

津波の研究 (II)

段波津波の堤防におよぼす影響——

福井 芳朗*・白石 英彦***
中村 充**・佐々木 泰雄***

1. 緒言

筆者らは本研究に関する一連の実験研究のうち、先に第Ⅰ報として、研究計画と実験方法および段波津波の波速について考察した。引きつづいて第Ⅱ報においては、段波津波の堤防面遡上、重複波高、波圧、堤防溢流量について理論的、実験的に考察してその堤防におよぼす影響を知り、津波堤防の設計に必要な諸式について報告する。

2. 段波津波の堤防のり面への遡上

段波形式の津波が堤防に衝突すると、のり面に沿って遡上が起こる。遡上の高さは段波のもつ運動エネルギーが位置のエネルギーに置換されることによって決定される。段波のもつ運動エネルギー、すなわち、水粒子の速度は微視的に見れば、きわめて複雑であり、特に堤防のり面に衝突した瞬間における水粒子の運動は複雑で、大きな速度を得て上向きに加速されたものが遡上の最高位置をきめることになる。この水粒子の運動エネルギーを極微要素ごとに知ることは困難であるが、この速度 v_m は巨視的に見た量としての波速 c との相関を認めて、つぎのように表わされると考えられる。

$$v_m = \alpha c \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 α は 1 より大きい無次元係数である。他方流れが完全流体であれば、流れはのり面によってのり線加速度を与えられ、水平な運動エネルギーは位置のエネルギーに変えられるから

$$R = \frac{v_m^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 R は静水面上の遡上鉛直高さであるが実際には、エネルギー消耗が伴って起こるものであるから、上式に k' なる無次元係数を乗じて

$$R = \frac{k'}{2g} v_m^2 = \frac{k' \alpha^2}{2g} c^2$$

この式で

$$k = k' \alpha^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

とおき、 k を実験係数として与えることにする。

$$R = \frac{k}{2g} c^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

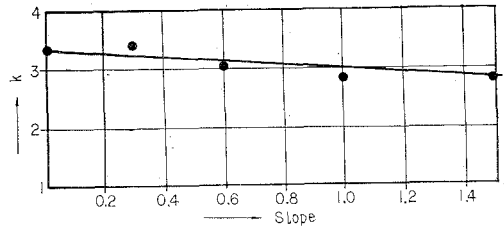
実験結果から、 k の値を示せば図—1 のようである。式 (4) に、第Ⅰ報における式 (16) を代入すれば

$$R = \frac{k}{2g\zeta^2} \left[\frac{\eta\zeta h}{H-\eta\zeta} \bar{a} \pm \sqrt{\left(\frac{hH\bar{a}}{H-\eta\zeta} \right)^2 + \frac{g\zeta^2 H(H+h) - 2hH^2\bar{a}^2}{2(H-\eta\zeta)}} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\bar{a}=0$ のとき

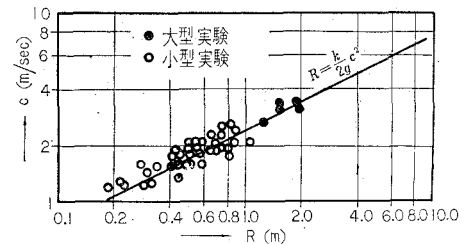
$$R = \frac{k}{2g} \cdot \frac{gH(H+h)}{2(H-\eta\zeta)} = \frac{kH(H+h)}{4(H-\eta\zeta)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図—1 遡上係数 (k) とのり面勾配の関係



式 (6) における計算値と実験値を比較すれば、図—2 のとおりである。つぎにのり面勾配と遡上高について考えれば、この量は式 (3) における k に関係する。式中 k' はエネルギー損失に関する量であるから 1 より小さく、勾配がゆるやかになるほど小くなる量である。また α は、式 (1) に示されるように 1 より大きい係数である。

図—2 波速 (c) と堤防のり面遡上高 (R) との関係



3. 重複波の波高

段波津波がのり面に衝突するとまず遡上が起こる。つづいて反射波が発生し、これと入射波が重複していちじるしい水位上昇を生ずる。そしてこの重複波が同じ段波型で沖側に反射進行するのである。この反射波の速度は入射流速との差によって決まるため、入射流速の大きな

* 正員 農博 農林省金沢農地事務局

** 正員 農博 農林省農業土木試験場

*** 正員 農林省農業土木試験場

初期は大きな重複波が持続される。このため、津波のように長周期の波では重複波高の持続時間が相当にながいため、もし堤防がこれより低い場合には大量の越流が起こる。ここに、入射流速 U 、その平均値 $\bar{U}$ 、入射水深 H 、反射波波速 c_0 、反射流速 U_0 、その平均値 $\bar{U}_0$ 、反射波波高 ζ_0 、反射水深 H_0 とすると、図-3 の I-II 断面における流れの連続性より

$$c_0 = \frac{\bar{U}H}{\zeta_0} \quad \bar{U}_0 = \frac{c_0 \zeta_0}{H_0} = \frac{H}{H_0} \bar{U}$$

図-3 重複波の発生

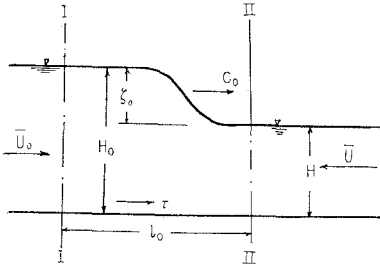


図-3 に示すような状態にあるものとして I-II 断面における運動量方程式を誘導する。段波先端より I 断面寄りの容積を V_1 、II 断面寄りの容積を V_2 として

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\iiint_{V_1} \rho U_0 dV - \iiint_{V_2} \rho U dV \right] \\ & - \iint_{H_0} \rho U_0^2 dS - \iint_H \rho U^2 dS \\ & = \frac{\omega_0}{2} (H_0^2 - H^2) - \iint_{l_0} \tau dl \end{aligned}$$

ここで各項について

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V_1} \rho U_0 dV &= \rho \bar{U}_0 \frac{\partial V_1}{\partial t} = \rho \bar{U}_0 c_0 H_0 \\ &= \frac{\rho \bar{U}_0 \bar{U} H_0 H}{\zeta_0} = \frac{\rho \bar{U}^2 H^2}{\zeta_0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V_2} \rho U dV &= \rho \bar{U} \frac{\partial V_2}{\partial t} = -\rho \bar{U} c_0 H = -\frac{\rho \bar{U}^2 H^2}{\zeta_0} \\ \iint_{H_0} \rho U_0^2 dS &= \eta_1 \rho \bar{U}_0^2 H_0 = \eta_1 \rho \frac{H^2}{H_0} \bar{U}^2 \end{aligned}$$

ただし、

$$\eta_1 = \frac{1}{H_0} \iint_{H_0} \left(\frac{U_0}{\bar{U}_0} \right)^2 dS, \quad \iint_H \rho U^2 dS = \eta_2 \rho \bar{U}^2 H$$

ただし

$$\eta_2 = \frac{1}{H} \iint_H \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 dS$$

末項については

$$\iint_{l_0} \tau dl = \eta_3 \rho H_0 \bar{U}_0^2 = \eta_3 \rho \frac{H^2}{H_0} \bar{U}^2$$

ただし

$$\eta_3 = F\left(n, \frac{H}{H_0}\right)$$

よって運動量方程式は

$$2 \frac{\rho \bar{U}^2 H^2}{\zeta} - \eta_1 \rho \bar{U}^2 \frac{H^2}{H_0} - \eta_2 \rho \bar{U}^2 H = \frac{\omega_0}{2} (H_0^2 - H^2)$$

ただし

$$\eta = \eta_1 - \eta_3 \quad \text{とおいてある。}$$

$$\rho \bar{U}^2 \left[2 H^2 - \eta \zeta_0 \frac{H^2}{H_0} - \eta_2 \zeta_0 H \right] = \frac{\omega_0 \zeta_0}{2} (H_0^2 - H^2)$$

$$\begin{aligned} & \bar{U}^2 \left[2 H^2 - \eta H^2 \left(1 - \frac{H}{H_0} \right) - \eta_2 H^2 \left(\frac{H_0}{H} - 1 \right) \right] \\ & = \frac{g H^3}{2} \left(\frac{H_0}{H} - 1 \right) \left[\left(\frac{H_0}{H} \right)^2 - 1 \right] \end{aligned}$$

ここに $H_0/H = m$ とおき、これを重複率と呼ぶことにすると

$$\bar{U}^2 \left[2 - \eta \left(1 - \frac{1}{m} \right) - \eta_2 (m-1) \right] = \frac{g H}{2} (m-1) (m^2-1)$$

$$\frac{g H}{2 \bar{U}^2} m (m-1) (m^2-1) + \eta (m-1)$$

$$+ \eta_2 m (m-1) - 2m = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで $\eta \div \eta_2 \div 1$ とおけば

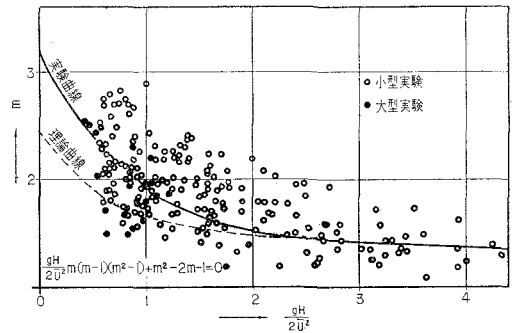
$$\frac{g H}{2 \bar{U}^2} m (m-1) (m^2-1) + m^2 - 2m - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

この式で $\bar{U}$ 、 H は別に与えられるから、本式を解いて m が求まる。したがって重複波水深 H_0 は

$$H_0 = m H$$

$gH/2 \bar{U}^2$ と m の関係を示す実験値は図-4 に見るとおりで m は $gH/2 \bar{U}^2$ が小さいところで理論値よりもやや大きく出ている。

図-4 重複率 (m) の理論値と実験値



なお、同図中の理論曲線は式(8)によるものであり、したがって式(7)中に考慮されている摩擦などの影響は省略された曲線である。

式(7)、(8)は m に関する4次式で4個の解をもちうるが、これらの式は与えられた条件 $m > 1$ のうちでは唯一の解が存在することが容易に確かめられる。

4. 波圧の解析

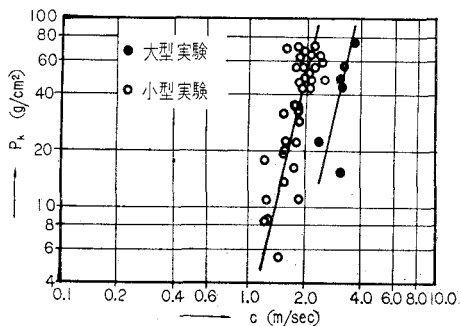
段波津波が来襲して堤防に衝突するとき、堤防には波圧が作用する。この現象を時間的に記述すれば、まず、津波が進行して堤防に衝突し、堤防に動波圧を与えると同時に、津波の堤防のり面遡上が起こり、つづいて入射波の連続的な到達によっていちじるしい水位上昇をきたし、反射波が発生する。この入射波と反射波の重複水深

は、入射波の減衰するまで相当長時間維持され、これによる持続波圧を堤防に与える。すなわち段波津波の波圧は衝突時の動波圧と、その後の持続波圧を考える必要がある。

(1) 動波圧の解析

動波圧に最も影響をもつと考えられる因子は、まず波速であろう。この観点から動波圧 p_k と波速 c の実測値を全対数方眼紙に記入して見れば、図-5 に見るとおりである。大型実験と小型実験で異なった状態が示されるが、いずれの場合も共通してその勾配、すなわち動波圧におよぼす波速のべき数が4に近いことがわかる。

図-5 波速 (c) と動波圧 (P_k) との関係



したがって動波圧は波速の4乗に關係することを実験的事実として認め、次元解析によって動波圧 p_k の式を導く。図-5 における p_k は堤防のり面における波圧分布の最大値をとってあるので、この値を p_{km} で表わす。次元解析にあたって動波圧に影響する因子を選べば、波速 c のほかに水の密度 ρ 、重力の加速度 g 、波高 ζ などが考えられる。

よって

$$p_{km} = f(c^4 \rho^a g^b \zeta^r) \dots (9)$$

を得る。よって

$$p_{km} = \kappa_0 \frac{\rho c^4}{g \zeta}$$

水の単位重量を w_0 として

$$p_{km} = \kappa_0 \frac{w_0 c^4}{g^2 \zeta} \dots (10)$$

ここに κ_0 は無次元係数であり、これを波圧係数と呼ぶこととする。式 (10) にしたがって 図-5 を整理すれば、図-6 となって、図-5 で表われた大型実験と小型実験の相違はほとんどなく、実験と計算値はよく一致していることがわかる。

波圧係数 κ_0 の値は 図-7 のようである。

つぎに動波圧の分布に関しては 図-8 に見るようにはば静水面上に最大値を有する直線分布となる。最大動波圧 p_{km} 、遡上高 R 、前浜水面上 R_p なる高さの点の動波圧 p_k として

図-6 動波圧の計算値と実験値

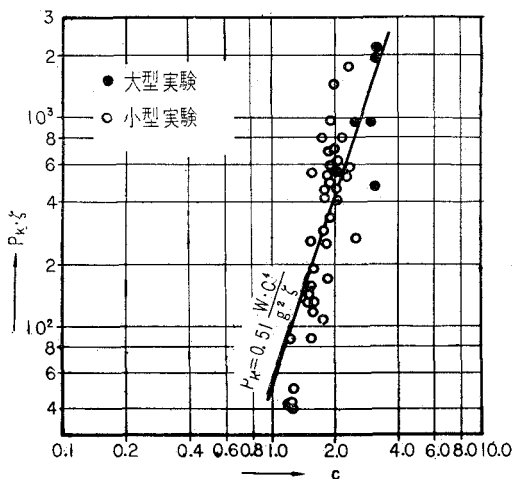
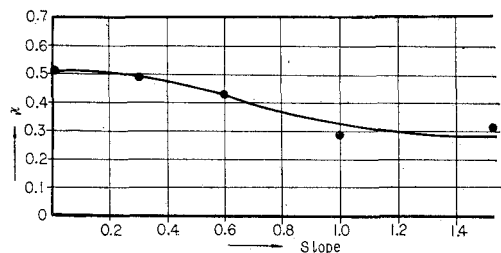


図-7 動波圧係数 (κ_0) と堤防のり面勾配の関係



$$\frac{p_k}{p_{km}} = 1 - A \frac{R_p}{R}$$

$$p_k = \left(1 - A \frac{R_p}{R}\right) p_{km} \dots (11)$$

ただし、 A は無次元係数で、実験結果から求めると 1.4 程度である。この式に式 (4)、(10) を代入すれば、

$$p_k = \kappa_0 \frac{w_0 c^4}{g^2 \zeta} \left(1 - A \frac{2gR_p}{kc^2}\right) \dots (12)$$

ここに

A : 無次元係数, 1.4

κ : 図-5 による値, 波圧係数

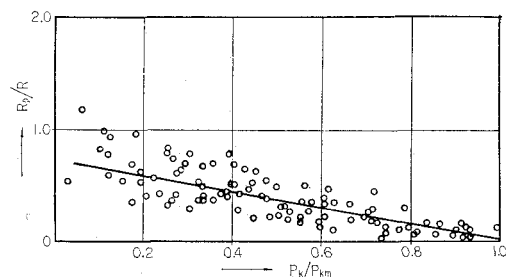
k : 図-1 による値, 遡上係数

w_0 : 水の単位重量

ζ : 入射波高

c : 波速

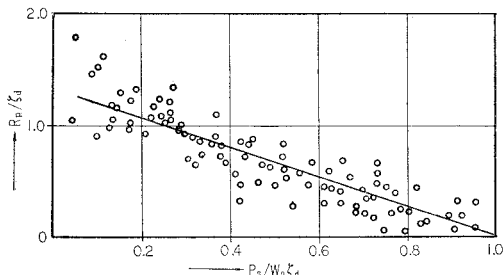
図-8 動波圧の分布



(2) 持続波圧の解析

持続波圧はさきに述べたように、重複波高による静水圧には近いものであるから、重複波高を用いてその分布状態を整理すれば図-9 のようである。

図-9 持続波圧の分布



これを式で表わせば

$$\frac{P_s}{w_0\zeta_d} = 1 - B \frac{R_p}{\zeta_d} \quad (13)$$

ここに

P_s : 前浜水面上 R_p なる高さの持続波圧

B : 無次元係数 ($B=0.75$)

ζ_d : 重複波高

よって

$$P_s = w_0 \left(\zeta_d - \frac{3}{4} R_p \right) \quad (14)$$

5. 堤防越流量

堤防前面において入射波と反射波が干渉し、重複していちじるしい水位上昇を生ずることは前項で解析したが、ここではその持続時間を対象に解析する。重複波の波高持続時間は、堤防越流量、堤防構造などに大きな影響をもつ、持続時間を示すパラメーターとして重複波高 ζ_d が入射波高 ζ に減衰するまでに要する時間 T_ζ をもって示すことにすると、 T_ζ は概略入射段波の波長 λ に比例して、反射波速 c_0 に反比例すると考えられよう。

$$T_\zeta = \frac{K\lambda}{c_0} \quad (15)$$

ここに K : 比例定数

λ : 波長

c_0 : 反射波速

ここで

$$c_0 = \frac{\bar{U}H}{\zeta_0}$$

また、第I報の式(1)より $\bar{U}H$ を求めて代入し

$$c_0 = \frac{ah + c\zeta}{\zeta_d - \zeta}$$

前浜流速 $a=0$ として

$$c_0 = \frac{c\zeta}{\zeta_d - \zeta}$$

ここに、 c : 入射波速

ζ : 入射波高

ζ_d : 重複波高

この式を式(15)に代入して

$$T_\zeta = \frac{K\lambda}{\frac{c\zeta}{\zeta_d - \zeta}} = \frac{K\lambda(\zeta_d - \zeta)}{c\zeta} \\ = KT \left(\frac{\zeta_d}{\zeta} - 1 \right) = KT \frac{\zeta_0}{\zeta} \quad (16)$$

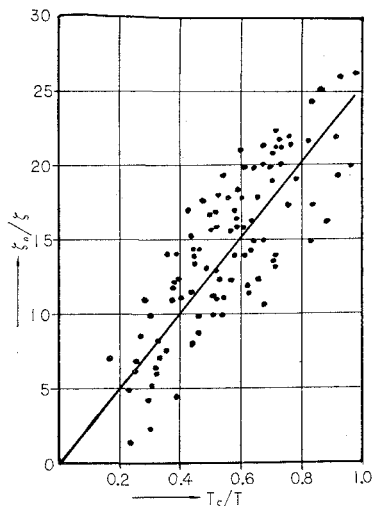
ここに T : 段波津波の通過に要する時間

ζ_0 : 反射波高

K : 無次元係数で、この値は実験的に $K \approx 2/3$ を求められている。

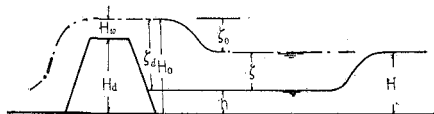
式(16)と実験値を比較して見れば図-10 のようである。

図-10 重複波高の減衰時間



津波堤防が重複波高より高ければ、遡上による多少の越波が起こる程度であるが、堤高が重複波高より低い場合にはその持続時間がながいため、越流量はいちじるしく大きくなる。このことは、堤防の安定や背後地のたん水などと直接関係する重要な問題である。津波堤防の高さは背後地の重要度にもよるが最少入射波高より低くすることは、かえって効果と工費の関連において不利となるであろう。したがってここでは堤高 H_d が入射水深 H より大で重複水深 H_0 より底い場合について検討する。すなわち $H < H_d < H_0$ の場合である。このことを整理して図示すれば図-11 のとおりである。

図-11 堤防を越流する段波津波



越流水深を H_w とすれば初期越流水深 H_{w0} は

$$H_{w0} = H_0 - H_d$$

t 時間後の越流水深 H_w は

$$H_{w_0} = H_{w_0} - \mu \cdot \frac{\zeta_0}{T} t$$

ここに

ζ_0/T : 重複波高の減衰速度を示す量で重複波高平均減衰速度と呼ぶ

μ : 段波津波の波形に関する係数=1

dt 時間の堤防越流量は

$$dQ = \sqrt{2g} \xi H_{w_0}^{3/2} dt$$

ここで

$$dt = -\frac{T_\xi}{\mu \zeta_0} dH_{w_0}$$

$$\begin{aligned} \therefore Q &= \frac{\sqrt{2g} \xi T_\xi}{\mu \zeta_0} \int_0^{H_{w_0}} H_{w_0}^{3/2} dH_{w_0} \\ &= \frac{2\sqrt{2g} \xi T_\xi}{5 \mu \zeta_0} H_{w_0}^{5/2} = \frac{2\sqrt{2g} \xi T_\xi}{5 \mu} \cdot \frac{(H_0 - H_d)^{5/2}}{H_0 - H} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(17)$$

で計算される。

6. 結 語

筆者らは津波の水理学的特性を考察して、防災上いちじるしい差異をもつ津波の2つの類型、すなわち、砕波進行型津波と共振定常型津波に分類し、特に破壊力の大きい砕波して進行する段波型の津波について、理論的、実験的に、その堤防におよぼす影響を考察してきた。特に大小2つの実験装置を用いることによって、その縮尺効果を検討することができた。津波の水理学的諸問題は明らかにフルードの相似則の支配領域である。すなわち、粘性、表面張力などに対し重力および慣性力の影響が卓越して大である。したがって、小型実験においても無論この領域内で実施し、かつ重力について影響の大きいと考えられる粘性あるいは渦粘性の影響を底面摩擦の形で考慮をはらった。したがって小型実験装置によって必要な観測が可能と思われるが、気泡連行など縮尺効果

に関する検討と、波圧分布における測定数を増加する意味で大型実験装置による実験を実施した。両実験の結果を比較して見ると、これまで示された諸図に見るように、ほとんど一致している。したがってこの種の実験においては小型実験における程度の規模で実験してもその現象を知るうえにそれほど支障はないようである。

つぎに実際に津波堤防の設計にあたって留意しなければならないことは、津波のこん跡しか得られない現段階において、こん跡記録を入射波高と見るべきか、重複波高と見るべきか、または陸岸遡上と解すべきか明確でないためその判断を誤らないようにしなければならない。すなわち、前浜と背後地の地形によって判断しなければならない。背後地が山の非常にせまっているところでは重複波と解すべきであろう。また背後地が比較的緩勾配で続いているところでは陸岸遡上高と見るべきであろう。もし津波が陸岸深く遡上した場合、汀線付近のこん跡記録は入射波高と見るべきであろう。

この報告は津波の複雑な諸現象を解明するという立場からは、いまだ不十分であり今後の研究発展に待たなければならない。しかし現時点において津波防災上、特に津波堤防の計画設計に役立つことを期待する。

参 考 文 献

- 1) Lamb: Hydrodynamics.
- 2) 本間 仁: 長波の変形について, 土木学会誌, 第19巻
- 3) 本間 仁: 津波の変形の理論, 土木試験所報告, 27
- 4) 山口王知: Abnomaly, High Waves of "Tsunami" on the East of Sanriku in Japan on March 3, 1933.
- 5) Kaplan: Tsunami Run-up on a Beach, Beach Erosion Board. Tech. Mem., No. 60.
- 6) 高橋道太郎: 海底の変動によって生ずる津波について, 震研集報 20 の4
- 7) 高橋道太郎: 本邦太平洋沿岸各地における津波の危険度について, 震研集報 20 の4
- 8) 石原・本間 編: 「応用水理学」
- 9) 本間 仁: 「技術者のための流体力学」
- 10) 土木学会: 水理公式集