

越波および津波により杭構造物に作用する衝撃氷力算定法

早川 哲也*・花田 真州**・川合 邦広***・佐伯 浩****

1. ま え が き

冬季のオホーツク海沿岸では、越波とともに防波堤を越えた流水（越水）の衝突により背後施設や係留中の漁船が破損する場合がある。また、1952 年 3 月に発生した十勝沖地震では、津波により流水が遡上し、沿岸の家屋が倒壊した事例も報告されている。この対策として、防波堤天端上の越水防止柵や流水制御施設として適用例の多いジャケット式沿岸構造物などの建設が求められており、実設計においては流水が高速度で杭構造物に衝突した場合の衝撃的な氷力を算定する必要がある。

直立堤および混成堤における越水特性については、酒井ら（1993）が水理模型実験を行ない、波浪および構造条件から氷板の越水速度を算定する方法を提案している。また、高橋ら（1995）は模型氷板群に孤立波を作用させ、津波による氷板の遡上メカニズムを解明した。ただし、これらの研究は越波および津波による氷板の運動特性の検討を中心に行っており、構造物に作用する衝撃氷力の解明にまでは至っていない。

衝撃氷力については Cammaert ら（1988）が流水の運動エネルギーが全て衝突時における水の圧縮破壊エネルギーに費やされるという仮定により算定法を導いている。しかしながら、オホーツク海に來襲する比較的小さな流水が杭構造物に衝突した場合、破壊した氷板が衝突後に飛散することが笹島ら（1996）の研究により明らかにされており、適切な衝撃氷力を評価するためには、衝突後の氷板の運動エネルギーについても考慮した算定法を提案する必要がある。

そこで本研究では、流水の杭構造物への高速衝突に関する大規模実験を行ない、衝撃氷力算定方法について検討する。また、オホーツク海沿岸の流水および波浪特性から、越水防止柵を想定し直立堤天端上の杭構造物に作用する衝撃氷力の確率分布について検討する。

2. 実験方法

図-1 は、氷板落下装置を示したものであり、幅が 1.5×0.3 m、高さが 5.6 m である。試験氷板をクレーンにより吊り上げ、衝突速度 V_i が $7 \sim 9$ m/s となるよう所定の高さに設置した。ここで、 V_i は酒井ら（1993）および高橋ら（1995）の研究結果をもとに決定されており、オホーツク海沿岸における越波および津波による氷板の移動速度と同程度である。

落下装置下部には円断面杭が設置されており、ロードセルおよび歪ゲージにより衝突時の作用荷重および杭の歪の時刻変化をサンプリングタイム 1000 Hz で記録した。実験で用いた円断面杭は鋼製であり、直径 $D=100$ および 200 mm の 2 種類である。

試験氷板については、塩分濃度が実際の流水と同程度となるよう濃度 5% の塩水を凍結させ、これを切断することにより作成した。氷板の大きさは、幅を 1.5 m および厚さを 0.2 m と一定にし、長さ l を $1 \sim 2$ m と変化させ、質量 m を 270~980 kg とした。実験に用いた氷板の一軸圧縮強度 σ_c は、18 個の直径 100 mm および高さ 200 mm の円筒形供試体からを歪速度 10^{-3} s で測定したところ平均して 2.2 MPa であった。

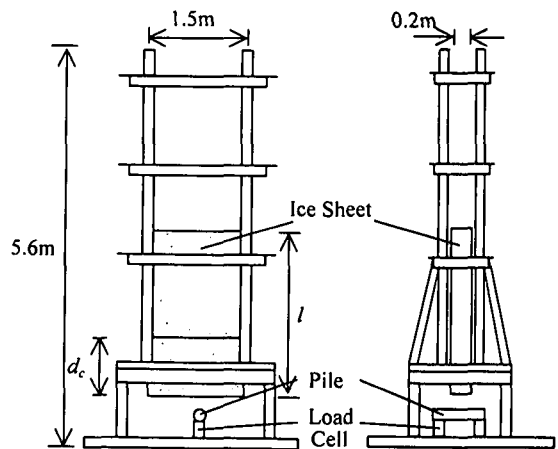


図-1 氷板落下装置

* 正 会 員 北海道開発局 開発土木研究所
** 正 会 員 工 務 (株)鹿島
*** 正 会 員 (株)西村組
**** フェロー 工 博 北海道大学大学院教授 工学研究科

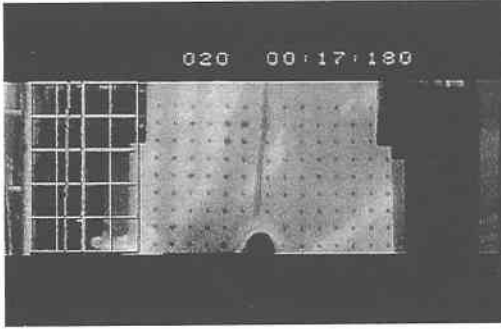


写真-1 氷板の破壊状況

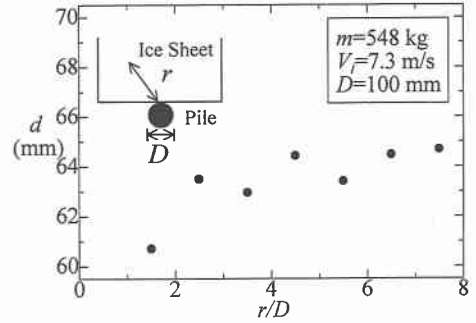


図-2 氷板の変形状況

また、氷板の衝突速度および変形状況を詳細に検討するため、氷板の表面に 0.1 m 間隔で格子点をプロットし、毎秒 500 コマで録画可能な高速度ビデオカメラにより撮影した。

さらに、氷板の質量 m を一定とした場合の衝撃水力に及ぼす氷板の長さ l の影響を調べるため、衝突側の氷板端から距離 d_c において落下方向と垂直に切断面を入れ衝撃水力を測定する実験も行った。

3. 氷板の破壊状況

(1) 氷板の破壊特性

写真-1 は、高速度ビデオカメラにより撮影された衝突後の氷板の破壊状況である。流水が高速で杭に衝突する場合、接触面では圧縮破壊モードが発生する。海水は歪速度により圧縮破壊モードにおける強度が異なることが知られているが(例えば Nadreau ら, 1984), 本実験では杭の貫入速度が非常に早いため、接触面では脆性破壊が発生していると考えられる。また、氷板が長さ方向に割れる現象もみられ、高速で流水が杭に衝突する場合、圧縮およびスプリット破壊の 2 つのモードが複合して発生することが明らかとなった。

(2) 氷板および杭の変形

図-2 は、衝突直後の氷板の変形特性の一例を示したものであり、氷板の質量 $m=548 \text{ kg}$ 、衝突速度 $V_i=7.3 \text{ m/s}$ および杭の直径 $D=100 \text{ mm}$ の条件である。横軸は杭との接触点から氷板上にプロットした格子点までの距離 r を D で除した r/D 、縦軸はビデオ画像から測定した衝突後 0.01 秒間での r/D におけるいくつかの格子点の平均移動量 d である。格子点の移動距離 d は氷板と杭との接触点から離れるとともに増加し、 r/D が 4 程度以上になると一定値となる傾向にある。一定値となる d は氷板全体の移動量であるのに対して、杭周辺の格子点では衝突による変形により d が小さい値を示すと考えられる。言い換えれば、衝突時の氷板の圧縮による弾性変形量は杭から離れるほど小さくなり、その距離が杭の直径

の約 4 倍以上となるとほぼゼロになる。また、この傾向は杭の直径 $D=200 \text{ mm}$ の条件でも確認された。

この結果から氷板の弾性変形により消費されるエネルギーをヤング率 0.9 GPa (佐伯ら, 1980) および一軸圧縮強度 $\sigma_c=2.2 \text{ MPa}$ により算定すると 10 J となり、氷板の衝突前の運動エネルギー 1.5 kJ と比較して十分に小さい。

また、歪ゲージによる測定結果から杭の弾性変形により消費されるエネルギーを計算すると 0.001 J 程度となり、これも氷板の弾性変形と同様に十分小さい値を示した。

4. 衝撃水力算定法

(1) 水力荷重の波形

図-3 は、ロードセルにより測定された水力の時刻変化の一例を示したものであり、氷板の質量 m は 548 kg 、衝突速度 V_i は 7.3 m/s および杭の直径 D は 100 mm である。ロードセルの固有振動数は 240 Hz 程度であり、水力の波形と比較して十分に高いものとなっている。衝突直後荷重は急激に増加し、約 0.015 s 後にピーク値である 20 kN に達している。ここで、水力の最大値を $F_{\max}$ および衝突後から $F_{\max}$ が発生するまでの時間を $t_{\max}$ と定義する。水力の最大値が発生した後もいくつかの荷重の

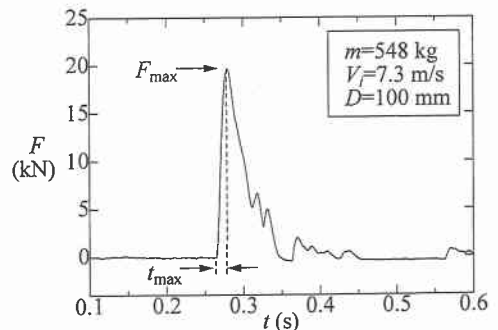


図-3 水力の時刻変化

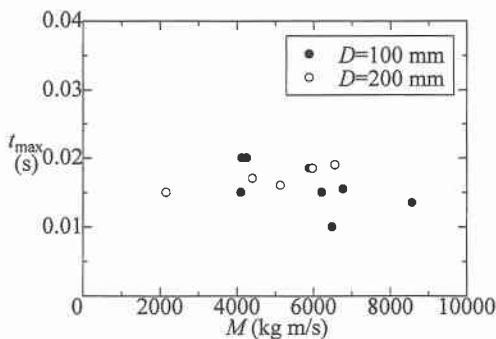


図-4 最大水力発生時間

ピークが測定されているが、これらは衝突後に破壊した水板が杭に接触したためである。

図-4は、水板の衝突直前の運動量 M と $t_{\max}$ の関係を示したものである。運動量に変化しても $t_{\max}$ は一定の値を示している。また、 $t_{\max}$ に対する直径 D の影響も見られず、 $t_{\max}$ は平均すると0.016 sとなる。

(2) 圧縮破壊による衝撃水力算定法

衝突直前と最大衝撃水力発生時におけるエネルギーの保存則は次式で示される。ただし、スプリット破壊は圧縮水力が最大となるまでに発生しないと仮定する。

$$\frac{1}{2}mV_i^2 = \frac{1}{2}m(V_i - \Delta V)^2 + E_c + E_{di} + E_{dp} \cdots (1)$$

ここに、 ΔV : 衝突による水板の速度の減少量、 E_c , E_{di} および E_{dp} : 圧縮破壊、水板の弾性変形および杭の弾性変形に費やされるエネルギーである。前章の結果より E_{di} および E_{dp} を無視し、 ΔV は V_i よりも十分小さいと仮定する。また、 E_c は次式で表すことができる。

$$E_c = \int_0^{x_m} p_e A(x) dx \cdots (2)$$

ここに、 p_e : 有効水圧、 x : 杭の水板への貫入距離、 x_m : 最大貫入距離、 $A(x)$: x における杭と水板との接触面積であり、 $x \ll D$ とすると E_c は次式のように表せる。

$$E_c = \frac{3}{4} k_e h_i \sqrt{D} x_m^{3/2} \cdots (3)$$

ここに、 h_i : 氷厚および D : 杭の直径である。

また、水力の時刻変化を圧縮破壊による最大衝撃水力 F_{cmax} およびその発生時間 t_{max} による三角形分布を仮定し、運動量の変化と力積の関係を式(1)に代入することにより ΔV を消去すると F_{cmax} は次式のようになる。

$$F_{cmax} = 1.73 p_e h_i \sqrt{D V_i t_{max}} \cdots (4)$$

ここで、 t_{max} は前章の結果から0.016 sとする。また、有効水圧 p_e については Michel ら (1977) が貫入試験結果から脆性破壊領域に対して、一軸圧縮強度の0.8倍程度

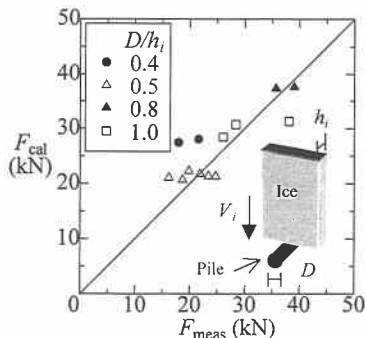


図-5 圧縮破壊による水力の算定結果

を提案している。しかしながら、本実験での水板の歪速度が Michel ら (1977) の実験と比較して極めて早いことから、実験結果を考慮して、一軸圧縮強度の0.25倍とした。

図-5は、最大水力の実験結果 F_{meas} と式(4)による計算結果 F_{cal} の関係を接触面のアスペクト比 D/h_i をパラメータとして示している。アスペクト比の影響は見られず計算結果は実験結果に一致する傾向にあり、算定法の妥当性が検証された。

一辺の長さが 2.0×2.0 m、厚さ0.2 mの密度 900 kg/m^3 である水板が直径100 mmの円断面杭に速度 7.0 m/s で衝突した場合、Cammaer ら (1988) の方法を用いると、衝撃水力は 50 kN と算定される。これに対して、式(4)では 20 kN となり、より経済的な構造物の設計が可能である。

(3) スプリット破壊による衝撃水力

図-6は、衝突面側の水板端から距離 d_c において切断面を入れた場合の最大水力 F_{max} の変化を示しており、水板の質量 m は $530 \sim 560 \text{ kg}$ 、衝突速度 V_i は $7.3 \sim 7.7 \text{ m/s}$ と同程度である。 F_{max} は d_c とともに増加し、ある d_c を越えると一定となる傾向にある。これは水板の長さが比較的短い場合は圧縮破壊による水力が最大値に達する前に、より抵抗が小さいスプリット破壊が発生するためと

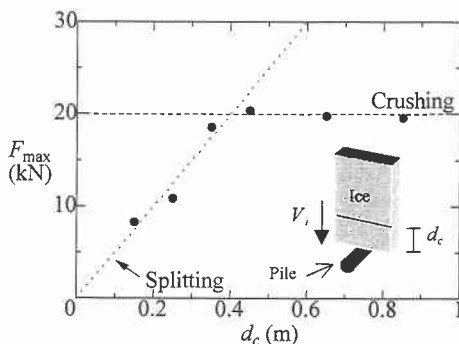


図-6 切断面の位置と衝撃水力の関係

考えられ、次式に示す氷板の長さ L に比例して増加するスプリット破壊発生時の最大水力 F_{max} の算定法 (Michel, 1978) と矛盾しない。

$$F_{\text{max}} = nLh_c\sigma_i \quad (5)$$

ここに、 n : 構造物の形状係数および σ_i : 氷の引張強度である。ただし、円断面に対する n は明らかにされておらず、また、本実験では引張強度の測定も行っていない。ここでは、実験時の気温 -2.0°C から Saeki ら (1978) の方法を用いて引張強度を 0.20 MPa と仮定し、実験結果を考慮して形状係数 n を 1.28 とする。

これに対して、 d_c がある程度大きくなるとスプリット破壊に至る水力も大きくなり、破壊エネルギーがより小さい圧縮により水力の最大値が決定される。このため、 F_{max} は d_c に関わらず一定値になると考えられる。

(4) 衝撃水力の算定法

越波および津波による衝撃水力を決定論的に算定する場合は、設計条件により酒井ら (1993) および高橋ら (1995) の結果を用いて衝突速度 V_i を求め、流水の大きさおよび強度から式 (4) および式 (5) により算定される水力の小さい値を用いれば良い。

5. 越波による衝撃水力の確率分布

(1) 計算方法

水力の算定においては、式 (4) および式 (5) にあるように流水の大きさや強度など、ばらつきが大きい変数を含んでおり、決定論ではなく確率論的に検討することが重要である。ここでは、直立堤天端上の越水防止柵を対象とし、オホーツク海沿岸における海水および海象特性から、衝撃水力の確率分布をモンテカルロ法により計算する。なお、計算を行った直立堤の構造条件は、水深 $h=12\text{ m}$ および天端高 $h_c=6\text{ m}$ である。

(2) 流水の大きさおよび強度の確率分布

國松ら (1993) はオホーツク海沿岸に接岸した流水の形状および氷厚の調査を行ない、氷板の形状はほぼ正方形で近似でき、その一辺の長さ a は平均 3.7 m および標準偏差 1.3 m の対数正規分布に従うことを明らかにした。また、氷厚については、ばらつきがあるものの a の $1/2$ 倍程度となることを報告している。本計算では國松ら (1993) の結果をもとに、氷厚は $0.5a$ を平均値および 0.2 m を標準偏差とする正規分布に従うと仮定した。

流水の圧縮強度に関しては、竹内ら (1995) がサロマ湖において調査を行っており、確率密度関数として平均 1.23 MPa および標準偏差 0.32 MPa の対数正規分布 (3母数) を提案している。

引張強度の確率分布に関する既往の検討例はないが、ここでは Saeki ら (1978) の算定式から得られる引張強

度 0.20 MPa を平均値とし、圧縮強度と同様に平均値の 26% の 0.05 MPa を標準偏差とする対数正規分布を用いた。

(3) 越氷速度の確率分布

図-7 は、過去8年間に紋別港沖合 -50 m において流水の来襲が考えられる2月および3月に観測された有義波高 $H_{1/3}$ の相対度数分布を示したものであり、横軸は有義波高 $H_{1/3}$ を2つの定数により基準化した y である。ただし、遠藤ら (1993) の方法により越波が発生する有義波高が 2.0 m と算定されたため、波高 2.0 m 以上の波浪を解析対象とした。流水来襲期のオホーツク海の波高分布はほぼ実線で示されている指数分布により近似することができると考えられる。また、この期間の沖波波形勾配 $H_{1/3}/L_0$ は平均して 0.02 程度であった。

図-8 は、酒井ら (1993) の実験結果を再整理したものであり、横軸は氷板の一辺の長さ a を沖波波長 L_0 で無次元化したもの、縦軸は越氷速度 V_i を沖波波高 H_0 および重力加速度 g により無次元化したものであり、無次元天端高 h_c/H_0 をパラメータとしている。 $h_c/H_0=0.44$ の条件では、無次元越氷速度が若干大きな値を示すが、沖波波長に対する氷板の長さが大きくなるとともに減少する傾向にある。この傾向を定式化すると次のようになる。

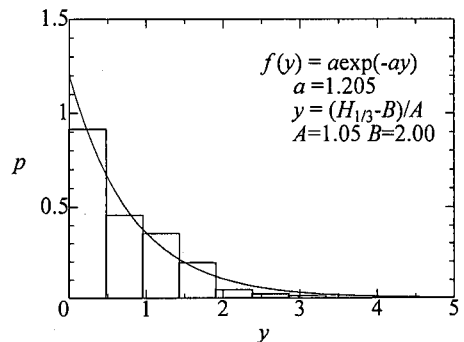


図-7 流水来襲期の波高の相対分布

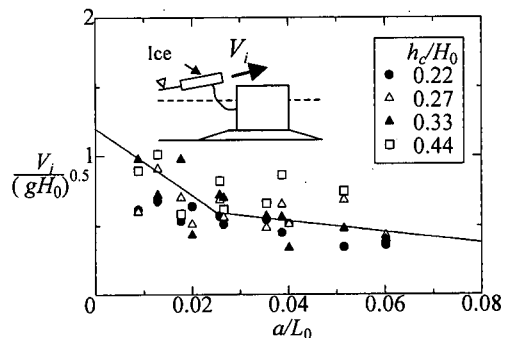


図-8 越氷速度と波浪条件の関係

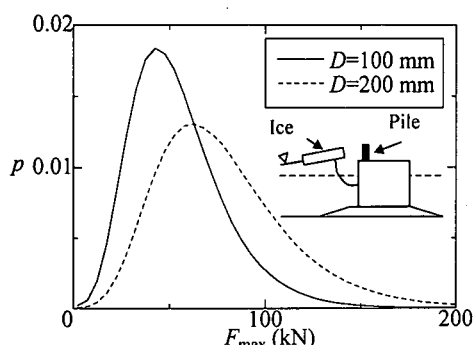


図-9 衝撃水力の確率分布

$$\frac{V_i}{\sqrt{gH_0}} = \begin{cases} -24a/L_0 + 1.2 & (a/L_0 < 0.025) \\ -4.0a/L_0 & (0.025 \leq a/L_0) \end{cases} \quad \dots (6)$$

よって、有義波高から沖波波形勾配 0.02 を用いることにより算定される沖波波長、沖波波高および氷板の大きさにより越氷速度の算定が可能である。

越氷速度の確率分布を求める場合、本来であれば不規則波中の一波ごとに対する越氷速度を算定するべきであるが、ここでは簡易的に代表値である有義波高の分布から越氷速度の確率分布を算定する。

(4) 衝撃水力の確率分布

以上の海水の大きさ、強度および越氷速度に関する確率分布から式(4)および式(5)を用いて、越波による衝撃水力をモンテカルロ法により求めると図-9のようになる。衝撃水力の平均値は $D=100$ mm で 57 kN、標準偏差が 28 kN となり、 $D=200$ mm での平均値は 81 kN、標準偏差は 37 kN と計算された。

また、円断面杭の高さを 1.0 m と仮定して菅原ら(1992)の方法によりオホーツク海沿岸の 50 年確率波から作用波力を算定すると 2.9 kN ($D=100$ mm) となる。モンテカルロ法により算定された水力の平均値は波力よりも大きく、氷海域での杭構造物の設計においては衝撃水力による検討が重要であることが示された。

6. ま と め

本研究により得られた主要な結論を以下に示す。

- ① 流水が高速で杭に衝突する場合、接触面では圧縮破壊モードが発生し、さらに氷板が 2 つに割れるスプリット破壊モードも発生する。
- ② 衝突時の氷板の圧縮による弾性変形は杭から離れる

ほど小さくなり、その距離が杭の直径の約 4 倍以上になるとほぼゼロになる。

- ③ 杭構造物に作用する衝撃水力算定法を提案し、その妥当性を検証した。
- ④ モンテカルロ法により、冬季のオホーツク海の水氷および海象条件から衝撃水力の確率分布を明らかにした。

最後に、この研究を進めるにあたり National Research Councils Canada の Dr. Robert Frederking から貴重な助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 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, 第 40 巻, pp. 1131-1135.
- 國松 靖・原文宏・高橋良正・佐伯 浩・榎 国夫・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.
- 酒井裕二・高橋良正・三谷朋行・山下俊彦・佐伯 浩 (1993): 防波堤における越氷機構と氷板の移動速度に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 247-252.
- 笹島隆彦・早川哲也・川合邦広・花田真州・大島香織・佐伯 浩 (1996): 円断面杭に作用する衝撃水力と氷板の破壊性状に関する研究, 第 12 回寒地技術シンポジウム論文集, pp. 552-559.
- 菅原邦彦・遠藤秀則・高橋重雄・遠藤仁彦 (1992): 親水性防波定上の手すりの耐波設計法, 海岸工学論文集第 38 巻, pp. 686-690.
- 高橋良正・片山 晃・花田真州・佐伯 浩・山下俊彦 (1995): 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, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1236-1240.
- 竹内貞弘・赤川 敏・岩井俊之 (1995): 現地海水氷盤の強度分布特性について, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 241-245.
- Cammaert, A. B. and D. B. Muggeridge (1988): Ice Interaction with Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold, pp. 208.
- Michel, B. and N. Toussaint (1977): Mechanism and Theory of Indentation of Ice Plates, Journal of Glaciology, Vol. 19, No. 81, pp. 285-301.
- Michel, B. (1978): Ice Mechanics, Les Presses de L'universite Laval, pp. 304.
- Nadreau, J. P. and B. Michel (1984): Ice Properties in Relation to Ice Forces, Proc. Second State of the Art IAHR Working Group on Ice Forces, Vol. 4, pp. 105-113.
- Saeki, H., T. Nomura and A. Ozaki (1978): Experimental Study on the Testing Methods of Strength and Mechanical Properties for Sea Ice, Proc. IAHR Ice Symp., pp. 135-149.