

波浪による防波堤の越水に関する実験的研究

佐伯 浩*・山下俊彦**・秋原真哉***

1. はじめに

北海道のオホーツク海沿岸は、冬期の1月中旬から、3月にかけて、オホーツク海北部海域から南下してくる流水によって覆われる。1987年以前は、大規模な密氷野の状態沿岸部に接岸することが多かったため、沖合いは開水面であっても、それにより波浪が減衰し、防波堤近傍の波高も小さく、氷盤が波浪により防波堤上に打ち上げられるような現象（これを越水という）はほとんど見られなかった。これは浅川ら（1989）や Ueda et al.（1991）の浮氷盤による波浪の減衰に関する研究でも明らかのように、海面が密接度100%の流水で覆われている場合、波高は波長と波浪進行方向の流水域の被覆延長の比の-0.3乗に比例して減衰することによるものである。しかし、この6年間は、地球規模の温暖化によるためか、オホーツク海の結氷範囲も狭くなる傾向があり、さらに北海道沿岸部に来襲する流水の量も以前に比べて少なく、密接度も小さい傾向がみられるようになった。このため防波堤等、港湾の外郭施設近傍に流水が存在していても比較的波高が大きい状態がみられることが多くなってきた。1991年の冬期には、網走港南防波堤において、越波とともに越水も発生し、防波堤パナベツト背後の送油管に大きな被害を与えると同時に、防波堤背後に建設されているドルフィンにも被害を与えた。また、近年、防波堤を積極的に利用して行こうとの立場から親水式防波堤がオホーツク海沿岸の重要港湾である網走港、紋別港でも計画され、一部は既に建設され始めている。このオホーツク海に建設が予定されている親水式防波堤の重要な機能の一つとして、冬期の流水観光への利用が考えられているが、越水現象により、防波堤上に堆氷現象が起これば、観光への影響が大きい。以上のことより、本研究は越水が越波にともなう生じる現象であると同時に、波浪による氷盤の運動である点を考慮するとともに、氷盤の大きさと越水量の関係、さらに大きさの異なった氷盤が混合した状態での越水量についても実験的に

明らかにしたものである。

2. 実験方法

2.1 実験装置及び実験条件

実験には図-1に示すような長さ24m、深さ0.8m、幅0.8mの鋼製両面ガラス張り造波水槽を用いた。また越波による、模型防波堤前面の水位の低下の影響を小さくするために、防波堤背後と造波板近傍の間の海底には塩ビ管を設置した。実験に用いた防波堤の模型断面を図-2に示す。実験に際しては、オホーツク海沿岸の主要港湾である網走港及び紋別港の最深部の防波堤の標準断面をもとに、フルードの相似則を用い1/50の縮尺で実験を行った。水深は現地換算で10.7mと一定とし、直立防波堤（CASE 1, 3, 5）と消波ブロック被覆堤（CASE 2, 4, 6）について実験を行った。この消波ブロックは現地換算で20トンのテトラポットを用いている。また天端高は3種類に変化させ、それぞれ、+4.3m（CASE 5, 6）、+6.8m

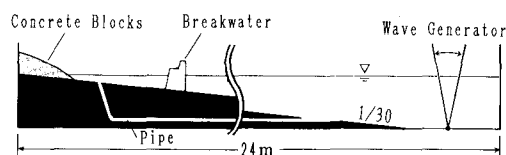


図-1 実験水路

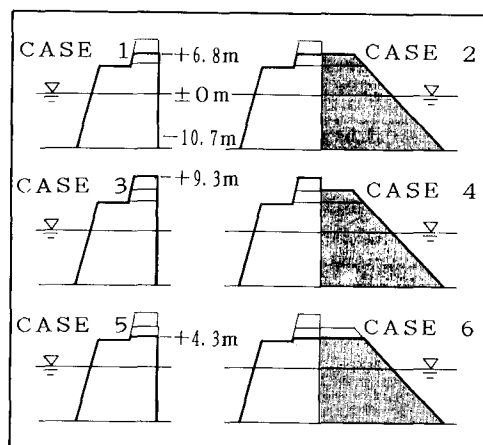


図-2 実験断面

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 東洋エンジニアリング(株)

(CASE 1, 2), +9.3 m (CASE 3, 4) である。また氷盤の模型としては海水の比重とほぼ等しい比重 0.85 のパラフィン板を使用した。また模型氷盤と流体間の摩擦係数については実海水と流体間の摩擦係数に等しいことが上田ら (1992) の研究により確認されており、模型氷盤間の動摩擦係数については海水間のそれとほぼ一致していることが浅川ら (1989) の実験結果より明らかにされている。また模型防波堤の天端 (木製) とパラフィン間の動摩擦係数は、相対速度が 30 cm/sec で約 0.14 で、実際のコンクリートと海水間に関する Saeki et al. (1986) の実験結果にほぼ一致しており、パラフィン板が模型氷盤として妥当であると判定した。本実験の対象とするオホーツク海沿岸の港湾の外郭施設の設計波は波高が 10 m, 周期 12.3 秒であるが、実験に用いた波高は 5~20 cm で実規模で 2.5~10.0 m に相当する。また周期については 1.13 秒, 1.41 秒および 1.74 秒で、これは 8.0 秒, 10.0 秒, 12.3 秒に相当する。また模型氷盤の大きさについては、形状は正方形とし縦横それぞれ 8 cm×8 cm, 6 cm×6 cm および 3 cm×3 cm を用いたが、これは実規模で 4 m×4 m, 3 m×3 m および 1.5 m×1.5 m に相当する。また氷厚については、各大きさの氷盤に対して 1.8 cm と 0.9 cm とし、これは実氷盤では 0.9 m と 0.45 m に相当する。このような氷盤の大きさを選択したのは、宇登呂海岸、オムサロ海岸、紋別空港海岸、三里浜での調査結果に基づいたためである。また、海岸勾配は、宇登呂の防波堤近傍では 1/70 以下であるが、本実験ではより急勾配の 1/30 として実験を行った。

2.2 入射波高および越水量の測定方法

入射波高の測定は、造波後、防波堤で波が反射して波高計に到達する直前までの間の波高を計測し、これを沖波に換算する方法と、図-1 に示す防波堤を一時水路から取り外して波高を計測し、沖波に換算する方法を用いたが、得られた結果には有意な差はみられなかった。また浮氷盤による堤体前面の波高の著しい減衰を防止するため、密接度 100 % (氷盤による海面の被覆率 100 %) の時の氷盤の水面被覆率は、波の一波長に相当する量の模型氷を、防波堤の沖側 5 波長程度の範囲にまばらになるように浮かべた。初期の氷盤の被覆率は 20~30 % であった。そのような条件で波を発生させると個々の模型氷盤は波の質量輸送により徐々に防波堤に接近し、密接度が大きくなり、最終的には、防波堤に押しつけられた状態となり、密接度が 100 % となる。このような状況は、流水の比較的少ないときのオホーツク海沿岸の漁港や港湾の防波堤前面でよくみられる。また防波堤直前で砕波するような大波浪の場合は、模型氷は水面を覆うだけでなく、砕波により巻き込まれ、堤前面では数層に重なり、その表層を構成する氷盤が防波堤を乗り越え越水

する事になる。越水量の測定では、波が定状態に達してから約 1 分 (40~60 波) の間に、防波堤上および背後に残存している氷盤の数を求めた。また、大きさの異なる氷盤を混合させたときの実験では、氷盤の大きさ別にその数を求めた。また、全実験をととして、防波堤前面の密接度が 100 % の時の波の反射率は、氷盤が存在しない場合に比べて 2~7 % 小さくなっていた。

3. 実験結果と考察

3.1 氷盤の大きさと越水量の関係

図-3(a), (b) に消波高のない場合 (CASE 1) の周期 T 別の氷盤の大きさが越水量 Q_i に及ぼす影響を調べたものである。図 (a) より、氷盤の大きさに関係なく越水量は沖波波高 H_0 の増加と共に増加する。また大きい氷盤では氷厚 t の小さい方が越水量が大きい、または等しくなっているが、氷盤の面積が小さい 3 cm×3 cm の場合は、逆に氷厚の大きい方が越水量が多く、ほぼ倍近くになっている。越水量 Q_i は、単位時間、単位幅当たりの越水した氷の体積であるため、波浪への追従性の良い小さな面積の氷盤は楽に越水できるが、同数の氷盤が越水しても、氷厚が大きい場合の方が越水量は大きくなる。3 cm×3 cm の氷盤の場合、厚さ 1.8 cm の方が 0.9 cm 厚の場合の約 2 倍の越水量になっているのはこのためである。また氷盤の面積が大きくなり氷厚が大きくなると、波浪への追従性も悪くなり、また氷厚が大きくなると、天端に接し易く越水しにくくなることから、比較的大きな氷盤の場合 (3 m×3 m~4 m×4 m 程度)、小さい氷盤とは異なった越水特性を示す。また、図-3 の (a) と (b) を比較すると、氷盤の面積および厚さの越水量への効果については大きな差異はないが、周期 T の短い方が越水量も少なくなっている。波浪による氷盤の運動についての泉山ら (1982) の実験結果によると、浮氷盤の

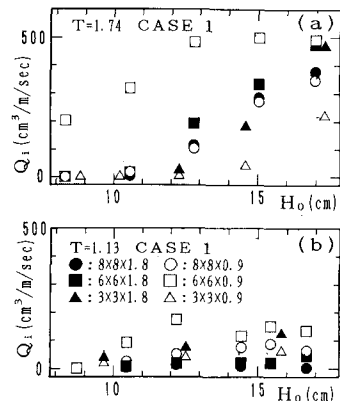


図-3 氷盤の各サイズに対する波高と越水量の関係 (消波工なし)

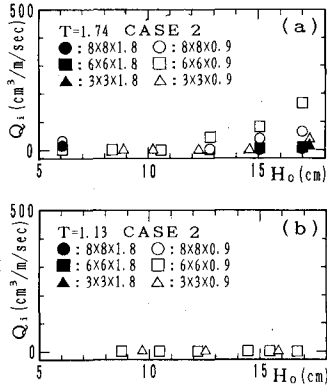


図-4 氷盤の各サイズに対する波高と越水量の関係(消波工あり)

波浪への追従性は、氷盤の代表長 l と波長 L の比に強く影響を受け、 l/L が小さいほど、追従性がよいことが明らかにされている。また越波流量に関する合田ら (1975) の実験結果においては、同一の構造物で同一の波高と堤脚水深であれば、周期が大きいほど流量は大きくなる傾向が示されている。さらに水野ら (1992) の越水に関する実験結果からも、越波流量が大きくなる程、越水量も増加することが明らかにされており、周期が短い波の場合、越水量が減るのはそのためでもある。次に図-4(a), (b) は、図-3 と同一条件であるが、消波工がある場合の一例である。図-3(a) と図-4(a), 図-3(b) と図-4(b) をそれぞれ比較すると、同一の条件でも消波工が存在することにより越水量は常に少なくなる。特に図-4(b) の場合は、全ての大きさの氷盤に対しても越氷現象は発生しなかった。

3.2 大きさの異なる氷盤が混合している場合の越氷

実際の流水は、大きさ、厚さの異なった氷盤の集合体である。一般的に流水は風と流れの作用で移動し、その移動速度は上田ら (1992) の結果より、表面積が小さく、厚さの薄いものほど速く移動することが明らかになっていて、実際のオホーツク海沿岸部でも速く着岸する流水は面積の小さいものが多い。図-5 は 1992 年の冬、知床半島の宇登呂沿岸での氷盤の大きさの分布の調査結果の一部である。氷盤を正方形換算したときの辺長の分布を示したもので、沿岸部では一辺 2~5 m 程度の大きさの流水が多く、全体の 75 % を占めている。本実験では、上述した調査結果に基づき図-5 中に示されているような、分布の 3 種類の大きさの氷盤を混合した状態で実験を行った。実規模で $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$, $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ および $4.0\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ の氷盤を 1:2:1 の比で混合した状態で実験を行った。この時の海面占有面積の比は 9:72:64 となる。また、この時の模型氷盤の厚さは全て 1.8 cm で現地換算で 90 cm である。図-6(a), (b) に混合した条

件の実験結果の一部を示す。波高の増加、天端高の低下に伴って越水量が増加する傾向は単一の氷盤での結果と全く同じである。また、ここには示されていないが、同一の条件であれば周期が長いほど越水量は増加し、消波工が存在しない場合の方が越水量は遙かに多いことも単一の氷盤のみの場合の結果と同様である。また、海面を占有している各氷盤の体積の比は前述したように大きい方から 64:72:9 となり、これはおよそ 7:8:1 となっている。図-6(a), (b) の波高の大きい、越し易い状態での各氷盤の越水量の比はおよそ海面占有面積率に一致している。この事実は、この様に氷厚が同一の氷盤で大きさの異なる氷盤が混在している場合には、お互いの影響を受けず、海面占有率で越氷して氷盤の比率は決定されることになる。これを示す例を図-7 に示す。

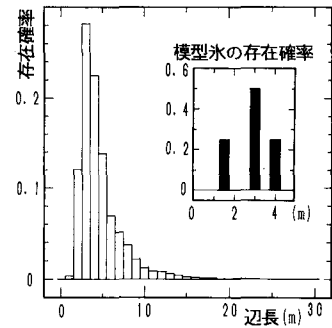


図-5 実氷盤の大きさの分布 (宇登呂海岸)

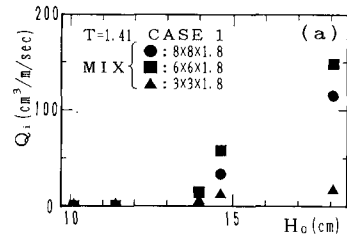


図-6(a) CASE 1 における混合氷盤の波高と越水量の関係

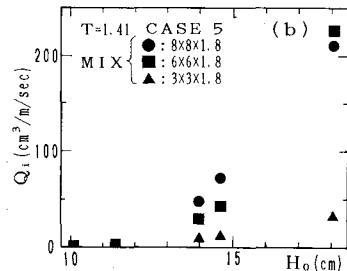


図-6(b) CASE 5 における混合氷盤の波高と越水量の関係

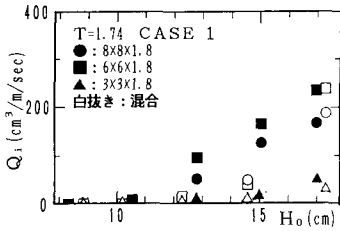


図-7 混合氷盤の越水量実験におけるサイズ別の越水量

図中の黒印は、単一の大きさの氷盤のみでの越水量に海面占有率 ($9/145 \approx 1/16$) を乗じたもので、白抜きの印は前述した混合比で実験を行った時の、各大きさ別の越水量である。図からも明らかなように、同一のサイズの氷盤の越水量は比較的良好な一致を示している。この事実は、越水量が多い条件下では異なる大きさの氷盤間での干渉はほとんどないことを示している。しかし、波高が小さい越水量の少ない場合には、小さい氷盤の運動は大きな氷盤により幾分拘束されてる傾向がみられる。

3.3 越水量の推定方法

大きさの異なる氷盤より構成される流水群の越水量の推定に当たっては、前述した結果を利用することにより可能となる。図-8(a), (b) は単一の大きさの氷盤による越水量に海面占有率を乗じて求めた越水量の総和の予測値 (●印) と混合状態での実験値 (○印) の比較を行ったものである。波高の小さな、越水量の少ない領域では誤差もあるが、波高が大きくなるにつれて良好な一致を示すことが明らかにされた。以上の結果より、氷厚にあまり差のない場合の実際の流水の越水量を見積もるためには、単一の大きさの流水の越水量を明らかにする必要がある。ここでは消波工がある場合とない場合に関する約 570 の越水に関する実験結果より、単一の大きさの氷

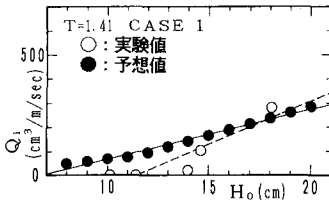


図-8(a) CASE 1 に対する実験値と予測値の比較

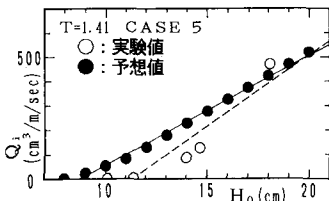


図-8(b) CASE 5 に対する実験値と予測値の比較

盤の越水量についてまとめた。その結果、防波堤前面に消波工があるなしに関わらず、無次元越水量 $Q_1/\sqrt{2gh^3}$ (h : 堤脚水深) は、氷盤の波浪への追従性を示すパラメーター l/L_0 (l : 氷盤の代表長, L_0 : 沖波波長) と $(h_c + t)/H_0$ (h_c : 天端高, t : 氷厚) で示されることが明らかとなった。その結果を図-9(a), (b) に示す。また、防波堤前面に消波工がない場合は $l/L_0=0.019$, ある場合には $l/L_0=0.006$ の場合の実験曲線と実験値の比較をし

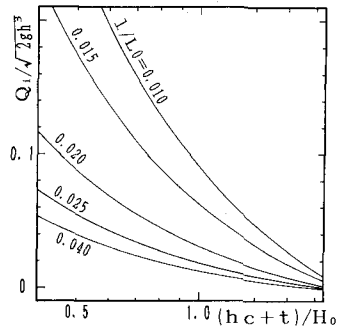


図-9(a) 無次元越水量の算定図 (消波工なし)

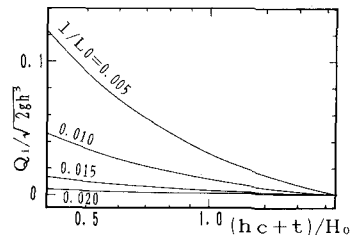


図-9(b) 無次元越水量の算定図 (消波工あり)

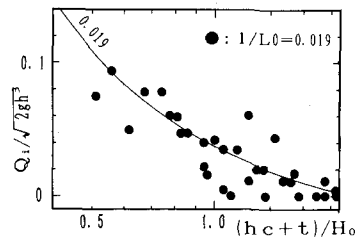


図-10(a) 無次元越水量の算定値と実験結果の比較 (消波工なし)

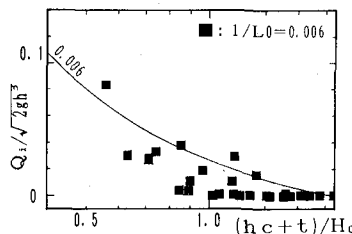


図-10(b) 無次元越水量の算定値と実験結果の比較 (消波工あり)

たものが図-10(a), (b)である。実験データにバラツキはあるものの比較的良い一致を示している。よって、防波堤の構造諸元と波浪条件、それに流水の大きさの分布が与えられれば、各大きさ別の越水量、全越水量が推定できることになる。

4. 結 論

1) 消波工で被覆した被覆堤、直立堤ともに、同一の周期、天端高であれば、単一の大きさの水盤であれ、混合された水盤であれ、波高が大きいほど越水量は多くなる。また、波浪条件と天端高および氷象条件が同じであれば、被覆堤の方が越水量ははるかに少ないことが明らかとなった。

2) 同一の構造条件で、同一の波高で、氷象条件が同じであれば、周期が長い程、越水量は多くなる。これは、単一の大きさの水盤、大きさの異なる水盤が混合されている場合でも同じである。

3) 同一の構造条件、同一の波浪条件であれば、氷象条件に関係なく天端高が低いほど越水量は多くなる。

4) 越水量が少ない条件の場合は、水盤の大きさが小さい程越水量が多くなるが、越水量が多くなると、水盤が大きいほど越水量が多くなることがある。また、入射波高が大きくなっても越水量には限界が存在する。この理由は、水盤の比重は0.85と小さく、また、固有振動周期も波に較べて遙かに短いため、越氷時は水盤は常に水面に浮いているためである。

5) 沿岸近傍の海水板の大きさの分布を求めた。さらに、この分布を基に、大きさの異なった水盤を混合した時の越水量については、氷厚が同じ場合、単一水盤での越水量に、その大きさの水盤の海面占有率を乗じたものが、混合した場合のその大きさの水盤の越水量に一致する。ただし、波高が小さく、越水量が少ない場合は小さな水盤は大きな水盤の動きによりその運動が阻害される

現象がみられ、上述した関係が必ずしも満足しない場合がある。

6) 以上の結果より、与えられた波浪条件、構造条件での、単一の大きさの水盤の密接度100%時の越水量が与えられ、実海域の水盤の大きさの分布が与えられれば、実海域の越水量の予測が可能であることを示した。

7) 数多くの実験結果に基づいて、単一の大きさの水盤の無次元越水量が l/L_0 と $(h_0+t)/H_0$ で表されることを明らかにした。

参 考 文 献

- 浅川典敬・折谷徳弘・佐藤英泰・佐伯 浩・井上一正 (1989): 浮水盤群による波浪の減衰に関する実験的研究, 第5回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 410-415.
- 泉山 耕・佐伯 浩・尾崎 晃 (1982): 波浪による水盤の運動に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第38号, pp. 135-140.
- 上田俊也・佐伯 浩・山下俊彦・村木義男・榎 国夫 (1992): 浮水盤に作用する流体力に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 135-140.
- 國松 靖・秋原真哉・榎 国夫・高木雄一郎・原文宏・佐伯 浩 (1992): 水盤の大きさの関する研究, 寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 417-422.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技研報告, Vol. 14, No 4, pp. 3-44.
- 水野雄三・笹島隆彦・神田尚樹・佐伯 浩・秋原真哉 (1992): 波浪による越氷に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 591-594.
- Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N., Sakai, M. and Tanaka, S. (1986): "The Coefficient of Friction Between Sea Ice and Materials Used in Offshore Structures", Journal of Energy Resource Technology. Transaction of The American Society of Mechanical Engineers, Vol. 108, pp. 65-71.
- Ueda, T., Yamasita, T., Saeki, H. and Enoki, K. (1991): Experimental Study on the Damping of Wave Height due to the Ice Floes, Abstracts of the Sixth International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, pp. 131-135.