

平板に作用する衝撃氷力に関する実験的研究

Impact Ice Load Acting on Flat Plate Due to Wave Action

花田真州*、川合邦広**、佐藤正樹**、早川哲也***、佐伯 浩****

Masakuni Hanada, Kunihiro Kawai, Masaki Sato, Tetsuya Hayakawa and Hiroshi Saeiki

The Okhotsk Sea coast of Hokkaido is covered with ice floes during winter. Aota et al. showed that the temperature in this region has been rising every winter, and in the last ten years the amount of sea ice has been decreasing. Therefore the period of coexistence of waves and ice floes has become more longer and it is very important problem to make clear the impact ice load acting on offshore, harbor and coastal structures which are constructed on Okhotsk Sea coast of Hokkaido. Saeiki et al. and Takahashi et al. reported that the velocity of ice floes due to wind wave, overtopping over breakwater and tsunami was about 4-8 m/s. In this paper, the authors clarified the impact ice load acting on flat-rigid plate through the systematic experiments.

KEYWORDS Impact ice load, Flat structure, Offshore structure, Harbor structure

1. はじめに

北海道のオホーツク海沿岸には、冬期、流氷が押し寄せる。防波堤等の構造物前面海域が十分な延長で海水に覆われている場合は、構造物前面の波高は十分に小さくなることが明らかにされている。しかし、最近オホーツク海の流氷量が減少傾向にあり、海水による波浪の減衰効果が小さくなって、波浪に伴う海水の運動が無視できない状況になりつつある。防波堤前面の水盤は波がやってきても上下に振動することが多く、構造物に高速度で衝突することはあまりない。しかし、防波堤港口部近傍やスリットケソン等特殊防波堤の部材には、波浪により氷盤が衝突する。また、流氷で覆われた海域に津波が発生して氷盤が陸上へ遡上し、防潮堤やそのゲートへ高速度で衝突することも考えられる。そこで本研究では、高速で移動する海水氷盤が massive な構造物に衝突するときの衝撃氷力を実験的に明らかにし、結氷海域における海洋・海岸構造物の設計に役立てようとするものである。

2. 実験方法

今回用いた実験装置は図1に示すような鉄骨構造であり、矩形氷盤(幅150cm, 厚さは最大30cmまで可能)を鋼枠の中を通して上から落下させるようになっている。下部には、幅180cm, 奥行き65cm, 厚さ16mmの鋼板が、片方はヒンジ、もう片方は容量10tfのロードセル2個で支持されており、氷盤はその中央部に衝突する構造となっている。また鋼板の裏面には、衝突時の変形を小さくするため、ウェブを横方向に5本入れた。衝撃荷重はロードセルで測定し、 $10\mu\text{sec}$ でサンプリングして記録した。防波堤越氷時の氷盤の水平方向移動速度については、酒井等の研究により、オホーツク海沿岸部の冬期の異常波浪と、紋別港、網走港の平均的な防波堤の堤脚水深、天端高から、氷盤の移動速度 V は4-8m/secとなる。よって本実験における海水の構造物への衝突速度は4.6, 8m/secとした。この衝突速度は氷盤の落下高を変えることにより変化させたが、衝突時の速度をより正確に調べる事と氷盤の破壊性状の確認をするため正面より高速度ビデオカメラ(毎秒500コマ)で撮影した。用いた海水は幅150cmの

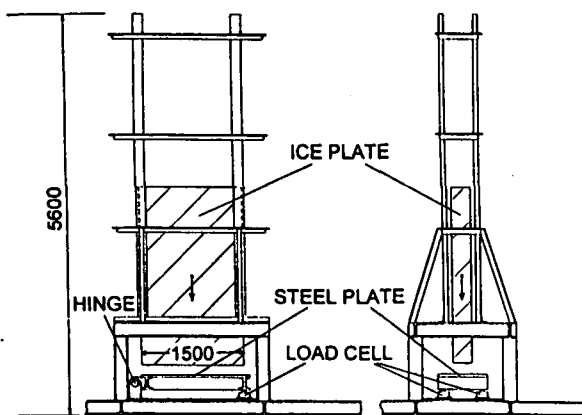


図1 実験装置

- * 学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (060 札幌市北区北13条西8丁目)
- ** 正会員 (株)西村組
- *** 正会員 北海道開発局開発土木研究所
- **** 正会員 北海道大学工学部

水槽に 5%の海水を入れ凍結させたものを用いた。海水の厚さは約 20cm、幅は150cmとし、切断する長さを変えることにより、氷盤の重量を変化させた。海水の一軸圧縮強度 σ_c は海水の成長方向に直交するように採取した円筒形供試体（直径10cm、高さ20cm）を歪速度が約 10^{-3}sec^{-1} で破壊することにより求めた。供試体数は20個で、この度数分布を図2に示す。平均の一軸圧縮強度は 24.4kgf/cm^2 、標準偏差は2.5であり、供試体破壊時の歪の平均値は0.011、標準偏差は0.002であった。また、強度試験時の水温は -2°C で、これは衝撃試験時の平均気温と同じである。

3. 実験結果と考察

衝撃試験の結果を表1に示す。同表より明らかなように、衝突速度 V が 4m/sec で7ケース、 6m/sec で8ケース、 8m/sec で9ケースと計24ケースの実験を行った。このうち、 $V=8\text{m/sec}$ のケースにおいては、氷盤先端部の左右端を45度の角度で切り落とし、接触面積を半分にした実験を6ケース行った。まず衝突してから最大衝撃力発生までの時間 t_{max} と氷盤の運動量 M との関係を示したものが図3である。接触面積を半分にしたケースを○印で表す。

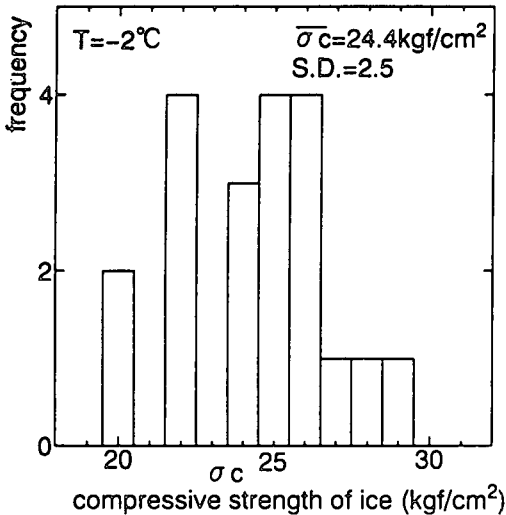


図2 一軸圧縮強度の度数分布

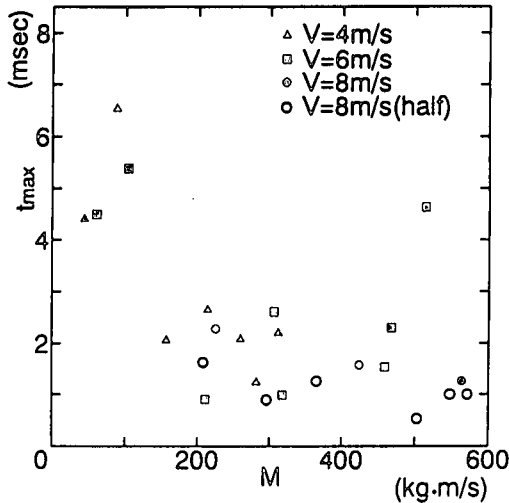


図3 衝撃時の氷盤の運動量と最大衝撃力発生までの時間との関係

表1 衝撃試験結果

重量	衝突速度	運動量	最大衝撃力	到達時間	衝撃継続時間	力積	平均荷重速度	平均衝撃力	衝撃時間	備考
kgf	m/sec	kg m/sec	tf	msec	msec	tf msec	t/msec	tf	msec	
W	V	M	F _{max}	t _{max}	t _d	I	F _{max} /t _{max}	I/t _d	I/F _{max}	
499	6	306	58.80	2.61	7.39	229	22.51	30.94	3.89	
749	6	459	37.80	1.54	8.75	260	24.59	29.74	6.88	
840	6	514	30.36	4.64	15.76	274	6.54	17.37	9.02	
100	6	61	6.72	4.50	14.85	66	1.49	4.42	9.77	
170	6	104	24.00	5.39	12.41	130	4.45	10.45	5.40	
344	6	211	19.20	0.91	19.91	225	21.04	11.29	11.70	
520	6	318	82.50	0.99	5.45	214	83.33	39.30	2.60	
765	6	468	65.82	2.30	6.66	219	28.62	32.91	3.33	
765	4	312	40.62	2.20	23.38	306	18.44	13.07	7.52	
638	4	260	41.76	2.08	10.95	256	20.13	23.34	6.12	
385	4	157	51.84	2.06	8.83	269	25.17	30.51	5.20	
108	4	44	11.70	4.41	12.7	66	2.65	5.17	5.62	
215	4	88	13.92	6.54	13.53	105	2.13	7.78	7.56	
524	4	214	51.72	2.65	10.41	288	19.54	27.65	5.57	
690	4	282	25.14	1.24	20.05	252	20.27	12.56	10.02	
519	8	424	57.18	1.58	7.38	205	36.13	27.73	3.58	
690	8	563	44.10	1.26	6.26	229	34.93	36.63	5.20	
276	8	225	49.44	2.28	5.98	149	21.71	24.91	3.01	
671	8	548	56.40	1.00	6.2	150	56.26	24.20	2.66	接触面積半分
616	8	503	28.20	0.53	6	111	53.71	18.45	3.92	接触面積半分
447	8	365	31.20	1.26	5.71	115	24.71	20.13	3.68	接触面積半分
363	8	296	45.06	0.90	5.8	117	50.21	20.22	2.60	接触面積半分
255	8	208	23.70	1.63	6.7	116	14.58	17.29	4.89	接触面積半分
700	8	571	45.78	1.00	5.9	140	45.89	23.74	3.06	接触面積半分

この図を見ると、運動量が大きくなると、最大衝撃力発生までの時間は、小さくなって一定となる傾向がみられ、おおむね1msecから3msecの中におさまる。ただ、運動量が小さい時の t_{max} も最大でも 6.5msec程度であることから、波浪等で運動している多数の水盤群が、同時に衝撃氷力を発生させることは極めてまれであると考えられる。一般に、オホーツク海沿岸部の代表的な海水氷盤の大きさは、一辺が4m程度の正方形と見ることができる。よって、構造物延長4m程度に一ヶ所衝撃氷力が作用すると考えても充分安全側の設計となる。

次に、衝突直前の速度 V と最大衝撃氷力発生時の時間 t_{max} の積 $V \cdot t_{max}$ と運動量 M の関係を調べたものが図4である。これは、衝突後もそれ以前の速度を維持するとしたときの最大衝撃氷力発生時の氷盤のみかけの変形量を示す。実際には衝突後の氷盤の落下速度は小さくなるはずであるから、実際の最大衝撃氷力発生時の変形量はこれより小さめの値になる。このみかけの変形量 $V \cdot t_{max}$ はほとんどが3cm以下である。これを各々の氷盤の長さ(l)で除して、最大衝撃氷力発生時の歪 $\epsilon (=V \cdot t_{max} / l)$ を求め、これと運動量との関係を示したものが図5であり、歪速度 $\dot{\epsilon} (=V/l)$ と運動量との関係を図6に示す。これをみると、歪速度はかなり大きいが、最大衝撃氷力発生時の歪の多くは0.01より若干小さい値であり、氷の一軸圧縮強度試験をしたときの破壊時の歪と同程度であった。次に衝撃力継続時間 t_c と氷盤の運動量 M の関係をしてみると図7のようになり、図3と同様に、運動量が大きくなると衝撃氷力の継続時間は小さくなり、5 msecから10msec程度とほぼ一定の値をとるようになる。

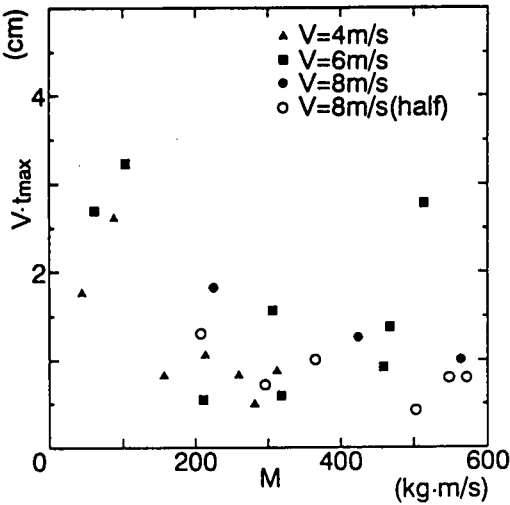


図4 最大衝撃氷力発生時のみかけの変形量と運動量との関係

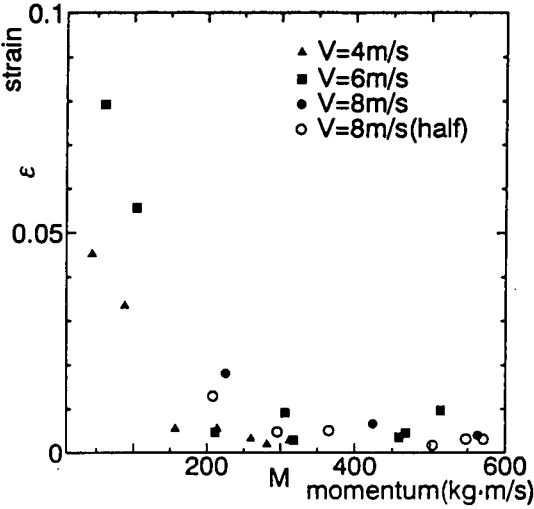


図5 最大衝撃氷力発生時の氷盤の歪

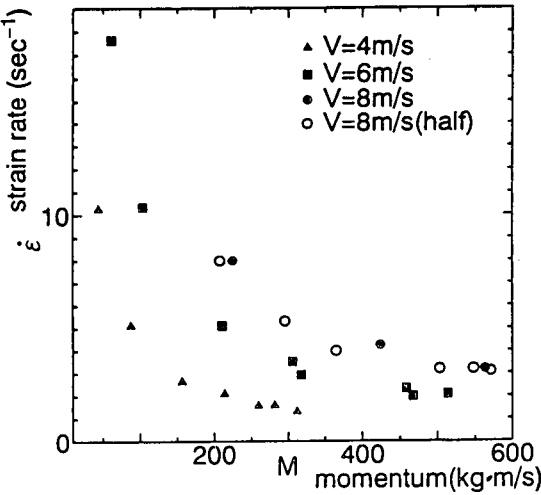


図6 氷盤の歪速度

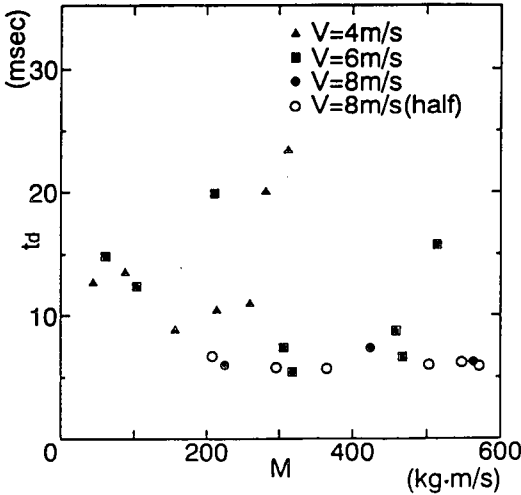


図7 衝撃力継続時間と運動量との関係

次に、最大衝撃力 F_{max} と力積 I との関係を調べたものが図8である。力積の増加とともに最大衝撃力は増加する傾向がある。最大衝撃力 F_{max} と運動量 M との関係を見てみると図9のようになり、やはり運動量の増加とともに最大衝撃力は増加する。この最大衝撃力 F_{max} を氷盤の接触面積 bh (氷盤の幅: b 、氷厚: h)に氷の一軸圧縮強度の平均値 σ_c を乗じたもので除した無次元最大衝撃力を考えてみる。これと運動量 M との関係を図10に示すが、運動量の増加とともに無次元最大衝撃力は増加していくが、接触面積を半分にしたものを除けば、おおむね1を越えることはない。1以上の値を示すものもあるが、これは、一軸圧縮強度のバラツキを考慮すれば、それほどおかしい値ではないことがわかる。すなわち、図2で示したように、一軸圧縮強度には19.6kgf/cm²から29.2kgf/cm²までの値が分散しており、その平均値を用いた場合に、図10の縦軸値が1となる。したがって、このバラツキを考えると無次元最大衝撃力は0.8から1.2の間に存在する。図10中にはこの範囲を破線で示す。接触面積を半分にしたものについては、他の場合より大きな値を示しているが、今のところその理由は明確ではない。

Neill も実河川で現地調査を行っているが、それによると、水平面から67°の角度で盤を橋脚に取り付け、平均氷厚38cm、46cm、76cmの氷盤が衝突したときの平均最大氷圧力は7.3kgf/cm²、8.7kgf/cm²、9.6kgf/cm²であった。これを盤が鉛直な場合に換算すると、佐伯等の研究から、水平面から67°傾斜時の氷圧力は鉛直時の氷圧力の0.47倍となるので、15.5kgf/cm²、18.5kgf/cm²、20.4kgf/cm²となる。このときの温度はおよそ0℃であった。Butkovichの研究によると、0℃での淡水氷の一軸圧縮強度は16.2~20.4kgf/cm²である。したがって、Neillの実験の無次元最大衝撃力は氷の一軸圧縮強度を18kgf/cm²とすると、0.86から1.13の間となる。Neillの実験で用いられた氷の大きさは明らかではないが、川幅が300mで氷厚が前述の通り38~76cmということから、かなり大きいことが予想される。よって、運動量も著者等の実験で得られたものよりかなり大きく、10³のオーダーになると思われるが、無次元最大衝撃力はそれほど大きくならず1前後である。このことより、衝撃氷力は運動量の増加とともに大きくなるが、ある一定の運動量を越えたと、運動量には依存せず衝撃氷力は一定値を示すと推定される。

4. 防潮堤ゲートへの衝撃氷力の計算例

佐伯等や高橋等は、津波によって氷盤が陸上へ遡上したときの、直立構造物の設置位置や陸上地形の違いによる氷盤の構造物への衝突速度を調べているが、それによると衝突速度は、砕波波高が大きいほど、氷盤の大きさが小さいほど大きい。また國松等は、オホーツク海沿岸部の氷盤の大きさと厚さの関係を明らかにしているが、それによると、氷盤はほぼ正方形と考えられ、一辺の大

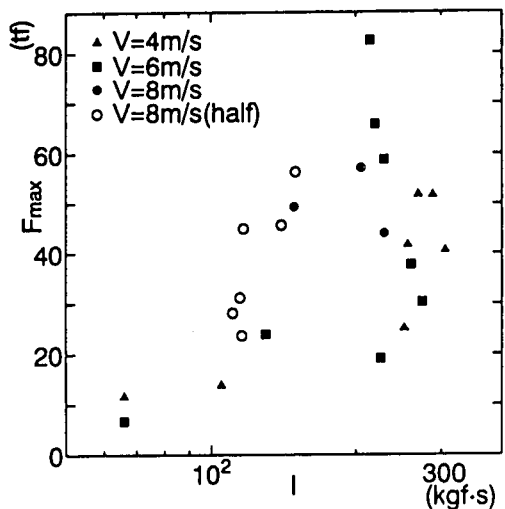


図8 最大衝撃氷力と力積との関係

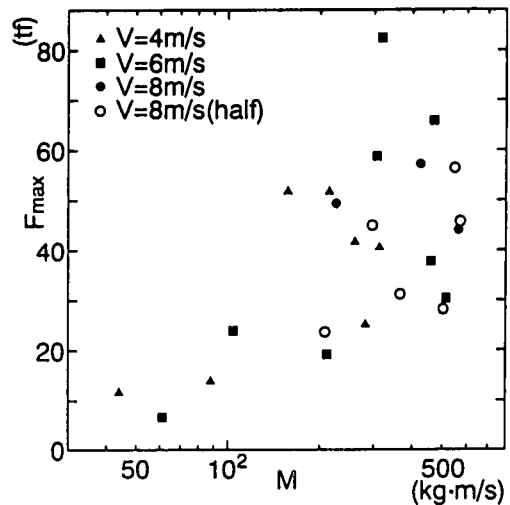


図9 最大衝撃氷力と運動量との関係

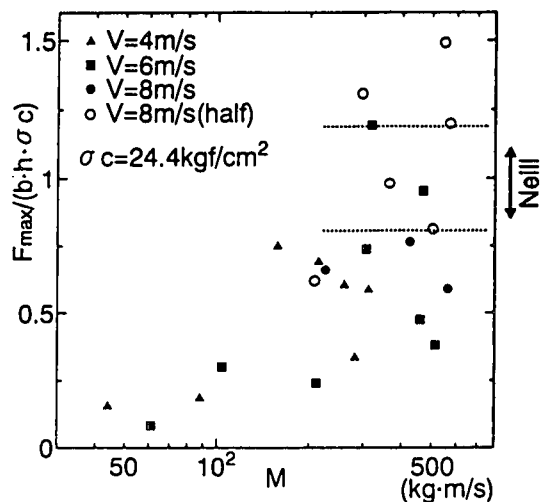


図10 無次元最大衝撃氷力と運動量との関係

きさ(b)が増すほど氷厚(h)も増すが、この増え方は徐々に小さくなっている($h \propto \sqrt{b}$)。今、津波のモデルとして碎波波高(Hb)が3.6mの波を考え、陸上域も海上域と同じ勾配(1/30)を持ち、汀線から碎波波高の5倍の位置に直立構造物をおいたモデルを考える。碎波後、波は陸域に遡上するが、この時構造物前面の波高は約0.9mとなる(佐伯等)。したがって、このモデルでは、氷厚が0.9mを超える氷は海底に接してしまうため、構造物に衝突することは考えにくい。氷厚が0.9m程度の時、氷の大きさは一辺3.0mの正方形である(國松等)から、遡上する氷の多くは一辺3.0m以下の氷である。実験では一辺の長さが0.9mと2.1mと3.0mに相当する氷盤を用いて行っており、これらの大きさの氷盤に対応する氷厚はそれぞれ40cm、76cm、90cmである。氷盤カバー率を、構造物への衝突速度(C_{ic})が最大となる20%とすると、氷盤の大きさが0.9m、2.1m、3.0mの時、衝突速度(C_{ic})はそれぞれ5.6m/s、3.9m/s、4.0m/sとなり(高橋等)、衝突直前の氷盤の運動量(M)は、167kg・m/s、1200kg・m/s、2976kg・m/sと計算される。結局氷盤の大きさが3.0mのものの運動量が一番大きいことがわかったが、これは著者等の実験で得られた運動量よりかなり大きい。しかし、前述の通り、Neillの実験で得られた衝撃氷力を無次元化したものは、運動量が大いにも関わらずそれほど大きくはなく、1程度であることから、この場合もそれを適用して $F_{max} = bh\sigma_c$ として求めてみる。すなわち、運動量には依存せず、氷と構造物との接触面積(bh)と氷の一軸圧縮強度(σ_c)で最大衝撃氷力は決定される。今ここで考えている氷盤は、11月頃オホーツク海北部で凍り始め、それが根室海峡を抜け、太平洋沿岸まで達した流水である。南下中、シベリヤからの寒気で流水は成長を続けるが、成長にともなって流水の塩分量は減少して密度が減少し、北海道沿岸にやってきた時には、氷の強度は低下している。そこで、北海道の太平洋沿岸に達した流水を考えてみると、凍り始めて90日後で氷温が-2℃の流水という条件で、強度は約10kgf/cm²である。したがって、 $\sigma_c = 10\text{kgf/cm}^2$ とし、氷盤の大きさが3.0mの場合氷厚が90cmであるので、最大衝撃氷力は270tfと計算される。実際には、氷の断面が一様ではないし、氷盤の形は多角形で接触長さはこれほど長くはない。また、氷が構造物に衝突する際の角度が必ずしも垂直ではないことなどから、現実観測される衝撃氷力はこれより小さくなると考えられる。今後は、沿岸域の流水の側面の形状と、それが構造物へ接触して氷力を及ぼす際の形状効果について、さらに詳しく調べる必要がある。

5. 結論

1. 氷盤が高速で衝突するため、最大衝撃力の発生は衝突後7msec以下となっている。また、この時の氷盤の貫入深さは3cm以下となっていて、歪は0.01程度である。
2. 本実験結果とNeillのField Testの結果から、氷盤の有している運動量が小さい範囲では、最大衝撃氷力は運動量の増加と共に増大するが、ある一定値を越えると最大衝撃氷力は一定値を示す。
3. 最大衝撃力発生時の氷盤と構造物の理論的接触面積に海水の一軸圧縮強度 σ_c を乗じた氷力は、最大衝撃氷力と同程度である。
4. 津波によって氷盤が陸上へ遡上し、防潮堤ゲートへ衝突したときの衝撃氷力を推定した。

参考文献

1. 佐伯、阿部、野村、小野、尾崎；海岸構造物に作用する氷圧力に関する研究(4)、第25回海岸工学講演会論文集、pp315-318、1978
2. C. R. Neill；Ice Pressure on Bridge Piers in Alberta, Canada, Proc. IAHR Ice Sympo., 1970
3. T. R. Butkovich；Ultimate Strength of Ice
4. 佐伯、高橋、三谷；津波による海水氷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、pp796-800、1994
5. 高橋、片山、花田、佐伯、山下；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、pp1241-1245、1995
6. 國松、原、高橋、佐伯、榎、今泉；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、pp95-100、1993