

親水性防波堤警報システム「クジラくん」のマウス部発生音特性

遠藤 仁彦*・早川 哲也**・笹島 隆彦***・水野 雄三****

1. ま え が き

豊かなウォーターフロントの具現化の一つの方策として、港湾において親水性防波堤の整備が進められている。一般に防波堤は、海・港などの景観を楽しむのに適しているばかりでなく、魚釣りを楽しむ場としても魅力的な空間となる。しかし、年間数日程度は高波浪によって防波堤上は非常に危険な場所となる。したがって、親水性防波堤を管理・運営するに当たっては、その施設の危険特性を十分把握し、利用者の安全確保に対して細心の注意を払うことが必要である。

既往の施設管理では、波浪注意報や警報を判断基準とし、高波浪時などに施設の利用を制限することにより管理を行っている例が多い。ただし、実際の危険は、場所的または時間的に変化するものであり、波浪注意報のように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場合もある。例えば、太平洋側の港では、通常の天端高さの防波堤において、波浪注意報が発令されていないときにうねり性の波で釣り人が海中転落する例が少なくないことが著者ら(1995)の調査により明らかになっている。

そこで本研究では、親水性施設の高波に対する危険状況が的確に判断できる新しい高波警報システムを提案し、その基本的な特性を水理模型実験および多方向不規則波の数値シミュレーションから検討するものである。

2. 「クジラくん」の基本コンセプトとその課題

図-1は、親水性防波堤の高波警報システム「クジラくん」のイメージパースを示すものである。本システムは、混成堤防波堤の上部工の形状を工夫したものであり、防波堤前面の窪み(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。

マウス部は静水面上に設置しており、堤体前面での打

ち上げ高さがマウス部高さよりも上回ると、波がマウス部内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。これらの発生は、防波堤前面での波の打ち上げ高さによって決まるために、各場所における危険状況を的確に知らせることができる。また、マウス部は、天端面よりも低い位置に設置するために、越波が生じる前に事前に危険を知らせることができるのも大きな特徴である。マウス部の設置位置によって危険を知らせる波高が、設定できるために、実際に越波するような危険状況に至るまでの余裕時間も設定できる。

本システムを実際に適用するに当たり、マウス部からの発生音特性、ノズル部からのしぶき特性などの物理環境と波浪条件との関係を検討する必要がある。また、物理環境の変化に対する防波堤上の人々の心理効果を把握することも重要である。本報告では、マウス部からの発生音特性を中心に検討を加えている。

3. 実験の概要

実験は、全長85m、全幅1.6m、高さ3mの大型2次元水路において行った。堤体は越波しないように天端高さを78cmにした混成堤を用いた。図-2はマウス部の形状を示しており設置水深 h は1.23mである。静水面からマウス部下端までの高さ h_{s1} が18, 28cm, マウス部奥行き B_s が6, 10, 20cm, マウス部高さ h_{s2} は全て10cmとした。

実験波は規則波とし、相対水深 h/L が0.095~0.277の範囲で、波高水深比 H/h が0.163~0.366である。



図-1 「クジラくん」のイメージパース

* 正会員 北海道開発局 港湾部港湾計画課 計画第一係長
 ** 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 環境水工部 港湾研究室
 *** 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 環境水工部 港湾研究室長
 **** 正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所 環境水工部長

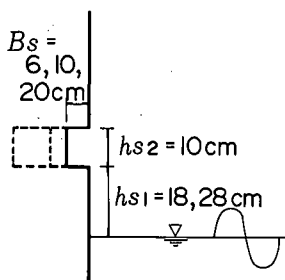


図-2 マウス部

実験では、マウス部の波の運動を高速ビデオ(毎秒250コマ)を用いて観察した。発声音は、騒音計(NA-60)を用いてレベルレコーダーにより音圧レベルを出力するとともに、デジタルデータレコーダー(サンプリング10kHz)によって測定し、スペクトル解析を行った。また、堤体前面には波高計を設置して打ち上げ高さを測定した。

4. マウス部発声音特性

(1) 波の運動と音の発生メカニズム

図-3は、マウス部及びその近傍の波の運動を示したものであり、 $h_{s1}=18\text{ cm}$ 、 $B_s=10\text{ cm}$ 、 $H/h=0.244$ 、 $h/L=0.1752$ の条件である。波面が上昇する押し波時において、マウス部下端に波面が達した後、①～②のようにマウス部下端で剝離した波面が空気を巻き込みながらマウス部内部へ倒れ込んでいく。③になると波面がマウス部上端に達してマウス部に空気が閉じこめられた状況になり、④で流入した水塊がマウス部奥壁に衝突している。その後、前面の打ち上げ高さが上昇するとともに、⑤のようにマウス部内の水塊と空気が混ざり合った状況となる。⑥～⑧に示すように波面が下降する引き波時において、波面がマウス部よりも下がり、マウス部に溜まっていた水塊が落水するようになる。

図-4は、前掲図-3と同様の条件でのマウス部からの発声音圧と音圧レベルの同時波形を示したものである。上図音圧波形は、比較的作用時間の短い始めのピークとその後の比較的最長い時間のピークの2つの大きなピークがあるのが特徴である。波の運動状況との関係を見ていくと、押し波時に最初のピークが生じており、③と④の時に振幅が大きくなっている。また、引き波時において⑥と⑧の状況で振幅が大きくなっている。これら音の振幅が大きくなる位相をそれぞれ以下のように定義することにする。

Phase I a: マウス部が波面で閉じた瞬間にマウス部上端から空気が薄い層で噴出した状況

Phase I b: マウス部内に流入する水塊がマウス部内

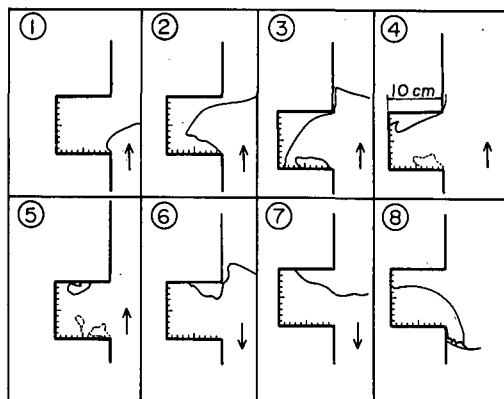


図-3 マウス部近傍の波の運動

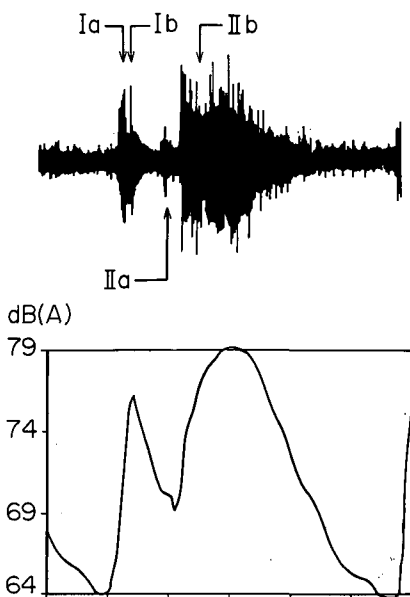


図-4 発声音圧と音圧レベルの同時波形

の壁に衝突した状況

Phase II a: 引き波時において、波面がマウス部上端に達してマウス部に空気が流入した状況

Phase II b: 波面がマウス部よりも下がり、マウス部内の水塊が落水する状況

次に、音圧レベル波形についてみると、Phase I aとI bで一つの大きな山となり、波形が鋭く立ち上がってピークになった後、減衰も大きいのが特徴である。Phase II aとII bでは二つ目のピークとなり、音圧レベルの立ち上がりおよび減衰が比較的緩やかになるのが特徴である。

(2) 音圧特性

図-5は、押し波時における最大音圧レベル SPL1 を示したものである。横軸にはマウス部下端での波面上昇する速度 V_{sf} (高速ビデオで測定) をとっている。SPL1 は、 V_{sf} と B_s/h_{s2} が主なパラメータになっており、条件によって 80~90 dB(A) となる。SPL1 と V_{sf} との関係についてみると、 V_{sf} が大きくなると SPL1 がやや減少し、 V_{sf} がある程度大きくなるとほぼ一定の値になる傾向がある。また、 B_s/h_{s2} については、 B_s/h_{s2} が大きいほど SPL1 が小さくなる傾向があり、 $B_s/h_{s2}=2.0$ の場合には SPL1 が V_{sf} によってほとんど変化しないのが特徴である。これらの V_{sf} や B_s/h_{s2} による SPL1 の相違は、波の運動状況と音の発生メカニズムによって説明することができる。つまり、 V_{sf} がある程度大きくなると、マウス部内への流入水が壁に衝突する Phase I b が生じる前に、マウス部が波面で閉じる状況の Phase I a となり、音圧としては I a の方が卓越して 80~85 dB(A) 程度のほぼ一定値となっているものと思われる。また、 $B_s/h_{s2}=2.0$ の場合には、マウス部の奥行きが大きいため、同様の理由で V_{sf} が小さくても Phase I a の方が卓越し、SPL1 がほぼ一定値になっているものと考えられる。

ここで、 $B_s/h_{s2}=1.0$ の条件において、 V_{sf} をパラメータとして SPL1 を近似すると下式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{SPL1} &= 90 & : V_{sf} < 35 \text{ cm/s} \\ &= 90 - 0.06 V_{sf} & : 35 \leq V_{sf} < 135 \text{ cm/s} \\ &= 84 & : V_{sf} \geq 135 \text{ cm/s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

図-6は、引き波時における最大音圧レベル SPL2 を示したものである。SPL2 は、SPL1 と同様に V_{sf} と B_s/h_{s2} に依存しており、 V_{sf} が大きいほど、また B_s/h_{s2} が大きいほど、SPL2 は漸増する傾向がある。また、その最大音圧レベルは 85~95 dB(A) となっており、SPL1 よりもやや大きくなる。 V_{sf} に依存する理由は、 V_{sf} が大きいほどマウス部からの落下高さが大きくなり、音圧が大きくなっているものと考えられる。また、 B_s/h_{s2} が大きい

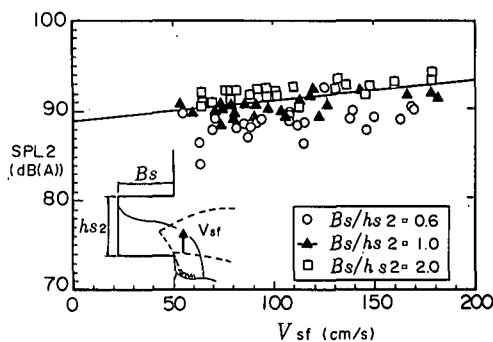


図-6 引き波時における最大音圧レベル

ほどマウス部の容積が増え、同じ落下高さでも落水する流量が増加することが音圧を増加させる原因となっている。

ここで、 $B_s/h_{s2}=1.0$ の条件において、 V_{sf} をパラメータにして SPL2 を近似すると以下のようになる。

$$\text{SPL2} = 89 + 0.016 V_{sf} \dots\dots\dots (2)$$

(3) 音質特性

図-7は、押し波時における発生音のピーク周波数 f_{p1} を示したものである。なお、 f_{p1} の算定では、最大エントロピー法によりスペクトル解析を行った後に、1/3オクターブ周波数帯でスペクトルを平均して求めた。これによると、比較的 V_{sf} が大きな場合や B_s/h_{s2} が 2.0 となる条件では、Phase I a における発生音が卓越し、そのピーク周波数が 500 Hz 前後とやや低めの音が発生している。また、Phase I b が卓越する場合には、ピーク周波数が 300~1000 Hz とばらつきが大きくなっているが、I a が卓越するものと比べてやや高周波側の音が発生しているのが特徴である。

図-8は、引き波時に発生する音のピーク周波数 f_{p2} を示したものである。 V_{sf} が大きな場合や B_s/h_{s2} が 2.0 となる条件では、落水時間が長くなるために Phase II b の音圧が卓越し、ピーク周波数が 800~1300 Hz となっている。また、比較的 V_{sf} が小さな場合には、Phase II b の作用時間が短くなるために Phase II a での音響エネルギーが相対的に大きくなり、ピーク周波数が 500~1500 Hz と比較的ばらつきが大きくなっている。

5. 数値シミュレーションによる平面音場特性

(1) 計算方法

① 多方向不規則波による前面水位の計算

平石ら (1994) による多方向不規則波の数値シミュレーションを用いて防波堤前面の水面変動を計算し、マウス部からの発生音の平面伝搬特性を検討した。計算では、海底勾配が一様で水深が一定と考えた。無限に続く直線上の防波堤が x 軸上にあり、防波堤直角方向を y 軸とし

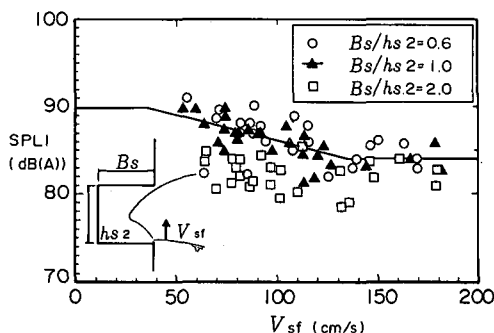


図-5 押し波時における最大音圧レベル

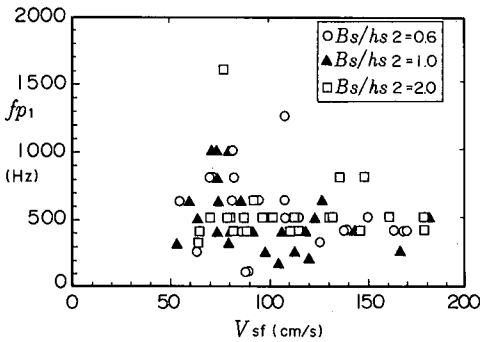


図-7 押し波時における発音音のピーク周波数

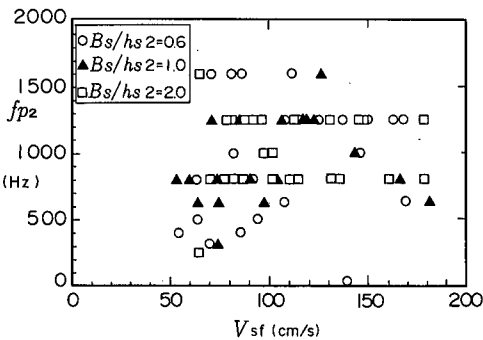


図-8 引き波時における発音音のピーク周波数

て、防波堤前面の水位変動 $\eta(x, t)$ を次式で表した。

$$\eta(x, t) = K \cdot \sum_{n=1}^{N_s} 2 \frac{1 + \cos(\theta_n - 90)}{2} \cdot a_n \cos(k_n x \cos \theta_n + \sigma_n t + \varepsilon_n) \quad \cdots (3)$$

なお、シングルサンメーション法（高山・平石，1989）により、波向きの異なる N_s 個の成分波を重ね合わせて水面変動を計算した。 N_s は 500 とし、 a_n 、 k_n 、 θ_n 、 σ_n 、 ε_n はそれぞれ n 番目の成分波の片振幅、波数、波向、角周波数、初期位相を示すものである。

② 発音音のモデル化

図-9 は、マウス部からの発音音圧レベルをモデル化したものであり、ここでは $B_s/h_{s2} = 1.0$ の条件について考えることにする。押し波時の音圧は、水位がマウス部高さの中央に達した時に式（1）で算定される SPL1 となり、25 dB(A)/s の割合で減衰すると考える。なお、減衰率は実験値より求めている。引き波時において波面がマウス部下端まで下降した時に音が発生すると考え、音の発生時間を t_{p2} 、最大音圧レベルを式（2）から算定される SPL2 とした。ここで、 t_{p2} は、マウス内部水位 d における流出速度を $\sqrt{2gd}$ と仮定して、下式のようにモデル化した。なお、式中の d_0 はマウス部内の残水位である。

$$t_{p2} = \frac{2B_s}{(2g)^{1/2}} (d_0^{-1/2} - h_{s2}^{-1/2}) \quad \cdots (2)$$

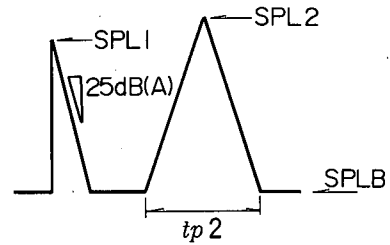


図-9 発音音圧レベルのモデル化

SPL1 や SPL2 の算定式では、有次元量である V_{sf} がパラメータとなっているために、現地スケールで考える際には実験縮尺を考えなければならない。音の発生メカニズムは、マウス部が波面によって閉じたときのマウス部内の流入水塊の状況によって変化するため、マウス部奥行き B_s が同じ場合、マウス部高さ h_{s2} と V_{sf} との関係によって音の特性が決まる。そこで、実験縮尺はマウス部高さの比として考える。音圧レベル自体も実験縮尺によって変化すると考えられるが、相似則が無いために、本検討では過小評価となるが音圧レベルについての相似を考えないことにする。

図中の SPLB は、防波堤周辺の暗騒音である。小樽港南防波堤上で波の状況と音の測定をした結果、通常の高さの混成防波堤の周辺では、越波しない時に重複的な波となる場合が多かった。観測の対象は、静穏時から越波する限界の状況までとし、SPLB は越波する直前の音圧レベルの平均値を用いて、56.5 dB(A) とした。

（2）多方向不規則波での防波堤上の音特性

計算に用いた防波堤は、天端高さ 2.8 m、設置水深 9.8 m の混成堤であり、マウス部は下端が静水面上 1.3 m の位置に、マウス部高さ h_{s2} が 0.5 m、奥行き B_s が 0.5 m とした。なお、防波堤天端上の港外側には不透過なパラバットを兼用した転落防止柵、港内側端には柵状の手すりが設置してある。この防波堤における危険発生波高を著者ら（1993）による方法で算定すると、利用限界に相当するしぶき発生時の有義波高 H_{ss} は 0.93 m、越波発生波高 H_{so} は 1.26 m、転倒発生波高 H_{st} は 1.34 m、海中転落発生波高 H_{sd} は 1.94 m となる。また、マウス部到達波高は、越波発生波高算定式における天端高さをマウス部下端高さとする 0.64 m となる。

図-10 は、防波堤上の等価騒音レベル SPL_{eq} （不規則騒音の平均的な音圧を示す指標）と最大音圧レベル SPL_{peak} を示したものであり、主波向きが防波堤に対して直入射で有義波高が 0.35～2.3 m の条件である。これによると、 SPL_{eq} 、 SPL_{peak} とともに S_{max} による違いはほとんど見られない。また、 SPL_{peak} は $H_{1/3}$ が 0.6 m を越えると暗騒音の 56.5 dB(A) よりも大きくなっており、マウス

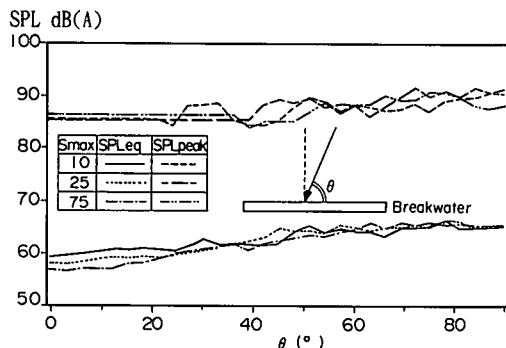


図-10 防波堤上の等価騒音・最大音圧レベル

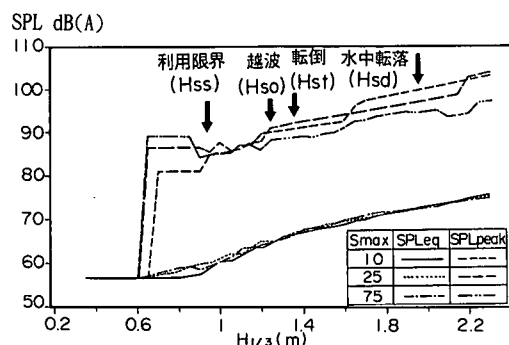


図-11 波向きによる防波堤上の発生音特性

部の到達波高とほぼ一致している。SPL_{eq}は、マウス部到達波高よりも大きくなると漸増しており、利用限界に対応する状況で約 60 dB(A)、越波が発生する限界の状況で約 65 dB(A) と暗騒音に比べてそれほど大きくならないが、SPL_{peak} は利用限界で約 85 dB(A) に達しており、暗騒音に比べて約 30 dB(A) も大きくなっている。

図-11 は、波向きによる防波堤上の発生音特性を示し

たものであり、越波発生限界波高 1.24 m について主波向き θ を $0 \sim 90^\circ$ (直入射) として計算した。発生音圧レベルは、SPL_{peak}, SPL_{eq} とも θ が $60 \sim 90^\circ$ までは波向きによる違いがほとんどないが、 60° よりも斜めに入射する場合には減少する傾向にある。ただし、波向きによる音の減少率はそれほど大きくない。

6. まとめ

親水性防波堤の新しい警報システムとして「クジラク」を提案した。本報告では、マウス部から音が発生するメカニズムを明らかにし、波浪条件や構造条件と発生音特性との関係が明らかになった。また、実際の状況を想定した数値シミュレーションから、防波堤上の発生音特性を明らかにした。なお、今回は音の物理環境について検討したが、今後は発生音が利用者の心理面に及ぼす影響を検討する予定である。

最後に、本研究を進めるに当たり、音のスペクトル解析については港湾技術研究所橋本典明海洋エネルギー研究室長に、また多方向不規則波シミュレーションについては同水工部平石哲也主任研究官にご指導頂いた。また、防波堤上の音の現地観測については、北海道開発局小樽港湾建設事務所鈴木一行調査試験係長ならびに石原洋、北川國廣、新井田勝男の各技官にご協力いただいた。

参考文献

- 高山知司・平石哲也・立石義博 (1989): 多方向不規則波の造波信号発生方法に関する検討, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 153-157.
- 平石哲也・望月徳雄・鈴木康正 (1994): 護岸越波流量における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 666-670.
- 遠藤仁彦・高橋重雄 (1993): 親水性施設の越波に対する安全性の評価方法に関する事例研究, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 1131-1135.