

中規模野外実験における載荷氷板の破壊条件

CONSIDERATION OF FAILURE MODE OF AN ICE SHEET IN FIELD INDENTATION TESTS

酒井雅史¹・松下久雄²・神尾善二³・河村宗夫⁴・竹内貴弘⁵・佐伯浩⁶

Masafumi SAKAI, Hisao MATSUSHITA, Zenji KAMIO, Muneeo KAWAMURA, Takahiro TAKEUCHI and Hiroshi SAEKI

¹正会員 工修 大成建設株式会社 技術研究所 自然環境部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²工博 財団法人 日本海事協会 研究センター (〒267-0056 千葉市緑区大野台1-8-3)

³三井造船株式会社 船舶艦艇事業部 技術開発部 (〒290-0067 市原市八幡海岸通1)

⁴正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-0044 東京都江東区越中島3-4-17)

⁵正会員 工博 八戸工業大学 工学部 土木工学科 (〒031-0814 八戸市妙大開88-1)

⁶正会員 工博 北海道大学 工学部 土木工学科 (〒001-0013 札幌市北区北13条西8丁目)

Field indentation tests to measure ice load have been conducted at Notoro lake in Hokkaido, using an indentation test apparatus. Test data and observations on failure of an ice sheet (first-year ice) have been accumulated. The failure of the ice sheet is discussed based on the observation of the contact surface between indenter and ice sheet. The simplified model for flaking failure is proposed under the assumption that the failure continues at constant shear strength of the ice. The model roughly matched the flaking failure of the ice sheet in the field test. Cleavage cracking criterion and bending failure were also discussed in relation to fracture toughness and Euler's equation.

Key Words : Indentation test, failure mode, strain rate, creep, fracture criteria, cleavage cracking

1. はじめに

氷海での海洋構造物や砕氷船等流水との接触が考えられる構造物を設計する場合には氷力を的確に評価する必要がある。著者らは、これまでオホーツク海沿岸の能取湖で一年氷を用いた鉛直壁構造物モデルの氷板への貫入試験を行い、氷力や氷板の破壊状況を観測し、その特性を明らかにしてきた。本研究では、野外実験で求めた氷板の破壊状況の観察結果から破壊の発生条件を検討した結果をまとめた。氷板の破壊現象は図-1に示すように、氷板への貫入速度(ひずみ速度)の影響を受ける。貫入速度が小さい場合は圧縮強度に支配されるクリープ変形していくが、貫入速度が大きい場合には、図に示すようにくさび型の剥離氷片を伴ったフレーキングや氷板と供試模型との接触で生じるクラッシングやクリベージクラックが発生する。後者の場合には複数の破壊条件を検討する必要があると考えられる。鉛直壁構造物に対する氷板の破壊条件は主に図-2のような4つのパターンが考えられる。

すなわち1) クリープ破壊, 2) セン断破壊, 3) クリベージクラック発生, 4) 曲げ破壊である。

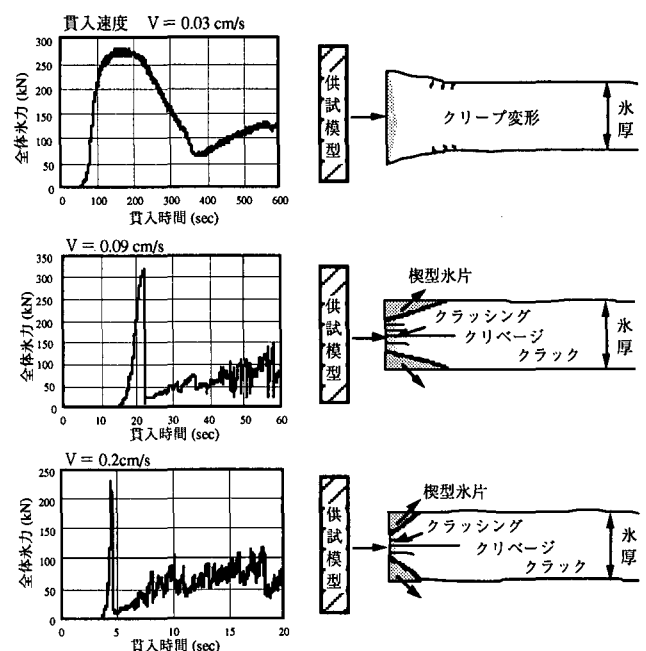
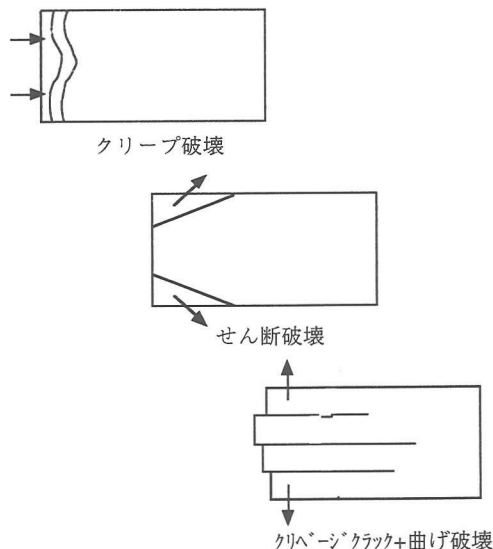


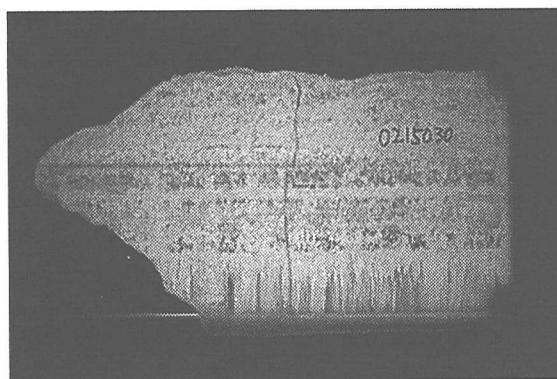
図-1 貫入速度による荷重変化と氷板の破壊状況(横断面)



図－2 氷板破壊様式の模式図

2. 試験氷板の物理特性

貫入試験を行った試験氷板の密度は $0.79\sim0.91\text{ g/cm}^3$ であった。塩分量は $2.0\sim7.7\%$ であった。このように能取湖の海水の密度や塩分量のばらつきが大きいのは、氷板の結晶組織が強固に固まっていない一年氷の初生氷であるためと考えられる。海水の結晶構造は、上方より雪氷、粒状結晶、柱状結晶であり、気温の変化により氷の成長速度に変動があることから、特に中央部から下層部では図－3に示すように成長過程で複数の層を形成する場合がある。



図－3 氷板の破壊断面の結晶構造

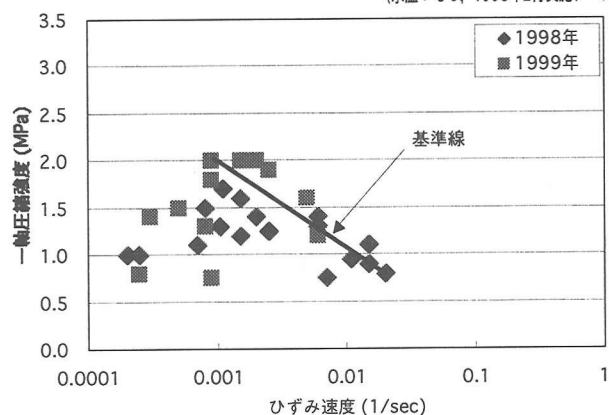
表－1に試験氷板の圧縮強度 σ_c 、割裂強度 σ_t 、せん断強度 τ 、曲げ強度 σ_b の平均値と圧縮強度と各強度との比率を示した。強度は大きい順に圧縮強度、せん断強度、曲げ強度、割裂強度となった。また、氷温 -3°C における圧縮強度は $1\sim3\text{ Mpa}$ 、ヤング率は $200\sim1200\text{ Mpa}$ 程度であった。なお、各強度試験では氷温を海水温度と同じ -3°C に保ち、ひずみ速度 $=10^{-3}$ となるよう速度を設定した。また、図－4に圧縮強度とひずみ速度の関係を示すが、既往の研究成果と同様、ひずみ速度が 10^{-3} 以下の場合には、

ひずみ速度の増加とともに圧縮強度 σ_c は大きくなり、 10^{-3} の近傍で σ_c は最大値を示し、さらにひずみ速度が増加すると圧縮強度は徐々に小さくなった。氷板の破壊様式はひずみ速度が 10^{-3} 以下ではクリープ破壊、 10^{-3} 以上では脆性破壊が顕著に現れた。一方、せん断強度については、中沢らの研究結果¹⁾からひずみ速度にはほとんど影響されないことが示されている。

表－1 試験氷板の強度

試験ケース	一軸圧縮強度 σ_c			割裂強度 σ_t	せん断強度 τ	曲げ強度 σ_b	σ_t/σ_c	τ/σ_c	σ_b/σ_c
	平均	標準偏差	共分散	平均	平均	平均			
1	1.09	0.56	0.51	0.12	0.28	0.39	0.11	0.26	0.36
2	1.40	0.31	0.22	0.17	0.38	0.33	0.12	0.27	0.24
3	1.73	0.40	0.23	0.47	0.55	0.35	0.27	0.32	0.20
4	1.56	0.27	0.17	0.24	0.61	0.45	0.15	0.39	0.29
平均	1.45	0.93	0.28	0.25	0.46	0.38	0.16	0.31	0.27
	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)			

(氷温： -3°C ，1998年2月実施データ)



図－4 一軸圧縮強度と歪み速度の関係

3. 氷板の破壊状況の観察

氷板の破壊は、図－1に示したように、貫入速度の影響を強く受ける。図－5に現地試験における各貫入速度での氷板破壊状況の観察例を示す。貫入速度が小さい場合($V=0.03\text{ cm/s}$)には、氷板に貫入する供試模型の全幅にわたり、載荷直後からクリープ変形を伴って破壊が進行した。その後中央部が割裂し、上下方向にバックリングや曲げ破壊が発生した。一方、貫入速度が大きい場合は、非同時に氷板の上下表層がくさび状に剥離するフレーキング破壊や構造物と氷板との接触面での圧壊が卓越し、氷厚に対してほぼ中央部にクリープ・クラックも発生する。特に、フレーキング破壊では最大氷力に到達した瞬間に供試模型前面の氷片が氷厚サイズより小さいサイズでくさび状に剥離する状況が確認された。また、貫入速度が大きくなるに従い、剥離する氷片は小さくなる傾向にあった。

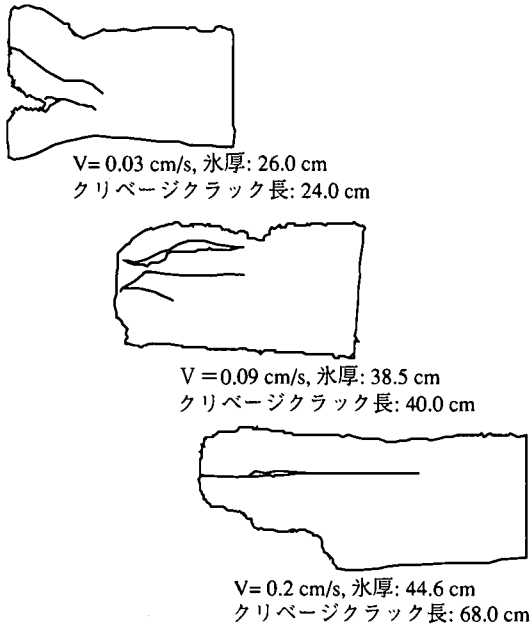


図-5 氷板の破壊様式の違い（実測断面図）

4. 氷板破壊条件の検討

4.1 セン断破壊条件の検討

(1) セン断破壊の条件式の設定

前述した氷板の破壊現象を明らかにするために、複数の破壊条件を検討する必要があると考えられる。まず、氷板の破壊現象のうち、実際に海洋構造物と氷板の相互作用で起こりやすい、貫入速度の大きい領域で発生するフレーキングによる破壊メカニズムに着目した。ここでは、幾何学的なモデルをベースに、せん断破壊による氷板の先端形状変化について検討した結果をまとめた。検討に際しては図-6のモデルを用い、以下の仮定条件を設定した。

1) 図-6に示すような破壊氷板の先端形状を考え、氷板上下層部はせん断によるフレーキング破壊が生じる。

2) フレーキング破壊が発生する場合、氷板上下層でのせん断強度は一定とする。

この仮定条件に基づき、氷板先端部分での静的な力の釣り合いを考えて式を導き、海水のせん断強度と圧縮強度の比、また、拘束による氷板先端への応

力集中の度合を圧縮強度に基づく集中度としてパラメータを設定し、破壊進行時の氷板の先端形状変化を求めた。各設定に基づく式を以下に示す。

設定1：破壊面形状の各種パラメータを図-6のように設定すると、

$$\tan \theta = A_x / L_c \quad \dots\dots (1)$$

$$A_r = (T - A_0) / (2 \cdot \sin \theta) \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 θ ：氷板水平面に対するせん断角度、

A_x ：せん断部分の垂直面面積、

L_c ：限界貫入量、 A_r ：せん断面の面積、

T ：氷厚、 A_0 ：静水圧部分の垂直面面積

設定2：破壊条件は、中央部の静水圧部分を除いた上下の A_x 部分の圧縮強度とせん断面におけるせん断強度が一致した場合に破壊が発生するとして、

$$A_x \cdot \alpha \cdot \sigma_c \cdot \cos \theta = A_r \cdot \tau_c \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 α ：応力集中係数、 $n = \tau_c / \sigma_c$ とすると

$$A_x / A_r = \tau_c / (\alpha \cdot \sigma_c \cdot \cos \theta) = n / (\alpha \cos \theta) \quad \dots\dots (4)$$

設定3：氷板先端部は静水圧状態と考え、図-6に示すベクトルの釣り合いが条件が成り立つとして、

$$(A_x \cdot \alpha \cdot \sigma_c \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) / (A_0 \cdot \tan \theta) / 2 = \alpha \cdot \sigma_c$$

$$A_0 = 2 \cdot (\cos \theta)^2 \cdot A_x \quad \dots\dots (5)$$

設定4：破壊の遷移条件として

$$(2 \cdot A_x + A_0) \cdot \alpha \cdot \sigma_c = T \cdot \sigma_c \quad \dots\dots (6)$$

上記の各設定から次式を求めた。

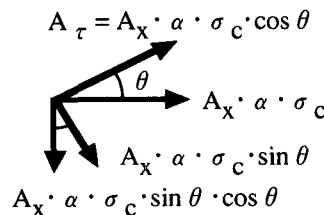
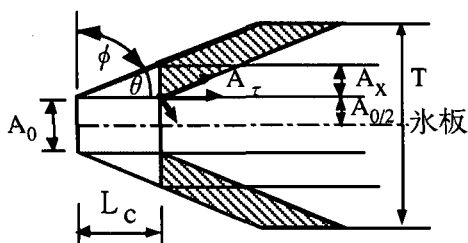
$$A_r / T = 1 / (2 (\sin \theta + n \cos \theta / \alpha)) \quad \dots\dots (7)$$

$$A_x / T = (A_r / T) \cdot n / (\alpha \cos \theta) \quad \dots\dots (8)$$

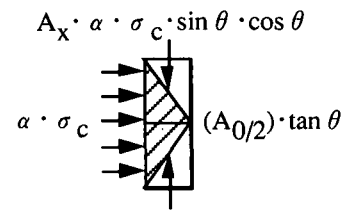
$$A_0 / T = 2 \cdot (\cos \theta)^2 \cdot (A_x / T) \quad \dots\dots (9)$$

$$2 \cdot A_x + A_0 = T / \alpha \quad \dots\dots (10)$$

ここに $X = \sin 2\theta = (n(2 - A) - nA(1 - 4n^2 + 4n^2A)^{1/2}) / (n^2A^2 + 1)$, $A = 1/\alpha - 1$ ($\alpha \geq 1$), $\theta = (1/2) \sin^{-1} X$
この結果より、氷板の先端部の破壊形状は、 α および n により表-2のように与えられる。



氷片剥離後の氷板端部での力の釣り合い



氷板先端部の静水部分状況

図-6 氷板先端部の設定モデルと力の釣り合い条件

表-2 氷板先端部の破壊形状予測

$n \backslash \alpha$	1	2	3
0.2			
0.3			
0.4			
0.5			

$n = (\tau c / \sigma c)$	α	$\theta (^{\circ})$	$A \tau / T$	$A x / T$	$A 0 / T$	$(2 A x + A 0) / T$
0.2	1	12	1.2	0.26	0.48	1.0
	2	18	1.3	0.13	0.24	0.50
	3	20	1.3	0.09	0.16	0.34
0.3	1	18	0.83	0.26	0.48	1.0
	2	28	0.83	0.14	0.22	0.50
	3	30	0.86	0.1	0.14	0.34
0.4	1	26	0.62	0.28	0.44	1.0
	2	45	0.59	0.17	0.17	0.50
0.5	1	45	0.47	0.33	0.33	1.0

(2) 実験結果との比較

図-7に示すように、角度 θ はひずみ速度が大きくなるにつれて徐々に減少し、一定値に近づく傾向がみられた。海水の圧縮強度を図-4の基準線上の値を採用し、せん断強度を0.4MPaで一定と仮定すると、角度 θ の計算値は α の値の違いにより図-7に示した各点線で表される。この図よりひずみ速度が $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の範囲では、 $\alpha=2$ 前後の計算値は実験結果とよく近似していることがわかる。また、氷板の最大せん断角度の計算値と実験値とを比較すると、歪み速度が 10^{-2} 以上では氷板の剥離角度の計算値は、実験値よりも若干大きめの値を示した。

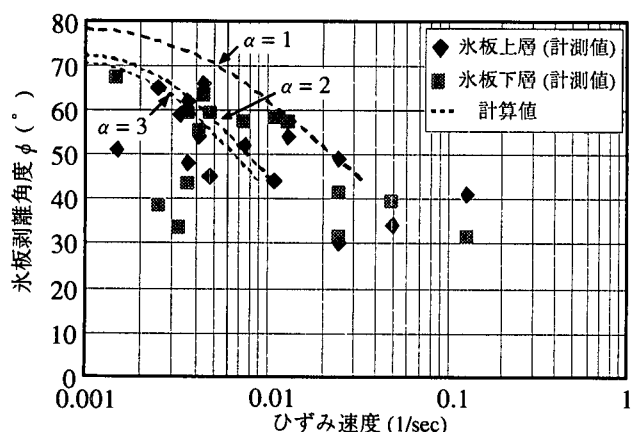


図-7 歪み速度と氷板先端部の氷片剥離角度の関係

ひずみ速度が大きい場合に剥離角度が45度より小さくなる理由は、氷板の破壊条件が「せん断+クラッキング」破壊から「クリベージクラック+曲げ」破壊に遷移していくためと考えられる。

図-8に限界貫入量 L_c の計算値を示すが、実測値よりも大きめの値を示す傾向がみられた。これは、実際の氷板破壊では貫入速度により氷板の貫入方向での破壊様式の違いや氷厚方向での氷板組織の違いが存在するため、平均化すると L_c が小さくなることによるものと考えられる。

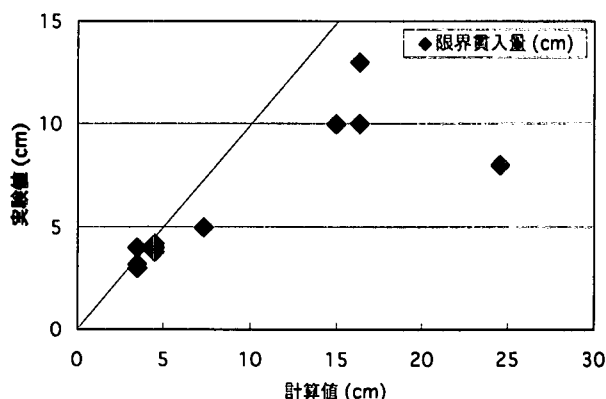


図-8 限界貫入量の計算値と実験値との比較

4.2 クリベージクラックの発生条件の検討

図-9に示すように、靱性試験は氷板への加力時の水平方向のクリベージクラックの発生を想定して行った。図-10の破壊靱性値とひずみ速度との関係は浦部らの実験結果²⁾とほぼ同様の関係となった。すなわち、ひずみ速度が大きくなると破壊靱性値は減少する傾向にある。また、試験温度の違いによる破壊靱性値の変化は少ないことも実験結果から明らかとなった。

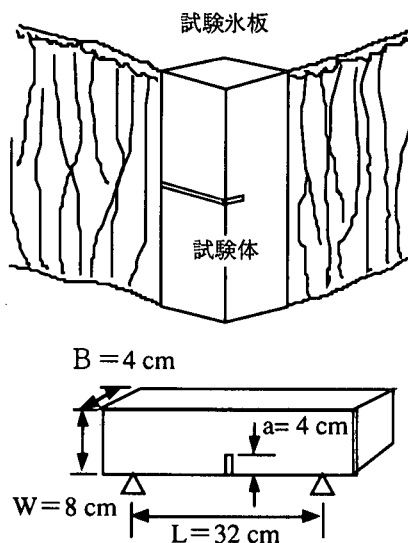


図-9 破壊靱性試験の試験体

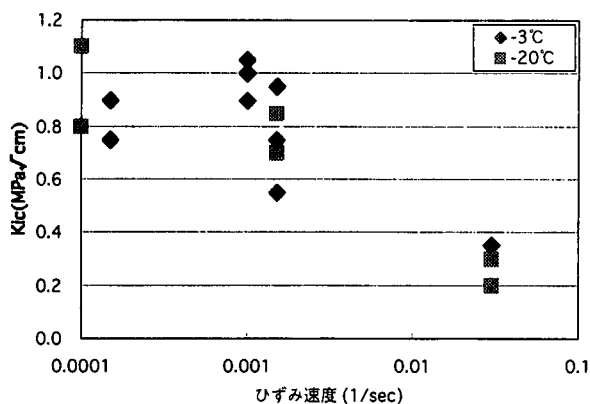


図-10 破壊靱性試験の結果

ここで、貫入方向前方の氷板中央部に発生する上下方向の引張応力 σ_t と氷板に存在する微小な割れから決まる応力拡大係数 $K(=\sigma_t(\pi a)^{1/2})$ が靱性値 K_{IC} に到達した場合、クリベージクラックが発生すると仮定する。氷板靱性値を $K_{IC}=0.5\sim1.0\text{MPa}\sqrt{\text{cm}}$ とし、初期ひびわれの大きさを $2\sim3\text{cm}$ とするとクリベージクラックの発生応力は $0.16\sim0.4\text{MPa}$ となり割裂強度 σ_c ($0.12\sim0.47\text{MPa}$) とほぼ一致する。

4.3 曲げ破壊条件の検討

曲げ破壊の発生はの要因は、以下のように荷重の作用方向や海水組織によるものなどが考えられる。

1) 供試模型の表面摩擦係数が大きい場合は、貫入時に発生する摩擦力による氷板の上下曲げ成分が大きくなると、氷板の曲げ強度は圧縮強度の約30%なので、曲げ破壊が発生しやすくなる。

2) 氷板の破壊初期にクリベージクラックの発生により、氷板が層状に破壊して氷板先端部の曲げ剛性が小さくなった場合には、曲げ破壊が発生しやすくなる。

割裂強度は圧縮強度の約15%程度の値を示し、氷板中央部から下部の層状組織では層間に貫入初期時にクリベージクラックが発生し、部分的に氷板厚が薄くなりやすい。このため、クリベージクラックにより層状に分かれた氷板下部は圧縮強度よりも曲げ破壊が生じやすくなる。

矩形断面の場合、座屈強度は式(11)のオイラー式で与えられ、氷厚が小さいほど小さくなる。

$$\sigma_{bu} = \pi^2 E I / (m^2 L^2 A) \\ = (\pi^2 E / 12 m^2) \cdot (T/L)^2 \quad \dots\dots (11)$$

ここに、 $A=bT$ 、 $I=bT^3/12$ 、 E : ヤング率、 b : 氷板幅、 T : 氷厚、 L : 氷板長さ、 m : 座屈モードによる係数したがって、クリベージクラックが多いほど割れやすくなると考えられる。また、 m 値が大きいほど、座屈強度は小さくなる。氷板の上下層の破壊状況は供試模型との接触条件により変化するが、図-11

に示すように、観察結果から中央部は $m=0.5$ 、外側は $m=0.7$ または 2.0 に相当した状況と考えられることから、氷板外側の方が中央部よりも割れやすくなる。これらの現象は実験結果と良く一致した。

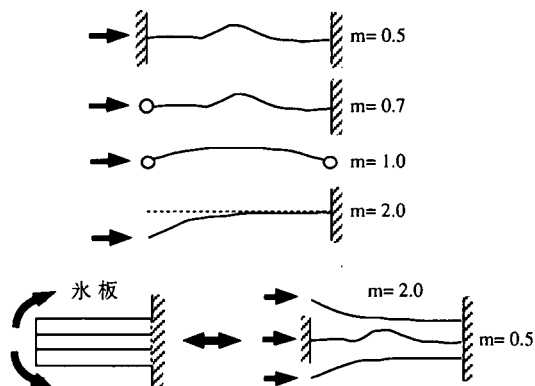


図-11 オイラーの座屈モードの氷板への適用

5. まとめ

能取湖の一年氷を用いた鉛直構造物モデルによる貫入試験時の破壊現象について、その破壊状況を観察するとともに破壊条件に関して検討を行った。

- (1) 氷板破壊様式は構造物の氷板への貫入速度(ひずみ速度)に大きく依存する。
- (2) フレーキング破壊の発生条件として、新たに氷板先端部分の力の釣り合いやせん断強度一定の条件を仮定した場合、氷板先端部の破壊形状予測値は計測結果と良く一致する。
- (3) 氷板破壊には結晶組織の影響があり、氷板上層部の粒状組織ではせん断破壊が、氷板下層部の層状の柱状組織では曲げ破壊が顕著に現れる。

謝辞

本研究は(社)日本海洋開発産業協会(JOIA)の「海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究」のもと平成10年度冬季に行われた現地での中規模野外実験において実施されたものであり、ここに実験に際してご助力をいただいた関係各位に対して謝辞を表するものである。

参考文献

- 1) Saeki, H., Ono, T., Niu En Zong, and Nakazawa, N.: Experimental Study on Direct Shear Strength of Sea Ice, *Annals of Glaciology*, 6, pp 218-221, 1985
- 2) Urabe, N., Kawasaki, T., and Yoshitake, A.: Fracture Toughness of Sea Ice, *Cold Regions Science and Technology*, 3, pp 29-37, 1980