

JET 下の衝撃圧の実験的研究

experiment study on the impact force of jet water

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 吉川幹司 (Motoji Yoshikawa)
 北海道大学大学院 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)
 北海道大学大学院 正員 佐伯浩 (Hiroshi Saeki)

1、はじめに

防波堤沖側にある程度以上の海底勾配が存在する場合、入射砕波は急速な浅水変形を受け、砕波を伴って堤体に衝突する。特に砕波直後の JET を有する波浪が直立堤に入射する場合 JET の接触直後に波圧が急激に発達し、その圧力ピークは合田式により与えられる波圧の数倍に及ぶこともある。この衝撃砕波圧は局所的なケーソン及び被覆ブロックの被害の直接的な原因である可能性があり、この衝撃砕波力に関して古くから多くの実験的研究がなされてきた。衝撃圧のピークとその継続時間との関係から衝撃圧の時系列をモデル化し継続時間からピークを推定しようとする動向が近年の代表的な予測手法の様である。(例えば, Walkden et al, 1996)

Hattori et al (1996) は、衝撃波圧発生時の水面形のビデオ画像から、Bagnald 型の波圧減衰振動が堤体と JET によって囲まれたエアチューブの断熱圧縮過程を通して空気圧変動に起因すると結論づけた。さらにその後、Hattori らの“仮説”を基本として Bagnald 型砕波圧を取り扱う多くの研究が報告されている。また、このエアチューブの規模により、砕波圧ピークが変動するという砕波圧の空気圧依存性を指摘する研究もある。(Hattori et al, 1994, Walkden, 1999)

しかしながら、現象を気液二相流として複雑にパラメーターを増やすよりも、流体の衝撃圧発生時の挙動を先ず解明することは、封入空気の影響を検証するために不可欠と考える。

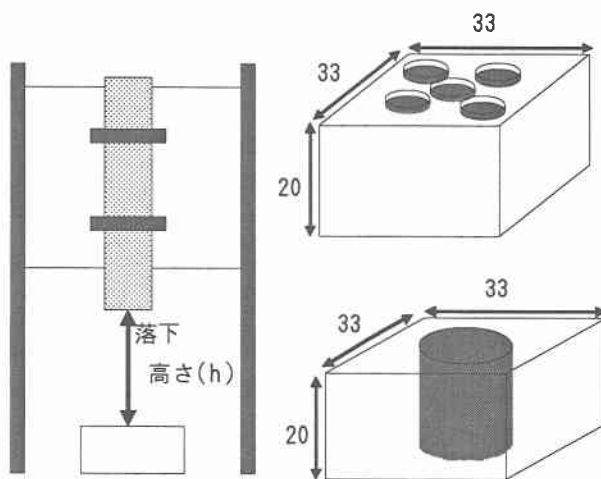
実際に封入エアチューブ内の空気圧の計測がなされておらず、砕波圧と空気圧の直接的な関係が得られていない点、及び完全に密封されたエアチューブ形成が困難である三次元波浪実験においても Bagnald 型砕波圧が計測される事がある点から、この現象における封入空気の寄与を再度検証する必要がある。

本研究は自由落下水の壁面衝突時の衝撃圧を計測し、衝突時に発生する振動及びピークの発生特性を議論するものである。

2、実験方法

実験は、図 1 に示すように自由落下する JET を発生させる装置を用いて行われた。終端にラテックスシートが張られた塩化ビニールパイプが架台に設置される。塩化ビニール内に一定の水を注入し、パイプ内を貫通する針によってラテックスシートを破くことで瞬時に注入水を落下させることができる。計測装置に依存する流体力の差異をしらべるため、JET 下に図 2 に示す様に波圧計及び 2

分力計が設置された。実験は表 1 に示すパイプ径(d)、パイプ終端の高さ(h)、注入水量の異なる ケースについて行われた。なお、衝撃流体力は瞬時に急激に変化するため、そのピーク及び時間変化がサンプリングタイムに依存する可能性があるため、500Hz、1kHz、2kHz、5kHz、10kHz の 5 種類のサンプリングタイムについて比較を行った。また、密封された空気の衝撃力への寄与をしらべるため波圧計と波圧計固定版上面の間にくぼみをあけ、JET 着水時に JET と波圧計間に空気を密閉できる構造をもたせ計測した。



▲図1 実験装置

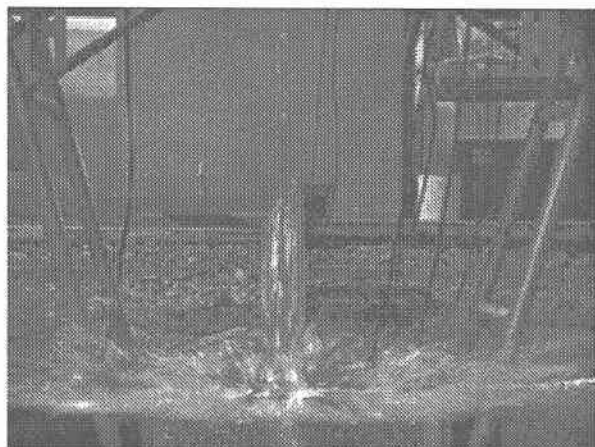
▲図2 波圧計(上)と分力計(下)の固定装置

	落下高さ(h)	パイプ径(d)	水の量
case1	50cm	5.6cm	1230cm ³
case2	70cm	5.6cm	1230cm ³
case3	90cm	5.6cm	1230cm ³
case4	110cm	5.6cm	1230cm ³
case5	130cm	5.6cm	1230cm ³
case6	150cm	5.6cm	1230cm ³
case7	50cm	8.3cm	2710cm ³
case8	70cm	8.3cm	2710cm ³
case9	90cm	8.3cm	2710cm ³
case10	110cm	8.3cm	2710cm ³
case11	130cm	8.3cm	2710cm ³
case12	150cm	8.3cm	2710cm ³

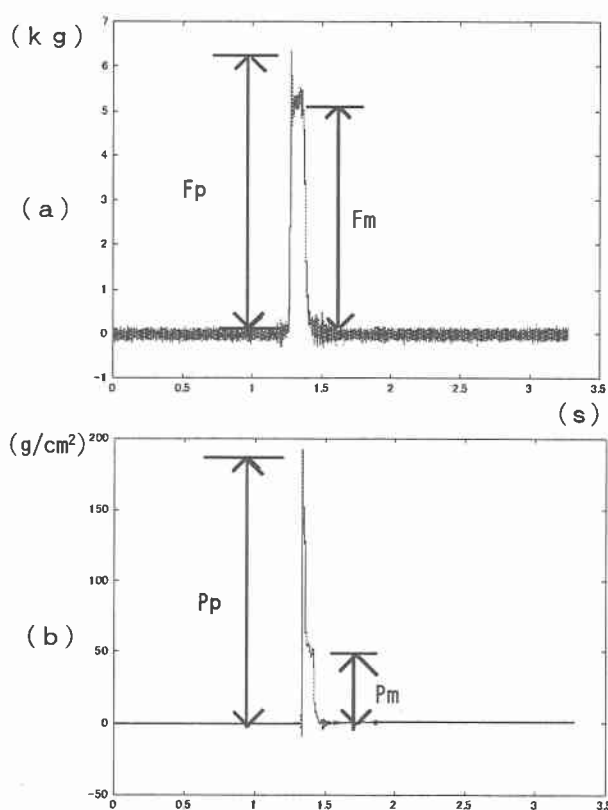
▲表1

3, 結果

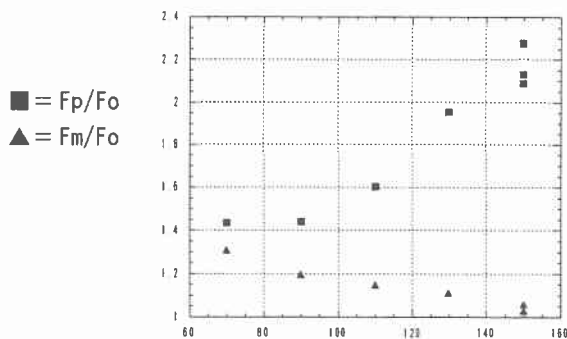
写真1は水柱の着水直後の水面形のスナップショットである。着水直後、JETのフロントは同心円状に側方に広がる。次に衝撃力発達過程を議論していく。



▲写真1 JET 着水直後の水面形



▲図3 衝撃力(a)と衝撃圧(b)の時系列 (s)



▲図4 h に対する \$F_p\$ と \$F_m\$

落下高さ (cm) ことがわかる。\$h\$ の増加に伴い、70 Hz から 100 Hz の

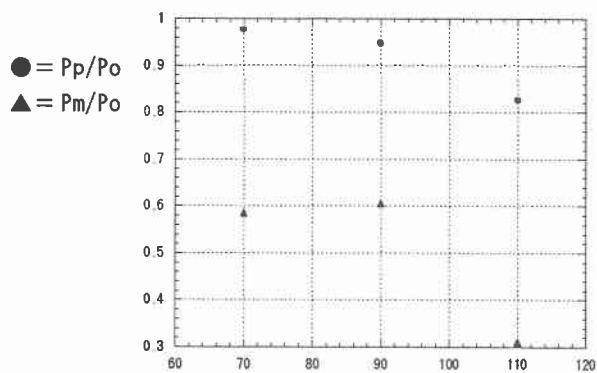
3.1 衝撃流体力

図3は、衝撃流体力発生時の典型的な時系列である(分力計(a) case4, 10kHz、波圧計(b) case10, 10kHz)。(a)、(b) 両者とも、JETの着水後急激に値が増加してピークをもち、落下継続間、高周波の激しい振動が確認できる。分力計による流体力及び波圧計による水圧の初期ピーク値と落下継続時間中の平均値をそれぞれ \$F_p, F_m\$ 及び \$P_p, P_m\$ と定義する。図4は \$F_p/F_o, F_m/F_o\$ の落下高さ \$h\$ との関係調べ

たものである (\$F_o = \int_A \rho u^2 dA\$、ここで \$\rho\$ は密度、\$u\$ は

着水点での速度)。それぞれの値は同一ケース3回の試行の平均値である。\$h\$ が小さいケースでは、\$F_p/F_o\$ と \$F_m/F_o\$ は大きな差はないが、\$h\$ の増加と共に \$F_p/F_o\$ の値が指数関数的増加する。衝突時の流速の増加と共に \$F_m\$ に比べ初期ピークの流体力が支配的になることを示す。case6に対するサンプリング周波数の比較から、特にピーク値を算出するためには、5KHz以下の周波数では不適当となる可能性があるといえる。

図5は波圧計で計測した case8, case9, case10の衝撃圧 \$P_p/P_o\$ と \$P_m/P_o\$ (\$P_o = \rho u^2\$) を表す。これらの値は同一ケースで異なる位置の波圧計による結果の平均値である。波圧計の結果は前述した分力計のものとまったく異なる傾向を示し \$h\$ の増加とともに \$P_p/P_o\$ 及び \$P_m/P_o\$ は減少する。JET着水時圧力が空間的に分布を持っている影響に寄因している可能性が考えられる。一方、\$h\$ の大きいケースにおいて初期変動値 \$P_p - P_m\$ が大きくなる傾向 \$h\$ が分力計の結果と類似する。

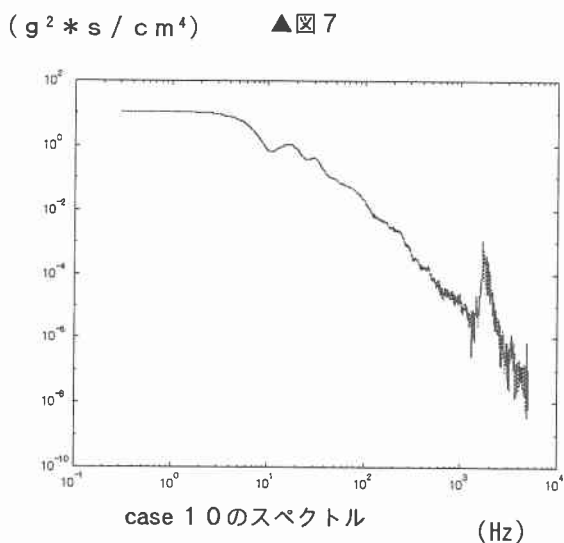
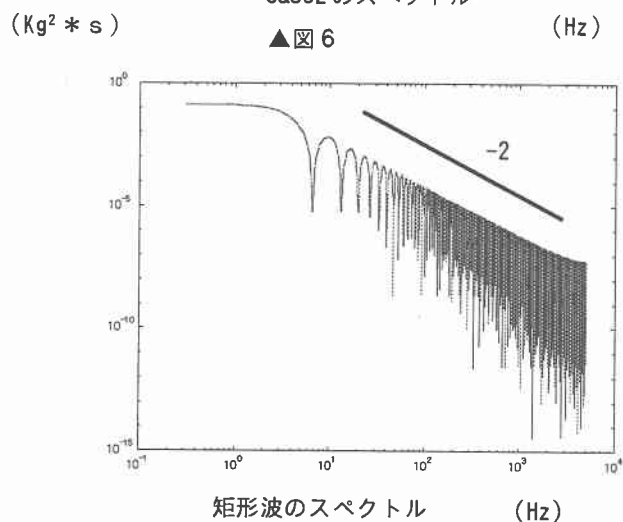
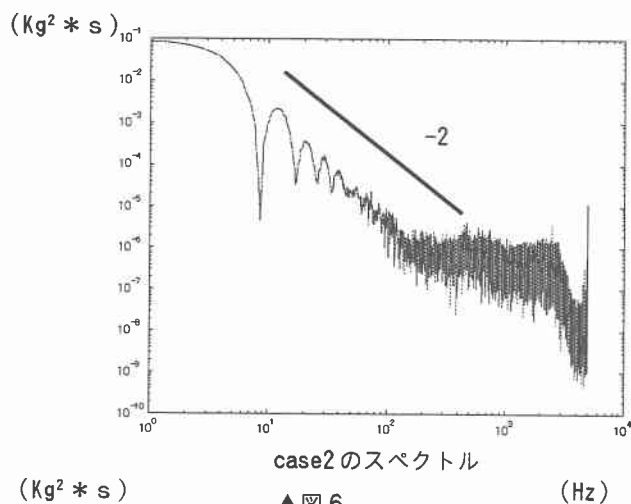


▲図5 落下高さ (cm) \$h\$ に対する \$P_p\$ と \$P_m\$

3.2 周波数特性

初期ピークをはじめ、落下継続中の振動成分を調べるためそれぞれのケースについてエネルギースペクトルを比較する。FFTにより計算されたスペクトルを分力計の結果については3回の試行、波圧計については5回の試行実験から異常ケースを取り除きそれぞれ平均した結果をしめす。なお、分力計及び波圧計の設置板の固有周波数はそれぞれ約450 Hz、1100 Hzであった。\$h\$ の低いケース(図6参照)では100 Hz以下の低周波数域においてほぼ矩形波のスペクトル(図7参照)と同様の勾配をもつことがわかる。\$h\$ の増加に伴い、70 Hz から 100 Hz の

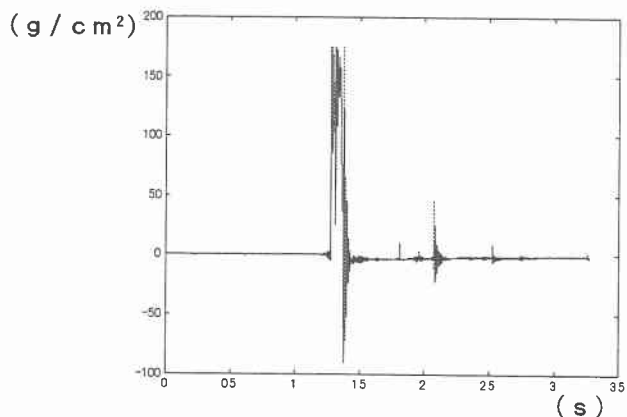
周波数帯に明らかに矩形波のそれとは異なるピーク及び勾配が現れるようになる。図8は波圧計によって計測された圧力のスペクトルを表す。分力計から得られたもの(図6参照)と比較すると100Hz近傍のスペクトルの発達は顕著ではなく、矩形波のスペクトル勾配と大差ない。一方、平均を取る前の個々のスペクトルは特に100Hz前後の中周波数領域で多様に変化していることから、JETにおいて圧力は強い局所性を有しているといえることができる。



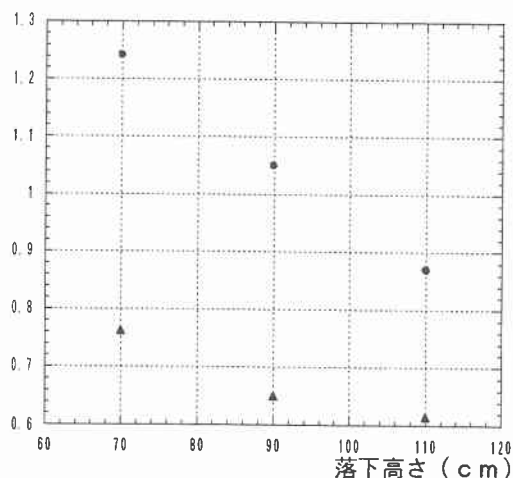
▲図8

3.3 空気溝の影響

衝撃碎波力発生時の空気塊の寄与を議論するため、波圧計前面に空気溝を設けたケースの結果を調べた。図9は、case 8に対する圧力の時系列であり、典型的な圧力変動傾向を表す。図3(b)と比較すると明らかのように初期ピークに続き2次ピークにも同程度の圧力がはたらいっているのがわかる。この差異が空気の圧縮に係わるものかはあきらかではないが、同様な結果が他の多くのケースに現れていた。図10は、空気存在時の P_p / P_o 及び P_m / P_o の結果である。JET流速の増加と共に $P_p - P_m$ が減少する。これは前節で議論した空気なしの条件下の結果と全く逆の傾向であり、空気溝が何らかの影響を与えている可能性があるが、データにバラツキも多かったためさらに詳細なデータを蓄積する必要がある。図11(a)、(b)はそれぞれ波圧計から得られたcase 8とcase 10のスペクトルを表している。前節で示したh及び管径が等しいケースの結果図8と比較すると、低周波数領域ではほぼ両者は類似した特徴をもつが、高周波数帯の4000Hz近傍で有意なピークが確認できる。このピークはhの増加と共に発達することからJETの運動量に依存する空気溝を有するケースの特有な特性といえる。一方、JETの着水時、空気溝内の空気の圧縮性が衝撃圧に寄与するとすれば、空気溝の容積を球に換算すると自然周波数は約370~380Hzと予測できる。図11(a)中の200~600Hzに明瞭ではないが傾配の変化するスペクトルが表れており、空気の圧縮性が流体に何らかの影響を与えている可能性があるが、その有意性は依然不明である。

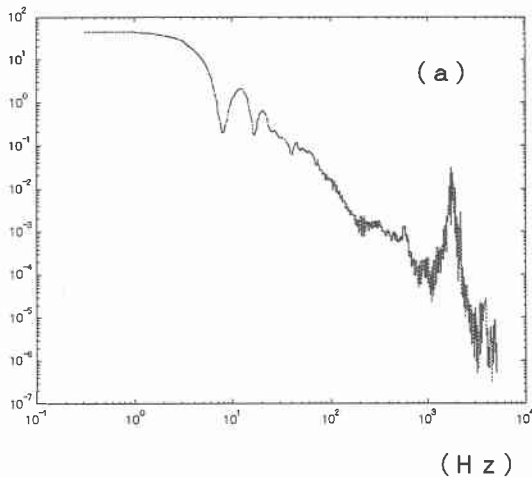


▲図9 空気溝をもつcase 8の時系列

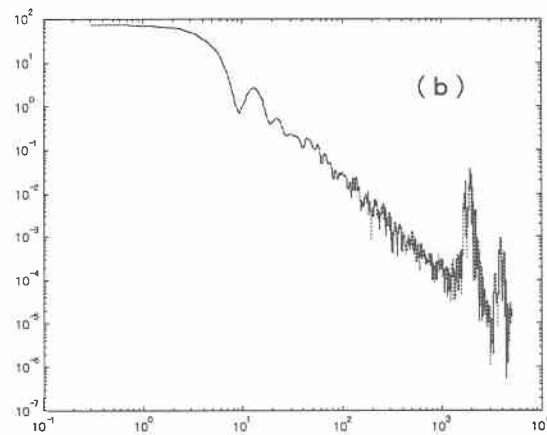


▲図10 空気溝をもつケースに対するPpとPm

($g^2 \cdot s / cm^4$)



($g^2 \cdot s / cm^4$)



▲図 1 1 空気溝をもつ case8(a)と case10(b)のスペクトル (H z)

4. 結論

JET のもつ基本的性質を明らかにするため、円柱JET の落下実験により、単純に水塊が着水時に与える衝撃力が調べられた。砕波時の衝撃波力は種々のパラメーターに依存するため、直接的な方法でこの現象を説明することは困難である。本研究は水塊と物体が衝突する現象だけに着眼し以下に示す基本的特性を明らかにした。

・JET の着水直後に急速に発達し最大値となるピークをもつ。その後水塊の落下継続中に高周波で振動する激しい変動を持つ。

・衝撃圧は局所的に変化するため、その面積積分値である分力計による測定値と相似形をなさない。

・水塊の衝突速度が増加すると初期ピーク値は指数関数的に増加する。しかしながら空気層がJET 着水面に分布すると、この傾向は崩れる。

・100Hz 前後にJET 着水に起因する特徴が現れ、10000Hz 近傍に空気層の影響が発生する可能性がある。もちろん空気の圧縮性が衝撃力に寄与するなら空気層の規模にこの特性周波数は依存する。

参考文献

- 1)Walkden,M.J.A.,Hewson,P.J.,and Bullock,G.N:Wave Impulse Rediction For Caisson Design, Coastal Engineering,pp.2584-2597,1996.
- 2)Hattori,M.,Tujioka,N:Dynamic Responce of Vertical Elastic Walls to Breaking Wave Impact, Costal Engineering,pp.2456-2469,1996
- 3)Hattori,M.,Arami,A.,and Yui,T:Wave impact pressure on vertical walls under breaking waves of various types,Costal Engineering,pp79-114,1994.