

氷盤群の津波による陸上への遡上機構に関する実験的研究

高橋良正*・片山晃**・花田真州***
佐伯浩****・山下俊彦*****

1. 研究目的

北海道の根室半島から釧路にかけての太平洋岸は、過去幾度も津波に襲われており、過去140年間に深刻な被害を与えた津波が13回この地域を襲っている。また北海道オホーツク海沿岸は、毎冬流水の襲来に見舞われる。その流水の襲来範囲を示したのが図-1である。図のように流水の多い年には根室海峡を回り込んで、太平洋側まで流水が流出する事もたびたびある。

1952年(昭和27年)3月4日午前10時23分頃北海道南東部に大規模な地震($M=8.0$)が発生し、北海道の東部沿岸に大きな被害が生じた。この地震は十勝沖地震(東経143度52分、北緯42度09分)と呼ばれている(死者30人、重傷90人)。この十勝沖地震の際、日高東海岸および襟裳岬から根室にいたる沿岸一帯にかけて、波高1~2m(局所的には3m強)といわれる津波が沿岸を襲った。これは津波の規模としてはそれほど大きいものではなく、大きな被害が発生するとは考えられなかった。しかし、霧多布が浜中湾と琵琶瀬湾にはさまれた陸繋島となっていて(図-1)、その中心部が海面上2~3m程度の低地であったこと、及び、時期がちょうど冬期の流水

来襲時期と重なったため、津波により氷塊が陸上に遡上して家屋に衝突した。このため、人的、物的被害を増大させた。現在この被害を受けた霧多布地方においては、このような被害を防ぐことを目的とした防潮堤が設置されている。

本研究の目的は、流水が津波により陸上を遡上し防潮堤やそのゲート等へ衝突する時の氷力を知ることである。氷の衝突時の力を求めるには氷の持つ運動エネルギーや運動量から求める式がMichel(1970)やCammaertら(1983)により提言されている。前回著者らは単独氷盤の遡上について報告したが、今回は多数の氷盤が存在し氷盤の相互作用がある場合の遡上について系統的な模型実験を行い氷盤の遡上時の速度、運動量と直立構造物への衝突速度を明らかにした。

2. 研究内容

実験はコンクリート斜面を持つ長さ24mの二次元造波水路で行った。実験縮尺は水路規模及び流水の大きさの実測結果に基づきフルードの相似則より1/30とした。実験水路の斜面形状は汀線まで勾配1/30で汀線から陸側は水平にし、陸域に防潮堤模型を実際の道東地区の構造物の配置調査より汀線から碎波波高の5倍の位置に設置した。さらに、陸上地形の効果を調べるために、汀線から陸側も海側と同様に1/30の勾配とし、碎波波高の5倍の位置に防潮堤模型を置いて実験を行った。

このような条件で静水面上に模型氷盤を汀線から沖側400cmの範囲に浮かべ、浅水域における津波のモデルとして孤立波を発生させ、波高変化、模型氷盤の遡上時の移動速度及び防潮堤への衝突速度を測定した。移動速度の測定はビデオカメラにより行った。用いた孤立波の碎波波高 H_b は、14.0、12.0、10.0cmの3種類である。これは、実規模で波高3.0m~4.2mとなり被害当時の最大波高を基にしている。また、使用した模型氷盤は正方形で比重0.85のポリプロピレン製でコンクリート斜面との動摩擦係数は0.36であり実氷盤の砂浜上での動摩擦係数(Shapiro et al, 1987)と同程度のものである。氷盤の大きさは、1952年の津波来襲時の写真および1992、93年のオホーツク海の調査結果により沿岸域に存

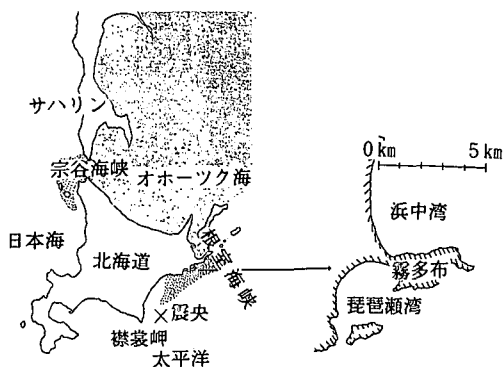


図-1 北海道の流水来襲状況と霧多布近傍地形

- * 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局
- ** 正会員 東亜建設工業(株)
- *** 学生会員 北海道大学大学院 工学研究科
- **** 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

表一 水盤の混合状態

水盤 (辺長 a cm)	存在比率	カバー率		
		20%	30%	60%
3	10%	6	8	17
7	28%	16	24	47
10	28%	16	24	47
13	21%	12	18	35
16	13%	8	12	24

にする流水の多くは正方形換算で一辺1~5mであり、代表的な大きさは一辺3.0mで厚さ60cmであった(國松等, 1993). よって、模型水盤は一辺3, 7, 10, 13, 16 cm (実規模で0.9, 2.1, 3.0, 3.9, 4.8 m), 厚さ2 cm (実規模で0.6 m) のものを使用した。また水盤群は (A) 全て同一の水盤の大きさの場合 ($3 \times 3 \times 0.6$ m 相当), (B) 大きさの異なる水盤が共存する場合の2ケースとした。case (B) においては流水の調査結果に基づいて各サイズの水盤を混合し、その割合を表一に示す。case (A), (B) とともに水盤のカバー率 (水域面積に対する水盤占有面積の割合, カバー率0%は単独水盤の遡上) を変化させ case (A) ではカバー率0, 10, 20, 30, 40, 50, 80%, case (B) ではカバー率0, 20, 30, 60%で実験を行った。

3. 実験結果と考察

入射波高は本実験程度の水盤群の水面カバー率及びカバー延長では、水盤による波高の減衰は小さく陸上遡上時の波高変化 H は前回報告した単水盤の場合と同じであった(佐伯等, 1994). 本実験での碎波帯から陸上の遡上過程での水盤の運動は、水盤の密度そのものが海水に近いために、碎波後の大きな乱れの影響を受け、水面に存在したり、回転運動して水中に潜り込んだりしながら波とともに遡上していく。そのため、本実験では主に水盤の重心部の水平方向移動速度を測定対象とした。

(1) 同一大きさ、同一厚さの水盤群の遡上

多水盤の遡上機構を明らかにするため碎波波高14 cmの場合の水盤の無次元移動速度 $Ci/\sqrt{gH}$ の変化を図-2に示す(カバー率0%, 20%, 80%). ここで Ci は水盤の水平移動速度で、 H は汀線から陸側へ距離 X 離れた点での最大波高であり、 g は重力加速度である。水盤の遡上の様子は海水の比重が0.85強と水に近いため複雑であるが、ここでは前述したように重心の水平速度としている。多水盤のカバー率20%の場合の遡上では、汀線付近の水盤は入射波があたってから移動を始めるのではなく、波があたる前に、先に波によって運動を開始した後方の水盤に押されて遡上を開始する。そして、波本体が水盤にあたり水盤は大きく加速し、最高速に達し防潮堤

に衝突する。このとき、水盤の遡上開始が早い場合、単水盤の遡上に比べて防潮堤への衝突時の波に対する遅れが小さくなり、反射波の影響が少なくなる。さらに、多水盤の遡上では反射波があたっても、後方から遡上してくる他の水盤に押されて減速が少なくなる。

この図-2における水盤遡上初期の加速時を拡大して示したものが図-3(a), 衝突時のそれを図-3(b)に示す。加速時は、カバー率が20%の場合、後方水盤の影響を受けて単独水盤より若干大きな速度となることがよくわかる。また、直立堤への衝突速度は(b)図より、水盤のカバー率20%が最も大きく、水盤カバー率80%と単独水盤ではほとんど差がみられない。この後者の理由は、単独水盤の場合は反射波の影響を受けて鉛直堤近傍で急

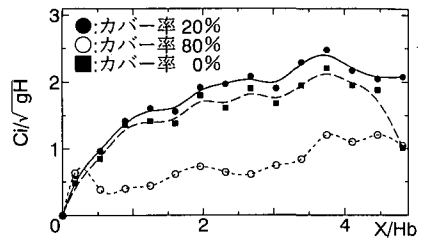
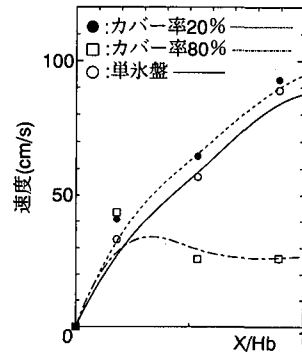
図-2 水盤の無次元速度変化 ($H_b=14$ cm, case A)

図-3(a) 水盤の遡上速度 (加速時, case A)

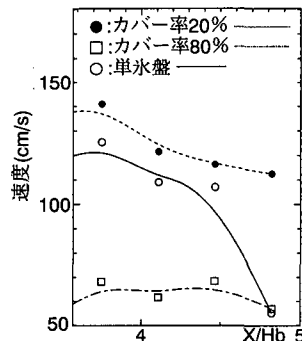


図-3(b) 水盤の遡上速度 (衝突時, case A)

速に速度が落ち、また氷盤カバー率 80 % の場合は、汀線からの遡上にしたがって速度は増加するものの、乱れた状態の氷盤相互の干渉によって衝突速度はカバー率 20 % に比べるとかなり小さくなることとがあげられる。

次に、氷盤のカバー率による防潮堤への衝突速度の違いを図-4 に示す。この図はカバー率 0 % (単氷盤) の無次元衝突速度を C_{i0} としたときの他のカバー率の無次元衝突速度 C_{ic} の比を表している。図-4 から明らかなように、無次元衝突速度は 20 % のとき最大となる。また、先に述べたように多氷盤の遡上では入射波が到達する前に氷盤が遡上を開始するが、カバー率が高くなるほどこの間隔は大きくなり、80 % では 1 秒以上もある。カバー率 80 % では氷盤はまず後方から押されて一瞬加速するが波の本体がすぐに到達しないため地面との摩擦力が大きく、すぐに減速し低速で移動する。やがて波本体が氷に追いつき加速していく。そのため単氷盤に比べても衝突時の速度は大きくはならない。しかし、カバー率が低いと氷盤の遡上開始と波の到達までの間隔が小さく、氷盤が後方から押されて加速したところで波があたり効率よく加速していく。そのため遡上中の速度は単氷盤に比べて最大 1.4 倍程度高速になる。さらにこの高速での移動と遡上開始が早いために、防潮堤への衝突時において波に対する遅れが少なく、反射波の影響は小さいか、場合によってはほとんどみられなくなる。さらに、先に述べた後方の氷盤の影響もあるため、カバー率が 50 % 以下では氷盤の衝突速度が単氷盤に比べ増加する。特にカバー率が 20 % の場合で $C_{ic}/\sqrt{gH}$ は最大となり単氷盤の場合より 2 倍と大きくなっている。

北海道太平洋岸の流水は、根室海峡から流出してきたものであるが、一般に南東から南の風によって流水が沿岸部に押しつけられる。この流水は一般に帯状を呈していて、外洋においては幅が 1 km 前後で、カバー率は 10~20 % であることが多い。つまり氷盤が離散化した状態で移動している。しかし、上述したように南あるいは南東の風により氷盤は沿岸部に押しつけられ、カバー率 100 % となって汀線近傍を埋め尽くすことになる。この時、海底の昆布等に多大の被害を及ぼすことになる。しかし、このカバー率 100 % になる前、あるいは離岸直後においては 0~100 % の間でカバー率が変化することになるので、本研究結果より、流水の衝突を考慮して防潮堤あるいは防潮水門を設計する場合には、最大の衝突速度を示す 20 % のカバー率を想定することが、より安全な設計につながると考えられる。

(2) 混合氷盤群の遡上 (氷厚一定)

大きさの違う氷盤 ($a=3, 7, 10, 13, 16$ cm) が混在している場合の氷盤の遡上実験を行った。また、氷盤のカバー率は 0, 20, 30, 60 % である。実験は一回ごとに各

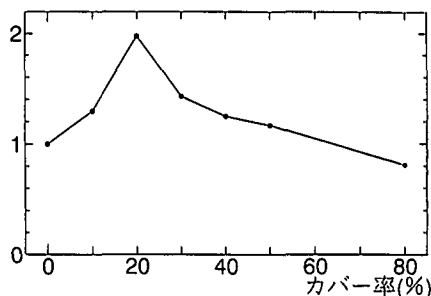


図-4 カバー率による氷盤の衝突速度 (case A)

大きさの水の中で衝突速度が最大のものをそれぞれ一枚選び解析した。また、同じケースの実験を五回づつ行い五回の中で最大値をその氷盤の衝突速度とした。

図-5 は氷盤の無次元衝突速度と氷盤の大きさの関係のカバー率ごとに示している。この時の碎波波高 H_b は 12 cm である。氷盤の衝突速度は、氷盤の増大とともに低下する傾向にある。カバー率の違いによる氷盤の衝突速度の違いを見ると、カバー率 20, 30, 60 % が単独氷の場合より大きな値となっている。この理由は、同一氷盤群の遡上と同様に後方の氷盤により押されることと、単独氷盤に比べて混合状態の氷盤群が反射波の影響が小さいことによるものと考えられる。しかし、遡上時の形態をみると同一氷盤群の場合に比べかなり複雑になっている。例えば大きな氷盤である a が 16 cm の氷盤の後方に存在する氷盤の大きさが、3 cm のときと 16 cm のときは移動の様子が大きく変わる。小さな氷盤は大きな氷盤の影響を強く受けるためであり、逆に大きな氷盤は小さな氷盤の影響をそれほど受けないためである。そのため、実験ごとのバラツキが他の場合より大きくでる。つまり、近接する氷盤の大きさが氷盤の衝突速度 C_{ic} に影響を与えることになる。

図-6 は、碎波波高 12 cm の場合の混合した氷盤群における、衝突時の氷盤の有している運動量と氷盤の大きさ (一辺 a の正方形で厚さ 2 cm の氷盤) を氷盤のカバー

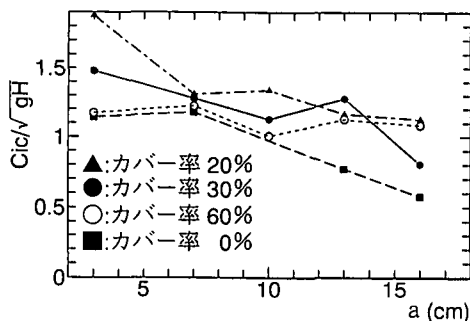


図-5 氷盤の衝突速度 (case B)

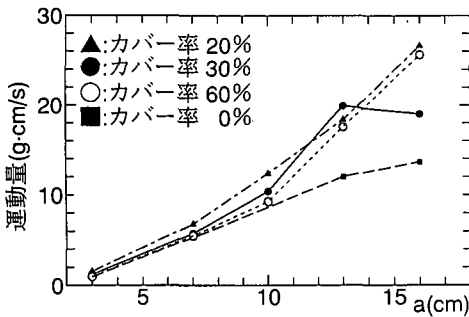


図-6 水盤の防潮堤への衝突時の運動量 (case B)

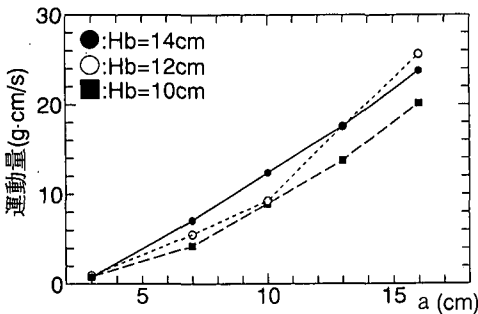


図-7 防潮堤への衝突時の運動量 (波高効果, case B)

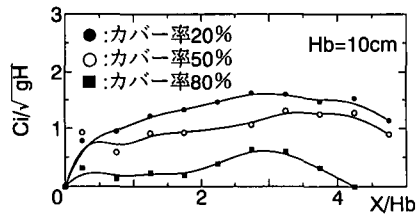


図-8(a) 水盤の遡上速度 (case A, SLOPE)

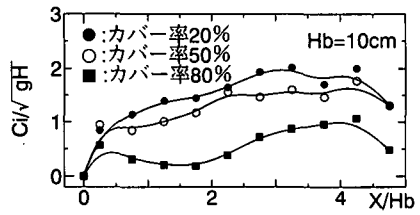


図-8(b) 水盤の遡上速度 (case A, FLAT)

れている。この図-8(a) (b) より、水盤の無次元速度にはほとんど差がなく、また、衝突時の水盤の速度も若干陸上地形が水平の場合が大きい値を示すことから、本実験での陸上を水平としたときの結果は陸上勾配が $1/30$ くらいまでは適用可能であることを示している。

4. 結 論

今回の実験により以下のことが明らかとなった。

(1) 本実験程度的大海盤の水面カバー率及びカバー延長では、水盤による波高の減衰は小さく、陸上遡上時の波高変化 H は前回報告 (佐伯ら, 1993) した単水盤の場合と同じであった。

(2) 水盤の陸上遡上時の防潮堤への衝突直前の反射波による減速は、単水盤の場合は大きい、多水盤群の遡上では後方の水盤に押されるためほとんどない。さらにカバー率が大きい方が反射波の影響は小さい。

(3) 防潮堤への水盤の衝突速度は多数の水盤が存在する場合ではカバー率が 60% 以下の時は単水盤の場合より大きくなる。特にカバー率 20% の時に最大となり、単水盤の場合の約 2 倍程度まで大きくなる。

(4) 異なる大きさの水盤が混在している場合の水盤の防潮堤への衝突速度は水盤が大きくなるに従い小さくなるが、衝突時の運動量は水盤の質量が増大するため、逆に水盤が大きい方が大きくなる。

(5) 実際の構造物の設計を考えるときは安全側を考え、水盤群のカバー率が 20% 程度の時の遡上速度、衝突速度を採用する方がよい。

(6) 汀線より陸側の地形の影響については、水盤の遡上速度、衝突速度は、水平であれ $1/30$ の傾斜であれ大

率ごとに分けて示したものである。先ほど図-5 で示したように、衝突時の速度は水盤のカバー率にかかわらず、水盤の大きさが大きいほど遅くなるが、その分質量が増すため、図-6 に示すように、水盤が大きくなるほど衝突時の運動量は大きくなっている。さらに全体的にみると、最大の衝突速度を示すカバー率 20% の場合、水盤の大きさにかかわらず、大きな運動量を示している。

また、水盤のカバー率 60% の場合の各碎波波高別の衝突時の運動量と水盤の大きさの関係を示したものが図-7 である。同図からも明らかなように、同一の波高であれば水盤の大きさが大きいほど水盤の衝突時の運動量は大きくなる。また全体的にみると、碎波波高が大きいほど衝突時の運動量は大きくなる。

(3) 陸上地形の影響

次に、水盤の陸上地形の違いによる遡上速度の違いを調べた。その結果を図-8 に示す。図-8(a) は陸上の勾配が海底勾配 $1/30$ と同じである場合、図-8(b) は汀線までは $1/30$ 勾配で、陸上は水平の場合である。この時の碎波波高 H_b は 10 cm で同一水盤群とし、水盤のカバー率が $20, 50$ それに 80% の場合の、汀線からの距離を碎波波高 H_b で無次元化したものと無次元水盤速度の関係を示したものである。また、佐伯ら (1993) の結果では、両地形の陸上での波高にはほとんど差がないことが知ら

きな差はなく、水平の場合が若干大きめで、設計としては安全側の値となる。よって、本実験結果は陸上が水平から1/30勾配まで使用可能となる。

(7) 本研究結果より Michel や Cammaert らの理論式より、防潮堤やそのゲートに作用する衝撃水力の算定が可能となる。

参 考 文 献

- 國松 靖・原文宏・高橋良正・佐伯 浩・榎 国男・今泉 章
(1993): オホーツク海沿岸部の流水盤の大きさに関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 95-100.
佐伯 浩・高橋良正・三谷朋行 (1994): 津波による海水盤の陸

上への遡上機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 796-800.

北海道庁 (1953): 十勝沖震災誌.

Cammaert, A. B., T. T. Wong and D. D. Curtis (1983): Impact of icebergs on offshore gravity and floating platforms, Proc. Int. POAC., Vol. 4, pp. 519-536.

Michel, B. (1970): Ice pressure on engineering structures, CRRL Monograph III B1b, Corps of Engineers, U. S. Army, pp. 15-20.

Shapiro, L. H. and R. C. Metzner (1987): Coefficients of friction sea ice on beach gravel, Jour. of OMAE. ASME, pp. 388-390.