

消波付親水性施設における警報システムの特徴

Characteristics of a wave warning system for a waterfront amenity seawall with a wave-dissipating function

本間 大輔* 井元 忠博** 山本 泰司***

Daisuke HONMA, Tadahiro IMOTO, and Yasuji YAMAMOTO

本研究は、防波堤前面に消波ブロックのある場合に適用することのできる親水性護岸の警報システムを考案し、その特性について報告するものである。本システムは本体工および上部工に流入管（水平管）と噴き出し管（鉛直管）を設置するシンプルな構造であり、海水デッキ上の噴き出し管からしぶきが噴き出すことにより視覚的に施設利用者に危険を知らせるものである。本報告では、流入管と噴き出し管について、①流入管の管形状、②流入管と噴き出し管の管径比、③流入管の設置位置について適切なものを水理模型実験により検討し、現地での実証試験を行った。

《キーワード：警報システム；流入管；噴き出し管》

We designed a wave warning system for installation on a waterfront amenity seawall with a wave-dissipating function. This system can visually warn people on a breakwater against wave overtopping by water spouting from outflow pipes. We clarified the basic performance of the inflow and outflow pipes, which were installed on the body and superstructure of the wave warning system respectively. A hydrological model experiment was conducted to optimize the shape of the inflow pipe, the ratio of the diameter of inflow pipe to that of outflow pipe, and the location of inflow pipe installation.

《Keywords : wave warning system ; inflow pipe ; outflow pipe,》

1. まえがき

近年、快適な海岸環境を楽しむことのできる施設として、親水性の防波堤や護岸が各地で整備されている。高波に対して利用者の安全性を確保するためには、設計波に対して越波流量が許容値以下となるように天端高を決定すればよいが、施設の高天端化は利用面の快適性や建設コスト面からは望ましくなく、適切な管理を前提として、ある程度天端高を低く設定することが实际的である。早川ら¹⁾、遠藤ら²⁾は、親水性防波堤の越波に対する危険状況を判断できる高波警報システム「クジラくん」(図-1参照)を開発している。「クジラくん」は、防波堤前面に窪みをつけ、その窪みから天端上へと通じる切り通しをつけることにより、高波浪時にしぶきと音を発生させ、防波堤上の利用者に危険を知らせるものである。しかし、「クジラくん」の適応可能な防波堤は、直立堤および混成防波堤に限定されている。そこで本研究は、消波ブロック被覆堤にも適用できる警報システムを考案し、その基本特性を水理模型実験で検討するとともに、宗谷港で実証試験を行った。図-2に本警報システムの概略図を示す。本システムは本体工に流入管(水平管)、上部工に噴き出し管(鉛直管)を設置するシンプルな構造である。防波堤前面の水位変動が大きくなると海水デッキ上の噴き出し管からしぶきが噴き出し、利用者に危険を知らせるものである。なお、波浪警報及び注意報は場所により異なるが北海道沿岸ではそれぞれ概ね有義波高が6mと3mと定められており、本システムは、注意報の発令基準程度である波高2~3mで機能することを目標とした。

2. 実験方法

実験は、長さ22m、幅0.8m、深さ2mの2次元造波水路を用いて実施し、実験スケールは1/20とした。造波機はピストン方式で反射波の吸収制御を行い、規則波および不規則波を発生させることが可能である。水路勾配は1/50とし、堤体設置水深 h は31.0cmとした。また、本実験で用いた模型の側面にはアクリル板を使用し、水の噴き出し状況を目視で観測した。実験模型設置状況を写真-1に示す。また、流入管設置位置は、図-3の堤体正面図に示すとおり、静水面を基準にして+9.0cm~-9.0cmの範囲で3.0cmピッチに変化させた。 d を静水面から流入管の中心までの距離として、上方から管位置を d/h で表記すると、-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3となる。また、流入管の内径を ϕ_1 、噴

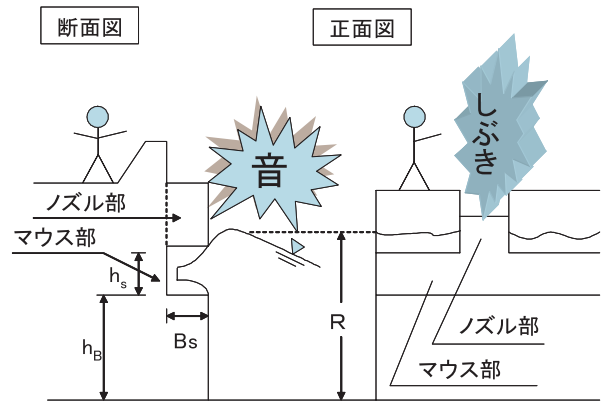


図-1 クジラくんの概略図

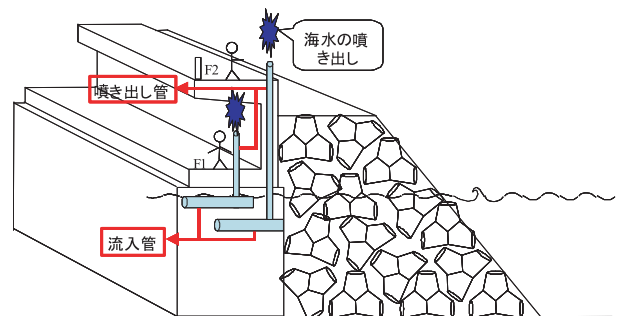


図-2 警報システムの概略図



写真-1 実験模型設置状況

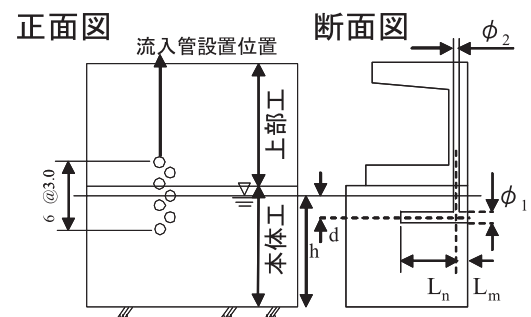


図-3 堤体正面・断面図

き出し管の内径を ϕ_2 とし、噴き出し管の中心から流入管の両端までの距離をそれぞれ L_m , L_n と表す。

実験は規則波(噴き出し特性を定量的に判断するた

め) および不規則波(現地に近い条件での噴き出し特性を判断するため)を用いた。規則波実験に用いた波浪は、周期 $T=1.79s$, $2.39s$ の2周期、換算沖波波高 $Ho'=5cm$, $8cm$, $11cm$, $14cm$, $17cm$, $21cm$ の6波高とした。1波群の作用波数は6波前後とし、反射波の影響がない最初の安定した3波を採用した。また、不規則波実験においては、1波群あたり200波程度とし、有義周期は規則波と同様の $T_{1/3}=1.79s$, $2.39s$ の2周期、換算沖波波高 $Ho'=10cm$, $15cm$, $20cm$, $31cm$ の4波高とした。

3. 実験条件

(1) 流入管形状

噴き出し高さに与える要因としては、波浪条件のほかに①流入管の管形状(L_n の長さ)、②流入管 ϕ_1 と噴き出し管 ϕ_2 の管径比、③流入管の設置位置 d/h があげられる。そこで、まず噴き出しに有効な形状を探し出す必要があるため、**図-4**に示す5種類の管で、噴き出し状況の比較を行った。作用させた波は不規則波で、周期 $T=2.39s$ 、沖波波高 $Ho'=31cm$ であり、流入管設置位置は $d/h=-0.1$ とした。同図には、各管形状に対する噴き出し回数と有義到達高さ $R_{1/3}$ を併せて示してある。ここで噴き出し回数とは、上部工上端から水が噴き出した回数であり、 $R_{1/3}$ は1波ごとの到達高さの上位1/3の平均値である。図に示した結果から、天端上への噴き出し回数、静水面からの管内平均水位到達高さ(以後到達高さとして表記)が大きかったT字型のNo. 5の形状(以後T字管と表記)で詳細に検討することとした。

No.	1	2	3	4	5
形状					
噴き出し回数	0回	0回	5回	3回	9回
1/3有義到達高さ	18.8cm	20.6cm	23.1cm	23.0cm	27.3cm

図-4 管形状および有義到達高さ

(2) T字管と管径パラメータ

T字管において、流入管の内径 ϕ_1 と噴き出し管の内径 ϕ_2 を変化させ(以後 ϕ_2/ϕ_1 を管径パラメータとして表記)、噴き出し特性を確認したところ、管径パラメータが1/3以下で噴き出し回数が大きくなった。そのため、流入管内径 ϕ_1 を34mmに固定し、噴き出し管内径を $\phi_2=9mm$, $11mm$, $16mm$ の3種類作成した。次に流入管の長さである L_m および L_n の関係を検討するため、**図-5**に示すように、T字管の奥行き $L_m=$

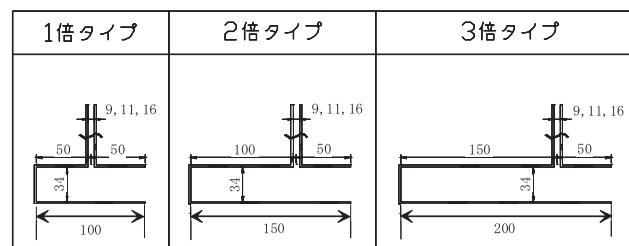


図-5 作製した管形状

50mmに対し(4倍タイプは表記していないが) $L_n=50$, 100 , 150 , $200mm$ (それぞれ1, 2, 3, 4倍タイプと表記)の4種類とし、合計12タイプ作成した。

4. 噴き出しのメカニズム

堤体前面からL字型の通水管を上部工まで立ち上げただけでは、噴き出し管内の水位は堤体前面の水圧変動により振動するのみで、上部工の上まで噴き上がることはない。T字管は、波浪時に管内に取り込まれる空気塊の作用により、噴き出しを可能にしている。**図-6**は規則波を作用させたときの空気塊の状況を示す連続写真である。図中1/6の満水状態から、堤体前面の水位が下がると流入管に空気を取り込まれ(2/6)、水位が上昇すると3/6のように空気塊が流入管に閉じ込められる。さらに水位が上昇すると空気塊は管の奥に圧縮されながら移動し、同時に噴き出し管へ水が進入する(4/6)。一旦管奥に圧縮された空気塊は、管奥で反射して管口側へ移動して噴き出し管に達し(5/6)、噴き出し管内に進入していた水塊とともに上方へ噴き上がる(6/6)。

図-5で示したT字管以外のタイプについては、流入管に混入した空気が、噴き出し管に移動したときに、水塊を押し上げるタイミングが合わなかったため到達高さ、噴き出し回数が共に小さくなったと考えられる。また、後述する実験結果から、T字管の奥行き L_n が大きくなるほど、到達高さおよび噴き出し回数が大きくなっているが、4倍管で実験したところ噴き出しは全くなかった。この原因は、流入管延長が大きいため混入する空気も多くなり、サイクル5/6において、流入管にある空気が完全に噴き出し管に到達する前に、前面水位が下がり、密封状態が終了するためであると考えられる。また、周期が短くなると、到達高さおよび噴き出し回数が小さくなる傾向があった。この原因は、短周期では、前面水位の下降および上昇の間隔が短くなるため、前面水位の下降により混入した空気が、サイクル4/6以降の前面水位の上昇とともに圧縮されて噴き出し管に到達する前に、前面水位の上昇

が終了するためと考えられる。以上のことから、噴き出しには、 L_n と波の周期が影響していることがわかる。

5. 噴き出し特性

(1) 規則波の噴き出し特性

図-7～図-8に、 d/h が $-0.1 \sim 0.2$ の条件で、T字管の3倍タイプの規則波実験の結果を示す。図に示すように、管径パラメーターが $1/4$ および $1/3$ の条件では、流入管の設置位置 d/h が、0, 0.1, 0.2のときに比較的小さな波高においてもよく噴き出した。なお、管径パラメーターが $1/2$ においては、ほとんど噴き出しがなかった。また、T字管の1倍タイプでは全てのケースでほとんど噴き上がることはなく、流入管設置位置 d/h が0.3のときも噴き出しがなかった。なお、T字管2倍タイプでは、3倍タイプより若干噴き出し回数、噴き上げ高さが小さくなった。

図-9は周期 $T=2.39s$ のときの堤体前面の消波ブロック内の水位変動を、静水面からの上昇変位量と下降変位量について示したものである。図に示すように、上昇変位量は波高の増大とともに増加傾向であるが、下降変位量は波高の増大にはあまり依存せず $5\text{ cm} \sim 6\text{ cm}$ 程度とほぼ一定であった。なお、周期 $T=1.79s$ のときの上昇変位量は、周期 $T=2.39s$ とほぼ同様な傾向であり、下降変位量は 5 cm 程度であった。水塊の噴き出すための条件としては、前面水位が流入管の設置位置まで下降する必要がある。そのために、 d/h が0.3より小さいことが噴き出すための条件になる。なお、様々な実海域での水面上昇変位 $\eta_{\max}$ と下降変位 $\eta_{\min}$ の比率は合田ら³⁾にもあるように $6:4 \sim 7:3$ となっており水理模型実験における下降変位量の妥当性が立証された。

ここで、噴き出しに重要な要因と考えられる周期の関係性を把握するため、流入管奥行き延長 L_n を沖波波長 L_0 で除した無次元パラメーターに対する到達高さの関係を図-10に示す。図に示したものは、管径パラメーターが $1/4$ のときのものであり、 L_n/L_0 が $0.024 \sim 0.037$ 付近において到達高さがピークとなっている。なお、管径パラメーターが $1/3$ の場合では、データのばらつきはあるものの、管径パラメーターが $1/4$ とほぼ同様の傾向であった。

(2) 不規則波の噴き出し特性

不規則波実験は、流入管設置位置 $d/h=0, 0.1, 0.2$ 、管径パラメーターが $1/4, 1/3$ 、T字管3倍タイプの条件で行った。図-11は周期 $T=2.39s$ 、管位置 $d/h=0.1$

での、有義到達高さ $R_{1/3}$ および噴き出し回数の実験結果を示す。なお、図中の数字は噴き出し回数である。図に示すように、波高の増加にともなって到達高さ、噴き出し回数ともに増加する傾向がある。なお、噴き出し傾向としては、管径パラメーターの違いはあまりなく、管位置 d/h が大きい方が、小さい波高で噴き出しの反応がよかった。図-12は $d/h=0.2$ 、管径パラメーター $1/4$ のときの周期別の $R_{1/3}$ と噴き出し回数を示す。図に示すとおり、規則波実験の結果と同様に、短周期では、噴き出し傾向が小さくなった。

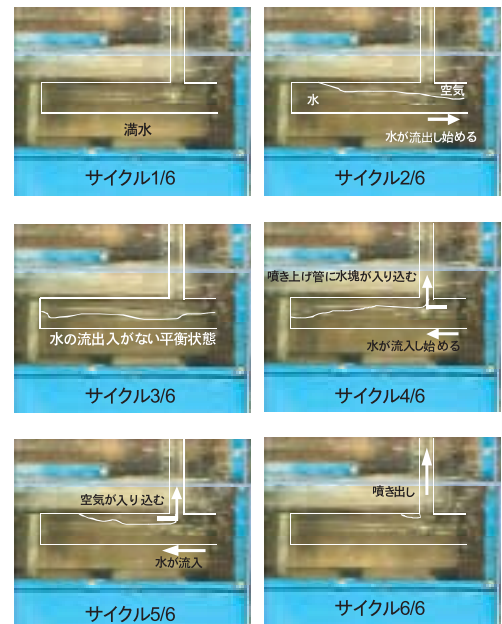


図-6 噴き出しのメカニズム

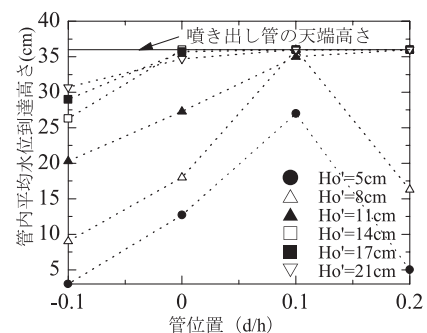


図-7 $\phi_2/\phi_1 = 1/3$ ・T字管3倍タイプ

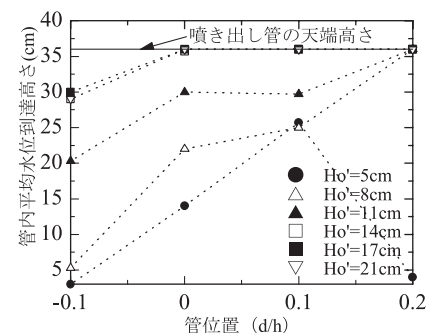


図-8 $\phi_2/\phi_1 = 1/4$ ・T字管3倍タイプ

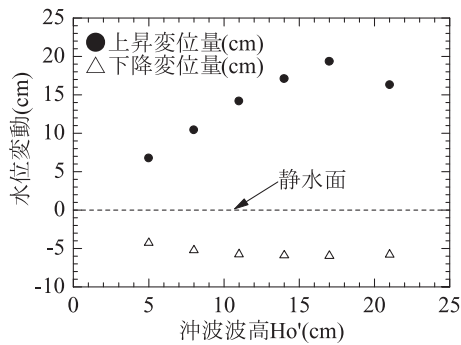


図-9 T=2.39sの堤体前の水位変動

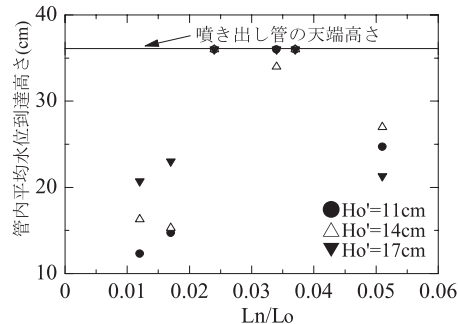


図-10 L_n/L_0 と噴き出し高さの関係

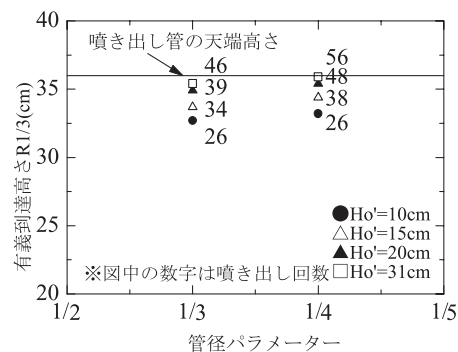


図-11 管径パラメーター別噴き出し特性

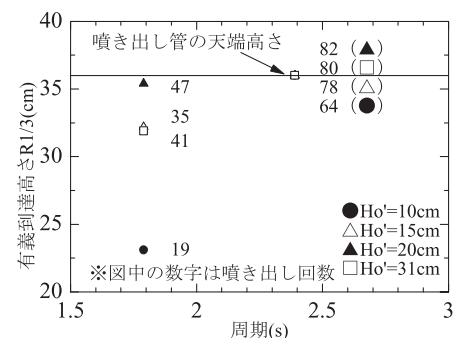


図-12 周期別噴き出し特性

6. 現地適用性の検証

(1) 現地実証試験

図-13に、宗谷港に本システムを設置した箇所を示

す。図中の防波（護岸）北はダブルデッキ構造の親水性護岸として現在整備されている。水理模型実験により噴き出しに有効と考えられる条件（ $d/h=0.2$ ， $\phi_2/\phi_1=1/3.5$ ）を現地で建設中の親水護岸に適用し、図-14に示すように、2段デッキの1Fと2Fの両方に噴き出し管を設置した。現地観測は、波浪注意報の発令があった2003年12月26日および2004年1月8日の9時～16時の毎正時20分間ビデオにより噴き出し状況の撮影を行い、画像を解析して水塊および飛沫の噴き出し回数と高さを評価した。また図中のST.1（水深12m）の箇所に波高計を設置し毎正時20分間の波浪観測を行った。

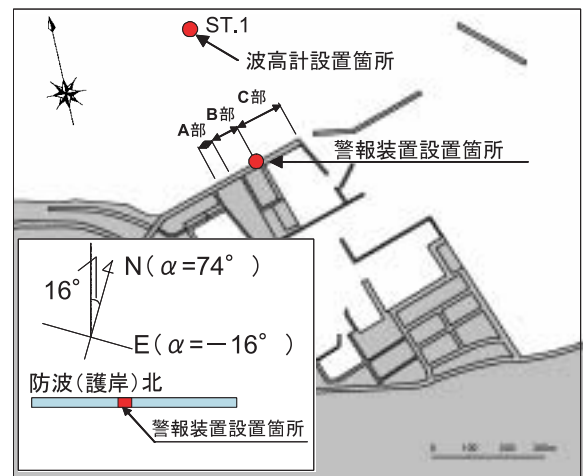


図-13 現地実証試験箇所図

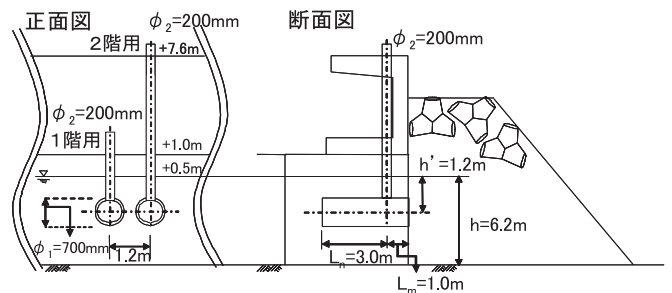


図-14 現地での設置正面・断面図

(2) 現地の波浪特性

宗谷港における1987～1991年の波向別波高出現頻度表によると主波向きはENE(24.0%)、NNW(20.8%)、NW(18.0%)であり、2.0m以上の波高が発生していた割合は通年を通して5.6%、3.0m以上の波高では1.0%となっている。卓越周期としては5.0s～8.0sであり90%以上を占めている。なお、ビデオによる現地調査を行った2003年12月26日の波向はENE～NE方向であり、有義波高は2m～2.5m程度、周期は7s程度であった。同様に2004年1月8日の波向きはE～NEであり、有

義波高は1.5m～2.5m程度、周期は6s程度であった。**表－1**および**表－2**に現地調査を行った2期間の波高、周期、波向き、2Fと1Fの噴き出し回数と噴き出し高さ（飛沫・水塊）について整理したものを示す。

(3) 現地での噴き出し特性

図－15に2003年12月26日、2004年1月8日の換算沖波波高 Ho' と1Fおよび2Fに設置した噴き出し管より、海水が噴き出した回数を示す。**図－15**に示すように、両日とも1Fでは換算沖波波高 Ho' が2m程度以上になると機能している。また、2Fでは12月26日における波高 Ho' は2.5m程度でほぼ一定であるが、11時50分から噴き出しが観測された。1月8日では、波高 Ho' が2.5m以上になった11時50分から噴き出しが観測された。

図－16は波向（堤体法線を基準とした入射角 α ）と1Fおよび2Fの噴き出し回数を示したものである。観測期間中の波向きは、12月26日ではENE($\alpha=6.5^\circ$)～NE($\alpha=29^\circ$)方向に推移しており、1月8日ではE($\alpha=-16^\circ$)～NE($\alpha=29^\circ$)方向に推移している。1Fおよび2Fの噴き出し状況は、両日ともに時間の経過とともに増加しており、**図－15**に示すとおり12月26日には期間を通じて波高の大きさはほぼ一定であるが噴き出しが増加している。また、1月8日では14時50分～16時10分の間において波高の大きさはほぼ一定であるが、噴き出し回数は増加している。これは波向きが護岸に対して直角方向に変化したためと考えられる。

図－17は、同期間の2F噴き出し回数と2F噴き出

し高さ（水塊・飛沫）について示したものである。噴き出し高さは、水塊・飛沫とも噴き出し回数に比例して大きくなる傾向があり、1Fにおいても同様の結果であった。**写真－2**に現地の噴き出し状況を示す。

2003年12月26日および2004年の1月8日の観測から波向きがENE方向からNE方向で沖波波高が2.0～2.5m程度以上で噴き出しが確認された。しかしながら、水理模型実験での噴き出し状況から判断すると今回の現地調査は噴き出し回数は少なくなっている。その要因として、実験では直角入射実験のみ行っていたため、斜め入射の検討は行っていない。また、周期 T が8s～11sの範囲で行っており、周期が長い程噴き出しが大きくなる傾向があるのに対し、観測期間の周期は6s～8sと比較的短い周期であったことが考えられる。これらの条件から推定すると、現地においては、ENE～WNWの波向きで周期が6秒程度以上、換算沖波波高が1Fで2.0m以上、2Fで2.5m以上の条件で噴き出しが予測できる。

(4) 本システムの適応範囲

以上の水理模型実験と現地調査から、本システムは親水性施設を建設する場合に、比較的天端の高い施設にも適用することができ、広い範囲の波向きと周期で、換算沖波波高が2.0m程度以上の条件において、噴き出しが期待でき、施設利用者の危険を事前に知らせる目安になると考えられる。また、流入管の設置高さの設定には、潮位変動を十分考慮する必要があると考えられる。

表－1 12月26日9時～16時の観測データ

	Hmax(m)	H1/3(m)	Ho'(m)	T1/3(s)	波向き	2F			1F		
						噴き出し回数	水塊高さ(cm)	飛沫高さ(cm)	噴き出し回数	水塊高さ(cm)	飛沫高さ(cm)
8:50～9:10	3.88	2.16	2.56	7.4	ENE	0	—	—	4	142	193
9:50～10:10	3.79	2.4	2.84	7.2	ENE	0	—	—	6	168	184
10:50～11:10	3.43	2.28	2.70	7.3	ENE	0	—	—	19	152	172
11:50～12:10	3.85	2.48	2.93	7.2	ENE	1	180	240	12	123	153
12:50～13:10	3.32	2.24	2.65	7.6	ENE	4	60	100	27	207	243
13:50～14:10	3.41	2.29	2.71	7.3	ENE	19	53	180	48	239	280
14:50～15:10	3.27	2.07	2.45	7.4	NE	16	38	38	60	236	296
15:50～16:10	2.92	2	2.37	7.7	ENE	11	29	131	60	245	295

表－2 1月8日9時～16時の観測データ

	Hmax(m)	H1/3(m)	Ho'(m)	T1/3(s)	波向き	2F			1F		
						噴き出し回数	水塊高さ(cm)	飛沫高さ(cm)	噴き出し回数	水塊高さ(cm)	飛沫高さ(cm)
8:50～9:10	2.44	1.44	1.63	5.2	E	0	0	0	1	360	360
9:50～10:10	2.51	1.56	1.76	5.3	E	0	0	0	11	132	204
10:50～11:10	3.57	1.88	2.12	5.5	ENE	0	0	0	40	131	226
11:50～12:10	3.49	2.16	2.44	6	ENE	1	20	20	35	153	231
12:50～13:10	4.03	2.47	2.79	5.6	ENE	7	17	113	50	161	254
13:50～14:10	3.33	2.21	2.50	5.7	NE	5	44	154	62	147	230
14:50～15:10	4.58	2.26	2.55	5.7	NE	9	29	116	69	149	245
15:50～16:10	3.22	2.25	2.54	5.8	NE	12	58	156	77	147	237

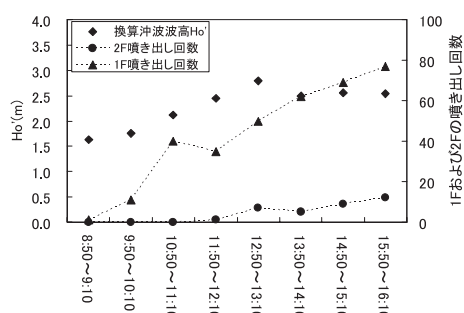
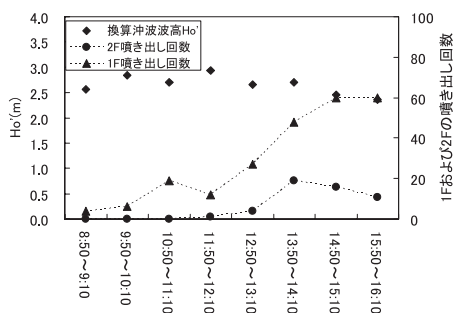


図-15 Hoに対する1F、2Fの噴き出し回数 (左図：12月26日、右図：1月8日)

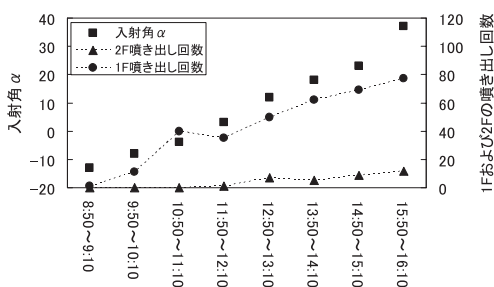
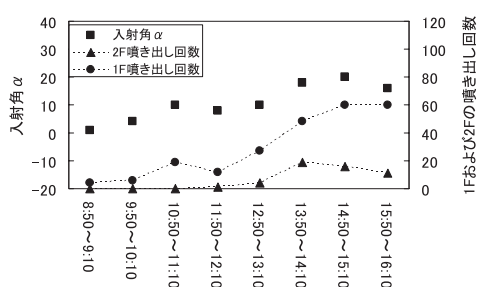


図-16 波向きと1F,2Fの噴き出し回数 (左図：12月26日、右図：1月8日)

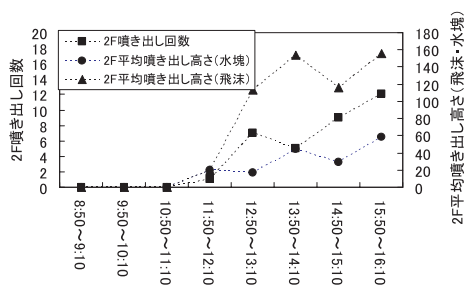
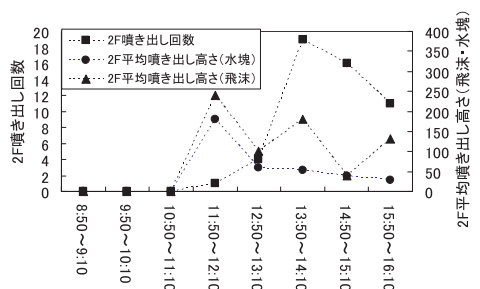


図-17 2Fの噴き出し回数と噴き出し高さ (左図：12月26日、右図：1月8日)



写真-2 現地での噴き出し状況

7. 結論

本研究では、水理模型実験および現地調査を実施し波高、波向き、周期の特徴から本システムの噴き出し要因について考察した。その結果は以下の通りである。

- (1) 流入管形状は、管内に空気塊を適切に取り込むことの出来るT字管形状にする必要がある。
- (2) 流入管の設置位置 h'/h が0～0.2、噴き出し管径 ϕ_2 と流入管径 ϕ_1 の比 (ϕ_2/ϕ_1) が1/3～1/4、を満たす必要がある。
- (3) 本システムは、堤体法線に対して斜め入射になるほど噴き出しが小さくなるが、比較的天端の高い親水性施設での有効性を現地で確認した。

参考文献

- 1) 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.
- 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) 合田良実・永井庸平(1974)：波浪の統計的性質に関する調査・解析，港湾技術研究所報告，第13巻，pp.3-37.



本間 大輔*
Daisuke HONMA

北海道開発土木研究所
環境水工部
港湾研究室
研究員



井元 忠博**
Tadahiro IMOTO

北海道開発土木研究所
環境水工部
港湾研究室
研究員



山本 泰司***
Yasuji YAMAMOTO

北海道開発土木研究所
環境水工部
港湾研究室
副室長