

越氷防止施設に作用する氷荷重の評価と試設計

Estimation of the impact ice load acting on the facility preventing from overtopping of ice floes

川合邦広*・佐藤正樹*・早川哲也**・花田真州***・佐伯 浩****

Kunihiro Kawai, Masaki Sato, Tetuya Hayakawa, Masakuni Hanada, Hiroshi Saeki

In the past ten years, there has been a tendency for frozen areas in the Okotsk Sea to become narrow, possible because of global warming. In the winter of 1991 waves broke over the south breakwater at the port of Abasiri and bringing with then ice floes which overtopped the breakwater causing grate damage to the oil pipelines and dolphins behind the breakwater.

In this paper, the authors proposed the facility preventing from overtopping ice floes and design method for the phenomena through the systematic experiments of the impact ice load acting on pile structures and the overtopping velocity of ice floes.

Key words : Overtopping ice, ice collision, Impact ice load, Design methods

1. はじめに

1992年、オホーツク海に面する網走港南防波堤で、流水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る越氷現象により、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、護岸背後に上架してあった漁船等に被害を与えている。その一方で、オホーツク沿岸の地域では流水観光が盛んになり、その散策路として親水防波堤の利用が年々増加しつつある。このような親水防波堤の建設にあたっては、歩行者の安全や散策路の確保という目的から越氷による災害を防ぐ越氷防止施設の設置が望まれる。

越氷を防止する方法として、①天端高を高くする方法と②天端高を高くするとともに前面を消波ブロックで被覆する方法、③防波堤の沖側に離岸堤や潜堤を設置する方法、④防波堤前面に防水柵を設置する方法、⑤防波堤上に越氷防止柵を設置する方法等がある。

今回は、最も経済的に建設が可能な防波堤上に越氷防止柵を設置する方法について、越氷防止柵に作用する越氷時の氷盤による衝撃氷力を明らかにし、それに対する施設の試設計を行うものである。

2. 設計方法

越氷防止柵の試設計における氷盤の諸条件は、冬期、オホーツク海に來襲する代表的な氷盤の大きさを用いた。図-1(a)は、著者らの調査結果で、1992年にオホーツク海に面する宇登呂海岸に接岸していた流水の正方形換算の一辺長の分布である。図より氷盤の一辺あたりの長さ a を2.0m, 3.0m, 4.0m, 6.0m, 8.0m, 10.0mとした。次に、1993年に紋別市のオムサロ海岸、紋別空港周辺の海岸およびサロマ湖の三里浜での氷盤の大きさ、厚さの現地調査の結果を示したのが図-1(b)である。図は流水の大きさと氷厚の関係を示したもので、上述した各辺長 a に対する氷厚 h を図から0.6m, 0.7m, 0.8m, 0.8m, 0.8m, 0.8mとした。

防波堤の断面は図-2に示すような構造物を想定し、その計算を行った。この時、防波堤の天端高 $h_c=4.2$ m、堤脚水深 $h_b=6.6$ mである。防波堤天端高さから越氷する氷盤の下面までの距離 z は越氷高さを示し、 U_i は越波とともに氷盤が防波堤を乗り越える時の速度を示す。波浪条件は、オホーツク海で出現する代表的な周期 T を考え、 $T=6, 8, 10, 12$ secとし、各周期に対する沖波波長 L_0 、沖波波高 H_0 および波高 H を求めた。

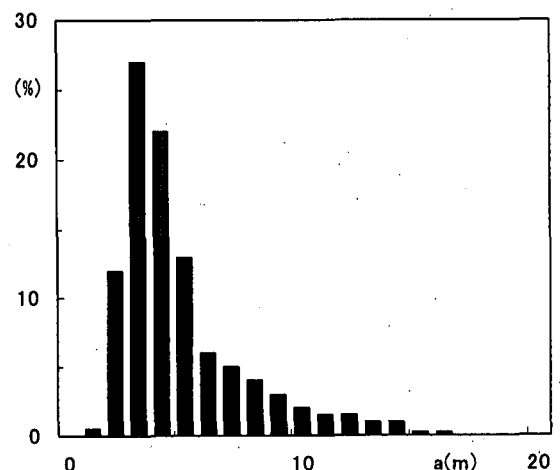


図-1(a) 流水の大きさの頻度分布

* 正会員 (株)西村組
 ** 正会員 北海道開発局開発土木研究所
 *** 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

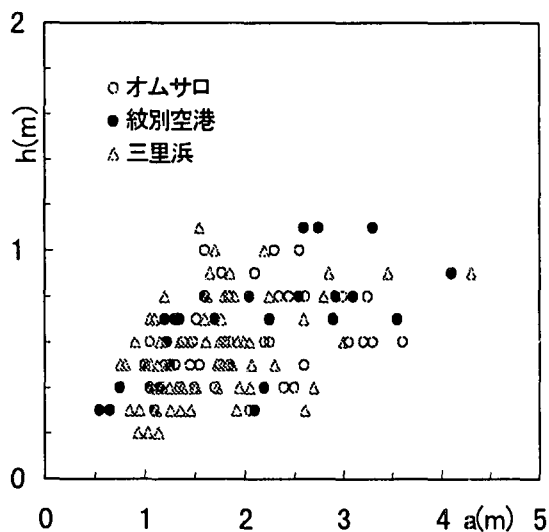


図-1(b) 流水の大きさと氷厚の関係

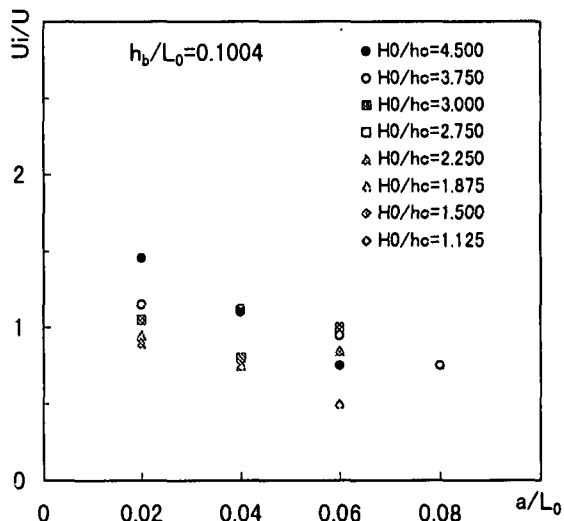


図-4(a) U_i/U と a/L_0 の関係

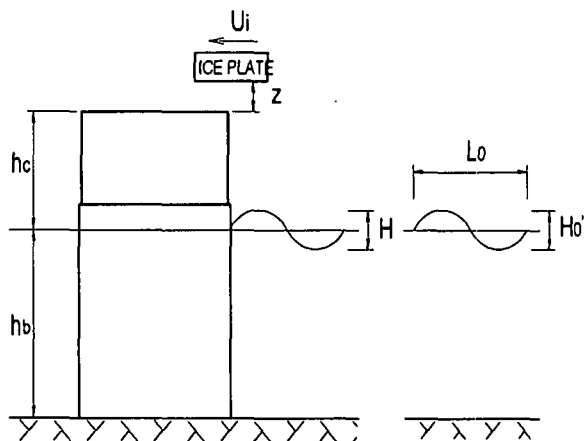


図-2 越氷防止柵設計断面

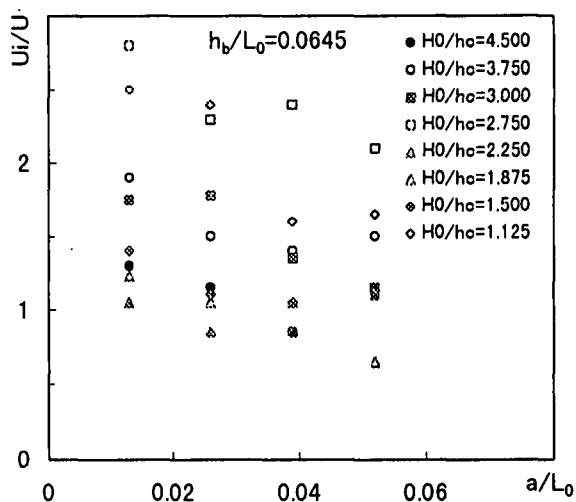


図-4(b) U_i/U と a/L_0 の関係

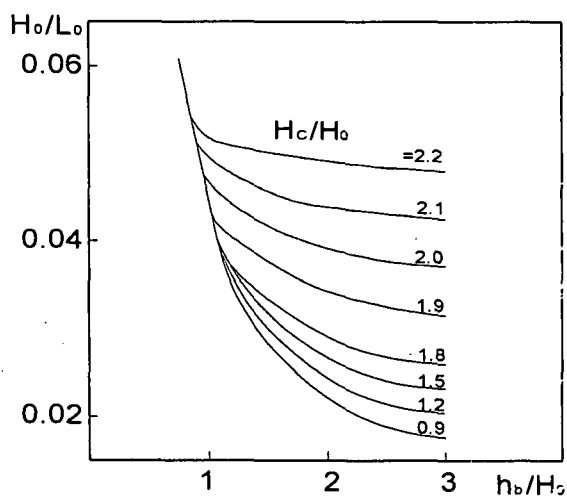


図-3 越氷の限界

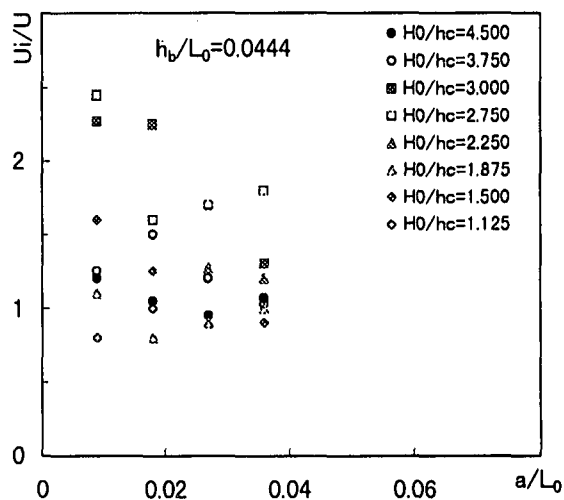


図-4(c) U_i/U と a/L_0 の関係

図-3は無次元量の h_c/H_0 、 h_b/H_0 および H_0/L_0 を用いて越水の限界を求めたもので、実線の下側の領域が越水量がゼロとなる領域である。この関係より各波浪条件での越水の有無も調べた。

図-4は酒井等の実験結果で、縦軸に防波堤上を越水する氷盤の速度 U_i と進行波の水粒子水平移動速度 U の比を、横軸に氷盤の辺長 a と波長 L_0 の比をとったものである。ここで水粒子の移動速度 U は、

$$U = \frac{\pi H \cosh 2\pi(h_b + z)/L}{T \sinh 2\pi h/L} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

で $z=0$ （静水面）での最大値を基準として用いた。この式で得られた U と図-4の関係より、越水時の氷盤の移動速度 U_i を求め、氷盤の有する運動量の範囲を調べた。図-5は、 $(H_0 - h_c)/z$ と H_0/L_0 の関係を示したもので、図より越水高さを求めることにより、越水防止柵に作用する氷盤の衝撃氷力の作用位置を算出した。

次に、越水する氷盤が直立円断面杭に衝突する時の衝撃氷力と氷盤の運動量の関係を著者等の結果により示したのが図-6である。図の縦軸は最大衝撃氷力を氷力 F で除した無次元衝撃氷力で、横軸は運動量である。ここで氷力式 F は

$$F = 5.0\sqrt{D} \cdot h \cdot \sigma_c$$

で佐伯等が提案している貫入時の歪み速度が 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5.0は円断面構造物の形状係数、 D は構造物の直径(cm)、 h は氷厚(cm)を、 σ_c は一軸圧縮強度(kgf/cm²)を現す。図の衝撃氷力と運動量の関係から、試設計で用いる越水防止柵に作用する衝撃氷力を推定した。なお、試設計で用いた円断面杭は比較的手が容易なステンレス製で直径は10cm、肉厚32mmで、氷盤の圧縮強度 σ_c は過去の実測結果にもとづき20kgf/cm²とした。

3. 考察

図-7は円断面杭に氷盤が衝突してから最大衝撃力発生までの時間 t と運動量 M の関係を示したものである。運動量が小さいときは、時間 t は5msec程度であるが、運動量が300kg・m/sを超える領域では、ほぼ一定の1msecを示す。この結果より、オホーツク海沿岸で、越水する単一の氷盤が複数の鉛直方向円断面杭に同時に衝突することは、ほとんど考えられないため、越水防止柵の設計において1本の円断面杭に衝撃氷力 F が作用すると考え、これに耐えうる構造としなければならない。また、1996年、紋別で行った実験結果より、越水防止柵の水平方向部材に作用する衝撃氷力は、鉛直方向部材に作用する衝撃氷力より大きいことが明らかで、越水防止柵の構造は水平部材を鉛直部材の背

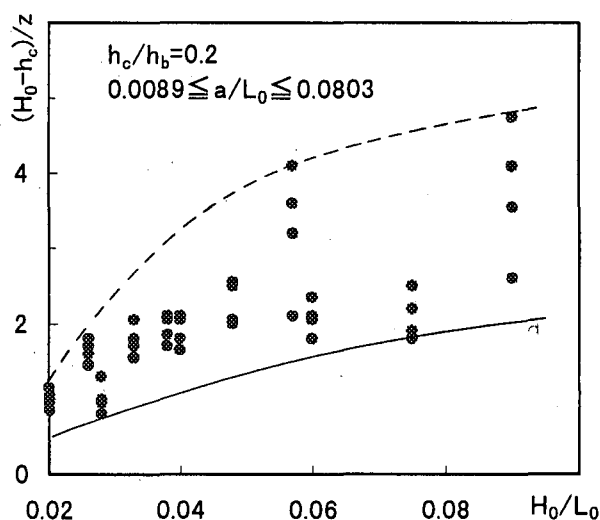


図-5(a) $(H_0 - h_c)/z$ と H_0/L_0 の関係

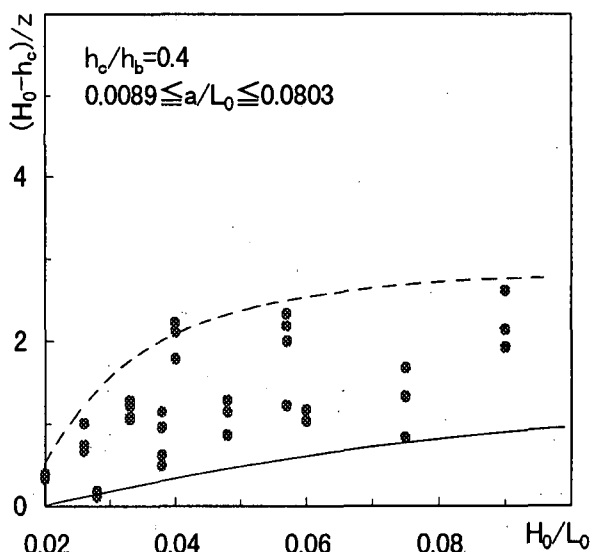


図-5(b) $(H_0 - h_c)/z$ と H_0/L_0 の関係

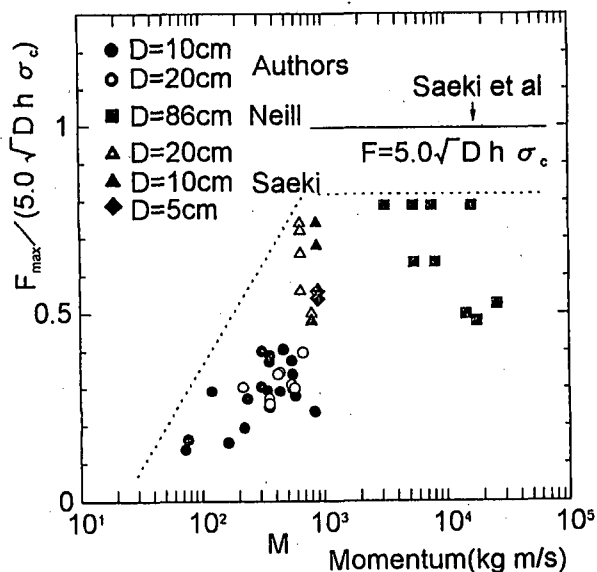


図-6 衝撃氷力と運動量の関係

後に配置して、鉛直部材に先に越水する氷盤を衝突させることが重要である。

次に、氷盤の大きさと波浪条件による氷盤の移動速度 U_i と運動量を表-1 に示す。表より周期 8sec で氷盤の辺長 6m のケースが最も運動量が大きくなっている。またほとんどのケースで $M > 10^3 \text{kg} \cdot \text{m/s}$ であった。図-6 より明らかなように運動量が $10^3 \text{kg} \cdot \text{m/s}$ より小さい領域では、衝撃氷力は運動量の増加とともに増加する傾向にあるが、これより大きい領域では、その包絡線は、ほぼ一定値を示し、貫入時の最大氷力推定式を衝撃氷力に適用する場合、衝撃氷力は貫入時の氷力の 80% 程度となる。すなわち、衝撃氷力 F_i は

$$F_i = 0.8 \cdot 5.0 \sqrt{D} \cdot h \cdot \sigma_c$$

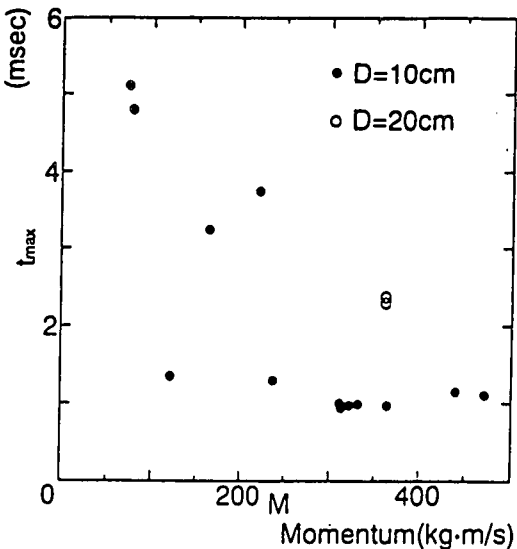


図-7 最大衝撃力発生時間と運動量の関係

で示される。今、氷盤の氷厚を 60cm、70cm、80cm について衝撃氷力を計算すると、直立円断面杭に作用する氷力はそれぞれ 15.2tf、17.7tf、20.2tf となった。この衝撃氷力が杭に対して直角に作用する場合、越水防止柵の直径が 10cm 程度の断面では耐えられないことが計算により明らかとなった。直立円断面杭に衝撃氷力が作用する場合、柵の構造は大きな断面を有するものとなり、その結果建設費も高くなることが予想される。

表-1 波浪条件による越水する氷盤の性質

周期 $T(\text{s})$	波長 $L_0(\text{m})$	波高 $H(\text{m})$	氷盤の大きさ				越水速度 $U_i(\text{m/s})$	運動量 $M(\text{kg} \cdot \text{m/s})$	越水高さ $z(\text{m})$
			辺長 $a(\text{m})$	厚さ $h(\text{m})$	重量 $W(\text{kgf})$	質量 $m(\text{kg})$			
6	56.16	4.356	2.0	0.6	2160	220	3.45	759	0.6
			3.0	0.7	5670	579	3.27	1893	
			4.0	0.8	11520	1176	2.72	3199	
			6.0	0.8	25920	2645	2.00	5290	
			8.0	0.8	46080	4702	1.09	5125	
			10.0	0.8	72000	7347	0.36	2645	
8	99.84	4.686	2.0	0.6	2160	220	11.23	2471	1.0
			3.0	0.7	5670	579	9.83	5692	
			4.0	0.8	11520	1176	8.42	9902	
			6.0	0.8	25920	2645	5.62	14865	
			8.0	0.8	46080	4702	1.40	6583	
			10.0	0.8	72000	7347	0.47	3453	
10	156.00	4.818	2.0	0.6	2160	220	4.37	961	越水無し
			3.0	0.7	5670	579	3.79	2194	
			4.0	0.8	11520	1176	3.21	3775	
			6.0	0.8	25920	2645	2.33	6163	
			8.0	0.8	46080	4702	1.46	6865	
			10.0	0.8	72000	7347	0.58	4261	
12	224.64	4.884	2.0	0.6	2160	220	1.40	308	越水無し
			3.0	0.7	5670	579	1.26	730	
			4.0	0.8	11520	1176	1.12	1317	
			6.0	0.8	25920	2645	0.98	2592	
			8.0	0.8	46080	4702	0.84	3950	
			10.0	0.8	72000	7347	0.70	5143	

堤脚水深 $h_b=6.6\text{m}$

防波堤の天端高 $h_c=4.2\text{m}$

次に、円断面杭を傾斜させた場合について、過去に行われた佐伯等の実験結果より、傾斜角と衝撃氷力の関係が明らかとなっている。この関係を図-8 に示す。杭を傾斜させた場合の衝撃氷力を F_{θ} 、水平面と円断面杭の

なす角を $\theta(^{\circ})$ とすると、

$$\frac{F_H}{F_i} = 0.425 \cdot \cos 4(90^{\circ} - \theta) + 0.575$$

で示される。例えば、杭を 60° 傾斜させた場合を考えると、杭を傾斜させた場合の水力は、直立させた杭に作用する水力のおおよそ36%に過ぎない。この結果より杭を傾斜させることは衝撃水力の軽減に有効な方法であり、越水防止柵の断面の減少にもつながり、経済的な越水防止柵の設置も十分可能である。

以上の設計条件から、図-9 に示す越水防止柵に衝撃水力が作用したときの各部材の応力を算出した。図-9(a)は、2 本の円断面部材を組み合わせたもので、その接点は安全側の結果が得られるようヒンジ結合とした。これをタイプAとする。また、図-9(b)は衝撃水力が作用する防波堤沖側の円断面部材の中間に防波堤内側の部材と平行に部材を配置した構造で、これをタイプBとする。表-2(a)、(b)は、それぞれタイプA、タイプBの越水防止柵の形状を変化させた時の各部材の応力である。今回の試設計で用いた鋼管の断面の性能を表-3 に示す。表-2(a)および(b)から明らかなように、円断面杭と氷盤が直角に衝突する場合、直径 10cm 程度の鋼管では強度が不十分であることが明確である。越水防止柵背後のスペースの確保と衝撃水力の軽減という観点から、傾斜角は 60° 程度が最も望ましいと思われる。杭を 60° 傾斜させたケースでも、タイプAの構造の場合、軸力に対しては満足するが、曲げに対しては強度不足が著しい。タイプBで杭を 60° 傾斜させたケースでは、各部材の応力度は断面の有する許容応力度を満足している。タイプA、タイプBいずれの場合も、曲げに対する応力が最も強度が不足気味となるため、越水する氷盤が直接衝突する鉛直方向部材の支点間距離を短くして、曲げに対して抵抗するように構造の決定をしなければならない。

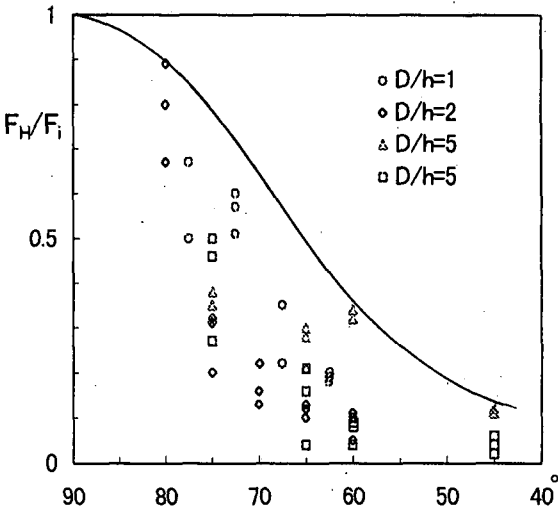


図-8 傾斜角と衝撃水力の関係

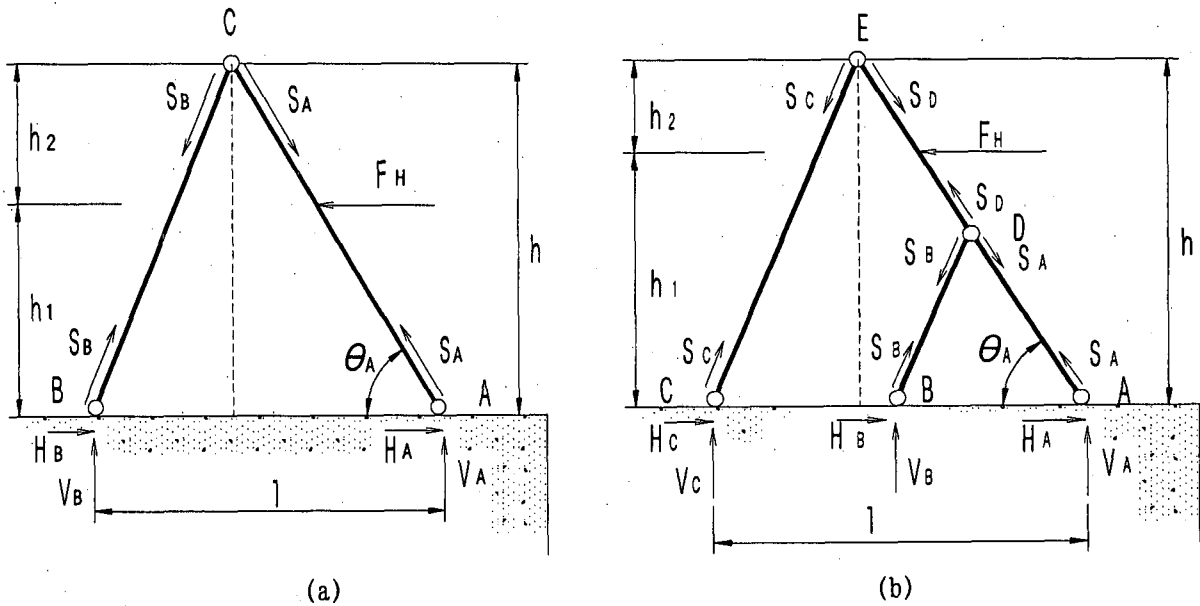


図-9 越水防止柵の構造形式

表-2(a) 越氷防止柵 (タイプA) の応力

表-3. 鋼管の断面性能

h	h ₁	h ₂	l	θ _A	F _i	F _H	V _A	V _B	H _A	H _B	S _A	S _B	M
(cm)				(°)	(kgf/cm ²)		(kgf/cm ²)		(kgf/cm ²)		(kgf/cm ²)		kgf・cm
140	60	80	120	90	20239	20239	-10120	10120	11565	8674	10120	13329	693900
140	60	80	120	60	20239	7337	-3669	3669	6310	1027	4237	3810	251548
140	100	40	120	90	20239	20239	-16866	16866	5783	14456	16866	22214	578300
140	100	40	120	60	20239	7337	-6114	6114	5625	1712	7060	6349	209635
140	70	70	120	90	20239	20239	-11806	11806	10120	10119	11806	15549	708400
140	70	70	120	60	20239	7337	-4280	4280	6139	1198	4942	4445	256818
70	60	10	60	90	20239	20239	-20239	20239	2891	17348	20239	26656	173460
70	60	10	60	60	20239	7337	-7337	7337	5283	2054	8472	7619	62910
70	35	35	50	90	20239	20239	-14167	14167	10120	10119	14167	17410	354200
70	35	35	50	60	20239	7337	-5136	5136	6633	704	5931	5184	128408

断面積	68.36cm ²
断面係数	96.53cm ³
断面2次モーメント	482.63cm ⁴
許容曲げ応力度	1600kgf/cm ²
許容引張応力度	1600kgf/cm ²
許容せん断応力度	915kgf/cm ²

表-2(b) 越氷防止柵 (タイプB) の応力

h	h ₁	h ₂	l	θ _A	F _i	F _H	V _A	V _B	V _C	H _A	H _B	H _C	S _A	S _B	S _C	S _D	M
(cm)				(°)	(kgf)		(kgf/cm ²)			(kgf/cm ²)				(kgf/cm ²)			kgf・cm
140	100	40	120	90	20239	20239	-23612	13493	10119	0	11565	8674	23612	-17771	-13328	10119	346954
140	100	40	120	60	20239	7337	-8560	4891	3669	4940	1369	1027	9884	-5079	-3810	4236	132151
140	105	35	120	90	20239	20239	-23612	11806	11806	0	10120	10120	23612	-15550	-15550	11806	354191
140	105	35	120	60	20239	7337	-8560	4280	4280	4940	1198	1198	9884	-4445	-4445	4941	134931
140	100	40	100	90	20239	20239	-28334	16191	12143	0	11565	8674	28334	-19897	-14923	12143	346950
140	100	40	100	60	20239	7337	-10272	5870	4402	5928	805	604	11861	-5925	-4443	5083	129560
140	105	35	100	90	20239	20239	-28334	14167	14167	0	10119	10119	28334	-17410	-17410	14167	354180
140	105	35	100	60	20239	7337	-10272	5136	5136	5928	704	704	11861	-5184	-5184	5931	132249
140	105	35	100	60	20239	7337	-10272	5136	5136	5928	704	704	11861	-5184	-5184	5931	132249
140	105	35	100	55	20239	5048	-7211	3606	3606	5048	0	0	8803	-3606	-3606	4401	88373

4. 結論

- 1)円断面杭に作用する衝撃水力 F_i は、氷盤の運動量を M とすると、 $M < 10^3$ のとき $F_i \propto \log M$ であるが、 $M > 10^3$ の範囲では $F_i = 0.8 \cdot 5.0 \cdot \sqrt{D \cdot h} \cdot \sigma_c$ で表される。
- 2)最大衝撃力発生時間の関係より、氷盤が同時に複数の越氷防止柵の鉛直部材に衝突することはなく、柵の設計においては1本の鉛直部材に対して衝撃水力 F_i が作用することを考慮しなければならない。
- 3)柵の水平部材に作用する衝撃水力は、鉛直部材に作用する衝撃水力より大きいので、構造の決定の際、鉛直部材の背後に水平部材を配置することが有効である。
- 4)円断面杭を傾斜させた場合、杭に作用する衝撃水力は、氷盤移動方向と直交する場合の氷力 F_i に対して著しく小さく、越氷防止施設の設計において有利である。
- 5)越氷防止柵の構造の決定においては、曲げモーメントによる応力に対して最も不利となるため、越氷する氷盤が直接衝突する部材の支点間距離を短くする必要がある。

参考文献

- 1)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、海洋開発論文集、Vol.10、pp247-252、1994
- 2)国松他；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