0.6$ の範囲で実験を行なったが, 本実験結

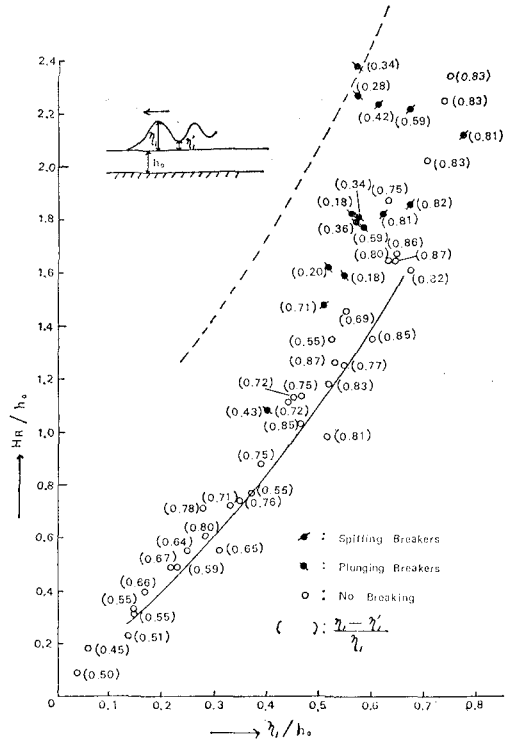


図-3 波状段波のうちあげ高

果と同様に η_1/h_0 が大きな所での H_R/h_0 の値の散乱が著しかったが, これについての説明がなされていない. ここでは, $\eta_1/h_0 \approx 0.8$ まで範囲を拡げて 50 コの実験を行ない H_R/h_0 のばらつきの原因を検討した. 実験で観測された砕波には Spilling 型と Plunging 型の2種類があってそれぞれの波形は図-2-b に示すように異なっており, 前者は波の谷が深く山と谷との差がかなり大きいのに対し, 後者は谷が浅くて山と谷の差が小さい. そこで, $(\eta_1 - \eta_1')/\eta_1$ (η_1' : 第1波と第2波の間の谷の静水面からの高さ) をパラメーターにとって図-3 にそれらの値を記載したが, 同一の η_1/h_0 に対して $(\eta_1 - \eta_1')/\eta_1$ の値が小さいほど相対うちあげ高が大きく, Spilling よりも Plunging 型砕波の方が大きいことがわかる. ただし, 砕波したかどうか及び砕波型式の判定を目視で行なっているので, 正確さに欠ける点がある. 図-3 の破線は次に述べる Bore 状段波のうちあげ高の実験の平均値を表わしているが, Bore 状段波の水面形状は図-2-c のようであるから, これは $(\eta_1 - \eta_1')/\eta_1 = 0$ の極限の場合に相当し, H_R/h_0 の上限値を示すと考えてよいであろう.

(2) Bore 状段波のうちあげ高

下流側水深を 1.5 cm, 3.0 cm の2種類, 貯留長を $L/2$, L , $2L$ として実験を行なったが, $h_0 = 1.5$ cm では $\Delta H/h_0 > 1.0$, $h_0 = 3$ cm では $\Delta H/h_0 > 1.2$ の範囲で, すべて波頭が崩れながら伝わる Bore 状段波が現われた.

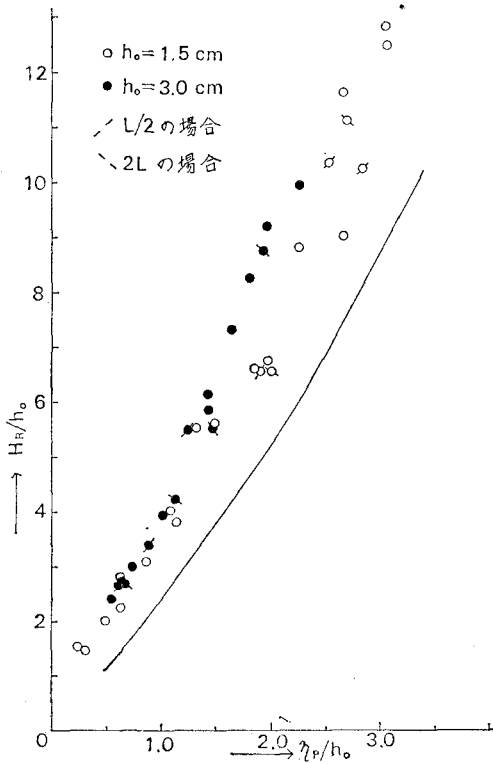


図-4 Bore 状段波のうちあげ高と波高の関係

波高は伝ばんに伴って減少するが No. 4 波高計に達するまでにほぼ安定し、波速についてはほとんど減衰はみられずほぼ一定である。図-2.c に示すように、No. 4 波高計での静水面上の波高を η_P とし、図-3 と同様に横軸に η_P/h_0 、縦軸に H_R/h_0 をとって描くと 図-4 のようである。水深 h_0 の静水中を波高 η_P の理想段波が進行するときの波速 c 及びこれが鉛直壁に衝突したときの重複波高（うちあげ高） H_R は、Stoker の方法⁴⁾ を用いれば次式で表わされる。

$$c = \sqrt{gh_0} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\eta_P}{h_0} + 1 \right) \left(\frac{\eta_P}{h_0} + 2 \right)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{H_R}{h_0} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\eta_P}{h_0} - 2 \right) + \sqrt{4 \left(\frac{\eta_P}{h_0} \right)^3 + 13 \left(\frac{\eta_P}{h_0} \right)^2 + 12 \left(\frac{\eta_P}{h_0} \right) + 4} \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-4 の曲線は式(2)を表わすが、実験値は計算値よりもかなり大きく 1.5 倍以上である。本実験では、入射段波が鉛直壁に衝突した瞬間に上方に大きな速度成分をもって壁面に沿って高くまで遡上する状態が観察されたので、これが実験値と計算値の違いの原因と考えられる。 $\eta_P/h_0 > 1.5$ の領域では $h_0 = 3$ cm の方が 1.5 cm よりも H_R/h_0 の値が大きい、この原因については明らかでない。また貯留長の影響はみられない。

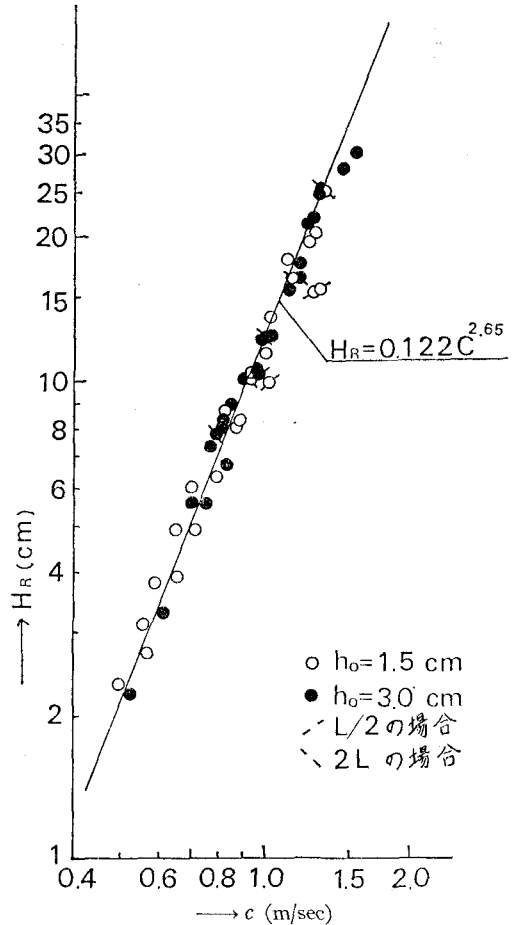


図-5 Bore 状段波のうちあげ高と波速の関係

つぎに、波高計 No. 3 と No. 4 の間での入射段波の波速 c を横軸に、縦軸に H_R をとって描くと 図-5 のよう、両対数軸上で実験値はきれいに直線上にのっている。福井・中村等も同様の整理の方法で、実験式 $H_R = k \cdot c^2$ を得ているが⁵⁾、著者の結果と比べると、 c の指数の値がかなり小さい。

(3) 楔形の波面をもつ段波のうちあげ高

津波が陸上に遡上した後に防潮壁に衝突した場合のうちあげ高について調べる。 $h_0 = 0$ の場合には 図-2.d に示したように摩擦のために先端に丸味をもち上方にやや凸の楔形をしている。貯水槽の水深 ΔH を 3~25 cm の範囲で変え、貯留長を $L/2$, L , $2L$ の 3 種類にして全部で 27 コの実験を行なったが、それらのうちで $\Delta H = 21$ cm について、波高計 No. 4 で測定された波形の時間変化を示すと 図-6 のようである。貯留長が長いほど最大水面高 η_P が現われるまでの時間が長く、かつ η_P の値が大きいことがわかる、なお、この状態を確かめるために実験と同じ条件 ($\Delta H = 21$ cm, L , $2L$ の場合) で、特性曲線法を用いて数値解析した結果が 図-7 である。

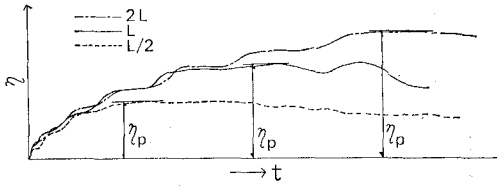


図-6 楔形段波の波形と貯留長の関係

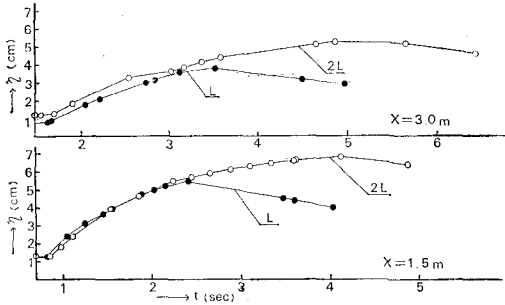


図-7 特性曲線法による楔形段波の計算波形

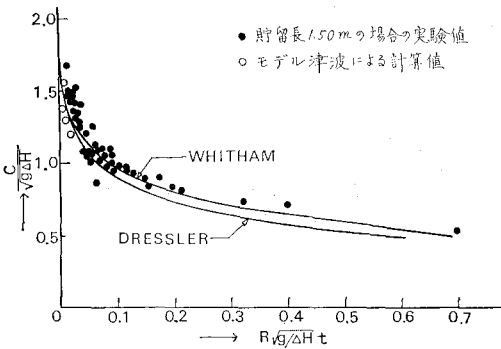


図-8 楔形段波の先端の移動速度

ただし、ゲートの下流側 1.5 m 及び 3.0 m の点での時間波形を示したものであるが、図-6 とよく似た形状を呈していることがわかる。次に、段波先端の移動速度について、すでに中村・土屋は実験を行なって Whitham, Dressler の値と比較しているが^{6),7)} 著者も同様の考察をした。すなわち、横軸に $R\sqrt{g\Delta H}t$ (t は水門を引き上げて段波を発生させてからの経過時間、 $R=g/C^2$ で C はシェージーの流速係数である。ここでは、ガラス張り水路であるので、 $C=57.2$ とした) を、縦軸に $c/\sqrt{g\Delta H}$ (c : t のときの先端の移動速度) をとって、貯留長 $L=155$ cm の場合の実験結果を描くと 図-8 のようである。中村・土屋の実験値は (この場合 $C=50.4$ としている) 二つの曲線よりかなり上方にあるが、著者の場合には両者がよく一致している。他の貯留長でも同様で、移動速度に対する貯留長の影響はなかった。図-8 の白丸はモデル津波に対する計算値である。すなわち、本実験での段波の発生方法は実際の津波のそれとは異なっ

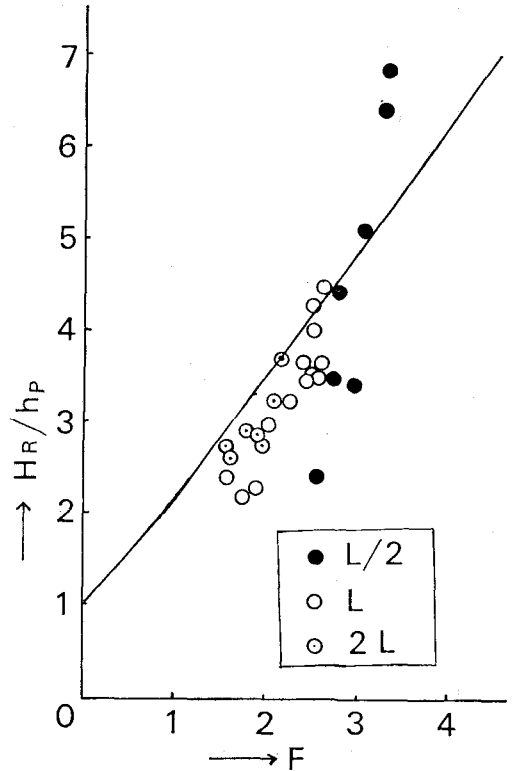


図-9 楔形段波のうちあげ高

いるので、一つのモデル津波 (波高 10 cm, 波長 3.5 m の孤立波) が鉛直岸壁を乗り越えて水平な陸上を移動する場合の先端の移動速度の時間変化を、岩崎・富樫が行なった特性曲線法⁸⁾ によって求めた計算結果が白丸である。黒丸の実験値よりやや下方にあるが、両者はよく一致しているとみてよい。

次に楔形段波が水平な Dry bed 上を移動して鉛直壁に衝突したときの相対うちあげ高 H_R/h_P を縦軸に、入射段波の波高計 No. 4 の位置のフルード数 $c/\sqrt{gh_P}$ を横軸にとって実験値を描くと 図-9 のようである。実線は、水深 h_P 、平均流速 c の定常流で水門を急速に完全閉そくしたときに水門の上流側に発生する理想段波の状態を表わしており、次式から計算される。このような定常流的取扱いは、すでに岩崎・富樫が行なっている⁹⁾。

$$\left\{ \begin{aligned} &\left(\frac{H_R}{h_P}\right)^3 - \left(\frac{H_R}{h_P}\right)^2 - \frac{H_R}{h_P}(1+2F^2)+1=0 \\ &F = \frac{c}{\sqrt{gh_P}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

実験値と理論値を比べると、 $(H_R/h_P)/F$ のこう配が前者は後者より大きく、また実験値については貯留長の影響がいくらか現われているが、 $F < 3$ の範囲では実験値と理論値の間には大きな違いはないと考えてよい。

4. 結 論

(1) 理想段波が分散して波状段波となり、これが鉛直壁に衝突したときのうちあげ高の下限値は、岩崎等による孤立波の重複理論、首藤によるクノイド波の重複理論による計算値と一致する。

(2) 分散波の谷の高さが高くなって山との差が小さくなるにしたがって、うちあげ高が大きくなるが、この傾向は分散波が碎波する場合には特に著しい。

(3) うちあげ高の上限値は Bore 状段波のときに現われ、これは (2) に述べたように谷の位置が高くなって山と同じ高さになった極限の状態と考えてよい。Bore 状段波のうちあげ高は Stoker による理想段波の完全反射理論値よりも約 50% も大きい。

(4) 鉛直岸壁から水平な陸上に遡上した津波の先端の移動速度の減衰の状態は、Dressler と Whitham の値とよく一致している。また水平な Dry bed 上の段波のうちあげ高の実験値は、定常流としての取扱いに基づく理論値に比べると、フルード数がほぼ 3.0 より小さい範囲では前者は後者よりやや小さく、フルード数がこれよりも大きいところでは実験値の方がかなり大きくなるように思われる。

本研究を行なうにあたり、実験の実施、計算に多くの

労を煩わした当時学部学生 of 島田和夫、山田紀利、青木淳司、山田英二の諸君に謝意を表す。また、この研究は文部省科学研究費自然災害特別研究（代表者岐阜大学村松郁栄教授）によるものであることを記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 中川博次・中村重久・市橋義臣：段波の発生とその発達に関する研究，京大防災研究所年報（第 12 号 B），pp. 543～553，1969
- 2) 室田 明・岩田好一郎：段波の変形に関する研究，土木学会論文集（第 160 号），pp. 49～58，1968
- 3) 岩崎敏夫・真野 明・小杉達郎：孤立性段波のソリトン分裂に関する研究，第 22 回海講論文集，pp. 47～51，1975
- 4) Stoker, J. J.: Water Waves, Interscience Publishers, New York, 326 p., 1965
- 5) 福井芳朗・中村 充・白石英彦・佐々木泰雄：堤防の津波対策に関する水理学的研究，農業土木試験所報告（第 1 号），pp. 281～328，1963
- 6) Whitham, G. B.: The effect of hydraulic resistance on the dam-break problem, Proc. Royal Society, Ser. A, Vol. 227, pp. 399～407, 1955
- 7) 中村重久・土屋義人：水門に作用する段波の波圧について，第 20 回海講論文集，pp. 157～161，1973
- 8) 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 回海講講演集，pp. 223～229，1966
- 9) 岩崎敏夫・富樫宏由：遡上津波に対する陸堤の効果に関する研究，第 14 回海講講演集，pp. 179～181，1967