

親水性防波堤警報システム「クジラくん」のノズル部しぶき特性

早川 哲也* ・ 鈴木 孝信* ・ 遠藤 仁彦**
 廣部 俊夫*** ・ 木村 克俊**** ・ 林 倫史*****

1. ま え が き

豊かなウォーターフロントの実現のため、港湾において親水性施設の整備が進められている。特に防波堤は海に突き出した位置にあり、景観や魚釣りを楽しむ場として魅力的な空間である。しかしながら、現状では経済性の観点から全く越波しない防波堤を建設することはできず、親水性施設として開放する場合、高波浪時における利用者の安全対策が重要な課題となっている。

現在の親水性防波堤の管理運営においては、波浪注意報や警報に基づき施設の利用を制限している場合が多い。しかしながら、実際の危険は海象条件や海底地形、周囲の構造物などによって場所的、時間的に変化するものであり、波浪注意報のような比較的広域を対象とするものでは、必ずしも施設周辺の危険状況を的確に表していないこともある。例えば、太平洋側の港では波浪注意報が発令されていないときに、うねり性の波により釣り人が海中に転落する事故が発生している（遠藤ら、1995 a）。

そこで、防波堤周辺の危険状況を的確に判断できる新しい高波警報システム「クジラくん」を開発した。図-1は本システムのイメージパースである。混成堤における上部工の港外側を工夫したものであり、水平に設けられた窪み（マウス部）とマウス部から天端上へと通じている切り通し（ノズル部）から成っている。

波がマウス部に衝突するときに音が発生し、かつノズル部においてしぶきが上方に上がる。これらの音としぶきによって、防波堤上の利用者や管理者に危険を知らせるものである。既往の研究では、遠藤ら（1995 b）がマウス部から発生する音について検討しており、構造条件や波浪条件との関係を明らかにしている。

本報告では、ノズル部から発生するしぶきの特性を断面および平面水理模型実験により検討している。さらに、

瀬棚港において試験施工された「クジラくん」の観測を行い、実験結果の現地への適応性を検証した。

2. 実験の概要

断面実験は、長さ85 m、幅1.6 m、深さ3 mの2次元水路で行った。水深 h が123 cmである水平床上に、図-2に示す堤体模型を設置した。静水面からマウス部下端までの高さ h_{s1} を18 cmおよび28 cm、マウス部幅 L_s を10、50および160 cm、ノズル部幅 L_n を0および10 cmに変化させた。マウス部奥行き B_s およびマウス部高さ

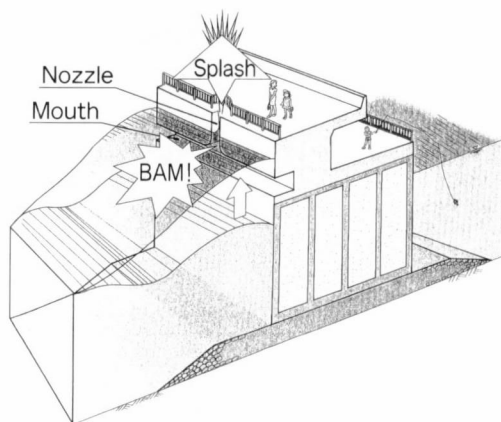


図-1 「クジラくん」のイメージパース

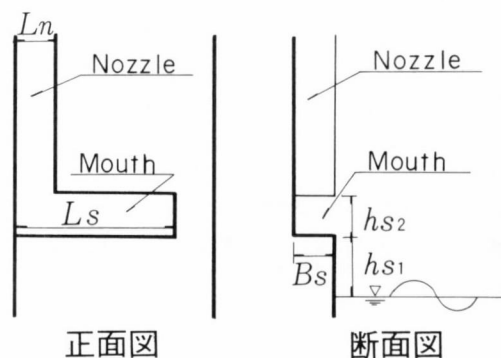


図-2 堤体模型

* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所
 ** 正会員 工博 北海道開発局 港湾部（前開発土木研究所）
 *** 北海道開発局 江差港湾建設事務所
 （前瀬棚港湾建設事業所）
 **** 正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所
 ***** 正会員 北日本港湾コンサルタント(株) 環境水理課

h_{s2} については、それぞれ10 cmと一定にした。また、堤体の天端は越波が発生しないように十分高くした。

平面実験は、長さ19.65 m、幅32.85 m、深さ3 mの水槽において行った。この水槽の中央に、長さが13.2 mの堤体模型を設置し、その内の一部を図-2のような形状とし実験を行った。

実験は規則波を用いて行い、相対水深 h/L が0.095~0.277で、波高水深比 H/h が0.163~0.366の範囲とした。平面実験においては、波の入射角 β を0（直角入射）、30および45°に変化させた。

実験では、ノズル部での波の運動を高速ビデオカメラ（毎秒250コマ）により観察し、しぶき高（マウス部下端からのしぶきの高さ）を目視により求めた。また、堤体前面の波高計により水位の変動を測定し、マウス部中央の奥壁に設置された波圧計により波圧の経時変化を記録した。

3. ノズル部のしぶき特性

(1) しぶきの発生状況

図-3は、ノズル部内の波の運動を $\Delta t = 0.076$ sの間隔で示したものであり、静水面からマウス部下端までの高さ $h_{s1} = 18$ cm、マウス部幅 $L_s = 160$ cm、ノズル部幅 $L_n = 10$ cm、 $h/L = 0.130$ および $H/h = 0.244$ の条件である。波面が階段部にさしかかると、①~②のようにノズル部内に倒れ込み、その後③のように奥壁に衝突する際

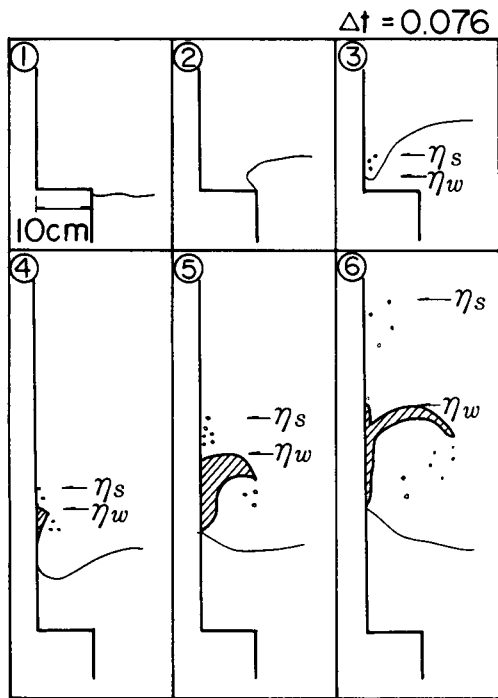


図-3 ノズル部内の波の運動

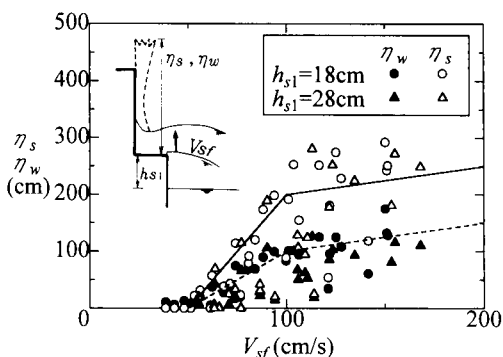


図-4 しぶき高と波面上昇速度の関係

にしぶきが上方に打ち上がる。発生したしぶきは、「飛沫状」のものと「水塊状」のものに分類することができる。それぞれのしぶき高を η_s , η_w として示しており、④~⑥のように「飛沫状」のしぶきは「水塊状」のものよりも高く上がる。

(2) しぶき高

図-4は、マウス部下端からの「飛沫状」と「水塊状」のしぶき高 η_s および η_w とマウス部下端での波面上昇する速度 V_{sf} の関係を示したものである。マウス部幅 $L_s = 160$ cm、ノズル部幅 $L_n = 10$ cm の条件である。 V_{sf} が50 cm/s程度になると、 η_s および η_w は急激に増加し始めるが、100 cm/s以上になると頭打ちとなる傾向にある。また、静水面からマウス部下端までの高さ h_{s1} の影響は見られない。

ここで、 η_s および η_w と V_{sf} の関係は式(1)のように表すことができる。

$$\eta_s(\text{cm}) = \begin{cases} 4V_{sf} - 200 & (50 < V_{sf} \leq 100 \text{ cm/s}) \\ 0.5V_{sf} + 150 & (V_{sf} > 100 \text{ cm/s}) \end{cases}$$

$$\eta_w(\text{cm}) = \begin{cases} 2V_{sf} - 100 & (50 < V_{sf} \leq 100 \text{ cm/s}) \\ 0.5V_{sf} + 50 & (V_{sf} > 100 \text{ cm/s}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(3) マウス幅の影響

遠藤ら(1995b)は、 $L_n = 0$ cm（ノズル部なし）の条件で、波面がマウス部上端に達した時に空気が閉じ込められることを報告している。図-5は、マウス部中央での波圧波形を示したものであり、 $h_{s1} = 18$ cm、 $L_s = 160$ cm、 $h/L = 0.175$ 、 $H/h = 0.244$ の条件である。ノズル部幅 L_n が0 cmの条件に比べて10 cmでは、衝撃的な波形を示しており、波圧の最大値も2倍程度の値である。 L_n が0 cmの場合はマウス部内に閉じ込められた空気がクッションとなるが、10 cmではノズル部より空気が抜けるため、波面が直接マウス部奥壁に衝突し衝撃的な波圧が作用していると考えられる。よって、 L_n が10 cmの場合マウス部からノズル部へ抜ける空気の流れが存在し、し

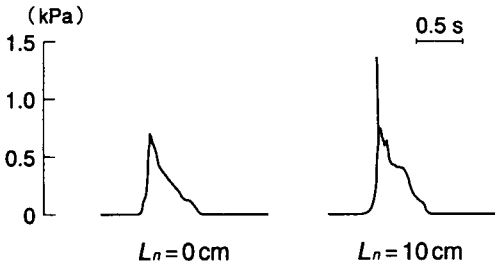


図-5 マウス部中央の波圧波形

ぶきが上方に打ち上がる一つの要因と考えられる。

図-6 は、しぶき高 η_s および η_w に対するマウス部幅 L_s の影響を示したものであり、 $h_{s1}=18$ cm および $L_n=10$ cm の条件である。「飛沫状」のしぶきについては、 L_s が 160 cm と 50 cm の条件を比較すると η_s は同じ傾向を示すが、 L_s が 10 cm (ノズル部のみ) の条件では小さい値を示すようになる。よって、「飛沫状」のしぶきはマウス部からノズル部へ抜ける空気の影響を受けており、 V_{sf} が同じ条件であれば L_s が大きければ η_s も大きくなるが、 L_s が 50 cm 以上になるとほとんど変化しなくなる。一方、「水塊状」のしぶきについては、 L_s の影響は η_s ほどみられず、 η_w は同じ傾向を示している。よって、「水塊状」のしぶきは、マウス部からノズル部へ抜ける空気の影響をほとんど受けていないと考えられる。

(4) 入射角の影響

図-7 は、「飛沫状」のしぶき高 η_s に対する波の入射角 β の影響を示したものであり、 $h_{s1}=18$ cm、 $L_s=160$ cm および $L_n=10$ cm の条件である。斜め入射の条件においても直入射 ($\beta=0^\circ$) と同じ傾向を示しており、斜め入射 45° 以内の条件に対しても、式 (1) が適用できると考えられる。

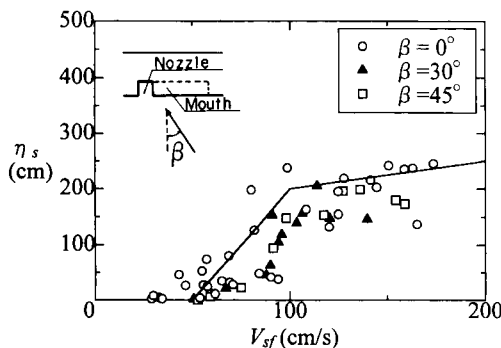


図-7 入射角の影響

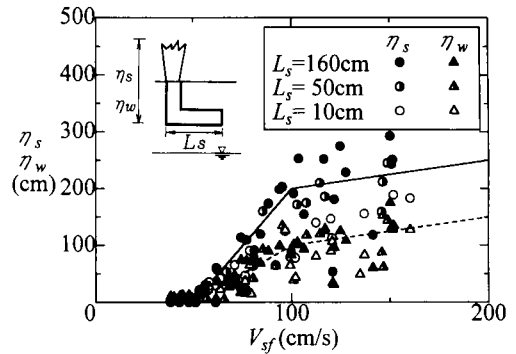


図-6 マウス部幅の影響

4. 「クジらくん」現地検証

(1) 試験施工場所および観測方法

北海道南部の日本海側に位置する瀬棚港において、図-8 に示す防波堤 (東外) に「クジらくん」の試験施工を行った。この防波堤の総延長は約 600 m あり、設置水深は 12~13 m である。また、海底勾配は約 1/50 で、等深線は防波堤にほぼ平行である。冬期間は波向 NW および WNW が卓越し、この防波堤には直角に波浪が入射する場合が多い。

図-9 は、試験施工された「クジらくん」の断面図、正面図および上面図を示しており、防波堤設置水深 h は 12.1~12.7 m、天端高 h_c は 7.0 m である。マウス部およびノズル部を 4 つ設置しており、No. 1 の静水面からマウス部下端までの高さ h_{s1} は 3.0 m、No. 2~4 が 1.8 m である。マウス部高さ h_{s2} 、マウス部幅奥行き B_s およびノズル部幅 L_n は全て 1.0 m、マウス部幅 L_s は 5.5 m である。これらは模型の 10 倍の値であるが、 L_s に関しては模型実験において 50 cm と 160 cm で η_s および η_w が同じ傾向を示していることから 5.5 m とした。

現地観測は 1997 年 1 月および 2 月に行った。しぶき高

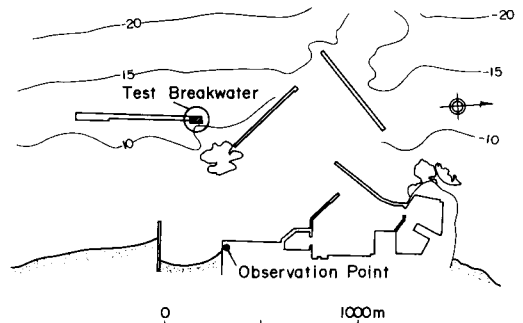


図-8 瀬棚港平面図

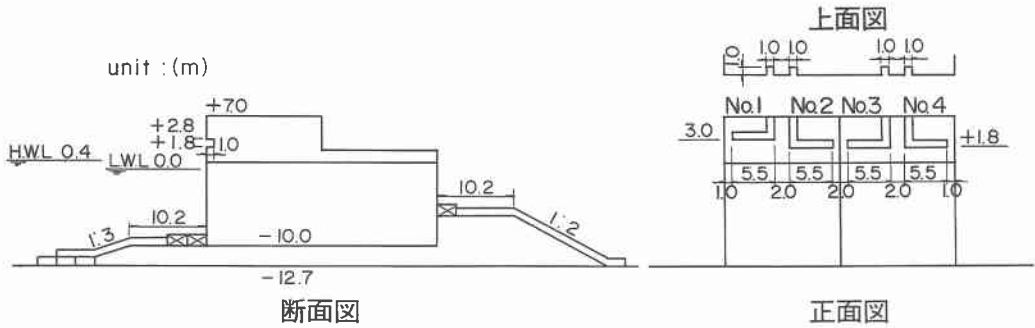


図-9 瀬棚港「クジラクん」

の測定は、約 600 m 離れた岸壁からビデオカメラにより 1 時間毎の 20 分間行った。また、試験施工場所から沖側約 1.8 km の位置に超音波式波高計（水深 53 m）が設置されている。

(2) しぶきの発生状況

写真-1 は、試験施工された「クジラクん」のノズル No. 2 から発生しているしぶきの状況であり、天端上約 4 m の高さまで白色のしぶきが打ち上がっている。

図-10 は、ノズル No. 2～4 におけるしぶき高の最大値 η_{wmax} の経時変化の一例である。図の上段には観測値と計算値を示しており、両者は良く一致する傾向にある。

しぶき高 η_w の算定においては、まず現地波浪観測値から堤体設置位置での最大波高 H_{max} および最大波周期 T_{max} を求め、式 (2) の有限重複波の第 2 近似式（浜田式）を用いてマウス部下端での波面上昇する速度 V_{sf} を計算した。

$$V_{sf} = \left(\frac{d\eta}{dt} \right)_{\eta=h_{s1}} \quad (1)$$

$$\eta = H \cos \sigma t + \frac{H^2}{8} k \frac{\cosh kh_m (2 + \cosh kh_m)}{\sinh kh_m} \cos 2\sigma t \quad (2)$$

ここで、 V_{sf} は波面上昇速度、 h_{s1} は静水面からマウス部下端までの高さ、 H は波高、 σ は $2\pi/T$ 、 k は $2\pi/L$ 、 T は周期、 L は波長、 h_m は換算水深、 t は時刻である。 h_m の算定には、高橋ら (1991) による式 (3) を使用し

た。

$$h_m = \begin{cases} d & (B_M/L \geq 0.16) \\ d + (h-d) \frac{0.16 - B_M/L}{0.05} & (0.11 \leq B_M/L < 0.16) \\ h & (B_M/L < 0.11) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 B_M はマウンド肩幅、 d はマウンド上の水深である。

次に、現地観測では写真-1 に示すような比較的規模の大きい水柱状のしぶきが発生していることから、しぶき高の算定には式 (1) における水塊状の η_w を適用した。ただし、式 (1) は次元を持っており、現地換算する際にはフルードの相似則（実験縮尺 1/10）を用いた。

図-10 の下段にはしぶき観測 20 分間における最大波高 H_{max} 、最大周期 T_{max} を示している。試験堤における高橋ら (1991) による越波発生限界波高 H_{mo} は 4.8 m であり、現地ではこれより小さい波高でしぶきが発生している。よって、防波堤上が実際に危険な状況となる前に人々に知らせることが可能となり、高波警報装置としての有

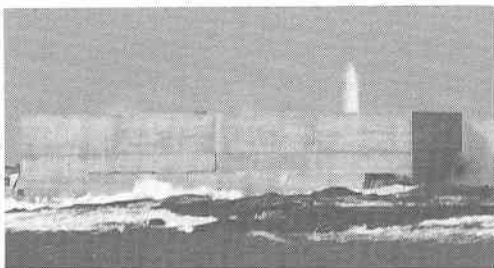


写真-1 しぶきの発生状況

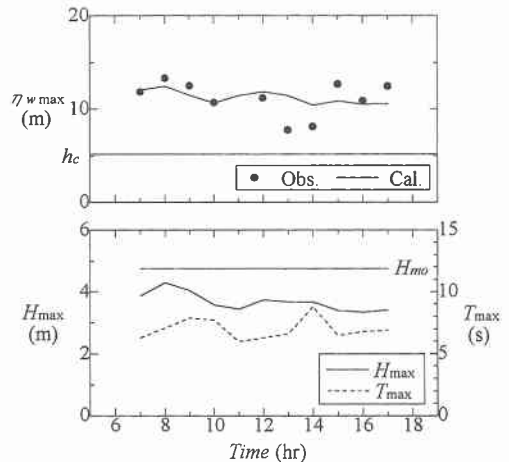


図-10 しぶき高の観測結果

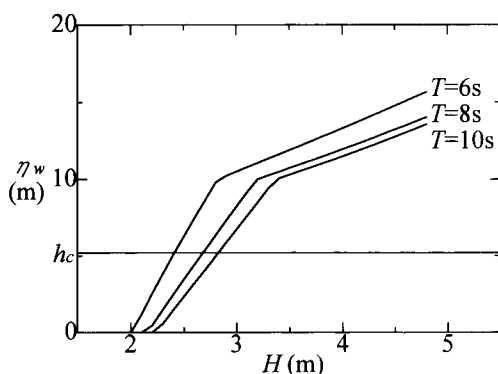


図-11 波浪諸元としぶき高の関係

効性が明らかとなった。

図-11は、式(1)～(3)を用いて試験堤の条件に対して、周期 T をパラメータとして波高 H と「水塊状」のしぶき高 η_w の関係を示している。 $T=6\text{ s}$ の場合、天端上(h_c)にしぶきが発生し始める波高は約2.4 mであるが、周期が長くなるにつれてその波高も大きくなる。また、波高 H が同じ条件であれば、周期が短くなるにつれて、しぶき高は大きくなる。

5. ま と め

親水性防波堤警報システム「クジラくん」について、模型実験によりノズル部から発生するしぶきの特性を検

討し、波浪条件や構造形式との関係が明らかとなった。また、波浪条件により算定されたしぶき高は、現地観測値とも良く一致する傾向にある。これにより、しぶきが天端から発生し始める波高および周期が計算できるため、危険を知らせるタイミングやしぶきが発生してから実際に越波が発生するまでの余裕時間の設定が可能となった。

公共施設として防波堤を一般に開放するためには、利用者の安全に対する様々の配慮が必要である。「クジラくん」は比較的設置が簡単であり、安全対策の有効な手段の一つであると考ええる。

参 考 文 献

- 遠藤仁彦・早川哲也・笹島隆彦・水野雄三 (1995a): 北海道の港湾・漁港における海中転落事故特性について, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 175-180.
- 遠藤仁彦・早川哲也・笹島隆彦・水野雄三 (1995b): 親水性防波堤警報システム「クジラくん」マウス部発生音特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1266-1270.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一朗 (1991): 親水性防波堤上の越波水の運動に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 536-540.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一朗 (1994): 手すりによる越波時の人の転落防止効果に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第33巻, 第1号, pp. 3-35.
- 早川哲也・遠藤仁彦・笹島隆彦・水野雄三・浮津憲一 (1996): 親水性防波堤警報システム「クジラくん」の開発, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 103-108.