

# 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

佐伯 浩\*・高橋良正\*\*・三谷朋行\*\*\*

## 1. 研究目的

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。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襲来する事もある。

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。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、1~3mの波高の津波が襲来した。これは津波の規模としては大きいものではなく、大した被害など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2m程度の低地であったことと、時期がちょうど冬期の流水来襲時期と重なったため、津波による水位の上昇にともない水塊が陸上に遡上して家屋に衝突した。それにより、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に遡上するときの遡上高とその移動速度を明らかにし、防潮堤へ水が衝突したときにゲート等に作用する水力を知ることである。この水盤の衝突

力を求めるには水の運動エネルギーや運動量から求める式が、Cammaert他(1983)により提言されている。よって、本研究では模型実験を行い、水盤の遡上時の速度の変化、運動エネルギーの変化を明らかにした。

## 2. 研究内容

実験はコンクリート斜面を持つ長さ24mの2次元造波水路で行った。実験縮尺はフルード相似則で1/25程度である。実験において斜面形状を2通り用いた。case(I)として勾配1/30の一樣斜面、case(II)として汀線まで勾配1/30で汀線から陸側は水平にして防潮堤を置いた場合、の2種類である。このcase(II)のとき防潮堤をの設置位置を汀線から入射波高の10倍(case(II-a))と5倍(case(II-b))の2ケースで実験を行った(図-2)。このcase(I)、case(II)においてそれぞれ静水面上に模型水盤を単独に浮かべ、浅水域における津波のモデルとして孤立波を発生させ、水盤の遡上機構を調べた。実験に用いた波は碎波波高で13.7, 12.0, 10.0, 7.0cmの4種類である。これは実規模で波高1.8m~3.5mとなり被害当時の波高を再現している。実験では、まずそれぞれの波について、波高計とビデオカメラを用いて波高変化を測定した。模型水盤はcase(I)では汀線に、case(II)では汀線、 $X_b/8$ ,  $X_b/4$  ( $X_b$ :汀線から碎波点までの水平距離)、の3点に浮かべ水盤の移動速度の変化

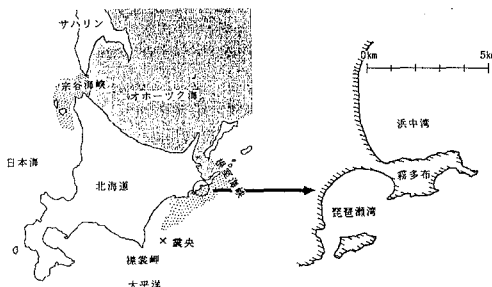


図-1 北海道の流水来襲状況と霧多布近傍地形

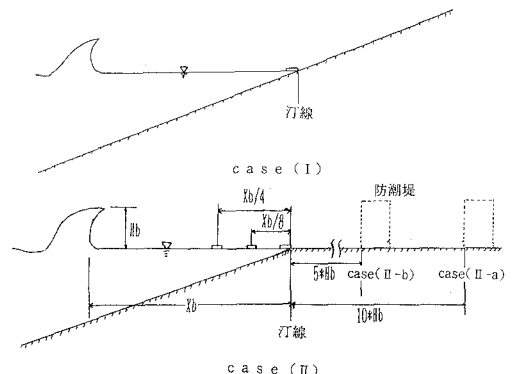


図-2 実験における斜面形状

\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科  
 \*\* 学生会員 北海道大学大学院  
 \*\*\* 東亜建設工業

及び, case (I) では水の最大遡上高, case (II) では防潮堤への水の衝突点の高さを測定した. また, 使用した模型氷盤は比重 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 Shapiro 他 (1990) の実氷盤の砂浜上での動摩擦係数の調査結果と同程度である. 模型氷盤の大きさは 1952 年の津波来襲時の被害写真及び著者らのオホーツク海沿岸での 1992 年, 1993 年の調査結果にもとづき実規模で一辺 2.5 m の正方形, 厚さ 25 cm~100 cm とし, 模型氷で一辺 10 cm, 厚さ 1, 2, 3, 4 cm のものを使用した.

### 3. 実験結果

図-3 は波の進行に伴う波高の変形状態を表している. 横軸は測定点の水深  $d$  を砕波点の水深  $d_b$  で除して無次元化したものであり, 縦軸にはその測定点における波高  $H$  を砕波波高  $H_b$  で除して無次元化したものである. 図中の線は, それぞれ砕波点において 13.7, 12.0, 10.0, 7.0 cm の波高の波の変形を表している. 造波機により発生した波は水深が浅くなるにつれて浅水変形し, 波高が大きくなる. そして限界に達すると砕波をし, エネルギーを失いながら進行し, これに伴い今度は急激に波高は減少し, 陸域に遡上していく. この図によると, 砕波した後の無次元波高  $H/H_b$  の減少の様子は, 砕波前の入射波高に関わりなくほぼ一定であることがわかる.

遡上の様子を示す図として砕波波高 12.0 cm, 水厚 1 cm の例を case (I), case (II) の場合それぞれを図-4, 5 に示す. 図には波の遡上時の波高  $H$ , 氷盤の移動速度  $C_i$ , そして水盤の移動速度  $C_w$ , を  $\sqrt{gH}$  ( $g$ : 重力加速度,  $H$ : 測点での波高) で除した無次元速度  $C_i/\sqrt{gH}$ , 横軸に  $X/H_b$  ( $X$ : 汀線を基点とした水平距離) を示している. 氷盤の移動の様子は, 水深が浅く氷盤が海底と接触しているような場合は波が氷盤にあたってから 1 テンポ遅れて動き出す. また, 氷盤が海底に接触せずに水面に浮いているような場合は氷盤に波があたると同時に動き出す. そしてすぐに加速し最高速に達し, その後, 一様斜面を遡上する場合には移動速度は徐々に減速していき地面との接触により摩擦が働き急激に減速し停止する. また, 水平面上を遡上する場合には移動速度はほぼ一定の値で移動していきそして防潮堤に反射してきた波が氷盤にぶつかり, 氷盤は減速しながら防潮堤に衝突する.

図-6, 7 は一様斜面上を遡上する case (I) の場合の無次元速度の変化を示している. 氷盤の無次元速度の変化を示している. 図-6 は砕波波高 12.0 cm の場合の無次元速度の水厚の効果を示している. 図-7 は水厚 2 cm の場合の無次元速度の砕波波高の効果を示している.  $I/H_b$  の値も図中に示している. 無次元速度の変化の様子

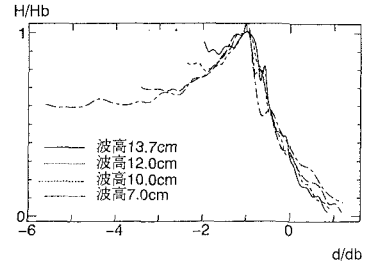


図-3 波の遡上の際の波高変形

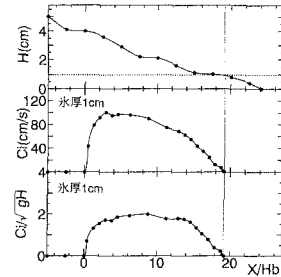


図-4 case (I) の場合 (砕波波高 12.0 cm)

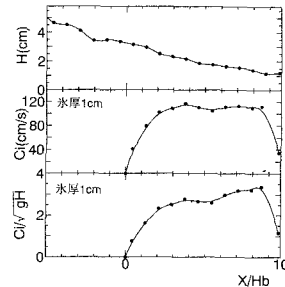


図-5 case (II-a) の場合 (砕波波高 12.0 cm)

から図-6, 7 のように加速域, 安定域, 減速域の三領域に分割できる. 減速域は, 斜面との摩擦により始る. また, 加速域以外の同じ地点におけるそれぞれの氷盤の無次元速度は波高の大きいもの, 水厚の薄いものほど大きい. また,  $I/H_b$  が大きくなるにつれて安定域が小さくなっていき,  $I=4$  cm の場合には安定域が無くなっている. これは, 加速域が終わった時点ですでに波高が水厚より小さく氷盤が斜面と接触しているためすぐに減速域が始まるためである.  $I=4$  cm 以外では, 減速域が始まる点, つまり地面との摩擦が働き始める点での波高は水厚の 1.1 倍~1.2 倍である. これは, 氷盤が水面上に完全に浮きながら移動しているわけではなく少し水中に沈みながら移動しているためである.

図-8, 9, 10 は case (II) の氷盤の無次元移動速度の変化である. 図-8 は水厚による効果 (波高 12.0 cm, 汀

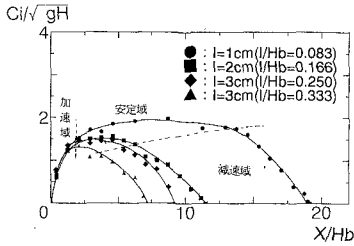


図-6 水盤の速度変化 (水厚による効果) case (I)

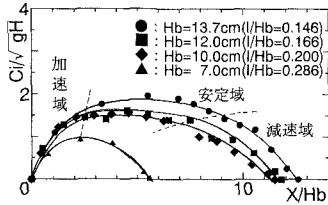


図-7 水盤の速度変化 (波高による効果) case (I)

線), 図-9 は波高による効果 (水厚 2 cm, 汀線), 図-10 には水盤の最初の位置の違いによる効果 (波高 10.0 cm, 水厚 1 cm) をそれぞれ示している. case (a) は防潮堤の設置位置が汀線から碎波波高の 10 倍の距離, case (b) は碎波波高の 5 倍の距離である場合を示である. 図-8 を見ると case (a), (b) とともに無次元移動速度は, 水厚が薄い方が速い. さらに防潮堤へ衝突するまでに波高が水厚以上にあるので地面との摩擦もなく, 堤に反射した波が水盤にぶつかる直前が最大となる. また図中で無次元速度が急に減少し出す点が反射波が水盤にぶつかる点である. また, case (a), (b) を比較すると case (a) の方が  $C_i$  と  $C_i/\sqrt{gH}$  の最大値は大きいが防潮堤への衝突速度  $C_{ic}$  と無次元衝突速度  $C_{ic}/\sqrt{gH}$  の値は小さくなる. これは, 防潮堤までの距離の長い case (a) は, 波の front と遡上中の水盤との差が大きくなり, 反射波が水盤にぶつかる点が防潮堤からより離れ減速域が大きくなるためである. また, 厚い水盤の方が速度が遅いため波に対する遅れが大きくなり反射による減速域が長くなる. これは, 防潮堤が遠くにある case (a) の場合の方が顕著に現れている. 図-9 を見ると case (a), (b) とともに波高の大きい方が移動時と衝突時の  $C_i/\sqrt{gH}$  は大きくなる. case (a), (b) を比較すると (a) の方が移動中の  $C_i/\sqrt{gH}$  は速いが堤への衝突時の  $C_{ic}/\sqrt{gH}$  は遅くなる. これは, 先に述べたように防潮堤への距離が遠いためである. また, 図で分かるように case (b) では, あまり減速せずに防潮堤へ衝突している. 図-10 を見ると, 移動時の  $C_i/\sqrt{gH}$  の最大値は水盤が浮いている場所による違いはあまりない. しかし, 汀線からスタートする水盤は,

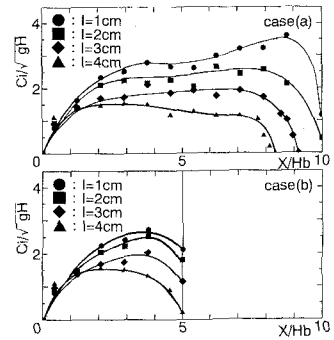


図-8 水盤の速度変化 (水厚による効果) case (II)

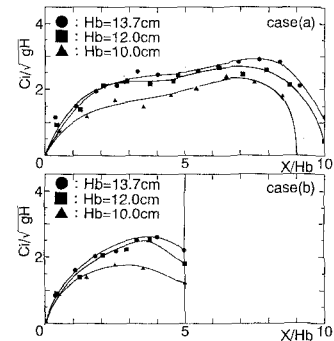


図-9 水盤の速度変化 (波高による効果) case (II)

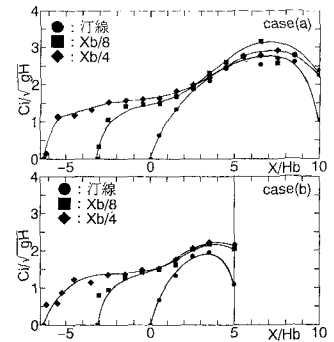


図-10 水盤の速度変化 (位置による効果) case (II)

(a), (b) とともに防潮堤へ衝突する直前の  $C_i/\sqrt{gH}$  の減少率は他の場合に比べて大きい. またこの場合も (a) の方がさらに減少率が大きい. 汀線に浮かべた水盤が防潮堤直前で減少率が大きいのは, 先に述べたように汀線の水盤は, 移動し始めるのは波があたってから 1 テンポ遅れてからなので波に対しての遅れが大きくなるからである.  $X_b/8, X_b/4$  の点に浮かべた水盤は, 水面に浮いているため波が水盤に到達すると同時に動き出すため波に対する遅れはあまりでない. そのため, 汀線の水盤は反射

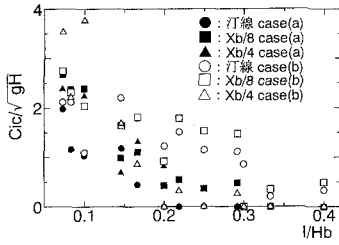


図-11 氷盤の防潮堤への衝突速度 case (II)

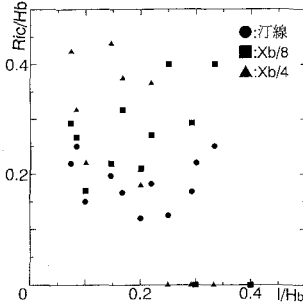


図-12 氷盤の防潮堤への衝突高さ case (II)

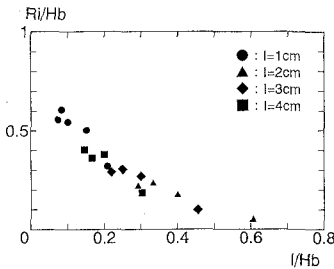


図-13 氷盤の遡上高 case (I)

波による減少域が他の場合に比べて長くなる。さらに、移動中の氷盤の  $C_i$  も汀線の氷盤は  $100 \text{ cm/s}$  程度で  $X_b/8, X_b/4$  の場合に比べ  $20\sim 30\%$  遅いため反射波を受ける時間が長くなりより減速すると考えられる。 $X_b/8, X_b/4$  においた氷盤では速度変化の様子の差は見られない。これは碎波帯内にある氷盤については、氷盤が海底に接地していなければその初期存在の位置に関係なく同じ速度変化をする事を示している。

図-11 は氷盤の防潮堤への衝突時の無次元速度を示した図である。横軸には、氷厚  $I$  を  $H_b$  で除した値である。この図を見るとこれまで述べてきたように衝突時の速度は全体的に case (b) の方が速いのがよく分かる。また、 $I/H_b$  が大きくなるに従い  $C_{ic}/\sqrt{gH}$  は減少する傾向がある。

図-12 は氷盤の防潮堤への衝突点の高さ  $R_{ic}$  を  $H_b$  で除したものと  $I/H_b$  の関係を示している。氷盤は防潮堤の直前で反射してきた波にもまれながら衝突するため図のようにばらつきがでていいる。しかし、汀線に置かれた氷盤は最大でも  $0.25$  程度と全体的に小さな値になる傾向がある。

図-13 は case (I) のときの氷盤の最大遡上高  $R_i$  を  $H_b$  で除した値と  $I/H_b$  の関係を示している。無次元最大遡上高  $R_i/H_b$  は  $I/H_b$  が增大するにつれて小さくなる。

図-14, 15 は case (I), case (II) それぞれの氷盤の運動エネルギー (erg) の変化の様子を波高ごとに示したものである。全ての波高に対して移動中の氷盤の運動エネルギーのピークの値は氷厚が増加するほど大きくなっている。これは厚い氷盤の方が移動速度は遅いが質量が大きいため運動エネルギーは増大するためである。その差は波高が小さくなるにつれ小さくなっている。しかし、case (I) の波高  $10.0 \text{ cm}$  の場合は氷厚  $3 \text{ cm}$  のとき最大となっている。これは波高が小さいため氷盤と地面との摩擦による減速が大きいためである。case (II) では、防潮堤への衝突時の運動エネルギーは  $I/H_b = 13.7 \text{ cm}$  のときは、厚い氷盤の方が大きい、波高が低下するに従い運動エネルギーは薄い氷盤の方が大きくなる。これは、先に述べたように氷厚が厚い方が反射波による速度の減少率が大きく、さらに  $I/H_b$  大きくなると地面との摩擦も起こり減少率が一層増加し、そのため運動エネルギーの減少が大きくなるためである。そのため、 $H_b = 10 \text{ cm}$  のときには、運動のエネルギーの大小が逆転している。

最後に case (I) と case (II) を比較するとその違いとして最大速度がある。波高、氷厚が同じ条件の図-6 と図-8 では  $C_i/\sqrt{gH}$  の最大値が case (II) の場合の方が  $15\sim 50\%$  大きい。また、case (II) では三領域に分割できず、地面との摩擦力が働かないような  $I/H_b$  が小さい場合では反射で減速するまでの間も少しづつ加速している。そして、防潮堤を設置しない場合は減速域が地面と

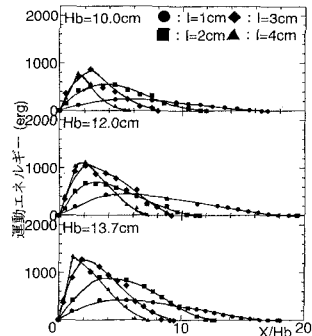


図-14 氷盤の運動エネルギーの変化 case (I)

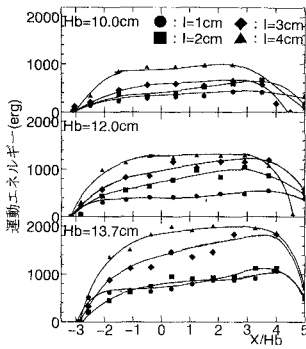


図-15 氷盤の運動エネルギーの変化 case (II-a)

の摩擦で始まるのに対し、防潮堤がある場合は  $I/H_b$  が小さいときは入射波の防潮堤による反射波で始まる。斜面上に施設や構造物が孤立して単独に存在するような時、その構造物への氷盤の遡上による衝突を考える場合は、防潮堤のない様斜面上での氷盤の遡上について実験を行った case (I) の結果を用い、防潮堤のゲートの設計などを考える場合は case (II) の結果を考慮に入れるとよい。

#### 4. 結 論

今回の実験により以下のことが分かった。

- (1) 入射波の波高に関わらず、砕波後に進行していく波の無次元波高  $H/H_b$  はほぼ同じように変化する。
- (2) 一様斜面上を障害物もなく遡上する氷盤の無次元移動速度  $C_i/\sqrt{gH}$  は、加速域、安定期、減速域の三領域に分割できる。しかし、 $I/H_b$  が大きくなるにつれ安定期は減少していく。
- (3) 入射波高が大きいほど、氷厚が小さいほど、氷盤の遡上時の移動速度  $C_i$ 、無次元移動速度  $C_i/\sqrt{gH}$ 、さらに防潮堤に衝突するときの  $C_{ic}$ 、 $C_{ic}/\sqrt{gH}$  は大きくなる。

(4) 防潮堤の設置位置が汀線に近い方が氷盤の遡上時の移動速度  $C_i$  および無次元移動速度  $C_i/\sqrt{gH}$  の最大値は小さくなるが、防潮堤に衝突するときの  $C_{ic}$  および  $C_{ic}/\sqrt{gH}$  は速くなる。

(5) 入射波により氷盤が、移動を開始する位置による、無次元移動速度の最大値の違いはあまりないが、防潮堤に衝突する際の無次元移動速度は汀線にある氷盤より沖側にある氷盤の方が速くなる。

(6) 一様斜面上を遡上する氷盤の最大遡上高  $R_i$  を無次元化した値  $R_i/H_b$  は  $I/H_b$  大きくなるに従い減少する傾向がある。

(7) 防潮堤への氷の無次元衝突速度  $C_{ic}/\sqrt{gH}$  は、 $I/H_b$  が大きくなるに従い小さくなる。さらに防潮堤が汀線から離れた方が小さくなる。

(8) 氷力の防潮堤への作用点の高さ  $R_i$  を無次元化した  $R_i/H_b$  は、衝突前に反射波にもまれるためバラツキが大きくなる。

(9) 氷盤の遡上時の運動エネルギーの最大値は、同じ入射波に対して氷厚が大きい方が増大する。しかし、 $I/H_b$  の値が大きくなりすぎると、波速に対して氷盤の速度が遅いため、反射波により防潮堤へ衝突する前に停止したり、速度が急激に低下するために、衝突時の運動エネルギーや運動量は小さくなる。

#### 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氷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・秋原真哉・高橋良正・原文宏・堺 茂樹 (1993): 津波による氷盤の陸上への遡上機構, 第8回オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム, pp. 184-188.
- 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.
- Shapiro, L. H. and R. C. Metzner (1987): Coefficients of friction sea ice on beach gravel, Jour. of OMAE. ASME, pp. 388-390.