

衝撃砕波圧の発達メカニズムの解明に向けた 基礎的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANISM TO PRODUCE IMPACT WAVE PRESSURES

大塚淳一¹・田中康文²・渡部靖憲³

Junichi OTSUKA, Yasufumi TANAKA and Yasunori WATANABE

¹学生会員 工修 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-6828 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

²学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-6828 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-6828 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

In this study, the mechanism to produce impact pressure on a wall under fresh water and sea water jets is experimentally investigated through water drop tests. The effects of entrapped air, which is a model of an air pocket formed at coastal structure under breaking waves, are also discussed. Higher impact pressure is found to occur under sea water jets rather than fresh water jet for all cases. It is also found that the entrapped air has a role to reduce the pressure maximal and to change peak frequencies of the impacts. New model to estimate variations of the impact pressure with coefficients determined through the experiments is proposed. It is roughly applicable to estimate the maximum pressure and the duration of the impacts under the jets.

Key Words : *Impact pressure, Breaking wave, Entrapped air*

1. はじめに

砕波を伴う波浪が防波堤や栈橋床版に衝突する際に極めて強い衝撃圧が発生し、躯体の滑動・転倒や部材の局所破壊を引き起こすことが報告されている^{1), 2)} (図-1 参照)。沿岸構造物の破壊は国土保全を脅かす重要な問題であり、多くの実験や現地観測によって衝撃砕波圧の発生・発達機構の解明が行われてきた^{3)~5)}。しかし、衝撃砕波圧は波浪条件だけではなく壁面と砕波ジェットに封入される空気塊、混入気泡、砕波ジェット衝突時の水面形など多くのパラメータが密接に関係する極めて複雑な現象であり、依然として不明な点が多く定量化、一般化には至っていない。つまり、砕波ジェットの水面形や混入気泡量は同一波浪条件においても波ごとに大きく異なるため計測結果の再現性が低く、さらに、実験や現地観測から得られる衝撃砕波圧の計測結果は流体、封入空気塊、混入気泡の影響を同時に含んでいるため、各パラメータの時間的・空間的寄与を定量化することができない。

近年、衝撃砕波圧の各パラメータに着目した詳細な研究が行われている。渡部ほか (2005)⁶⁾ は微小圧縮性近似された運動方程式系に対して高精度数値解析を行い、砕波ジェットの単純化されたモデルと

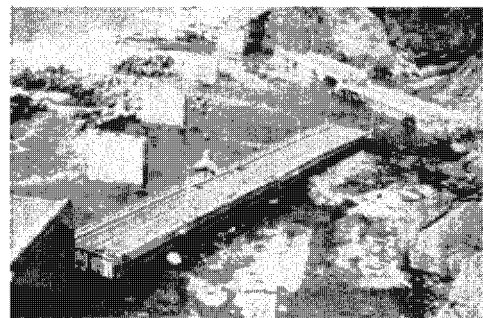


図-1 台風襲来時に衝撃圧によって落橋した大森大橋

して円柱状流体ジェットを壁面に衝突させ、封入空気塊の非存在下においても淀み点近傍で流体にはたらく圧縮に起因する圧縮-膨張振動が発生することを示している。また、Bullock et al. (2001)⁷⁾ は海水および淡水で衝撃砕波圧の計測を行い、生成気泡が多い海水では衝撃圧のピーク値が淡水よりも低下することを示している。

本研究は衝撃砕波圧の発達メカニズムを解明するための基礎的研究として、円筒容器からジェットを落下し、壁体衝突時に作用する衝撃圧を計測するとともに、ジェットを密閉された容器内に落下し、ジェットによって圧縮される封入空気存在時の衝撃圧を計測することにより、衝撃圧発達過程における

流体・封入空気塊の寄与を定量化，特徴化することを目的としている。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験は透明アクリル製の貯水パイプ，導水パイプ，容器(20cm×20cm×10cm，厚さ 2cm)と，これらを支持する厚さ 2cm の鋼板製台座で構成される実験装置によって行われた(図-2 参照)．容器は計測時に振動しないように鋼製金具によって台座上に固定されている．内径 10cm の貯水パイプ下端にラテックスシートを均一に緊張して張り貯水パイプ内に水を溜め，鋼製針でシートを破ることにより容器底面に向かってジェットを落下させた．容器底面には高感度動圧力センサー(PCB PIETRONICS 社製，ICP 型，M106B)が設置されており，ジェット衝突時に発生する衝撃圧をサンプリング周波数 25kHz で計測した．また，容器上部に設置したエア抜き穴を閉じて容器内を密閉し，ジェットを落下することにより衝撃砕波の封入空気をモデル化し圧縮空気存在下における衝撃圧を計測した．本実験で用いた高感度動圧力センサーは従来のものと比較し，感度および応答性が高く(それぞれ 43.5mV/kPa，9 μ s 以下)，圧力変動を高精度で計測することが可能である．導水パイプ側方からパイプ中央部を通過するレーザー光をフォトダイオードに向けて照射し，ジェットがレーザー光を遮ると同時に発生するトリガ信号により計測を開始した．また，このトリガ信号によって着水点側方および鋼製台座内に設置された高速ビデオカメラ(400fps)を起動し，ジェット着水点側方および容器底面からジェット着水時の様子を撮影した．

なお，実験を行う前に実験装置の固有周波数および圧力センサーの共振周波数を調べた結果，実験装置の固有周波数は約 1.2kHz，圧力センサーの共振周波数は 60kHz 以上であることを確認している．

(2) 実験条件

表-1 に実験条件を示す．実験ケースはジェット落下高さ h ，貯水高さ h_w ，淡水と海水，封入空気がないケースとあるケースをそれぞれ変化させた計 12 ケースであり，各ケース試行回数 20 回の実験を行った．

3. 実験結果と考察

(1) ジェット落下実験(封入空気がないケース)

図-3 は淡水ジェット(RUN1)が衝突する様子を着水点側方から撮影した連続画像である．ジェットはパイプ中央部から釣鐘状に落下し，この形状を維持しながら着水する．全てのケースに対する 20 回の試行計測においてジェット形状の変動は小さく，再

表-1 ジェットの条件

ケース	落下高さ h (cm)	貯水高さ hw (cm)	着水速度 v (m/s)	水塊	封入空気
RUN1	20	6.4	1.90	淡水	なし
RUN2				海水	
RUN3			1.74	淡水	あり
RUN4				海水	
RUN5	30		2.50	淡水	なし
RUN6				海水	
RUN7			2.35	淡水	あり
RUN8				海水	
RUN9	50		4.00	淡水	なし
RUN10				海水	
RUN11			3.33	淡水	あり
RUN12				海水	

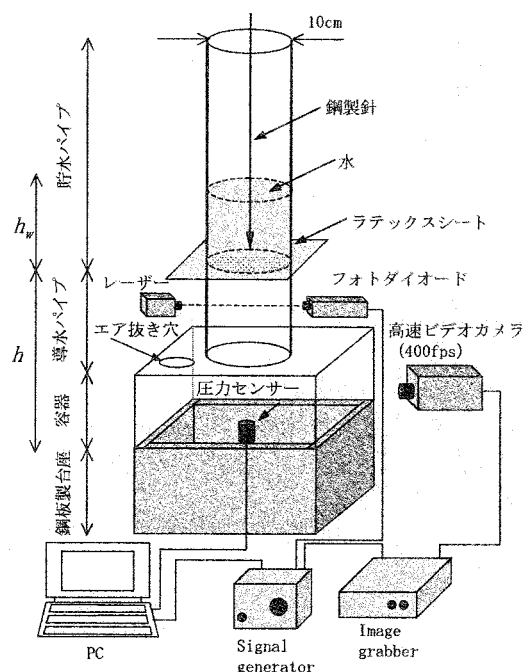


図-2 実験装置

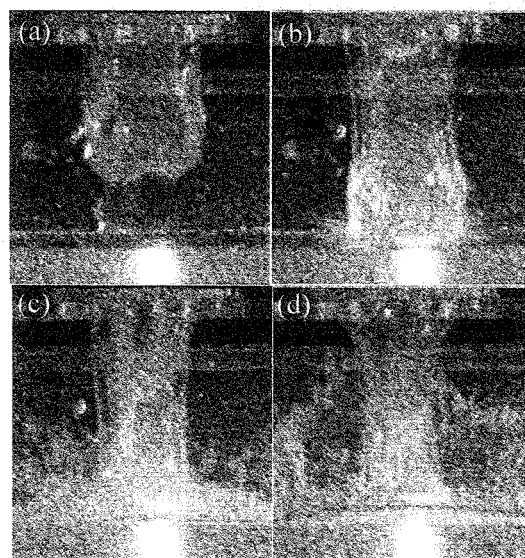


図-3 ジェット落下時の様子を着水点側方から撮影した連続画像(RUN1，封入空気塊なし，時間間隔40ms)

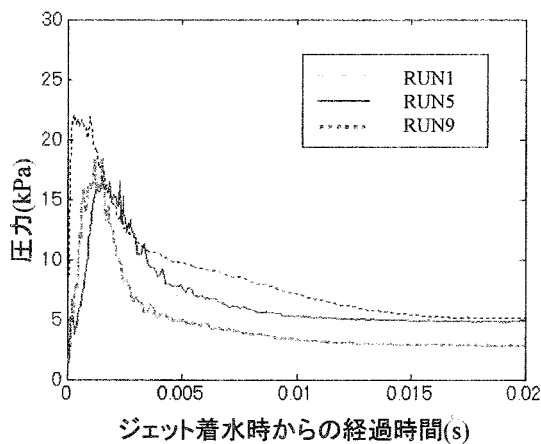


図-4 淡水ジェットに対する圧力変動の時系列 (封入空気なし, 試行回数 20 回のアンサンブル平均)

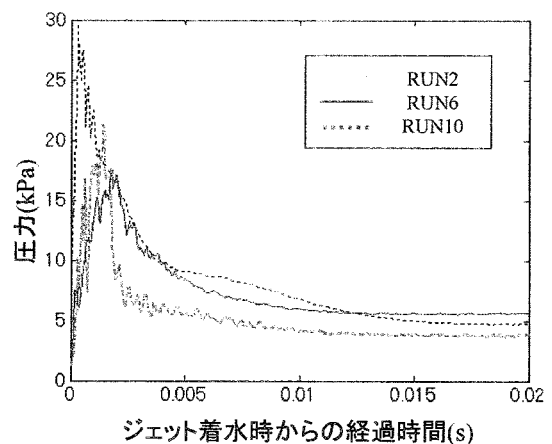


図-5 海水ジェットに対する圧力変動の時系列 (封入空気なし, 試行回数 20 回のアンサンブル平均)

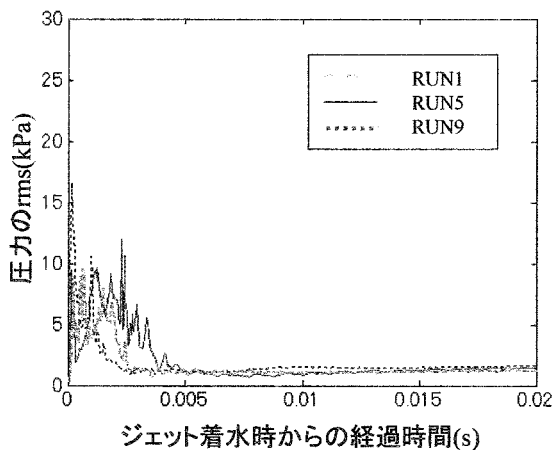


図-6 淡水ジェットの試行に対する圧力の rms の時系列 (封入空気なし)

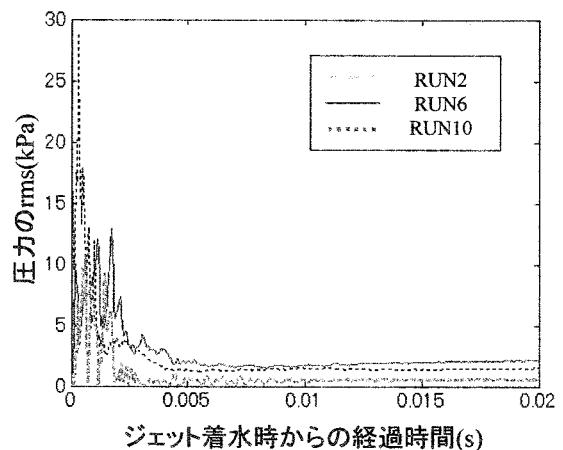


図-7 海水ジェットの試行に対する圧力の rms の時系列 (封入空気なし)

現性の高いジェットが発生したことを確認している。高速ビデオカメラによって容器底面からジェット着水点を撮影した結果、全ケースにおいて容器底面とジェット間に空気塊あるいは気泡の混入は確認されなかった。

図-4 および図-5 はそれぞれ淡水と海水ジェットに対する試行回数 20 回のアンサンブル平均圧力変動の時系列であり、ジェット着水時から 0.02 秒間の結果を示している。ジェット着水後、淡水、海水ともにジェット着水速度が速いほど衝撃圧の最大値は大きく、最大値までの到達時間が短い典型的な衝撃圧が発生する。ジェット着水速度が同じケースを比較すると、海水ジェットの方が衝撃圧の最大値は大きく、30%以上増加した。淡水と海水の比重の違いは約 3%であり、このような大幅な衝撃圧の増加を比重の違いだけでは説明できない。この、海水ジェットの衝撃圧の増加は淡水で見積もった衝撃力が実海域で過小評価となる可能性を示しており、この原因の究明が今後必要である。

図-6 および図-7 はそれぞれ淡水と海水ジェット

による各ケースの試行に対する圧力の rms の時系列であり

試行に対する圧力の分散の程度を示している。各ケース衝撃圧が最大となる時間において最も分散が大きく、衝撃圧の最大値が大きいほど分散も大きい。RUN10 における圧力の rms の最大値は衝撃圧の最大値 (図-5 参照) とほぼ等しいことから、ジェット着水速度が速いケースでは各試行の衝撃圧の最大値は平均衝撃圧の倍以上に達している可能性がある。

図-8 および図-9 はそれぞれ淡水と海水ジェットに対する着水時に計測された圧力スペクトルのアンサンブル平均を示している。なお、衝撃圧は図-5 から図-7 に示したように極めて短い時間における現象であり、その波形を Fourier 変換した場合、周波数の-2 乗に比例する矩形波としての性質が強く現れる。したがって、本研究では衝撃圧のスペクトルに対して周波数の 2 乗を乗じてその影響を補正している。RUN1, RUN5 および RUN2, RUN6 において約 300Hz を中心とする比較的広い高エネルギー周波数帯が存在し、ジェット着水速度および淡水と海水の

違いによる明確な影響は確認できない。

(2) ジェット落下実験（封入空気存在下）

図-10 は封入空気存在下における淡水ジェット (RUN1) が衝突する様子を容器側方から撮影した連続画像である。封入空気存在下においてもジェットは封入空気がないとき (図-3 参照) と同様に釣鐘状に落下し、その形状を維持したまま容器底面に着水する。全 20 回の撮影においてジェット形状に大きな変動は認められず、封入空気存在下においても再現性の高いジェットが発生したといえる。なお、他のケースにおけるジェット形状についても大きな変動は確認されなかった。ジェット落下後、ジェットは導水パイプおよび容器内の空気を急速に圧縮しながら落下する。ジェット先端部は内部空気の抵抗を受けながら落下するため着水速度は理論値と比べて 10%~20% 程度低下した。なお、高速ビデオカメラによって着水点近傍を底面から撮影した結果、各ケースとも圧力センサー設置位置に底面とジェットに封入された空気塊および混入気泡が存在しないことを確認している。

図-11 および図-12 はそれぞれ淡水、海水に対する試行回数 20 回のアンサンブル平均圧力変動の時系列であり、ジェット着水時から 0.02 秒間の結果を示している。図-4、図-5 の結果と比較すると衝撃圧の最大値は封入空気がないときと比べて大きく低下しているため、封入空気が衝撃力を抑制していると考えられる。この封入空気による衝撃力の低下率はジェット着水速度が遅いほど大きく、RUN3 では 70% 以上となる。一方、図-4、図-5 で示した結果と同様に、ジェット着水速度が同じケースでは海水のほうが衝撃圧の最大値は大きな値を示し、増加率は最大で 70% 以上に及ぶ (図-12, RUN4)。

図-13 および図-14 はそれぞれ淡水、海水に対する圧力スペクトルのアンサンブル平均を示している。なお、圧力スペクトルは図-8、図-9 と同様に周波数の 2 乗を乗じた値を用いている。淡水、海水ともに 7Hz~30Hz にかけてジェット落下に伴う圧縮空気の圧縮膨張振動に起因するものと考えられる周波数帯を確認することができる。一方、RUN3 と RUN7 において 1500Hz~2500Hz の高周波数帯に卓越周波数を確認することができ、ジェット着水速度が大きくなるにつれて高周波域へ移行する傾向がある。また、RUN4 においても約 2000Hz に卓越周波数が存在する。このような高周波域における卓越周波数および着水速度の影響を受ける卓越周波数は封入空気がないときには確認されなかったことから、封入空気存在下における特徴的な卓越周波数であると考えられる。

4. 単一水塊衝突時の衝撃力変化の推定法

3 章で得られたジェットの壁面衝突時に発生する衝撃圧変化を単純なモデルで表し検討を行う。平均衝撃圧の典型的な時間変化である急速に立ち上がり

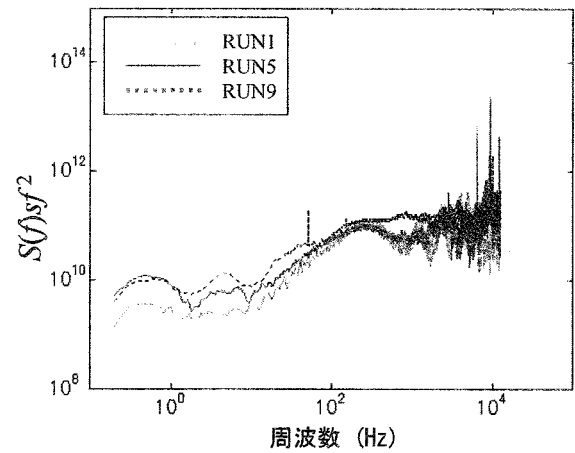


図-8 淡水ジェットに対するアンサンブル平均圧力スペクトル（封入空気なし）

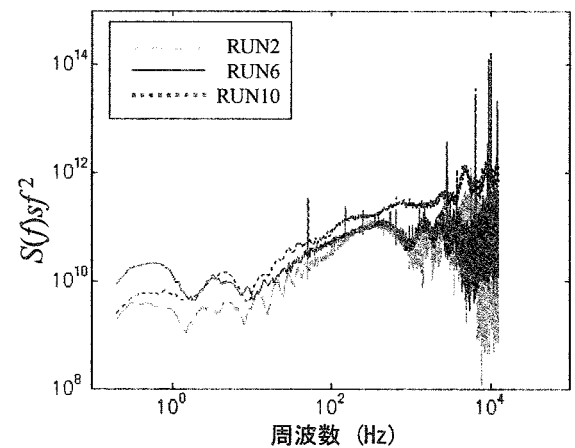


図-9 海水ジェットに対するアンサンブル平均圧力スペクトル（封入空気なし）

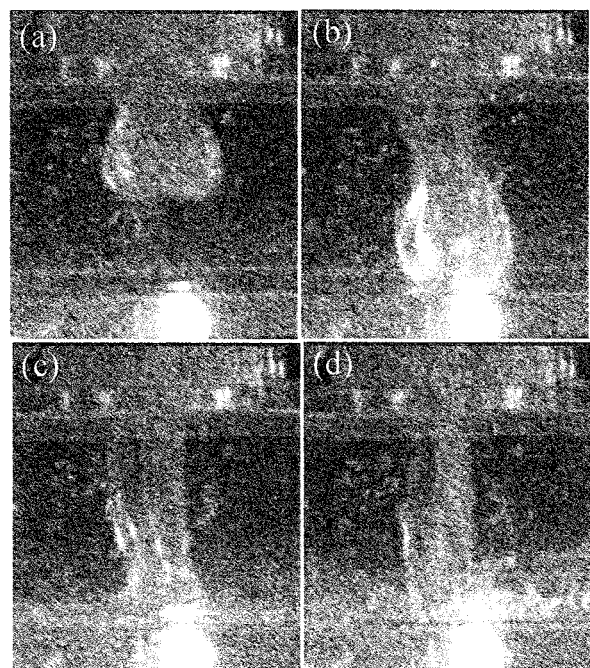


図-10 ジェット落下時の様子を着水点側方から撮影した連続画像（封入空気存在下, RUN1, 時間間隔 40ms）

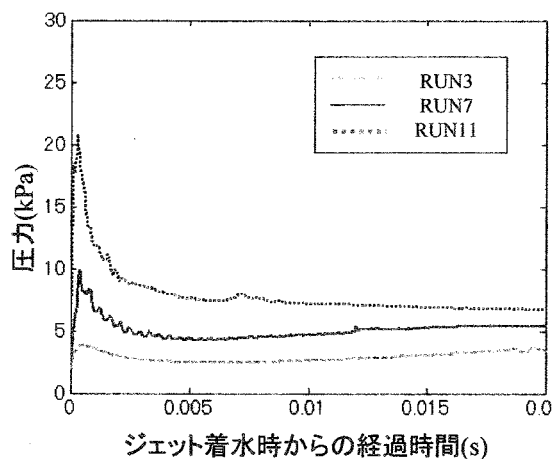


図-11 淡水ジェットに対する圧力変動の時系列（封入空気存在下，試行回数 20 回のアンサンブル平均）

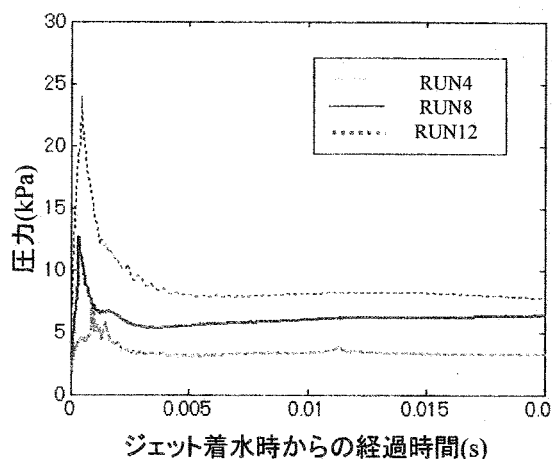


図-12 海水ジェットに対する圧力変動の時系列（封入空気存在下，試行回数 20 回のアンサンブル平均）

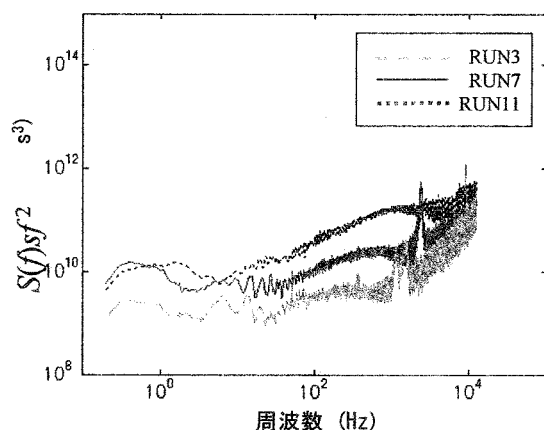


図-13 淡水ジェットに対するアンサンブル平均圧力スペクトル（封入空気存在下）

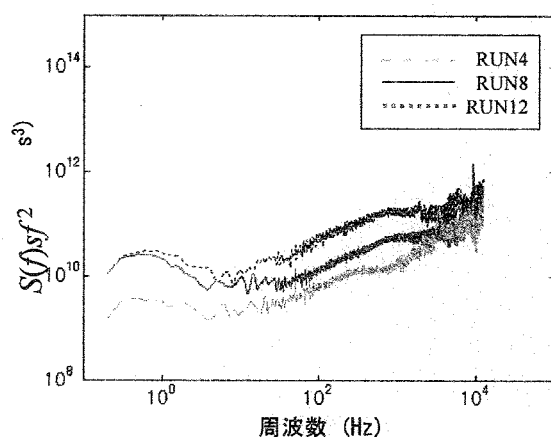


図-14 海水ジェットに対するアンサンブル平均圧力スペクトル（封入空気存在下）

ピークを持ち，その後指数関数的に減衰する特徴を次の関数で近似する．

$$P = a_1 a_2 \frac{t}{T_1} \exp\left(-b \frac{t}{T_2}\right) \quad (1)$$

全てのケースに対してフィッティングを行い，未知定数 a_1 ， a_2 と立ち上がりおよび減衰時間スケールを以下のようにモデル化した．

$$a_1 = 1 \text{ (淡水)}, \quad a_1 = 1.3 \text{ (海水)} \quad (2)$$

$$a_2 = 1 \text{ (封入空気なし)}, \quad a_2 = 0.4 \text{ (封入空気存在下)} \quad (3)$$

$$b = 1 \quad (4)$$

$$T_1 = -C_1 V + d_1 \quad (5)$$

$$T_2 = -C_2 V + d_2 \quad (6)$$

ここで， $C_1 = 2 \times 10^{-5} \text{ (s}^2/\text{m)}$ ， $d_1 = 8 \times 10^{-5} \text{ (s)}$ ， $C_2 = 3 \times 10^{-4} \text{ (s}^2/\text{m)}$ ， $d_2 = 1.9 \times 10^{-3} \text{ (s)}$ （封入空気なし）， $d_2 = 1.4 \times 10^{-3} \text{ (s)}$ （封入空気存在下）
なお，これらの定数は本実験の範囲内でのみ適用できる．

図-15 および図-16 は同一落下高さに対するケース（RUN5, RUN7 および RUN6, RUN8）の平均衝撃圧の時間変化と式(1)による推定結果を比較したものである．推定の結果は部分的に実験結果との逸脱はあるものの，ラフに全てのケースの圧力変化の特徴を表しており平均衝撃圧やその継続時間等，必要な基本物理量は見積もることが可能である．なお，瞬時の最大碎波圧を取得するためには図-6，図-7 で示したような圧力のばらつきもまたモデル化する必要がある．

5. 結論

本研究により以下のことが明らかとなった．

(1) 現在の沿岸構造物の設計では，淡水の模型実験

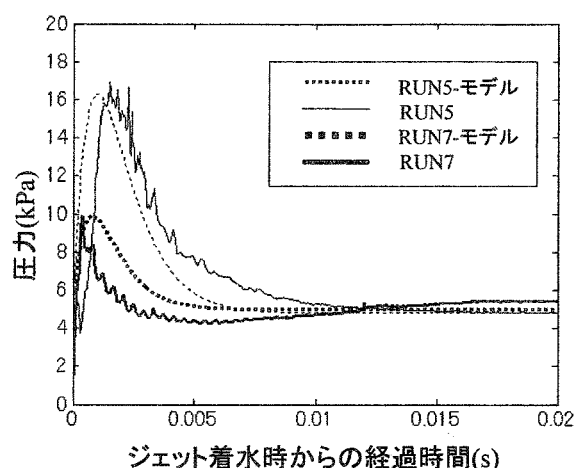


図-15 同一落下高さにおける平均衝撃圧の時間変化と式(1)による推定結果（淡水使用時）

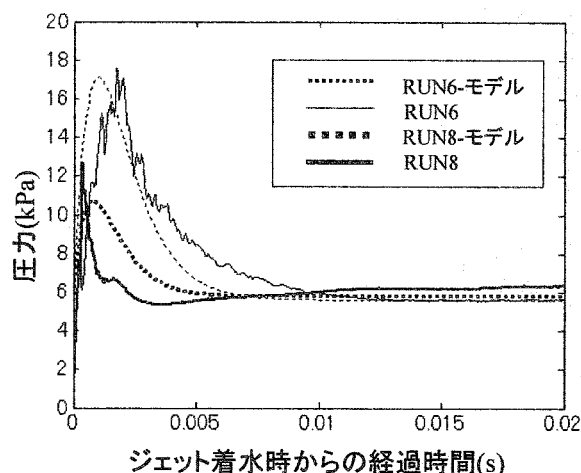


図-16 同一落下高さにおける平均衝撃圧の時間変化と式(1)による推定結果（海水使用時）

の結果を海水と淡水の比重で補正したものを波圧公式に使っている。しかし、本実験結果から海水と淡水で何らかの物理現象の違いがあり、その影響は大きく、単に比重で補正するだけでは不十分である可能性がある。

- (2) ジェット着水速度が速いケースでは衝撃圧の分散が大きく、各試行における衝撃圧の最大値は平均衝撃圧の最大値の倍以上に達する可能性がある。
- (3) ジェット着水時に封入空気が存在する場合、封入空気は衝撃圧を抑制する効果がある。ジェット着水速度が遅いケースでは封入空気がない時と比べて衝撃圧の最大値は70%以上低下する。
- (4) 封入空気存在下にジェットを落下した場合、高周波数域に卓越周波数が現れる。高周波域における卓越周波数は封入空気がないときには確認されないため、封入空気存在下における特徴的な卓越周波数であると考えられる。
- (5) 本実験で得られた平均衝撃圧における衝撃圧最大値までの急速な立ち上がり、最大値到達後の指数関数的減衰を(1)式で近似した結果、比較的ラフではあるが平均衝撃圧の時間変化を特徴化しており、平均衝撃圧やその継続時間等を

大まかに推定することを可能とした。

参考文献

- 1) 本間大輔, 窪内篤, 山本泰司, 木村克俊: 波浪作用からみた大森大橋の被災原因の推定と復旧後の安全管理に関する実験的研究: 北海道開発土木研究所月報, No.626, pp.16-24, 2004.
- 2) 高橋重雄, 津田宗男, 下迫健一郎, 横田弘, 清宮理: 防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃砕波力について, 海岸工学論文集, Vol.45, pp. 751-755, 1998.
- 3) 合田良実, 原中祐人: 衝撃砕波圧に関する一実験, 港湾技研資料 (32), pp.3-12, 1967.
- 4) Hattori, M., Arami, M. and Yui, T.: Wave impact pressure on vertical walls under breaking waves of various types, *Coastal Engineering*, 22, pp.79-114, 1994.
- 5) Peregrine, D.H.: Water-Wave Impact on Walls, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 35, pp. 23-43, 2003.
- 6) 渡部靖憲, 大友崇行, 猿渡亜由未: ジェットのへ気体衝突時に発生する衝撃圧発達機構について, 海岸工学論文集, Vol.52, pp.736-740, 2005.
- 7) Bullock, G.N., Crawford, A.R., Hewson, P.J., Walkden, M.J.A. and Bird, P.A.D.: The influence of air and scale on wave impact pressure, *Coastal Engineering*, Vol. 42, pp. 291-312, 2001.