

円断面杭に作用する衝撃氷荷重に関する研究

Impact Ice Load Acting on Pile Structure

笹島隆彦*、川合邦広**、佐藤正樹**、花田真州***、佐伯 浩****

Takahiko Sasajima, Kunihiro Kawai, Masaki Sato, Masakuni Hanada and Hiroshi Saeki

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. Saeki 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 when ice sheets collide vertically with a circular cross-sectional structure.

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

1. はじめに

北海道のオホーツク海沿岸は、冬になると流氷により覆われる。海面が波長の10倍程度の延長で海水に覆われると、氷盤がない場合に比べて波高は1/10以下と著しく減衰することが、佐伯等や秋原等の研究により明らかにされている。しかし流氷の量は年によりまた季節により変化し、海面が流氷によって十分に覆われていない場合、すなわち流氷の量が少ない年や流氷の接岸時と海明け時期には、波浪に伴って氷盤が運動を始め、構造物に影響を与えることとなる。

オホーツク海に面する網走港南防波堤では、流氷接岸時の大時化で多量の海水氷盤が越波とともに防波堤を越え（この現象を越氷という）、パラベット背後のパイプラインやドルフィン等を破壊したり、防波護岸背後に上架中の漁船等に被害を与えている。このような越氷による被害を防ぐため、越氷防止施設の設置が望まれている。笹島等はこの施設の構造形式として、越氷は許すが越氷を防止するステンレス製柵を防波堤上に設置する（図1）のが最も現実的であるとしている。そこで本研究では、杭状部材に氷盤が衝突したときの衝撃水力を実験的に明らかにした。

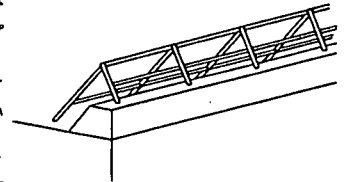


図1 防波堤上の越氷防止柵

2. 実験方法

防波堤の越氷量に関する水野等や秋原等の研究によると、越氷量には海水氷盤の大きさが大きな影響を与えることが知られていて、海水氷盤の大きさが小さいほど越氷しやすい。オホーツク海沿岸の海水の大きさの調査については國松等の報告があるが、それによると、正方形換算で一辺が3-5mの海水が最も多く、その厚さも60%以上が1m以下である。また、防波堤越氷時の氷盤の水平方向の移動速度については、酒井等が実験的に明らかにしている。それによると、氷盤の越氷時の速度 u_i と防波堤位置での進行波としての波浪の理論波頂部水平流速 u の比 u_i/u は a/L_0 （ a は海水の一辺の長さ、 L_0 は沖波波長）と H_0/h_c （ H_0 は沖波波高、 h_c は天端高）それに h/L_0 （ h は堤脚水深）に強く依存し、氷厚の影響は大きくないことを示している。オホーツク海沿岸部の冬期の異常波浪と、紋別港、

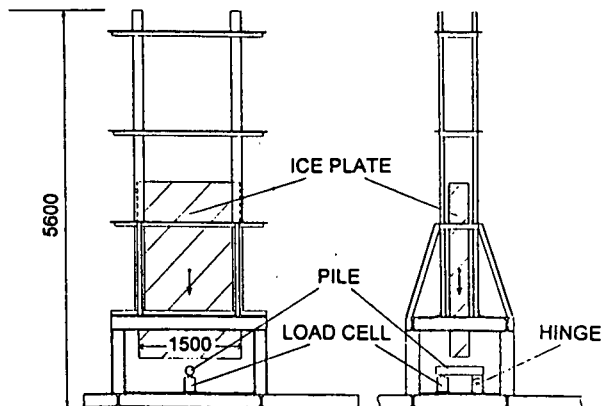


図2 実験装置

- * 正会員 北海道開発局農業水産部水産課
- ** 正会員 (株)西村組
- *** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
- **** 正会員 北海道大学工学部 (060 札幌市北区北13条西8丁目)

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6m/secと8m/secとした。また試験杭としては、実規模に近い、直径10cmと20cmの円断面杭とした。実験装置は図2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)を所定の高さから落下させ盤がその中央部に衝突する構造となっている。この杭は衝突時の変形を小さくするため、剛性の大きいものを採用した。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。衝突速度は落下高さ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。また衝突時の氷盤の衝突角度を調べるため、側面から通常のビデオカメラで撮影した。氷盤は幅150cmの水槽に5%の海水を入れ凍結させたものを用い、厚さは約20cm、そして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。ここで、氷盤の長さは30~200cm、重量は89~591kgf、運動量は73~471kg・m/secの範囲であった。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個で平均の一軸圧縮強度は24.4kgf/cm²、標準偏差は2.5であった。また、強度試験時の水温は-2℃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、直径10cmの杭については13ケース、20cmについては2ケースで計15ケースの実験を行った。まず衝突してから最大衝撃力発生までの時間 t_{max} と運動量 M の関係を示したものが図3である。直径10cmの杭が●印、直径20cmが○印である。運動量が小さい時は、5msec 程度と大きい値を示しているが、運動量が増すにつれ徐々に t_{max} は小さくなり、運動量が300kg・m/sを越えるとほぼ1msecと一定値をとるようになる。次に、衝突直前の速度 V と最大衝撃力発生時の時間 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力発生時の氷盤の杭へのみかけの貫入量を示す。実際には衝突後の貫入速度は小さくなるはずであるから、実際の最大衝撃力発生時の貫入量はこれより小さめの値になる。これも運動量が小さい時は、見かけの貫入量は 4cm程度と大きい値を示しているが、運動量が大きくなると 1.5cm以下となっている。運動量が小さい場合、すなわち、氷盤の大きさが小さい場合には、落下させるときのクレーン操作

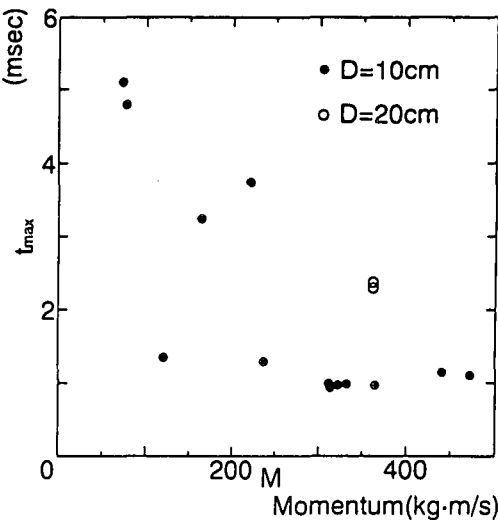


図3 衝撃時の氷盤の運動量と
最大衝撃力発生までの時間との関係

表1 衝撃試験結果

直径	重量	衝突速度	運動量	最大衝撃力	到達時間	衝突継続時間	力積	平均荷重速度	平均衝撃力	衝撃時間	備考
cm	kgf	m/sec	kg m/sec	tf	msec	msec	tf msec	tf/msec	tf	msec	
D	W	V	M	F _{max}	t _{max}	t _D	I	F _{max} /t _{max}	I/t _D	I/F _{max}	
10	89	8	73	1.05	5.11	17.50	20.40	0.21	1.17	19.43	傾斜
10	149	8	122	2.25	1.36	19.00	25.08	1.65	1.32	11.15	
10	578	8	472	3.12	1.11	49.60	115.20	2.81	2.32	36.92	傾斜
10	270	8	220	1.50	3.75	30.50	46.34	0.40	1.52	30.89	傾斜
10	539	8	440	2.25	1.15	31.50	49.98	1.96	1.59	22.21	
10	446	8	364	3.00	0.97	39.25	76.66	3.09	1.95	25.55	傾斜
10	290	8	237	2.10	1.30	28.50	47.94	1.62	1.68	22.83	
10	200	8	163	1.20	3.25	34.50	41.40	0.37	1.20	34.50	傾斜
10	94	8	77	1.26	4.80	9.75	10.58	0.26	1.09	8.40	傾斜
10	511	6	313	3.09	0.94	18.75	27.26	3.29	1.45	8.82	
10	508	6	311	2.34	1.00	32.35	69.70	2.34	2.15	29.79	
10	542	6	332	4.17	0.99	29.75	50.90	4.21	1.71	12.21	
10	527	6	323	3.48	0.98	4.80	11.48	3.55	2.39	3.30	
20	590	6	361	2.70	2.30	46.50	128.82	1.17	2.77	47.71	
20	591	6	362	2.82	2.38	39.85	101.12	1.18	2.54	35.86	

のちょっとしたぶれが氷盤の落下挙動に影響を与え、斜めになって落ちてきてしまうことが多く、また、後述するように、破壊の仕方が運動量の大小によって違うことから、このような傾向がみられるものと考えられる。同図より、運動量が多い場合、最大の衝撃氷力は、最大の接触面積となる杭の半径分貫入したときではなく、1 cm程度の貫入時に最大の氷力を示す。この時の氷盤と構造物の接触面積に氷の一軸圧縮強度を乗じたものは、実験より得られる最大衝撃氷力と比較的よい一致を示している。この一例を図5に示す。これは最大衝撃氷力発生時までの、理論的氷力(F_c)と実際にロードセルで計測された氷力(F_i)の時間変化である。 F_c は、衝突直前の速度が杭への貫入中に徐々に遅くなることを高速度ビデオを解析することにより求めて、実際の貫入量そして接触面積を算出し、これに氷の一軸圧縮強度を乗じたものである。最大衝撃氷力は衝突後1msecで発生したが、この時 F_c と F_i はほぼ同じ値をとっている。この例は、今回実験を行った15ケースのうちの一例にすぎず、他の14例の中には、 F_c と F_i があまり一致しないものもあったが、これは、各試験氷盤の有する一軸圧縮強度の違い(ばらつき)が原因だと考えられる。

高速ビデオカメラによる氷盤衝突時の氷盤の破壊状況の観察によると、大きく二つに分けることができる。氷盤の長さが1mを超える場合、衝突直後には杭との接触部近傍に乳白色のマイクロクラックが発生した後、氷盤の表・裏面が楔状に剥げいわゆるスポーリング破壊を起こし、杭の半径程度貫入した時、目で見てわかる大きなクラックが縦方向に入って氷盤の後方まで延び、氷盤は大きく二つに裂けた状態となって下方に落下していく。これに対し、長さが1mより短い氷盤では、衝突直後は接触面に乳白色のマイクロクラックが入るが、スポーリング

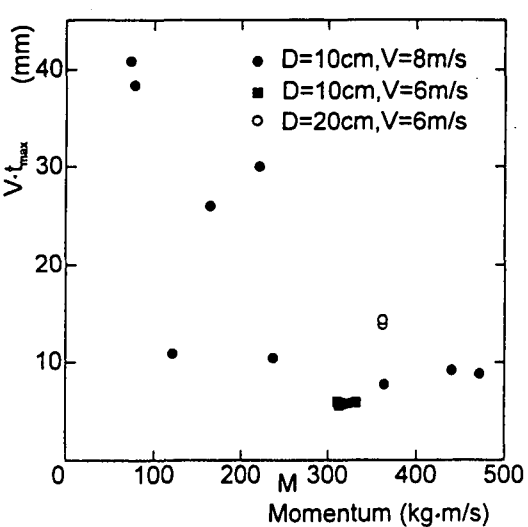


図4 最大衝撃氷力発生時のみかけの貫入量と運動量との関係

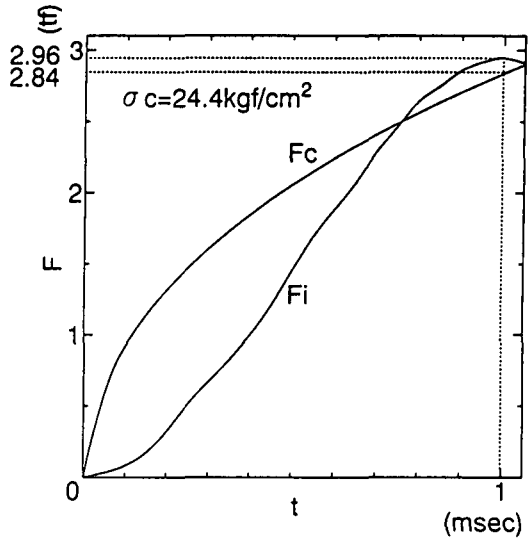


図5 衝撃氷力の実測値と理論値

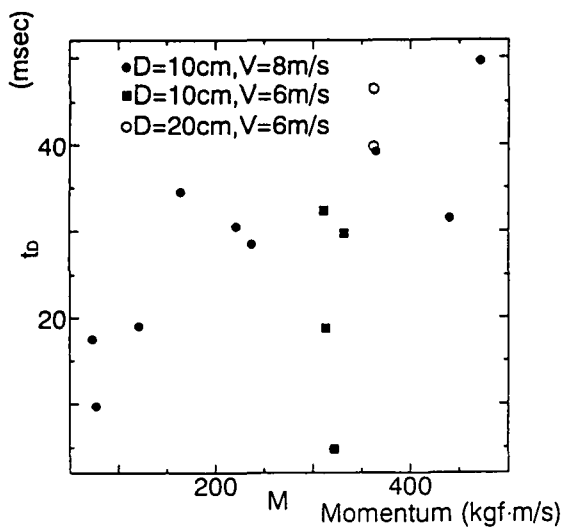


図6 衝撃力継続時間と運動量との関係

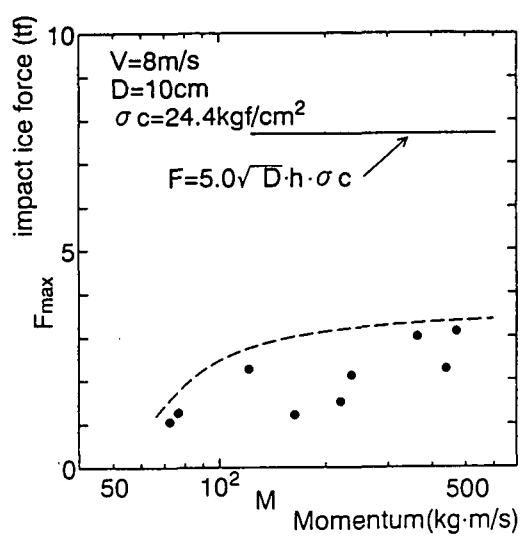


図7 最大衝撃氷力と運動量との関係

を起こすと同時に盤は杭との接触面を支点にして曲げ破壊のような性状で破壊する。この高速ビデオカメラから、今回のような比較的小さい氷盤の衝撃問題においては、衝突後の氷盤が有している運動エネルギーをも考慮に入れねばならないことが明らかになった。

次に衝撃力継続時間 t_c と氷盤の運動量 M の関係を示したものが図6である。今回の実験においては、衝突速度 V は6m/secと8m/secであり、氷厚・氷盤の幅はそれぞれ20cm, 150cmであるから、この運動量 M は氷盤の長さに大きく依存している。図から明らかなように、運動量 M が大きくなる程、衝撃氷力の継続時間 t_c は長くなっている。

次に、最大衝撃力 F_{max} と運動量 M の関係を示したものが図7である。このデータは直径10cmの杭に対してで、衝突速度 V は8m/secの場合である。図からも明らかなように、運動量が小さな範囲では、運動量の増加と共に最大衝撃力が増加するが、次第に F_{max} は運動量に無関係となる。また、Neillも実河川で現地調査を行っているが、その時の最大衝撃力と運動量の関係を示したものが図8である。この時の平均氷厚は46cm、衝撃速度が1.2-1.9m/secで、杭径は86cmである。運動量の範囲は大きく変化しているものの最大衝撃力には顕著な傾向はみられない。以上のことより、同一の杭径であれば、ある一定の運動量を越えると、衝撃氷力は運動量に依存しなくなると推定される。図7に示されている(1)式

$$F = 5.0\sqrt{D \cdot h \cdot \sigma_c} \quad (1)$$

は、佐伯等の提案している貫入時の歪速度 $\dot{\epsilon}_0$ ($=V/4D$) が 10^{-3}sec^{-1} の時の円断面構造物に作用する最大氷力推定式で、式中の h は氷厚(cm)、 σ_c は一軸圧縮強度(kgf/cm²)である。この図からも明らかなように、最大衝撃力は(1)式よりもかなり小さい力を示している。次に力積 I と最大衝撃力の関係を調べたものが図9である。力積の増加とともに最大衝撃力は増加する傾向はあるが、 I が500 kgf・sを越えると、両者の相関は非常に小さくなることが認められる。

次に最大衝撃力と運動量の関係を、本実験の結果、Saeki等の実験結果、それにNeillの実測値で調べたものが図10である。Neillの結果は前述したような条件であり、Saeki等の結果は氷盤の重さ約1000kgf、衝突速度6-7m/secの実験結果である。図からも明らかなように、運動量 M がおおよそ $10^3 \text{kg} \cdot \text{m/sec}$ より小さい領域では、 M の増加と共に $F_{max}/\sqrt{D \cdot h \cdot \sigma_c}$ は増加する傾向にあるが、これより大きい範囲では、その包絡線は $F_{max}/\sqrt{D \cdot h \cdot \sigma_c} \approx 4.0$ とほぼ一定の値となっている。つまり、運動量がいくら大きくなっても、(1)式で示される氷力を越えることがなく、たかだか(1)式の80%の氷力となる。Michel等の氷の一軸圧縮試験結果では、歪速度 $\dot{\epsilon}$ が大きくなると、 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ での強度の80%程度になることが示されているが、それと似た結果となっている。

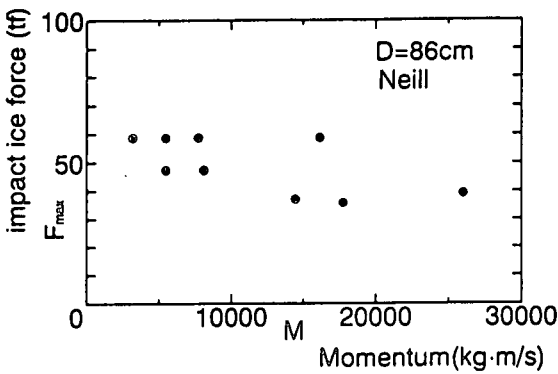


図8 最大衝撃氷力と運動量との関係 (Neill)

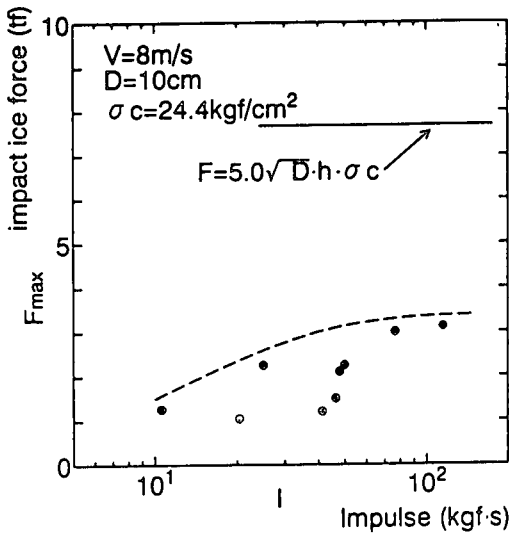


図9 最大衝撃氷力と力積との関係

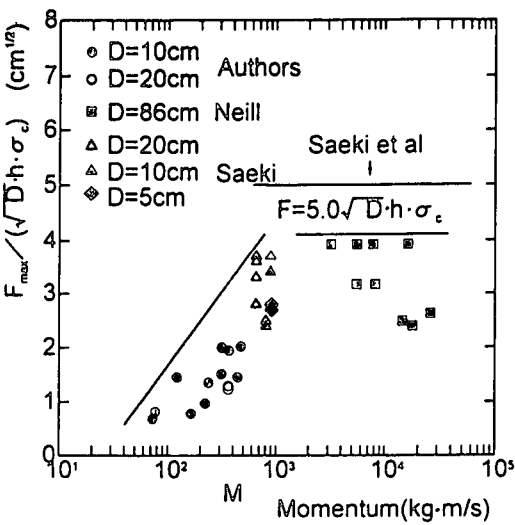


図10 最大衝撃氷力と運動量の関係

4. まとめ

移動する氷盤が構造物に衝突する時、氷盤が有している運動エネルギーは、氷盤エッジ部での破壊に費やされるエネルギー E_c と構造物の弾性変形に関するエネルギー E_s 、それに氷盤が衝突後も飛散したり、移動したり、回転したりする運動エネルギー E_D の和で表されると仮定すると次式で示される。

$$\frac{mV^2}{2} = E_c + E_s + E_D \quad (2)$$

ここで、 m は氷盤の質量、 V は衝突時の速度である。エッジ部での消費エネルギー E_c は一般に次式で示される。

$$E_c = \int_0^{s_0} F(s) ds \quad (3)$$

これはクラッキングが連続的に破壊するとしたときの氷-構造物接触面での消費エネルギーであり、 $F(s)$ は界面での氷荷重に相当していて、杭の断面形状、連続的なクラッキング時の氷荷重（人によっては破壊強度を用いる場合もある）等が与えられれば、この E_c は計算可能となる。Kreiderや Cammaert等や Michelは、(2)式の右辺第一項のみを考慮して、衝撃氷力式を求めている。また、Kozhavinは右辺の第一、第二項を考慮した衝撃氷力式を求めている。また加藤は右辺第一項と第三項の氷盤回転の効果を考慮した式を提案している。今回の実験結果をもとに、(2)式の右辺第一、第二項を考慮しても、実験値とは大きくかけ離れることが明らかとなった。この理由は、前述したように、今回のような小さな氷盤が高速で衝突するような現象に於いては、衝突直後に氷盤に縦クラックが発生し、細分化された氷盤は構造物に力を及ぼすことなく高速で飛散する。つまり、(2)式の第三項がかなり大きな効果を有しているわけである。

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 4msec以下となっている。また、この時の氷盤の貫入深さは1.5cm以下となっていて、杭の半分(5cmまたは10cm)には至っていない。これは、氷盤が小さいことと、氷が高歪速度領域では Brittleな性質を有しているためである。また、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。
2. 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。このことは、最大衝撃氷力と力積の関係に於いても同じである。
3. 本実験結果、Saeki等の結果それにNeillのField Testの結果から、衝撃氷力は貫入に伴う歪速度 10^{-3}sec^{-1} で得られた氷力式(Saeki et al)を越えることはない。
4. エネルギー保存則を小さな氷の衝撃問題に利用する場合には、氷盤の破壊に関するエネルギー、構造物変形に要するエネルギーの他に氷盤の回転や飛散時の運動エネルギーを考慮せねばならない。

参考文献

1. 酒井他；越氷時の氷盤の移動速度に関する実験的研究，寒地技術シンポジウム講演論文集，Vol. 9, pp.101-106, 1993
2. 酒井他；防波堤における越氷機構と氷盤の移動速度に関する研究，土木学会海洋開発論文集，Vol. 10, pp.247-252, 1994
3. 國松他；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, 1993
4. 秋原他；越氷に関する実験的研究，寒地技術論文集，Vol. 8, pp.423-427, 1992
5. A. B. Cammaert et al; Ice Interaction with Offshore Structures, pp.262-277
6. M. Kreider; Summer Ice Loads from Multi-year Ice Floes, Proc. IAHR Ice Sympo., Vol. 2, pp.55-66, 1984
7. C. R. Neill; Force Fluctuations During Ice-Floe Impact on Piers, IAHR Ice Symposium, pp.44-50, 1972
8. B. Michel; Ice Mechanics, Laval University Press. , pp.499, 1978
9. H. Saeki et al; Experimental Study on The Ice Forces on a pile, Proc. POAC, pp.695-706, 1977