

1. はじめに

ダム破壊等によって生ずる段波の衝突による波力、特に衝突時に発生する衝撃圧を適確に推定する理論的研究は意外に少なく、Cumberbatchの理論を応用したCrossの研究が挙げられる程度である¹⁾。しかし、その研究にしても段波の水面形に実験値が用いられている段階である。

そこで、本研究は Crossの研究を参考にし、このような段波の水面形を与える著者らの一人の研究結果²⁾を用いて、段波衝突による波力を理論的に推定する一つの評価方法を提案するものである。

2. 段波先端部の水面形

対象としている段波先端部の水面形評価には、著者らの一人の研究結果を用いることにする。段波先端部のモデルを図-1に示す。なお、図中の記号や以下の理論式に関する詳細は参考文献 2)を参照されたい。

このモデルでは、水面形は次式で表される。

$$\xi \leq x \leq \xi_0 : h = 2\delta^{1/3} \cos \frac{x}{\delta} + \frac{2}{3\delta} S_5 (a-U)^2 \frac{a-x}{a-x} \quad (1)$$

$$\xi_0 \leq x \leq a :$$

$$h \left(\frac{S_2}{S_1} \frac{h}{h-d} - 1 \right) (v_0-a)^2 + 2(\delta-u_0)h_0 \left(\frac{S_2}{S_1} \frac{h}{h-d} - 1 \right) (v_0-a) + \frac{S_2}{S_1} \frac{h_0^2}{h-d} (\delta-u_0)^2 + \frac{S_2}{S_1} h^2 - (\delta-u_0)^2 h_0 + \frac{R}{2} h^2 - (\delta-u_0)^2 h_0 - \frac{R}{2} h_0^2 - KU^2 \left(1 - \frac{d}{h_0} \right) (a-\xi_0) = 0 \quad (2)$$

(1),(2)式より、水位の経時変化を Crossの実験値と比較したのが図-2である。ただし、(1),(2)式は水面形

を求める式であり、Crossの実験値と比較するために段波を進行させて、壁があると想定している位置の水位変化を求めることにした。また、 $t=0(s)$ での初期段波を剛体と考え、仮想壁面位置を通過した後も水面形は変わらず、先端移動速度 δ で動き続けるとして水位変化を求めた場合もほぼ同じ結果となった。図-2より、本研究モデルの方が全般的に Crossの実験値より水深を大きく評価してしまい、特に $t=0.2(s)$ までの水位増加のプロセス

には大きな違いがある。この一つの理由として、水路床勾配のわずかな違いが考えられる。

3. 波力の評価

(1),(2)式より、段波先端部の水面勾配 $\tan \theta$ は次式で表される。

$$\xi \leq x \leq \xi_0 : \tan \theta = -\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{2}{3} \delta^{-2/3} \cos \frac{x}{\delta} + \frac{2}{3} \delta^{1/3} \sin \frac{x}{\delta} - \frac{2}{3\delta} S_5 (\delta-U)^2 \frac{a-x}{(a-x)^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \left(-\frac{2}{3\delta} \right)^{1/2} \left[\frac{8}{3\delta^2} S_5^2 (\delta-U)^2 \left(\frac{a-x}{a-x} \right)^2 - \frac{2}{3} S_5 (\delta-U) \frac{h_0}{a-x} \left(\frac{a-x}{a-x} \right)^{1/2} - \frac{2}{3} KU^2 \right]$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \left(-\frac{3}{2\delta} \right) \left(1 - \frac{d^2}{4\delta^2} \right)^{-1/2} \left[-\frac{2}{3\delta} S_5 (a-U)^2 \frac{a-x}{(a-x)^2} + \frac{2a}{9\delta^2} S_5^2 (\delta-U)^2 \left(\frac{a-x}{a-x} \right)^2 + \frac{6}{\delta} S_5 (a-U) (a-U) \left(\frac{a-x}{a-x} \right)^{1/2} + \frac{2}{\delta} (a-u_0)^2 h_0 + h_0^2 \right] - \frac{9}{\delta} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\xi_0 \leq x \leq a : \tan \theta = -\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{(v_0-a)^2 h h_0 + 2\delta h_0^2 (v_0-a) - \frac{R}{2} h^2 h_0 + a^2 h_0^2 + \frac{R}{2} h_0^3 + KU^2 (h h_0 - 2d) (a-\xi_0)}{(a-\xi_0) \left\{ 2 \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right) h + d \right\} (v_0-a)^2 + 2\delta h_0 (v_0-a) \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right) + \frac{3}{2} \delta h^2 - \delta h d - (a^2 h_0 + \frac{R}{2} h_0^2) - KU^2 \left(1 - \frac{d}{h_0} \right) (a-\xi_0) \right\}} \quad (4)$$

(3),(4)式から求めた水面勾配を用いて、Cumberbatch 理論に基づく全波力Fを次式で評価する。

$$F = \frac{1}{2} \rho g h^2 + C_F \rho U^2 h \quad (5)$$

$$C_F = 1 + (\tan \theta)^{1.2}$$

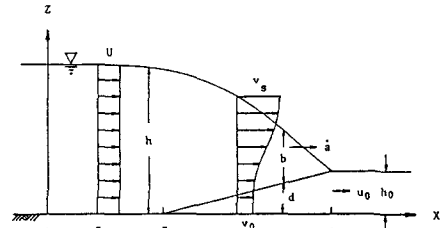


図-1 段波先端部のモデル

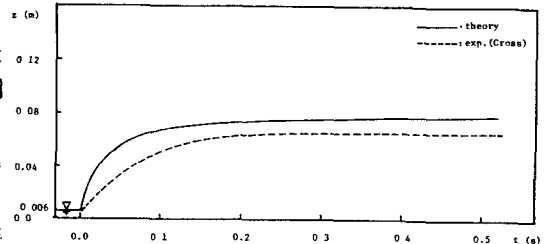


図-2 水位の経時変化

たし、(5)式中の C_F は Crossが dry bed上の段波を対象に Cumberbatch理論を応用する際に求めた式である。Cumberbatch理論は本研究対象のような下流側水深を有する段波には本来ならば適用できないが、本論文のように h_0 が非常に小さい場合(図-2を見よ)はその影響が小さいと考えて適用した。(5)式で求めた全波力をCrossの実験値と比較したのが図-3である。図からわかるように、理論とCrossの実験値は良く一致している。図-3には、段波が衝突して壁前面で完全反射する現象を検討したStokerの研究³⁾より求めた静水圧も合わせて示してあるが、Stoker理論では全波力を過大評価することになり、工学上、波力評価には本研究の方法がより合理的であると考えられる。また、本モデルでは、図-1の $x = \xi_0$ で水面勾配が食い違い、そのため波力もその点で多少の食い違いが見られるが、波力の絶対値からすると無視できると考えてよい。さらに、 $x = a(t=0)$ で(4)式が $0/0$ の不定形となり、(4)式そのものから水面勾配を求めることはできない。そこで、不定形の極限值を得る数学的手法で解を求め、その値を $x = a$ (段波最先端位置)での水面勾配とした。この値は、 $x = a$ 近傍の数値計算の値から外挿して求めたものとほぼ同じであった。図中の黒丸は、このようにして求めた水面勾配から算出した $t=0(s)$ での全波力である。

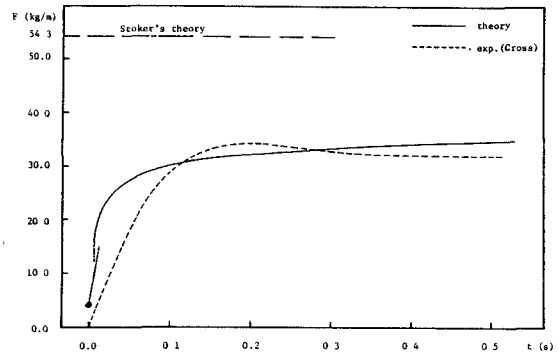


図-3 全波力-時間曲線

4. 衝撃圧の評価

段波衝突時の衝撃圧を段波の水深と全波力を用いて、 $p/\rho g = F/\rho g h$ で評価する。衝撃圧について比較したのが図-4である。図-4より、最大衝撃圧(理論では図中の●)はほぼ同じ値に評価されるが、静水圧が支配的となる $t=0.1(s)$ 以後での圧力は過少評価する傾向にあるらしい。これは、図-2で見られる水深の違いによるものと推定されるが、工学上、段波の衝突による衝撃圧の検討ではピーク値を評価することが最も意義深いことである。したがって、本研究でもピーク値の比較に主眼を置いており、その意味で本研究の方法は有用であることが確認されたとと言える。また、図-4には示していないが、東江ら⁴⁾の実験でも理論ピーク値とほぼ等しい値を示している。

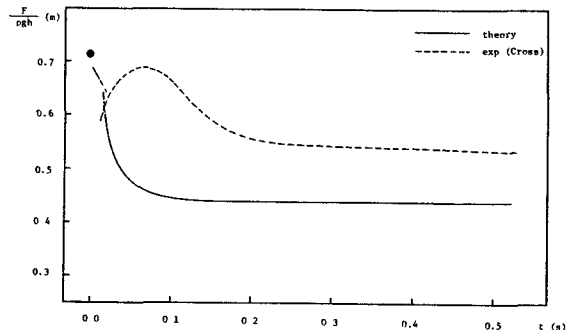


図-4 衝撃圧の時間波形

5. むすび

ダム破壊等によって生ずる段波の衝突による波力をCumberbatch理論と著者の一人の研究結果から評価し、このような場合の波力に関する Cross の実験値と比較した結果、本研究で十分波力を推定できる事がわかった。今後の課題としては波力に関する実験を行い、数多くのデータとの比較を通して、本研究手法の妥当性を検討することが残されている。

<参考文献> 1) Cross, R.H.: TSUNAMI SURGE FORCE, Proc. of ASCE, Vol. 93, WW4, 1967

2) 松富英夫: 下流側水深を有するダム破壊流れ先端部の水面形, 土木学会論文集 No. 375/II-6, 1986

3) Stoker, J.J.: Water Wave, Interscience Publishers, New York, 1957

4) 東江隆夫・勝井秀博: ドライ・ベット上を進行する段波による衝撃圧, 第28回水講演文集, 1984