

親水性防波堤警報システム「クジラくん」の開発

Warning system against Wave Overtopping on Promenade Breakwaters

早川哲也*・遠藤仁彦**・笹島隆彦***・水野雄三*・浮津憲一****

Tetsuya HAYAKAWA, Kimihiko ENDOH, Takahiko SASAJIMA, Yuzo MIZUNO and Kenichi UKITSU

A newly developed device, which is to be installed on the seaward side of promenade breakwaters, can be used as a warning system against wave overtopping. This system generates wave splashing and sounds before wave overtopping occurs, warning people nearby of possible danger on the promenade breakwater.

The run-up height of wave splashing and characteristics of the sounds from this system are studied based on the results of hydraulic model tests. According to these tests, this system has been constructed at the Port of Mombetsu.

key words: promenade breakwater, personal safety, warning device

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施設の整備が進められている。特に、防波堤は海に突き出た位置にあり、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である。しかし、防波堤の天端高は、ある程度越波を許容するように設計されているため、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・運営するにあたっては、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。しかし、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、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防波堤から海中に転落する例が少なくないことが著者らの調査により明らかになっている。そこで親水性防波堤の越波に対する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。

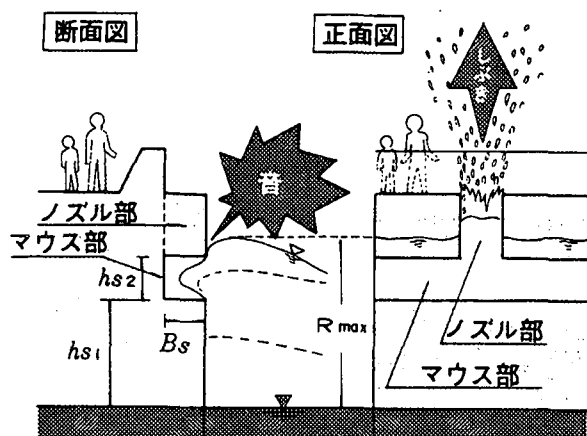


図 - 1 「クジラくん」の概念図

2. 「クジラくん」の基本概念と既往の研究

図-1は、「クジラくん」の概念図を示すものである。本システムは、直立堤及び混成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。マウス部は静水面より上に設置しており、波高が大きくなり、波がマウス部に達するようになると音が発生し、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。

* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 環境水工部
(062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

** 正会員 北海道開発局 港湾部 港湾計画課

*** 正会員 北海道開発局 農業水産部 水産課

**** 北海道開発局 網走開発建設部 紋別港湾建設事務所

これまでの研究では、断面実験により音の発生メカニズムやしぶきの発生状況を検討することにより、波浪条件や構造条件と発生音及びしぶきの特性が明らかとなっている²⁾。しかし、防波堤に対して斜めに入射する波に対しては、本システムが有効であるかどうかは分かっておらず、本研究では、平面実験を行うことにより、斜め入射波に対する本システムの特性を明らかにすることを目的としている。

3. 平面実験

(1) 実験方法

実験は長さ 20m、幅 33m、深さ 3m の平面水槽において行った。この水槽は、幅 90cm の造波機を 30 台並べたサーペント型造波機を備え付けている。この水槽の中央に長さ 13.2m の堤体模型を配置し、そのうちの 120cm の部分を図-2 に示すような L 型および T 型の形状にマウス部とノズル部を設置した。堤体設置水深 h は 123cm、堤体は越波しないように天端高さを十分大きくした。「クジラくん」の構造条件であるマウス部奥行き B_s 、静水面からマウス部下端までの高さ hs_1 、マウス部高さ hs_2 、ノズル部幅 dn は、それぞれ 10、18、10、10cm と一定とした。実験波は規則波で、相対水深 h/L が 0.213~0.277、波高水深比 H/h は 0.122~0.325 の範囲である。また、波向 β は模型に対して 0° (直入射)、 30° 、 45° である。マウス部からの発生音は、マウス部から前方に 88cm 離れた地点に設置した騒音計 (NA-60) により音圧レベルを測定し、しぶきについては、その静水面からの最高到達高さを目視により観測した。マウス部およびノズル部を設置した堤体前面の波面の上昇速度や打ち上げ高さを測定するため、波高計により水位を測定した。

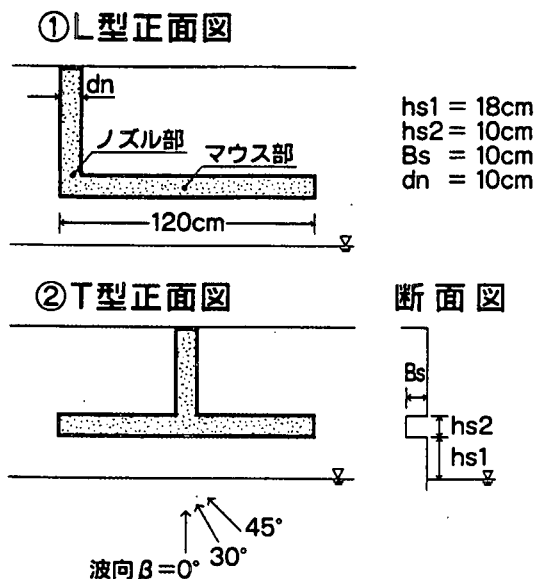


図-2 堤体模型

(2) マウス部発生音特性

図-3 は、マウス部およびその近傍の波の運動を示したものである。マウス部における波の運動と音の発生メカニズムは、断面実験により明らかとなっており²⁾、下記に示す 4 種類の音が、図-3 のそれぞれの状態において発生する。ただし、押し波時に Phase I、引き波時に Phase II が発生する。

・ Phase I a (図-3・③)

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するときに発生する音。

・ Phase I b (図-3・④)

マウス部内に流入する水塊がマウス部内の壁に衝突した時に発生する音。

・ Phase II a (図-3・⑥)

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内に空気が流入した時に発生する音。

・ Phase II b (図-3・⑧)

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時に発生する音。

しかし、発生音がこの 4 種類であるのに対して、騒音計より測定された音圧レベルの波形は、押し波時と引き波時において、それぞれ一つずつのピークを持った形となる。このため、音圧レベルについては、押し波時の最大値を SPL1、引き波時の最大値を SPL2 として、波向の影響を検討した。

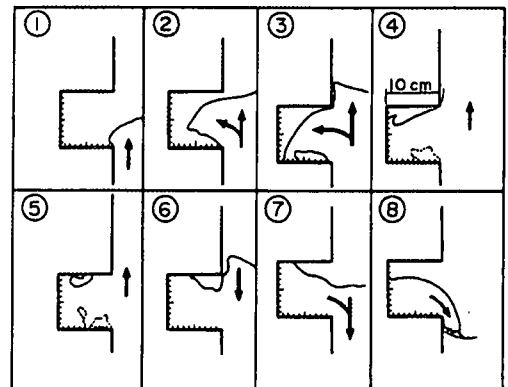


図-3 マウス部近傍の波の運動

図-4 は、L 型模型での押し波時における最大音圧レベル SPL1 に対する波向の影響を断面実験の傾向を示す直線と同時に示したものであり、横軸は波面の上昇速度 V_{sf} 、縦軸は SPL1 である。SPL1 は堤体前面の最高水位がマウス部中央程度に達すると発生し、82~90dB(A)程度とほぼ一定の値を示している。また、SPL1 に対する波向の影響はほとんどない。

断面実験における SPL1 と今回の平面実験における直入射 (0°) の SPL1 を比較すると、音圧レベルにはそれほど

ど差は見られない。しかし、断面実験では SPL1 が V_{sf} の増加とともに減少するのに対して、平面実験ではほぼ一定の値を示す傾向にある。この理由は、断面実験では発生音の基本特性を調べるために、実験はマウス部のみの形状 ($dn=0\text{cm}$)で行っているのに対して、平面実験ではノズル部を取り付けた形状 ($dn=10\text{cm}$)で行っているためと考えられる。マウス部のみの場合は、 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、閉じこめられた空気により音圧としては I a の方が卓越する。このため、音圧レベルは Phase I b より I a のほうが小さいので、 V_{sf} が大きくなると SPL1 は減少する。しかし、ノズル部がある場合は、マウス部からつながるノズル部より空気が漏れるため、 V_{sf} とは無関係に Phase I b が卓越し、音圧レベルとしてはあまり変化しないと考えられる。また、図-4 には示されていないが、模型 L 型と T 型における SPL1 の差はないことが、実験により明らかになった。

図-5 は、L 型模型での平面実験での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。横軸は堤体前面の波高計により測定された波面の打ち上げ高さ R_{max} からマウス部高さ $hs1$ を差し引いたものである。 $R_{max}-hs1$ に対する SPL2 の傾向を見ると、 $R_{max}-hs1$ が 0 より大きくなる、つまりマウス部下端に波面が到達するようになると SPL2 は急激に増加し、 $R_{max}-hs1=hs2$ 程度、つまりマウス部上端に波面が到達するようになるとわずかに増加するようになる。また、その時の SPL2 は $90\sim93\text{dB(A)}$ と SPL1 よりやや大きくなっている。 $R_{max}-hs1$ に依存する理由としては次のようなことが考えられる。波面がマウス部下端に到達するようになると Phase II b の音が発生し始め、 R_{max} とともにマウス部内の落水する水の量も増加し、SPL2 は急増するようになる。しかし、波面がマウス部上端に達してしまうと落水する水の量が一定となり、 R_{max} の増加とともに引き波時の最小水位が減少し、落下する高さが大きくなるので、SPL2 はわずかに増加するようになると考えられる。また、波向の影響がほとんどないのは、波向が異なっても落下する水の量と落下高さが同じであれば音圧レベルは同じになるためと考えられる。また、図-5 には示されていないが、模型 L 型と T 型における SPL1 の差はないことが、実験により明らかになった。

(3) ノズル部しぶき特性

図-6 は、しぶきの最高到達高さ R_s を模型の形状別、波向別に示したものであり、横軸は波面の打ち上げ高さ R_{max} である。波がマウス部に到達 ($R_{max}=hs1$) するようになると、ノズル部内に波面が倒れ込み、しぶきが発生 ($R_s\geq R_{max}$) するようになる。さらに R_{max} が大きくなると、 R_s は R_{max} よりも急激に増加するよ

うになり、実験では、L 型模型で R_s は R_{max} の 4 倍程度までになる。

模型別に波向の影響を見ると、L 型及び T 型ともに R_s に対する波向 β の影響はほとんどない。また、模型形状の違いによる R_s の違いを見ると、 R_{max} が小さい場合は、 R_s の差はほとんど見られない。これに対して、 R_{max} が比較的大きく ($R_{max}\geq 40\text{cm}$) になると、 $\beta=45^\circ$ においては

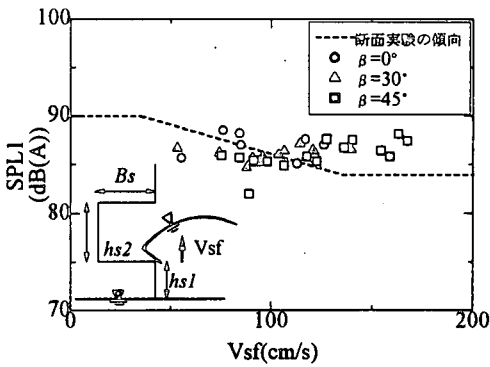


図-4 押し波時における最大音圧レベル

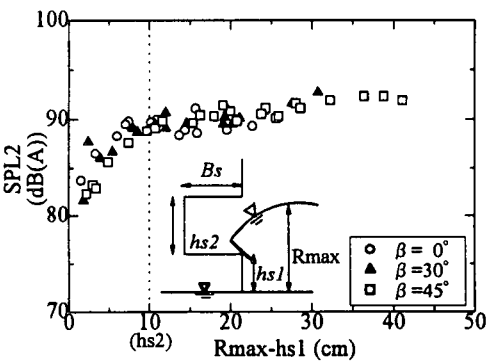


図-5 引き波時における最大音圧レベル

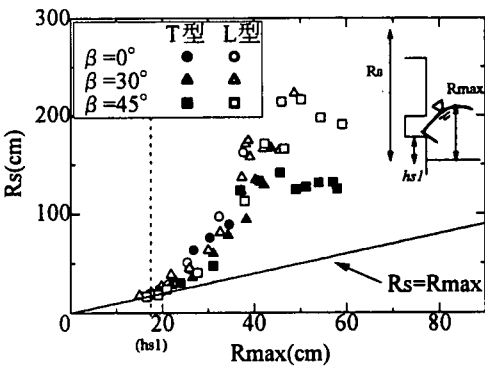


図-6 しぶきの最高到達高さ

T 型より L 型の方が R_s は大きい傾向にある。ただし、この傾向は実験の制限から波向 $\beta = 45^\circ$ の場合にのみ確認されたものである。

4. 「クジラくん」の実用検討

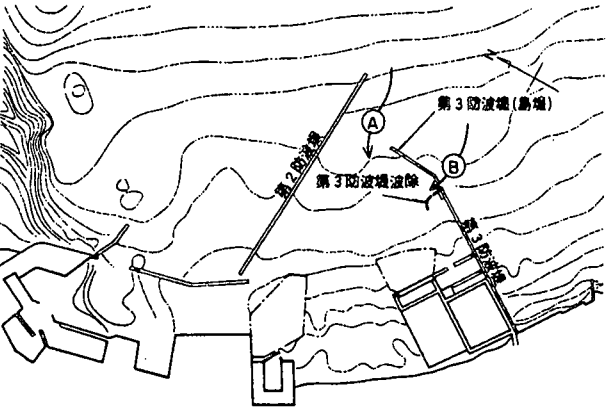
本報告では、「クジラくん」の実用例として紋別港における検討結果について報告する。この検討においては、マウス部下端の静水面からの高さ hs_1 の設定を音の発生から考察しており、しぶきについては考察していないので注意を要する。

図－7 は、紋別港の平面図を示したものである。現在第 3 防波堤を親水性防波堤として整備中であり、平成 7 年度に同防波堤先端付近に配置される波除部分の上部工を施工した。

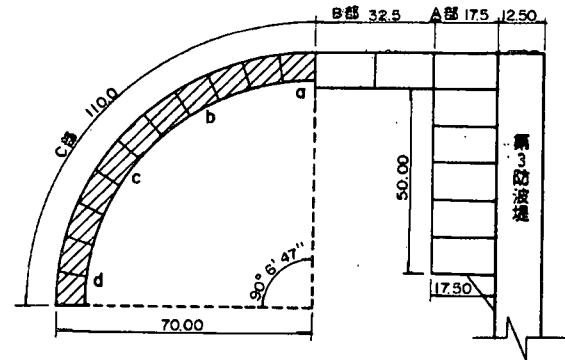
図－8 は、第 3 防波堤波除周辺の平面図を示したものであり、堤体形状としては A～C 部に分けられる。本報告では C 部において、クジラくんを適用する際の断面形状の検討を行う。なお、第 3 防波堤波除前面の背後は船着き場となっており、同防波堤も親水性防波堤として整備された。

(1) 現地の波浪特性

紋別港での波浪観測は水深 52m の地点で行われており、その観測値の波向別波高出現率頻度表(1989～



図－7 紋別港の平面図



図－8 紋別港第 3 防波堤波除

1993 年)によると、3.5 m 以上の高波が発生していた波向は、NW・NNW・N・NNE・NE・ENE であり、頻度的に多いのは NNE・NE (両者で 80% を占める。) である。これらの中で NW・NNW・N の波向については、第 2 防波堤の遮蔽効果により第 3 防波堤波除の伝達波高は他の波向に比べて小さくなると考えられる。そこで、比較的伝達波高が大きくなると考えられる波向は、NNE・NE・ENE であり、入射波の検討にはこれらの波向を対象とする。

第 3 防波堤波除には第 2 防波堤と第 3 防波堤(島堤)によって遮蔽されているので、直接外海の波が作用することがない。したがって、対象防波堤には、第 2 防波堤と第 3 防波堤(島堤)との開口部 A からの回折波と、第 3 防波堤(島堤)と第 3 防波堤との開口部 B からの回折波が作用していると考えられる。

表－1 は、対象防波堤 a～d 部(図－8)における港外側の波高比を各波向ごとにまとめたものである。これらの波高比は数値波動解析法で計算されたもので、周辺防波堤の遮蔽効果や対象防波堤の反射効果を考慮したものであり、ここでは、波高比を簡易的に堤体前面における波高と波浪観測値との比と考える。これによると、a、b 部の波高比が大きくなっており、この部分が比較的危険になると考えられる。また、防波堤周辺の波高比から判断すると、ENE 側になると開口部 B からの回折波が卓越して防波堤堤幹部(a 部)で他の波向きよりも波高比が大きくなっているが、NNE 側になると開口部 A の影響が相対的に大きくなるために堤頭部(d 部)の波高比が比較的大きくなっている。

表－1 防波堤周辺の波高比

波向	a	b	c	d
NNE	0.19	0.16	0.07	0.07
NE	0.27	0.24	0.09	0.09
ENE	0.32	0.28	0.08	0.08

(2) 対象防波堤の危険特性

遠藤・高橋より提案された危険限界発生波高算定法³⁾を用いて、第 3 防波堤波除 a 部における、波しぶき、越波、越波による転倒、越波による転落が発生する状況となる波高を計算する。(計算の詳細については、参考文献を参照されたい。)ただし、各危険発生波高は、満潮時(H.W.L.=D.L.+1.3)において、波が防波堤に対して直角に入射する条件で計算している。

① しぶき発生波高

$H_{ms}=1.07\text{m}$ (最高波高) $H_{ss}=0.59\text{m}$ (有義波高)

② 越波発生波高

$H_{mo}=2.27\text{m}$ (最高波高) $H_{so}=1.26\text{m}$ (有義波高)

③ 転倒発生波高

$H_{mt}=2.68\text{m}$ (最高波高) $H_{st}=1.34\text{m}$ (有義波高)

④転落発生波高

Hmd=3.90m(最高波高) Hsd=1.95m(有義波高)

1989～1993 年における波向別波高出現頻度表に従い、防波堤波除前面の波高比から算出された波高分布からは、第 3 防波堤波除において利用者が海中に転落する波高 ($H \geq Hsd$) 事故は発生しないが、波向 NE・ENE の波により利用者が転倒する波高 ($H \geq Hst$) が発生する可能性があると考えられる。

防波堤の利用については、防波堤上に波しぶきが発生するようになると利用が困難になると考えられ、しぶき発生波高を防波堤の利用限界波高とし、波浪観測値における利用限界波高の未超過確率を施設の稼働率として算定する。1989～1993 年の波浪観測値を用いると、この防波堤の稼働率は 97.7% となり、防波堤で発生するしぶきにより年間 8 日程度利用が不可能になると考えられる。ただし、波が直角に入射する条件で危険発生波高を算定しており、実際の稼働率はこの値より多少高くなると考えられる。

(3) マウス部の検討

「クジラくん」は危険な状態になる前の警報に考えているものであるが、越波が発生し実質的な危険に至る前に利用者に危険を知らせるのが妥当と考えられる。したがって、「クジラくん」の音を発生する頻度は、防波堤上においてしぶきが発生する頻度と同じとし、年平均 8 日程度と考える。ここで、マウス部の形状は、断面実験の結果から SPL1 と SPL2 の大きさを考えると、マウス部奥行き B_s とマウス部高さ hs_2 の比 B_s/hs_2 が 1 であるのが適当であり²⁾、また、防波堤上部工の大きさから強度的に問題のない大きさを考慮してマウス部高さ hs_2 を 0.5 m、マウス部奥行き B_s を 0.5 m とする。

マウス部高さ hs_1 については、この高さにより危険を知らせ始める波高を設定することが可能であり、ここでは室内実験の結果と現地の波浪特性や危険特性により hs_1 を決めることにする。前述したように押し波時における最大音圧 SPL1 は堤体前面の波の打ち上げ高さ R_{max} がマウス部中央に達した時に発生し、82～

90dB(A)でほぼ一定の値を示す。これに対して、引き波時における最大音圧 SPL2 は R_{max} がマウス部下端に達してから上端に達するまで急激に増加し、その後わずかに増加することが実験により確認されている。このため、 R_{max} がマウス部中央に達した時に Phase I、II の両方の音が発生するので、ここでは R_{max} がマウス部中央に達した時に音が発生し警報装置として働くと考ええる。この場合、 R_{max} がマウス部上端に達するまでは危険の増大とともに Phase II の音圧が増加するので警報装置としてはより効果的となる。また、第 3 防波堤波除には、図-7 の開口部 A、B からの回折波が、堤体前面に斜めに作用するため、マウス部とノズル部の配置は、 R_{max} が比較的大きい場合に、 $\beta=45^\circ$ で R_s が大きくなる L 型を用いた。

図-9 は、静水面からマウス部下端までの高さ hs_1 と「クジラくん」の音の発生率の関係を示したものである。音の発生率は、波浪観測値におけるマウス部到達波高の超過確率を音の発生率と考える。また、マウス部到達波高の算定には、 hs_1 を天端高として算定した越波発生波高³⁾を用いた。これにより、「クジラくん」の音やしぶきを年平均 8 日程度発生させるためには hs_1 が 1.3 m となるが、各危険発生波高を危険側である満潮時(H.W.L.=D.L.+1.3m)で計算しているため hs_1 は +2.6 m とする。また、M.W.L.(=D.L.+0.65 m と仮定)で計算すると年平均 4.1 日、L.W.L.(=D.L.)で計算すると年平均 1.3 日程度「クジラくん」の音が発生すると考えられる。以上の検討から、平成 7 年度に施工された上部工(写真-1)の正面図、断面図を図-10 に示す。

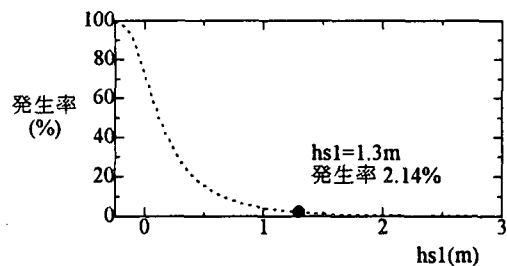


図-9 hs_1 と音の発生率の関係

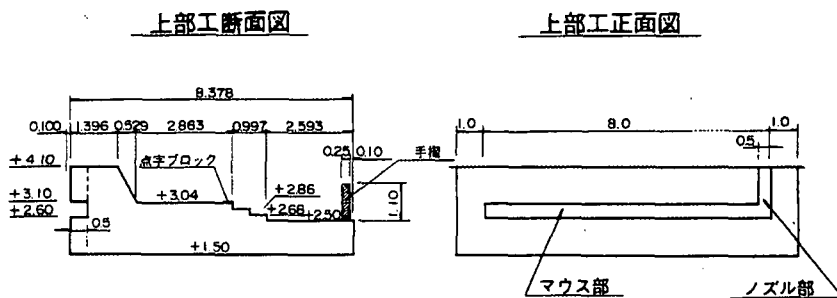
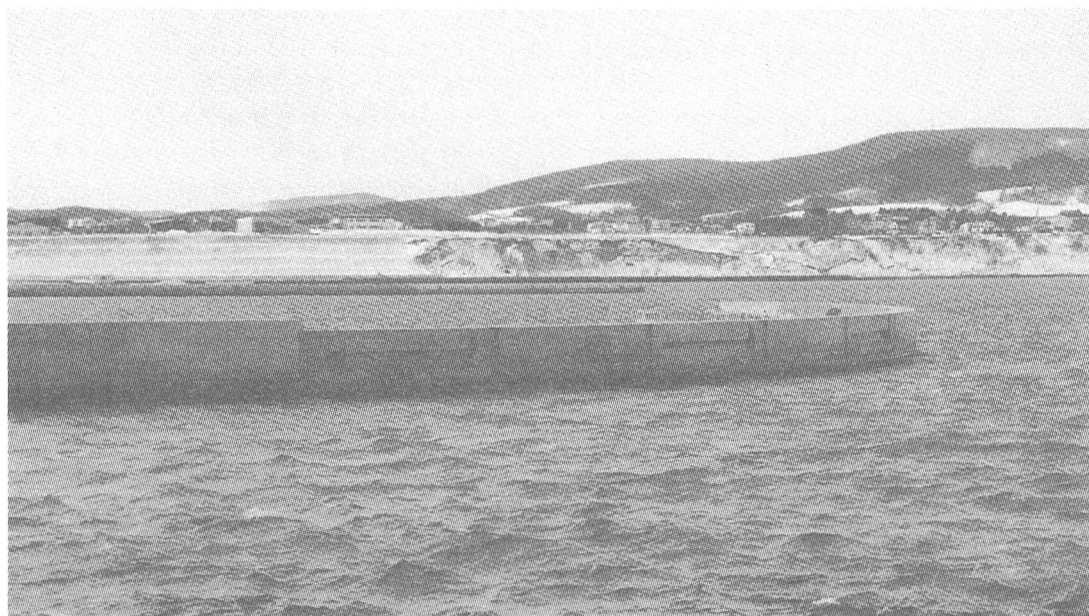


図-10 上部工の正面図・断面図



写真－１ 紋別港第３防波堤波除

５．まとめ

親水性防波堤の新しい警報システムとして「クジラくん」を開発した。本報告では、マウス部からの発生音とノズル部から発生するしぶきに対する波向の影響が明らかになった。また、紋別港の防波堤を対象として、室内実験の結果と現地の波浪特性や危険特性により、「クジラくん」の現地設計を行い、平成７年度に現地施工を行った。公共施設として防波堤を一般に開放するためには安全確保が不可欠であり、様々な配慮及び検討を行う必要がある。「クジラくん」は比較的簡単な構造で設置可能であり、安全対策の有効な手段の一つであると考えている。今後は現地観測を行い、実際の音やしぶきの発生状況や本報告で算定した静水面からマウス部下端までの高さ h_{s1} の妥当性について検討する予定である。

参考文献

- 1) 遠藤仁彦・早川哲也・笹島隆彦・金川均(1995):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.
- 2) 遠藤仁彦・早川哲也・笹島隆彦・水野雄三(1995):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,海岸工学論文集,Vol.42,pp.1266-1270.
- 3) 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, Vol.40,pp.1131-1135.
- 4) 早川哲也・笹島隆彦・遠藤仁彦(1995):親水性防波堤警報システム「クジラくん」の基本特性,北海道開発局技術研究発表会,第 39 回(4),pp.225-232.