

鉛直壁構造物に作用する1年リッジ荷重の推定

FIRST YEAR RIDGE LOAD ESTIMATION
ON A VERTICAL SIDED STRUCTURE亀崎一彦¹・山内 豊²・島崎 克教²

Kazuhiko KAMESAKI, Yutaka YAMAUCHI and Katsunori SHIMAZAKI

¹正会員 工修 NKK エンジニアリング研究所 (〒514-0393 三重県津市雲出鋼管町1丁目)² 工修 同上

This paper describes the experimental study on the first year ridge load. The authors attempted to estimate ridge load by the ice tank tests despite the lack of the field data setting rough assumptions. Ridges were built in the ice tank using molds. The consolidation depth was controlled with the insulation sheet and room temperature. 800 mm wide rectangular indenter with segmented ice pressure panels in water line and ridge keel direction was used to measure the local pressure characteristics. The tests were performed varying the indentation velocity, compliance of the indenter. An estimation of the first year ridge load exerted on a vertical sided structure is attempted using the test results.

Key Words: First year ridge, vertical sided structure, consolidated layer, global load, dynamic response, Indentation test, The sea of Okhotsk

1. まえがき

北極海の浅水深海域及びオホーツク海、ベーリング海などの亜北極域(Sub Arctic)で稼働する氷海構造物を設計する場合、1年氷が設計荷重を支配する因子となる。1年氷の作用するシナリオとしては：

- ①平坦氷 (Sheet ice)
- ②堆積氷 (Rubble Ice)
- ③一年氷丘脈 (First Year Ridge)

に分類される。その中でも③が最大の設計荷重を与えると考えられるが1年氷丘脈の断面構造及び各部に於ける強度特性など不明確な部分が多い。公表された文献から1年氷丘脈の形状、物性などの代表的な値を決定することは困難であるが、近年幾つかの文献が発表されつつあり、1年氷丘脈の特性が次第に明らかにされつつある。Leppäranta & Hakara¹⁾はボツニア海の1年氷丘脈内部構造を詳細に調査し1年氷丘脈を形成する氷片の厚さ、大きさ、空隙率、凝固層などの大きさなど強度評価に関連した因子を調べている。また Timco & Goodrich²⁾は氷海水槽に於いて1年氷丘脈の作成試験を実施し、積算寒度と1年氷丘脈上部の凝固深さ (consolidation depth) の関係を実験的に調べ、平坦氷の厚さに比べると約2倍となることを示した。1年氷丘脈の構造的な特性として以下の特徴を再現することを目標とした。模型の幾何学的縮尺比としては1/40~1/30を想定した。

・上部層は氷片同士が凝固し、下部層は氷片同士が

弱く結合している。凝固層の深さは周辺の平坦氷の約2.5倍の深さとする。

- ・上記の凝固層は空隙率が大きいために、その強度は周辺の平坦氷部と比較すると弱い。
- ・氷丘脈の幅は、平坦氷の約40倍とする。

図-1に1年氷丘脈の寸法を示す。

構造物としては鉛直壁型の四角柱型として、構造物が氷丘脈に貫入した時の破壊モード、荷重特性などを調べた。氷丘の凝固深さ、幅は一定とし構造物の剛性を種々変化させ剛性が氷丘貫入荷重に与える影響を調べた。

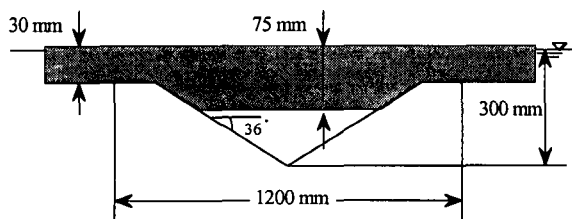


図-1 1年氷丘脈の断面形状

2. 供試模型

供試模型を図-2に、氷海水槽に於ける配置を図-3に示す。局部的氷圧力を計測するためにT字状に幅88mmの荷重パネルを14枚配置した。模型基部にはディスクスプリングを取り付け、模型の剛性を変更できる構造とした。

- ・形状等：四角柱、水線幅 = 800 mm

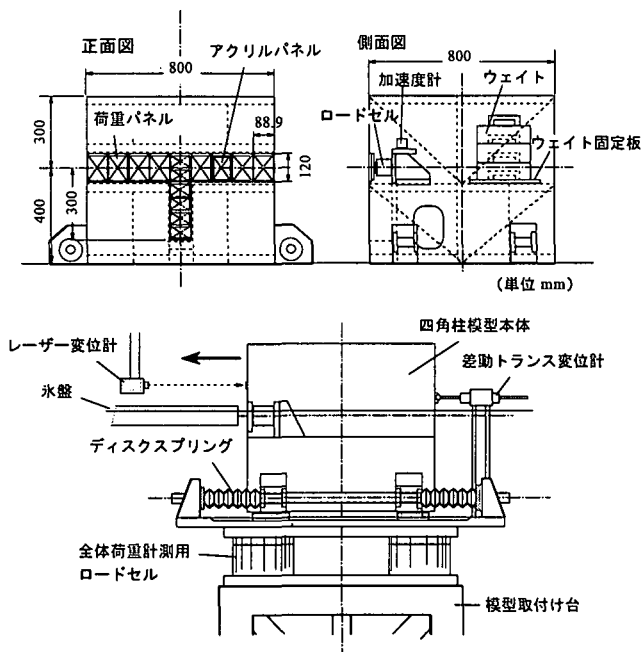


図-2 供試模型と荷重パネル配置

- ・可動部重量：空中重量=339KG, 水中重量=267KG
- ・バネ剛性：0.26~15KN/mm
- ・固有振動数：4~30HZ
- ・減衰比：5~6%
- ・荷重パネル：標準パネル：幅 88 x 高さ 118mm、小パネル：幅 88 x 高さ 59mm

3. 試験方法

(1) 氷丘の作製方法および氷丘の物性試験

氷丘は厚さ約 20mm の平坦氷を一旦作製し細かく破碎し、水槽の中に取りつけたモールドに入れた。その後、氷丘周りの平坦氷部を作製する方法を取った。長さ 20m の氷海水槽に図-3 に示すように 2 本の氷丘を作製した。凝固部の深さ及び強度を調整するため、平坦氷部の作製が終了した後、断熱シートを氷丘部に被せた。試験は氷丘部と平坦氷部に分けて実施した。貫入試験時のデータとして以下の項目を測定した。

- ・曲げ強度：平坦氷部にて実施。
- ・一軸圧縮強度：平坦氷部及び氷丘部、氷丘部については凝固部中心から水平方向に試験片を採取、試験片寸法：長さ 150mm、幅 60mm、厚さ 30mm。
- ・氷丘の断面形状：試験後、氷丘を幅方向に切り断面の全深さ及び凝固部深さを測定した。
- ・氷丘部かさ密度：ブラインを完全に落下させた、-15℃にて固化後整形し体積重量を測定した。模型氷の真密度を 940kg/m³ として空隙率を算出した。

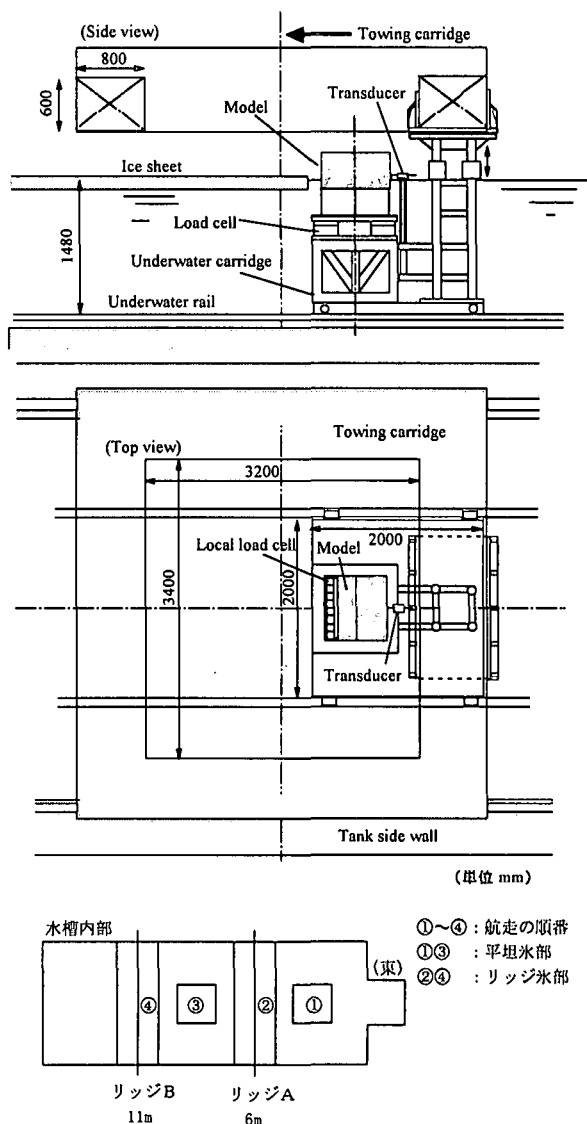


図-3 試験装置及び氷丘の配置

(2) 計測項目

貫入速度(V)、加速度(ax, ay, az)、構造物の相対変位(dsr)、構造物の絶対変位(dsg)、全体荷重(Ftx, Ftz)、局部荷重(fn, fnH, fnV) 等を測定した。図-4 に荷重パネルの番号および計測項目の座標系を示す。

4. 試験結果及び考察

(1) 試験条件

バネ剛性を 3 段階に変更させた。3 段階のバネ特性に対して LS、MS、HS モデルと呼ぶ。各モデルのバネの特性および貫入速度を表-1 に示す。各モデルに対して 4 本の氷丘貫入試験を実施した。氷丘の物性を表-2 に示す。また計測された氷丘断面形状の例を図-5 に示す。凝固部の深さはほぼ目的通りであったが、氷丘部の圧縮強度は平坦氷部を上回ってしまった。

表-2 氷丘の物性試験結果

模型	Test No.	リッジ ID	t (mm)	H0 (mm)	H0 / t	θ (°C)	H1 (mm)	一軸圧縮強度			空隙率 (%)
								平坦氷部 (kPa) ②	リッジ部 (kPa) ①	② / ①	
LS	21	A	31	66	2.1	-0.9	15.8	244	-	-	-
	23	B	31	56	1.8	-1.0	22.1	244	-	-	-
	25	A	31	65	2.1	-0.8	17.9	146	286	2.0	26.4
	27	B	31	52	1.7	-0.9	16.4	146	280	1.9	26.8
MS	16	B	32	52	1.6	-0.9	9.6	217	331	1.5	25.1
	8	B	32	62	1.9	-0.8	15.6	198	153	0.8	-
	10	A	31	67	2.2	-1.0	15.2	174	216	1.2	-
	14	A	32	52	1.6	-0.8	9.2	217	275	1.3	20.5
HS	2	A	31	73	2.4	-0.8	16.7	215	313	1.5	-
	4	B	32	66	2.1	-0.9	16.0	215	256	1.2	-
	7	A	31	63	2.0	-1.1	12.3	331	511	1.5	21.3
	9	B	31	55	1.8	-1.1	13.1	331	422	1.3	21.4

注) t : 平坦氷平均氷厚
H0: キール部平均凝固部深さ
H1: 水面からセールまでの平均高さ
 θ : 上部から 5cm の氷温度

(2) 破壊モード

安定したフレーキングを伴うクラッシングにより破壊するモードが観察された。ただし MS, LS では貫入速度が 60 mm/sec では供試模型がリッジの約 2/3 を貫入した時点で図-6 に示すように模型両端から外側、前方に放射状のせん断クラックがリッジの後縁に向けて発生し、模型前縁とリッジ後縁を結ぶ台形状のリッジ部が上方に持ち上げられ崩壊する現象が観察された。崩壊すると図-7 の Type D に示すように氷荷重は、一気にゼロレベル近傍まで低下する。

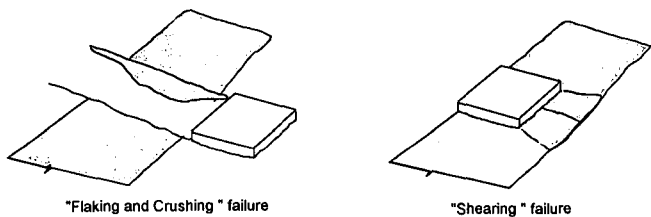


図-6 氷丘の破壊モード

(3) 最大荷重の発生パターン

水平全荷重 F_{tx} の発生パターンを図-7 に示す 4 つのタイプに分類した。特に剛性と速度の関係に於て、一定の傾向は見られないが、最大荷重はリッジ前縁からリッジ幅の約 2/3 の距離までに発生する。リッジ前縁から約 100mm 程度貫入した時点で発生する場合が多い。リッジ後縁部を通過するとき最大値を記録することはなかった。

R4	R3	R2	R1	C1	L1	L2	L3	L4
				C2				
				C3				
				C4				
				C5				
				C6				

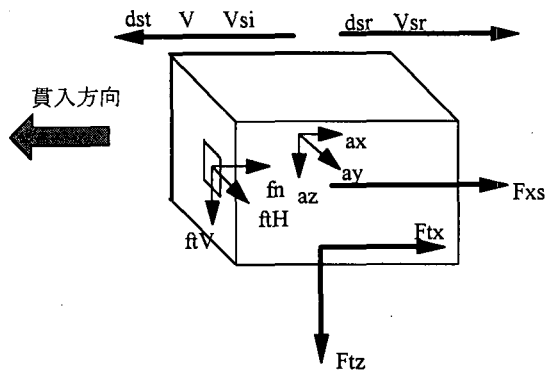


図-4 荷重パネルの配置及び座標系

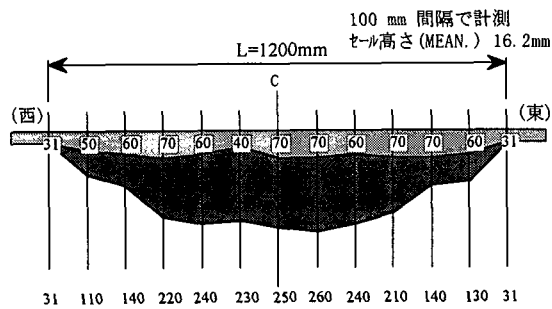


図-5 氷丘の断面形状の一例 (Test25 Ridge-A)

表-1 試験条件

模型名称	固有動数 (Hz)	Test ID	貫入速度 (mm/sec)
LS モデル	4.52	21	15
		23	30
		25	45
		27	60
MS モデル	8.20	16	15
		8	30
		10	45
		14	60
HS モデル	9.21	2	15
		4	30
		7	45
		9	60

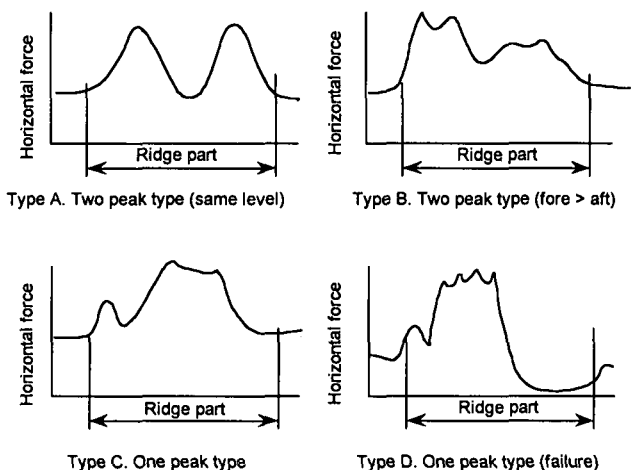


図-7 最大荷重の発現パターン

(4) 全体荷重と速度、剛性の関係

構造物の相対変位 d_{sr} 、相対速度 V_{sr} 、加速度 a_x 、全体氷荷重 F_{tx} 、荷重パネルの鉛直方向の荷重の時系列データの例を図-8 に示す。氷丘部と平坦氷部の境界を明確にするために図中の下段に領域を併記した。リッジ貫入中の全区間の（平均値+2×標準偏差）を越す F_{tx} のピーク値の平均値、 $F_{txp}(avr)$ と σ_{cpu} と凝固部の断面 $H_0 \cdot B$ の積により除し無次元化した全体荷重 $F_{txp}(avr)/(\sigma_{cpu} \cdot H_0 \cdot B)$ と歪み速度 (V/H_0) の関係を図-9 に示す。図中には同様の方法により無次元化した平坦氷 60mm の結果を併せて示す(Kamesaki et al.³⁾)。氷丘部の値は平坦氷より大きめの値を示し、約 0.4~0.6 の間にばらついている。平坦氷の試験では、剛性が小さい LS モデルが HS に比べると全体荷重がやや増加する傾向が観察された。即ち剛性が弱いほど、全体荷重が増加する傾向が認められた。また歪み速度に関しても、歪み速度が大きい程、全体荷重が増加する傾向を示した。しかしながら、今回のリッジ試験では、平坦氷で観察された、前述した剛性の全体荷重に与える定性的な影響は認められなかった。

(5) 局部荷重の特性

水線面および深さ方向に取りつけた局部荷重パネルの氷圧力特性について述べる。水線面に取りつけた局部荷重パネル C、R2 及び d_{sr} , V_{sr} , F_x の時系列データを図-10 に例示する。MS モデル, $V=15\text{mm/sec}$ では、 d_{sr} , V_{sr} , F_{xs} の波形は明瞭な準静的な挙動を示しているが、局部荷重パネル波形の同時性は平坦氷と比べると同時性が弱くなっている。即ち、ある時間では非同時的な部分も発現している。これは、リッジ内部は氷片を凝固させたものであり、その均一性は、平坦氷と比べて弱いために同時性が弱くなっ

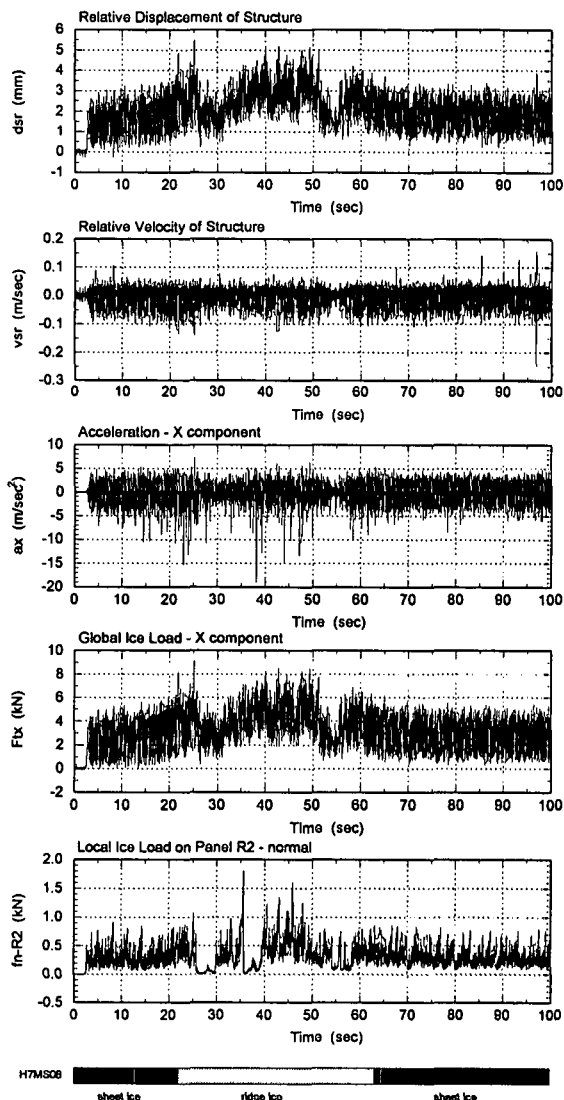


図-8 氷荷重の時系列(MS Model Test 8)

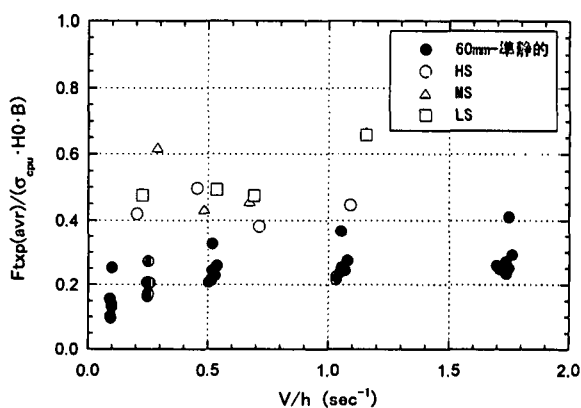


図-9 全体荷重と歪み速度の関係

たものと推察される。図-11 に深さ方向に取りつけた C1~C6 荷重パネルから求めた貫入中に記録された各パネルの最大氷圧力の分布を示す。C1 パネルで殆どの氷圧力を分担していることが解る。模型基

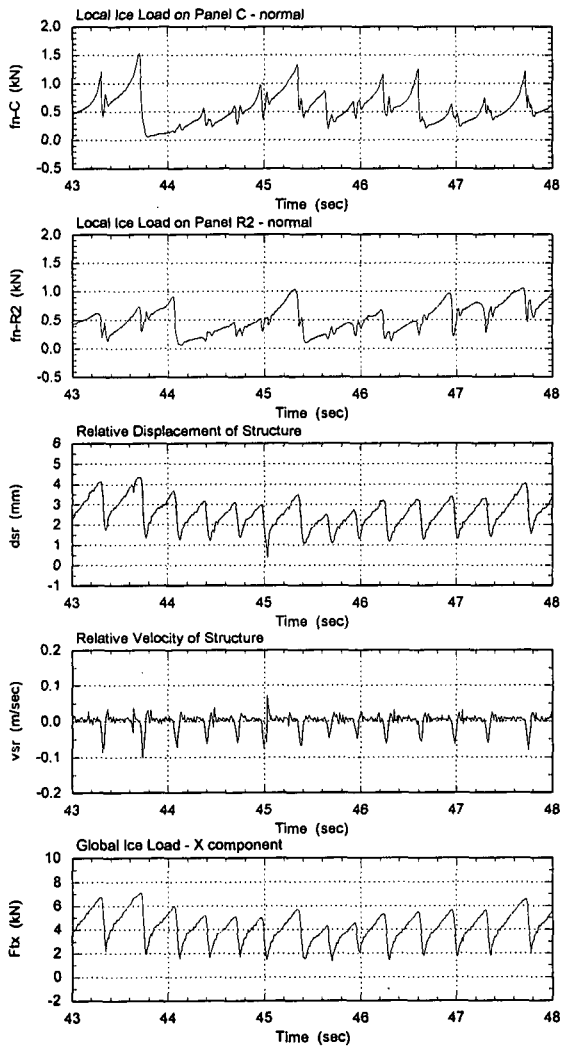


図-10 氷丘貫入時の時系列
(MS Model, Teat 16, V=15mm/sec)

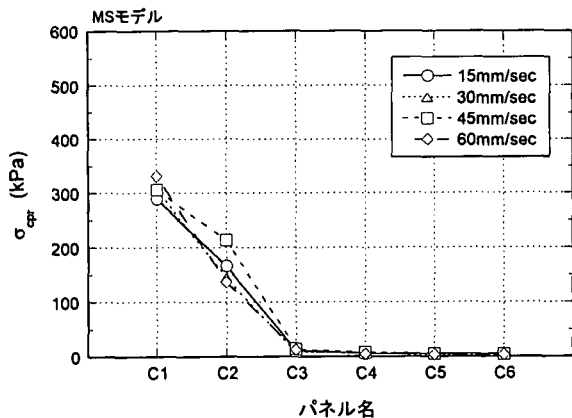


図-11 鉛直方向荷重パネルの最大氷圧力

部のロードセルで測定した全体荷重 $F_{txp(avr)}$ の比、 $F_{sxp(avr)} / F_{txp(avr)}$ は 0.81~0.95 に分布している。8 割以上の荷重を水線面で分担していることが解る。

(6) 動的応答

平坦氷による試験では図-12 に示すように貫入速度が早くなると模型の応答は、準静的振動(a) (Quasi Static)から定常振動(b) (Steady State Vibration) を経て、微小振動応答(c) (Small response) に遷移することが解った。構造応答のモード／バネ剛性、貫入速度の関係を図-13 に示す。貫入速度が速くなるにつれて準静的振動から定常振動を経て微小振動に移行する様子が窺える。

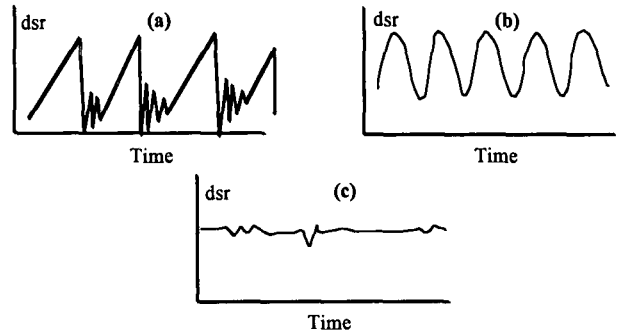


図-12 動的応答モードの分類

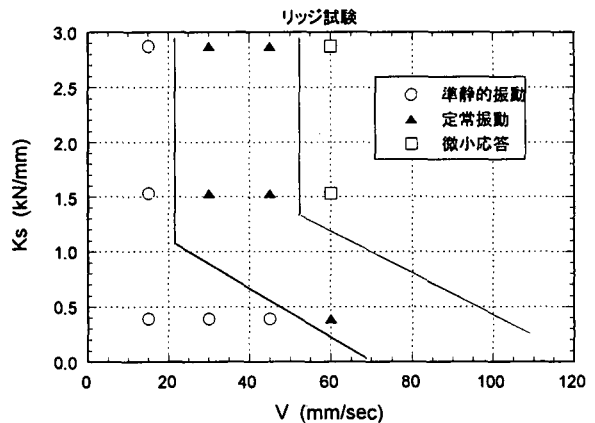


図-13 構造応答のモード／バネ剛性、貫入速度の関係

5. 実機に作用する 1 年リッジ荷重の推定

実験結果を使い、サハリン海域の構造物に作用する 1 年リッジ荷重の算定を概略試みた。図-9 の実験結果から全体荷重の無次元値の上限値を 0.6 とするとリッジ荷重は式(1)により求められる。

$$F_x = 0.6 \cdot \sigma_{cr} \cdot B \cdot H_0 \quad (1)$$

ただし、 F_x はリッジ荷重 (水平力)、 σ_{cr} はリッジ凝固部の一軸圧縮強度、 B は構造物の幅、 H_0 は凝固深さである。

Bekker⁴⁾はサハリン海域の 100 年再現期間のリッジ形状としてセール高さ $H_s=3\text{ m}$ 、キール深さ $H_k=21.0\text{ m}$ セール幅 $B_s=20.0\text{ m}$ 、リッジ幅 $B_k=57.0\text{ m}$ 、凝固深さ $H_0=3.45\text{ m}$ を提案している。一方、Astafiev⁵⁾

らはサハリン海域の平坦氷の月別一軸圧縮強度として表-3 の値を提案している。凝固部の圧縮強度は氷温度が平坦部と比較して暖かいので 3 月の圧縮強度の 70% になると仮定し、 $\sigma_{cr}=1.2\text{Mpa}$ を採用する。構造物の幅は 100m を想定する。以上よりリッジ荷重は式(2)により求められる。

$$\begin{aligned} F_x &= 0.6 \cdot 1.2 \cdot 3.45 \cdot 100 \\ &= 248\text{MN} \end{aligned} \tag{2}$$

更に、幅 B と H0 の修正、 σ_{cr} の推定など精度向上が必要であることは云うまでもないが、サハリン海域のリッジ荷重は北極海域の多年リッジ荷重と比較すると数分の一のオーダーであることが解る。

表-3 サハリン海域の月別の一軸圧縮強度

項目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
氷温度(℃)	-10.7	-11.3	-3.4	-1.8	-1.0
塩分濃度(ppt)	7.3	6.5	4.4	3.6	2.8
σ_c (Mpa)	0.68	1.44	1.72	0.96	0.52

6. 結言

鉛直構造物が 1 年氷丘脈に貫入した時の氷荷重算定法を検討した事例は最初に述べたように極めて少ない。今後サハリンなどの Sub-Arctic の石油開発が活発になるにつれて最重要課題として認識されるものと思われる。阻害要因の一つとして、1 年氷丘脈の構造、機械的特性が不明確なことからモデル化が困難になっている。今回の試験では 1 年氷丘脈の荷重は凝固部の圧縮強度とその深さにより一次評価できることを示したが、今後更に以下の研究が必要である。

- ・ 平坦氷部と氷丘部の強度比及び相似則の確保するための実験法の改善
- ・ 氷丘凝固部の空隙率と圧縮強度、せん断強度との関係式の導出
- ・ 周辺の平坦氷による拘束の影響
- ・ 圧壊以外のせん断すべり線を想定した極限解析的な取り扱い

謝辞：本研究は通産省から(社)日本海洋開発産業協会が委託され「海洋構造物に及ぼす氷荷重の研究」(委員長 佐伯 浩 教授)の一環として実施されたものであり、貴重な助言を得た委員各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

1) Leppäranta, M., Hakala, R.: The Structure and strength of first-year ice ridges in the Baltic Sea, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.20, pp.295-311, 1992.

2) Timco, G.W., Goodrich, L.E.: Ice Rubble Consolidation, *IAHR Ice Symposium*, Sapporo, pp.427-438, 1988.

3) Kamesaki, K. Yamauchi, Y., Kärnä, T.: Ice force as a function of structural compliance, *Proc. 13th IAHR Ice Symp.*, Beijing, Vol.1, pp.395-402, 1996.

4) Astafiev, V.N., Polomoshov, A.M., Truskov, P.A.: Starmukhi on the Northern Sakhalin Offshore, *Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol.II, pp.461-466, 1991.

5) Bekker, A.T., Komarova, O.A., Vasilijev, S.L.: Methods of Ridge Force Analysis on Offshore Structures, *Proceedings of 7th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol.II, pp.461-465, 1997.

(1999. 4. 19 受付)