

ドライベット状を進行する段波による衝撃圧
The impact pressure by hydraulic bore on the dry bed

大成建設㈱ 正会員 東江隆夫
同上 勝井秀博

1 はじめに

ドライベット状を進行する段波に関する研究は、ダム破壊流れ、あるいは津波の遡上といった観点からとらえられ、その形状・速度に関しては、古くから数多くの研究が行われている。¹⁾ところが、その段波が、直立壁に衝突した際に発生する衝撃圧に関しては、研究例が、意外に少なく、Cumberbatch²⁾、Cross³⁾そして中村等⁴⁾の研究が、挙げられる程度である。

我々は、後述する様な、有限の狭水路を走る段波の特性、直角に曲がった開口部の影響、さらに、段波同志が、衝突した時の衝撃圧の特性（段波が、直立壁に衝突した場合との相連等）を知るために、実験を中心に、研究を行った。

2 実験装置および方法

実験に使用した装置は、図2-1に示すように、アクリル製の水路に直角に、2つの貯水槽を取り付けたもので、貯水槽と水路は、アルミ製のゲートで仕切られている。実験では、最初に、貯水槽内に水を貯め、左右のゲートを、同時に引き上げるにより、水路内に段波を発生させる。発生した段波は、水路内を進行し、反対側から来た段波と、水路中央で衝突する。その間の水路側壁に作用する圧力を、同図中に示す21点で測定する。図中Gとあるのは、水路中央部付近の屋根に取付られた圧力計である。段波の波形は、ビデオと16mm高速カメラで撮影した。

実験ケースは水路幅をB、ゲート幅をBg、初期水深をhoとして、表2-1に示す。表中、中央仕切板とあるのは、段波同志の衝突実験と比較を行うために、水路中央に、直立壁を設けたケースである。

3 実験結果と考察

3.1 圧力の一般的性質 図3-1は、圧力測定全点の時系列記録である。段波は、まずF列の最下段に設置したF4に衝突した後、上昇しながら、水路内を進行し、E4、D4、C4、B4を通過する。そして、反対側から来た段波と、水路中央で衝突して、A4の圧力計に、衝撃圧を作用させている。記録された、圧力波形を整理すると、図3-2に示す5つのパターンに分類できる。Pmは、最大圧力、Ppは最初のピーク値、tpはピーク値までの立ち上がり時間、tdは、ピークから静圧までに戻る時間、Pℓは、最終静水圧である。

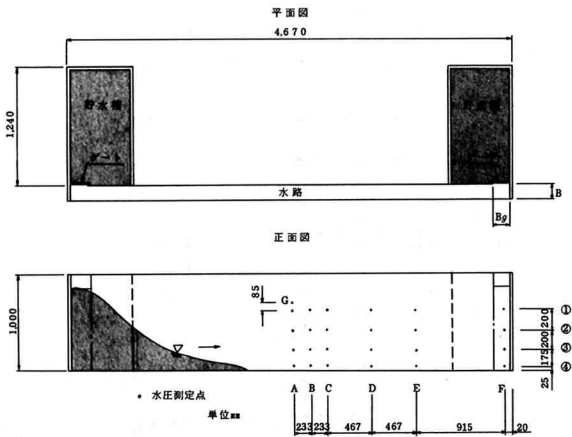


図2-1 実験装置

表2-1 実験ケース

B Bg	2.5cm	3.75cm	6.25cm	8.75cm
3.75cm		●		
6.25cm		○	○	○
12.5cm	□	●	○	○
25.0cm	○	●		

- h₀ = 68.0cm
- 中央仕切板
- h₀ = 34.0cm

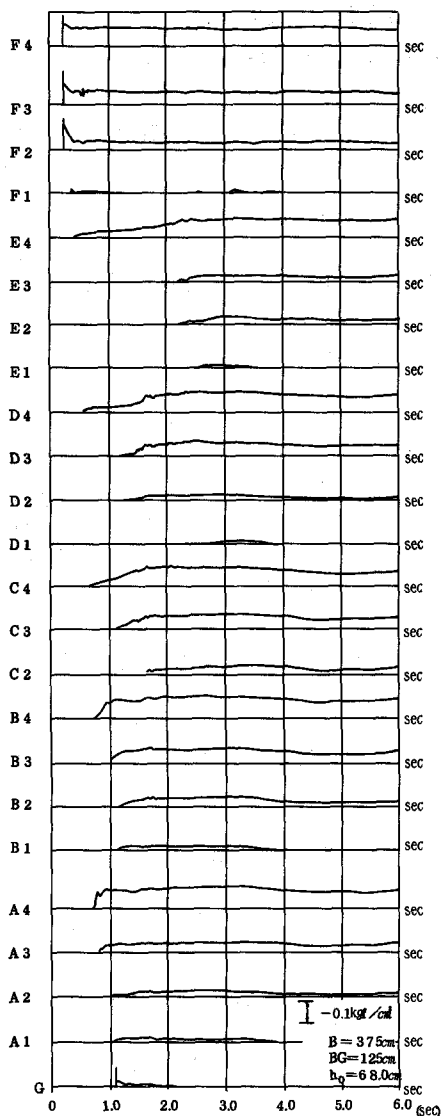


図 3-1 圧力測定全点の時系列

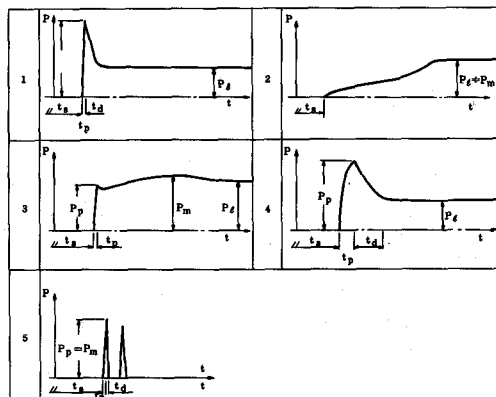


図 3-2 圧力波形のパターン

図 3-2 の 1 は、典型的な衝撃圧を示すもので、F 列と、A 列のみに現れた。ほとんどの場合 $P_p = P_{max}$ となり、 $t_p = 0.01^s \sim 0.1^s$ であった。2 は B, C, D, E 列の波形の大半を代表する。圧力は、段波の進行とともに増加、 $P_{max} = P_d$ となった。3 は、衝撃圧が発生するパターン的一种であるが、 t_d がほとんどゼロである。A 4 に時折あらわれた。4 は、これも衝撃圧が発生するパターンの中で、比較的 t_p が長く、 t_d も 0.1^s 程度の値をとる。F 列・A 4 で時折発生した。5 は、G で衝撃圧が発生する時のパターンで、 $0.1^s \sim 0.2^s$ の間に 2～3 回の衝撃圧が発生した。圧力の最大値 P_{max} の水平方向分布、鉛直分布を示したのが、図 3-3 である。図によると、B, C, D, E 列ではほぼ、静水圧程度で、衝撃的な圧力が作用するのは、A 列（特に A 4）

G、そして F 列であることがわかる。そこでこれ以降、圧力に関しては、F 列、A 列、G に限って議論することにする。

3.2 圧力最大値 P_{max} と、B, Bg の関係

図 3-4 は、 $B_g = 12.5\text{cm}$ における、A 列、F 列の P_{max} と B の関係、及び t_s （段波が F 4 に到達した時刻を 0 とした時の圧力記録から求めた、段波の到達時間）と B の関係を示したものである。この図を見ると、 P_{max}, t_s は、水路幅にはほとんど、関係しない様に思われる。次に、 B_g の影響を調べるために、A 4

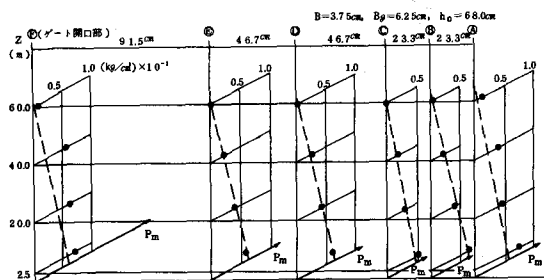


図 3-3 圧力最大値の各列における鉛直分布

と F 4 の圧力の最大値 $P_{\max}$ と B_g/B の関係を示したものが、図 3-5 (a), (b) である。図中の C_{pm} は以下の式で計算した。

$$C_{pm} = P_{\max} / \frac{1}{2} \rho u_m^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ただし } u_m = L/t_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

L , F 4 から A 4 までの距離

また、 P_{68} は、実験直前の貯水槽内水深 6.8 cm に対応する静水圧である。ただし、 B_g/B の物理的な意味は、A 列と F 列では異なる。A においては、水路を流れる、単位幅流量の一つの指標であり、他方、F 列では、図 3-6 よりわかるように、開口部の幾何的形狀の特徴をあらわすものである。図 3-5 によれば、A 4 に関しては、 $P_{\max}$ は B_g/B についても、ほとんど無関係と思われるが、このことに関しては、後述する。

F 4 に関しては、 B_g/B の増大とともに、 $P_{\max}/P_{68}$ の値が増大する傾向がある。F 4 に見られる、このよ

うな傾向について、以下の説明を試みる。ゲートの上昇速度（後述）を考えると、ゲートが上り終る前にすでに水の先端は、F 4 に到達している。従って、水面形状は、Ritter⁽¹⁾ の解の様な、開口部で $\frac{4}{9} h_0$ の水深を持つ、下に凸な放物線形ではなく、むしろ、オリフィスから出る流れに近いと考えられる。この流れは、本来、水深によってのみ決まるはずであるが、 B_g が大きい程、開口部の損失の度合が小さく、かつ開口を出た流れは、直ちに側壁に衝突して、流路を直角に曲げるため（図 3-6 参照） B_g が大きい程、流れ中央部の拘束度が大きくなるため、 $P_{\max}$ が増加するものと考えられる。これは、流れの発生する非常に初期の状態、即ちゲート上昇開始後、最大 30ms 内での現象である。

3.3 先端部の速度 u と衝突角 θ と B , B_g の関係

段波の先端速度 u は、摩擦を考慮しない場合には、Ritter の解により、 $u = 2\sqrt{gh_0}$ となる。摩擦を考慮した場合には Whitham⁽⁶⁾ 等の計算では、時間とともに $2\sqrt{gh_0}$ から減少し、その減少の度合は、初期が急激で、次第にゆるやかとなって行く。ある時刻の瞬間の先端速度を $u_R(t)$ とすると、

$$u = L/t_s = \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} u_R(t) dt \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり、実験で求めた速度 u は、 $u_R(t)$ より大きい値となる。図 3-7 は、 $t_s = u/\sqrt{gh_0}$ と B の関係を示したものである。 ξ は、 B , B_g に無関係に一定値のまわりを、バラついている様に見える。そこで ξ の分布を調べてみたのが、図 3-8 である。 ξ は、平均値 $\xi = 1.55$ のまわりに、正方向にひずんだ形となっている。

次に、衝突角 θ と B , B_g の関係を図 3-9 に示す。これも、 B あるいは B_g にはほぼ無関係に $\theta = 5^\circ \sim 15^\circ$ の間に分布している。

以上、実験データを見る限り、 u , θ とともに、 B , B_g には無関係であった。前述した様に、 B_g/B は単

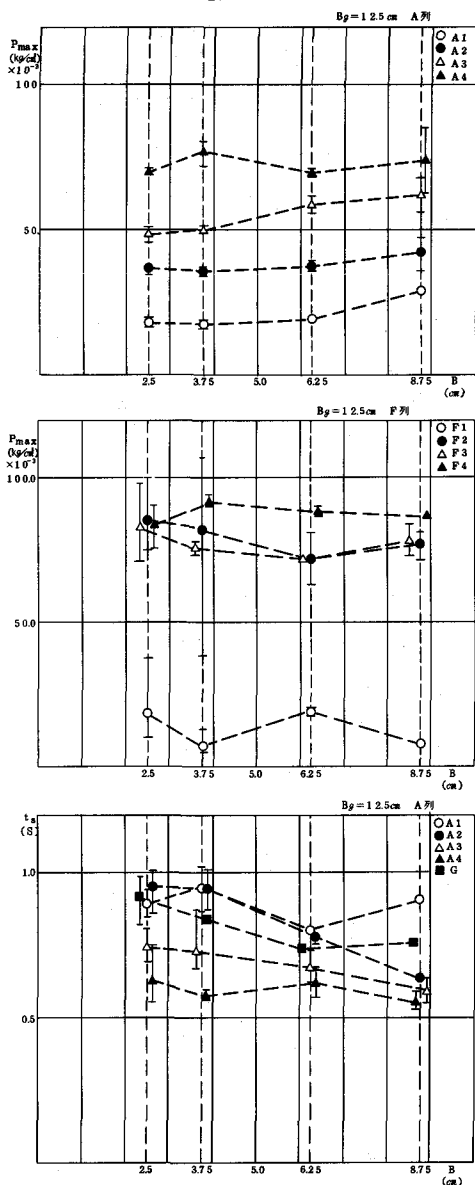


図 3-4 A 列, F 列における $P_{\max}$, t_s と B の関係

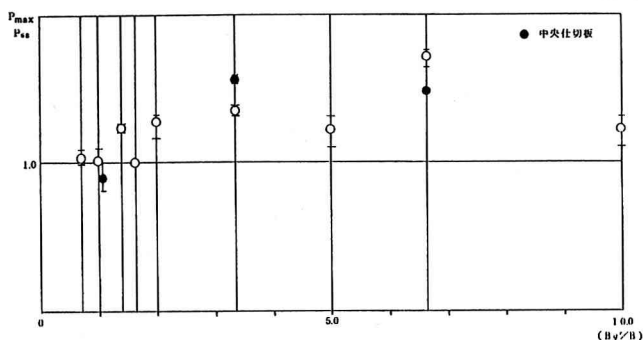
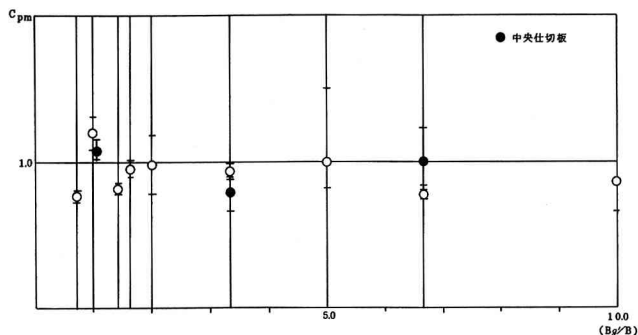


図3-5 Cpm Pmax/P68 と Bg/B の関係

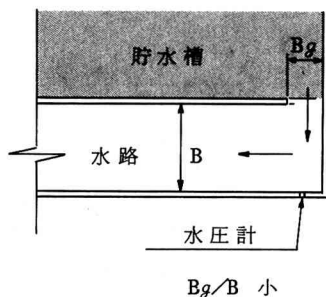
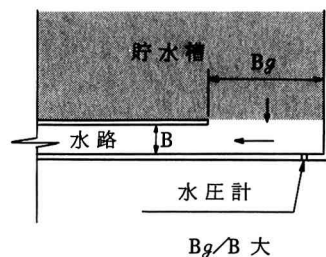


図3-6 F列における Bg/B の意味

位幅流量の指標であることを考えると、 u も θ も Bg/B に無関係であることは、理解し難い。実際、 θ の精度には幾分誤差が大きかったことから、次節で数値計算により、 Bg/B と θ の関係をもう少し詳しく検討することにした。

3.4 計算による定性的説明

- (1) θ と u 通常・ダム破壊流れの数値計算には、次式であらわされる浅水理論が用いられる。

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} = -ix gh - \frac{gn^2}{h^{1/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad \dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial y} = -iy gh - \frac{gn^2}{h^{1/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 x, y , 水平直角座標、 t , 時間、 h , 全水深、 MN , x, y 方向の流量、 g , 重力加速度、 ix, iy , x, y 方向の水底勾配、 n , マニングの粗度係数である。上記の理論は今回の実験を完全にシミュレートする事は、不可能であるが、 Bg/B と θ の関係を定性的に把握するために、初期条件を工夫して、用いることとした。先端条件には、松富の理論に従い、初期条件としては、図3-10に示す様に、Ritter の解が成立するものとした。

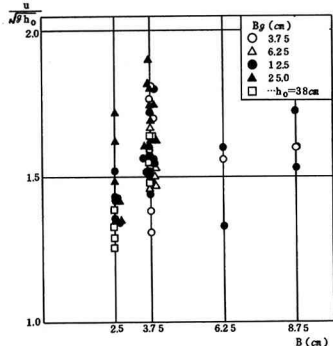


図3-7 ξとBの関係

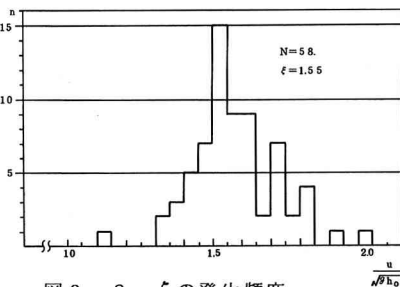


図3-8 ξの発生頻度

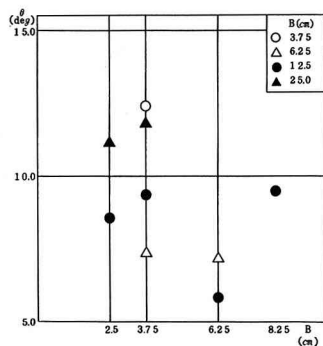


図3-9 θとBの関係

図3-11は、 $B_g/B = 2.0, 4.0$ のシミュレーション結果であるがこの先端部を見ると、両者にはほとんど差はなく、僅に、 $B_g/B = 4.0$ の方が、 θ が $Ke <$ 読み取れる。また、これは実験でも観察されたことであるが、負方向の段波の進行が見られず、ゲード前面の水位は、ほぼ一定の形状を保っている。 B_g/B の増加にもかかわらず、先端部の形状が、僅しか、変化しない理由は、次の通りと考えられる。本実験では、狭い水路に直角に開口がある。従って、流れが開口から出始めた初期の状態では、流れを規定するものは開口部であるが、時間が経過して、開口部前面の水深が上昇した状態では、流れは水路幅部を「新しい開口部」として流れるようになり、ゲートのあった開口部は貯水槽の一部の抵抗と比の存在に過ぎなくなる。従って、開口部 B_g によらず、 B のみによって決まる。この事は、あまり高い精度は得られなかったが、開口部前面に取付けたプロペラ流速計の流速の値からも、定性的に説明できた。しかし、現段階の計算では、粗度や、初期条件、波速にまだ問題があるため、今後詳細な検討が必要であると考えている。

(2) Crossの理論 今回の実験では、水路中央部での圧力 A_4 の値が、 B, B_g に対して無関係であった。Crossによると、ドライベット状を、進行する段波が直立壁に衝突する時の底面から Z_0 の高さにおける圧力は、次式であらわされる。

$$P = \frac{1}{2} \rho u^2 C_p \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_m} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 u ；衝突する段波の速度、 C_p ；衝突角 θ によって決定される係数、 $\lambda_m = Z_w/ut$ で θ の関数 $\lambda_0 = Z_0/ut$ 、 Z_w ；直立壁と自由表面との交点（図3-12参照）、 t ；時間である。(6)式は、 θ が一定であれば $\lambda_0/\lambda_m \rightarrow 0$ で最大となり、

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho u^2 C_p \dots\dots\dots (7)$$

である。 C_p と θ の関係は、図3-13の様である。今回の実験範囲である $5^\circ \sim 15^\circ$ では、 C_p の変化は非常に小さいことがわかる。従って、本実験で、 A_4 の P_{max} に B, B_g の影響が、明瞭に現れなかったのは θ が上述の範囲で変化しても、 P_{max} に対する寄与は少なく、図3-7に示した u の変動幅に吸収されてしまったものと考えられる。

3.4 仕切板の影響 本実験では、段波同志の衝突を取り扱ったがこれを鏡像現象とみなして、水路中央に仕切板（直立壁）を設置し、それに段波を衝突させた現象と等価と見なすことができる。そこで、段波同志の衝突と等条件で、段波を衝突させる実験を行い、両者による圧力の違い、および、直立壁に使用する圧力と、水路側壁に使用する圧力の違いを調べた。図3-14は直立壁に作用した圧力とその時側壁に作用した圧力、および、同条件での段波同志の衝突による圧力の三つを比較したものである。三者は、大差なく鏡像の仮定と、圧力の2次元性（等方性）が確かめられた。

3.5 ゲート上昇速度の影響 今回の現象は、ゲート上昇開始後

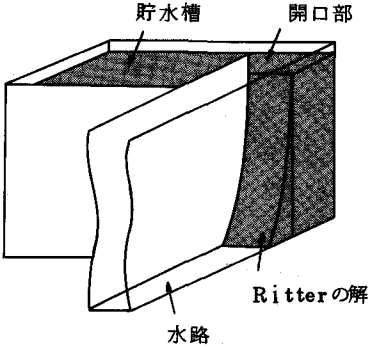


図3-10 初期条件

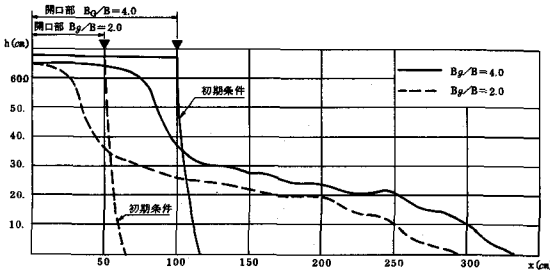


図3-11 数値シミュレーションによる段波の波形

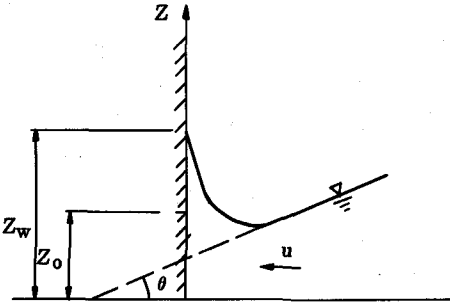


図3-12 Z_w の説明

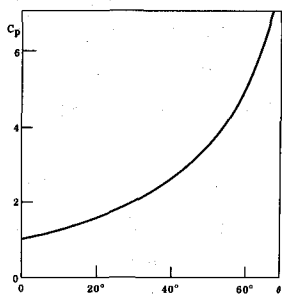


図 3-13 $C_p \sim \theta$

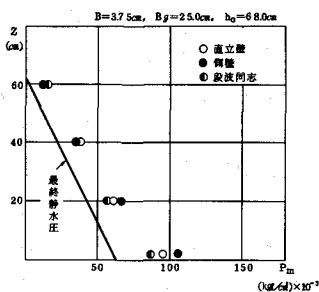


図 3-14 仕切板の影響

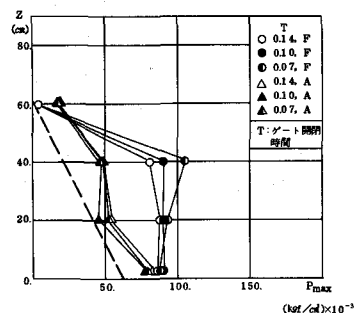


図 3-15 衝撃圧の作用時間の頻度

0.5 秒程度の短時間で終了するため、実験の計画に当ってはゲートの上昇速度を出来るだけ速くする工夫をした。図 3-15 は、ゲートの上昇速度を 3 段階に変化させて、実験を行い、F, A 列の圧力について、比較したものである。F 2 (底面から高さが 40 cm) で、上昇速度が速い程、Pmax が大きくなる傾向のある他は図に示す上昇速度の範囲では、水理現象は、ほとんど変化しないものと考えられる。

3.6 衝撃圧の作用時間と圧力 衝撃圧が作用する場合、工学上問題となるのは、その圧力値と作用時間の関係である。今回の実験の衝撃圧について、圧力の立ち上がり時間 t_p (作用時間) の発生頻度と、その時間に対する圧力のピーク値 P_p 、およびその積 $t_p \times P_p$ を示したのが、図 3-16 である。強大な圧力が作用する範囲は t_p が 15~35 ms の間で、頻度は高いが、力積は小さい。また力積が大きい所では、その頻度は相対的に小さかった。

4 結 論

- (1) 衝撃圧の発生する場所は、開口部直前の F 列、水路中央部の A 4 および G であった。
- (2) 全測定中の最大圧力は、F 4 で発生し、その値は $1.8 \sim 1.9 \rho g h_0$ であった。(図 3-5(b))
- (3) 水路幅 B, 開口幅 Bg による、水路幅中央での圧力の違いは、ほとんど見られなかった。
- (4) 開口部直前の F 4 の圧力は、Bg が大きい程増加した。
- (5) Bg の影響が顕著なのは、ゲート開放直後の非常に短い時間においてであった。

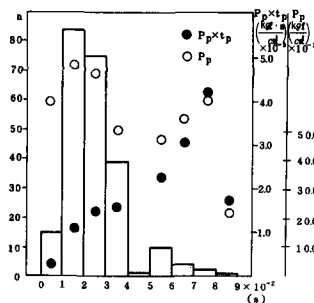


図 3-16 衝撃圧の t_p と P_p

参 考 文 献

- (1) Stoker, J.J., Water Waves, Interscience Publishers, New York, 1957, 567P.
- (2) E. Cumberbatch, The impact of a water wedge on a wall. Univ. of Manchester, Department of Mathematics, 1960, Journal of Fluid Mechanics, Vol 7 pp353-373.
- (3) RALPH H. CROSS, Water surge forces on coastal structures, Univ. of California, Berkeley, HEL 9-10 July, 1966.
- (4) Fukui, Y., Nakamura, M., Shiraishi, H., and Sasaki, Y., Hydraulic study on tsunami, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Tokyo, Vol 6, 1963, pp.67~82.
- (5) 松富英夫, ダム破壊流れの二次元数値解析, 土木学会第 27 回水理講演会論文集, pp. 23~28.
- (6) Whitham, G.B., The effects of hydraulic resistance in the dam-break Problem, Proceedings of Royal Society of London, Series A, Vol. 227, pp.399~407, 1955.