

傾斜構造物による氷板の破壊パターンについて

岩手大学工学部	正会員	平山 健一
同上	正会員	堺 茂樹
同上	正会員	笹本 誠
同上	学生員	前田 智春
豊橋市役所		伊藤 正博

1 はじめに

構造物に作用する氷圧力を計算する場合、氷板の破壊モードが特定出来れば、これまで提案された多くの算定式を用いて各方向成分の氷荷重を決定することは可能である。従って氷板の破壊モードの予測は設計上極めて重要である。

特に傾斜した衝突面を持つ構造物では、氷板面と構造物面との角度が大きい場合、曲げ破壊、座屈破壊、圧縮破壊等の複数の破壊モードが予想される。

これらの破壊モードは、氷厚、氷温、傾斜角、氷板と構造物の摩擦の大きさ、氷の移動速度、構造物の形状など非常に多くのパラメータに起因することがこれまでの研究により明かとなっている。本報告では傾斜角、摩擦、氷の移動速度の3つのパラメータを変化させて氷板に対する傾斜板の押し込み実験を行い、それぞれのパラメータが破壊モードに及ぼす効果を明らかにすることを目的とする。

2 これまでの研究の現状

田口等は直立円柱模型の押し込み試験を行ない、歪速度 $V/2D=10^{-2}$ / sec を境界として圧縮破壊モードと座屈破壊モードに分けられるとしている。また、水平氷荷重は圧縮破壊モードの場合 Afanas'yev の indentation 係数、円柱の形状係数を 0.9 とした計算値とほぼ一致し、座屈破壊モードの場合は、構造物と氷板の接触条件を free とした Sodhi 解のまわりに分布し、その最大値は接触条件を hinge とした解を上回ることではないとしている。

坂本は、平板の傾斜角を変化させて氷板の破壊モードを実験的に検討し、 $84^{\circ} \sim 86^{\circ}$ を境として曲げ破壊から座屈破壊に移行することを明かにした。また、最も単純な一次元弾性理論を用いるには、幅の狭い構造物の場合、実際のクラック長に相当する長さを構造物幅と考えると実験値が良く説明されることを示している。座屈破壊モードの場合は、座屈荷重は Sodhi の解に比べて若干小さくなる傾向を示している。

川崎等は、直立平板の押し込み試験を行ない、実験値は Afanas'yev, Reinicke の推定値と良く一致することを明らかにしている。また座屈破壊モードの場合実験値は Sodhi の解のうち接触条件として free とした場合の理論値の近傍に分布している。

近年、構造物による氷板の破壊パターンに関する実験、研究がいくつか見られるが、破壊パターンに関連する要因は多く、これらの効果について更に検討が必要な現状である。

3 実験方法

実験は、低温室内に置かれた長さ 1.6m、幅 1.0m、深さ 0.5m のエチレングリコール水溶液を満たした木製の水槽を用いた。水面に氷板を製氷した後、傾斜角が 5° づつ可変な平板(幅 20cm)を移動させて氷板を破壊する。平板は水槽両壁天端の二本のレール上を一定速度で走行する台車に荷重測定装置と共に取り付けられている。台車の速度は範囲は $0.18 \sim 1.38$ cm/sec、氷圧力は鉛直方向と水平方向に取り付けられた 2 個の load cell により各分力を測定した。

本実験では、下記のパラメータのそれぞれ組合せを変えつつ実験した。

氷板と斜面構造物との摩擦係数	;	$\mu=0.064, 0.1, 0.25, 0.3$
斜面構造物の移動速度	;	$v=0.2 \sim 1.4$ cm/s
構造物の斜面角度	;	$\alpha=75^{\circ}, 80^{\circ}, 85^{\circ}$

破壊モードの識別は、視察によって行い、ビデオにより確認した。

4 実験に使用された氷板

今回の実験に使用された氷板は、エチレングリコール濃度 1.2 % の水溶液を使用して製作された。現在模型実験において多く使用されている模型氷として尿素水溶液より作られる尿素氷がある。尿素氷は不規則な結晶

方向を持つ薄く強度の大きい上層と、柱状の結晶構造を持つ下層の二層から成るが、実際の氷に比べ上層の比率が大きく、上下方向の载荷により異なった曲げ強度を持ち、また低強度での弾性が得られない等の欠点を持っている。エチレングリコール模型氷は尿素氷で問題であった氷の二層構造の影響が少なく、広い強度範囲で弾性体としての取り扱いが可能であり模型氷として物性的に優れている。

製氷は、低温実験室内の温度を低下させながら結氷直前の水面に微細な霧を噴霧する wet seeding を行い、室温 -10°C で 8 時間 (積算寒度 80°Chr) で氷厚 2cm の実験用氷板を得る事ができる。

(1) 氷板の曲げ強度

氷板に手鋸で片持ち桁 (氷厚を h として、桁長 6-7 h、桁幅 1-3 h) を整形し、最大荷重 2kgf の push-pull 試験器により载荷し、下方曲げ強度を測定した。氷板の曲げ強度は 40 kPa となるように製氷した。

(2) 氷板の弾性係数

弾性係数は平板载荷法により測定した。氷板の中心で集中荷重を一定値増加した時の、氷板たわみの増加量から特性長を求め、次式により弾性係数 E を計算した。

$$L_c = [Eh^3 / 12(1-\nu^2)\rho_w g]^{0.25}$$

ν : 氷のポアソン比 $\rho_w g$: 水の単位体積重量 L_c : 特性長

本実験で使用した氷板の特性長はほぼ 26 cm、弾性係数は 60 MPa である。

(3) 氷板の一軸圧縮強度 σ_c

模型氷の圧縮強度を求める標準的方法は定まっていない。本実験では氷板に手鋸で 10×20 cm のコの字形の試験片を切り、その先端部の一辺に水平に push-pull 試験器により荷重を加え、破壊荷重を測定した。測定された σ_c はほぼ 100 kPa となった。

5 実験の結果

(1) 氷板の破壊モードの分類

本実験で見られた氷板の破壊モードを大別すると次の三つに分類することが出来る。(1)圧縮破壊モード

(2)座屈破壊モード (3)曲げ破壊モード

(1)の圧縮破壊モードは、構造物の近辺の氷板のみが破壊するモードであり、(2)の座屈破壊モードは、氷板が不安定な状態となり突然面外変形を起こして破壊するモード、(3)の曲げ破壊モードは、氷板が構造物に乗り上げるようにして起こるモードである。

(2) 破壊モードマップ

図1、図2、図3はそれぞれ傾斜角 75° 、 80° 、 85° の場合、摩擦係数と歪み速度に対する破壊モードマップである。本報告では歪速度は 平板の速度、幅をそれぞれ V 、 B として $\varepsilon = V / (3 \times B)$ で計算してある。

図1の 75° の場合は、図中のメッシュの範囲では3種類の破壊モードが生じたが、それ以外の範囲では曲げ破壊だけがみられた。図より摩擦係数が一定値より大きくなると曲げ破壊以外のモードの領域に移行するが、その限界値は歪速度が大きくなるに従って低下する傾向が見られる。しかしながら構造物と氷の摩擦係数が 0.2 が程度以下であれば曲げ破壊が設計の対象破壊モードとなろう。図2の 80° の場合も 75° の場合とほぼ同じく曲げ破壊が卓越しているが、その範囲がやや狭くなっている。図3の 85° の場合は 75° と 80° の破壊モードマップに比べて大きく変化し、曲げ破壊のみが生じる範囲は見られず圧縮破壊、座屈破壊の範囲が広がっている。

図中の右側の線は座屈破壊と圧縮破壊を区別し、左側の線は曲げ破壊モードが生じる可能性のある範囲を区別したものである。また、図より摩擦係数、歪速度が大きいほど曲げ破壊の可能性は減少する。また座屈破壊と圧縮破壊は、歪速度 $0.015 \sim 0.02$ /sec で概略区分ができ、歪速度が大きいほど圧縮破壊が生じ易いことが認められた。従って、 85° の場合は圧縮破壊、座屈破壊など直立面としての破壊モードが設計の対象となる。

(3) 破壊荷重の検討

図4は各破壊モードに対する全ての実験例の水平方向荷重と頻度分布をパラメーターに関係なく示したものである。圧縮破壊モードと座屈破壊モードの場合は、分布に明瞭なピークが見られるが、曲げ破壊モードの場合はそれらに比べると荷重が広く分布し、パラメーターの違いによる荷重に対する影響が特に曲げ破壊モードにおいて大きいと考えられる。

以下に各破壊モードについて本実験で得られた荷重測定値と既往の計算式を比較してみる。

(a) 圧縮破壊

圧縮破壊モードに対する水平氷荷重計算式は、直立構造物を用いた模型実験により導かれた次のような公式がある。

Afanas'yev の式 $F/Dh\sigma_c = Cg\sqrt{5(h/D)-1}$

Cg : 断面形状係数 σ_c : 氷の圧縮強度 D : 模型幅

佐伯の式 $F = 50^{0.5} h \sigma_c$

平山の式 $F = 3.57D^{0.5}h^{1.1}\sigma_c$ (cm, kgf-unit)

本実験では、平板を用いているので $C_g = 1.0$, また、圧縮強度の測定値 $\sigma_c = 100$ kPa、 $h = 2.0$ cm、 $D = 20$ cm を代入すると実験値は Afanas'yev 式による計算値とほぼ一致する。佐伯の式、平山の式とも、本実験の範囲では適合性良いことが確かめられた。

一方、垂直荷重成分は通常の直立構造物では発生しないが、傾斜平板の場合には測定され、摩擦係数、傾斜角に比例して増加する傾向が実験的に認められた(図5参照)。水平荷重と垂直荷重成分の関係は図6のように与えられ摩擦係数、傾斜角が大きいく程、水平力に対する比率が増えていることがわかる。

(b) 座屈破壊

座屈破壊モードの場合の水平氷荷重は圧縮破壊と同様に摩擦係数、歪速度などの効果は小さく、本報告では多くの文献に参照されている Sodhi の FEM 解と比較する。図7に示されるように本実験値は、Frictionless の場合(構造物と氷板との間の境界条件が全く拘束されないという条件で導かれた解)をやや下回った。柳沢等による実験においても同様な傾向が報告されている。

座屈破壊の場合、傾斜面と氷板の接触点はほぼ固定されるため、氷板は進行に伴い平板前面で水面に対して凸に変形する。そのため座屈破壊モードにおいても垂直荷重成分は存在し、摩擦係数や平板傾斜角が大きくなるに従って、増加する傾向が見られたが、歪速度については明確な傾向はみられなかった。

(c) 曲げ破壊

氷板の曲げ破壊は、傾斜平板による上向きの力によるものであり、これまでいくつかの計算式が提案されている。本実験の垂直荷重は氷板の破壊荷重と平板上への氷の ride-up 荷重の合計であるが、傾斜角度が大きいために後者の比率は無視できる大きさと判断される。図8は幅の十分広い斜面に対する弾性理論で用いられる無次元表示で氷荷重鉛直成分と摩擦係数の関係を示した。無次元垂直荷重はかなりのバラツキが見られるが2~7の範囲に分布し、摩擦係数の増加と共に増大する傾向が示された。同理論によれば無次元垂直荷重は0.68であるが、これまで報告された実験結果でも過小であるとされ、構造物の幅の効果を考慮しなければいけないことを示している。本実験においても構造物前面の曲げ破壊が生ずるクラックの長さは構造物幅の2~3倍程度であり同理論の仮定は満足されない。また、積雪等による摩擦の増加による荷重の増加は1、2の報告がありその原因は ride-up 成分力の増加、破壊パターンの変化などとされているが明確ではなく今後検討が必要である。

図9は、水平荷重と摩擦係数、傾斜角度の関係について示したものであり、摩擦係数が大きくなるに従い、水平荷重も大きくなっていることがわかる。

図10は、曲げ破壊モードの場合の水平荷重と歪速度の関係を示したものである。

これより摩擦係数が大きくなるに従い、歪速度が大きくなると水平荷重も大きくなっている。以上より曲げ破壊モードにおける水平荷重は歪速度、傾斜角、氷板と傾斜構造物との摩擦係数の各パラメーターの関数であることが明かとなった。

6 結論

本実験のパラメーターの範囲は限られたものであるが、曲げ破壊モードは、一定の傾斜角に対して摩擦係数が小さいほど、歪速度が小さいほど生じ易く、圧縮破壊モードと座屈破壊モードは歪速度によって分類できることが明かとなるなど、本実験のパラメーターの範囲で破壊モードマップを得た。

曲げ破壊荷重は、これまでの提案式より大きくなり、圧縮破壊荷重、座屈破壊荷重についてはほぼ同様の値を得た。

参考文献

- 1 川崎哲郎他 実氷及び模型氷による押し込み試験 寒地技術シンポジウム'86講演論文集、1986 11
- 2 坂本典正 構造物に作用する氷板の破壊パターンの実験的研究 岩手大学大学院 修士課程論文、1988 3
- 3 田口芳明他 氷板の破壊モードと氷荷重に関する一考察 寒地技術シンポジウム'87講演論文集、1987 11
- 4 成田秀明 砕氷抵抗に及ぼす氷上積雪の影響 オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム講演論文集、1989 2
- 5 Carstens T., A State-of-the Art Report, Working Group on Ice Forces on Structures, CRREL Special Report 80-26
- 6 Hirayama, K. and N.Sakamoto Some Investigations For EG/AD Model Ice, Proc. of POAC, 1988 8
- 7 Hirayama, K. et al. Ice Forces on Vertical Piles: Indentation and Penetration, IAHR 3rd Int. Nat. Symp. on Ice Problems, 1975 8
- 8 Hirayama, K., Properties of Urea-doped Ice in the CRREL Test Basin, CRREL Report 83-8, 1983 3
- 9 Saeki, H. et al. Experimental Study of Ice Forces on Pile, Proc. of POAC, 1977

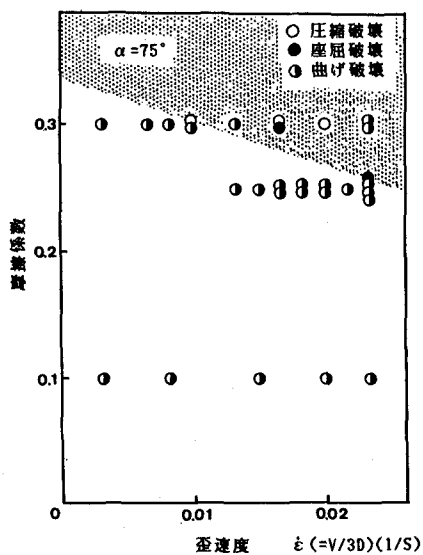


図1 破壊モードマップ ($\alpha = 75^\circ$)

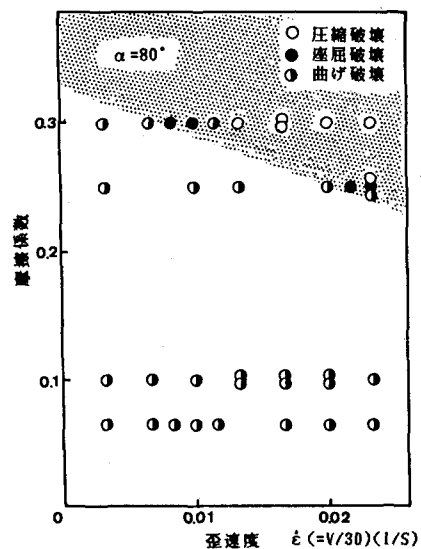


図2 破壊モードマップ ($\alpha = 80^\circ$)

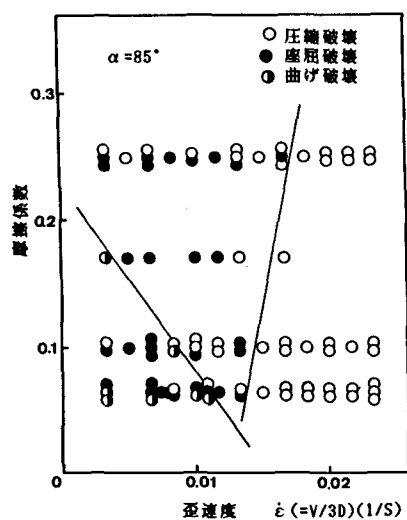


図3 破壊モードマップ ($\alpha = 85^\circ$)

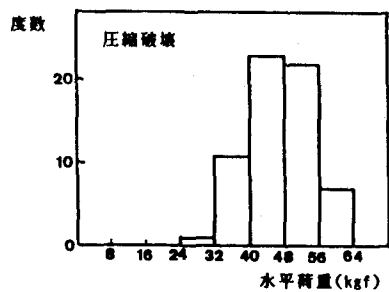


図4a) 破壊水平荷重の頻度分布 (圧縮破壊)

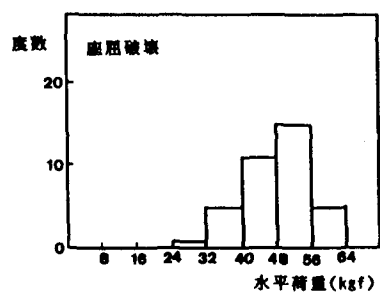


図4b) 破壊水平荷重の頻度分布 (座屈破壊)

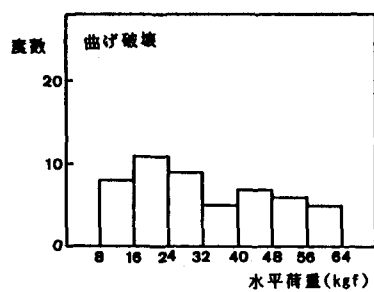


図4c) 破壊水平荷重の頻度分布 (曲げ破壊)

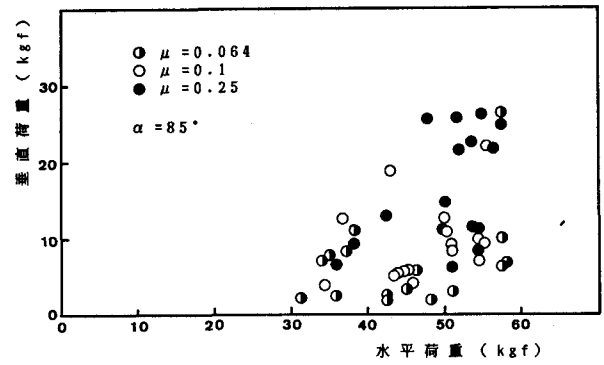
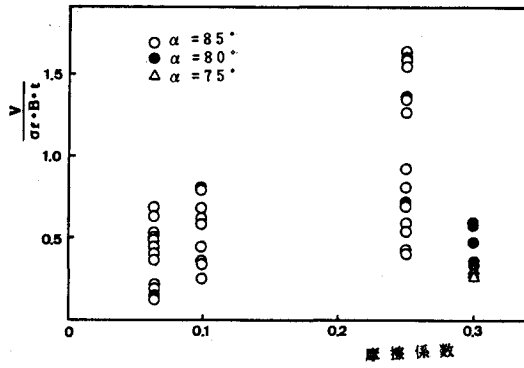


図5 圧縮氷荷重（鉛直成分）と摩擦係数の関係

図6 圧縮氷荷重鉛直成分と水平成分の関係

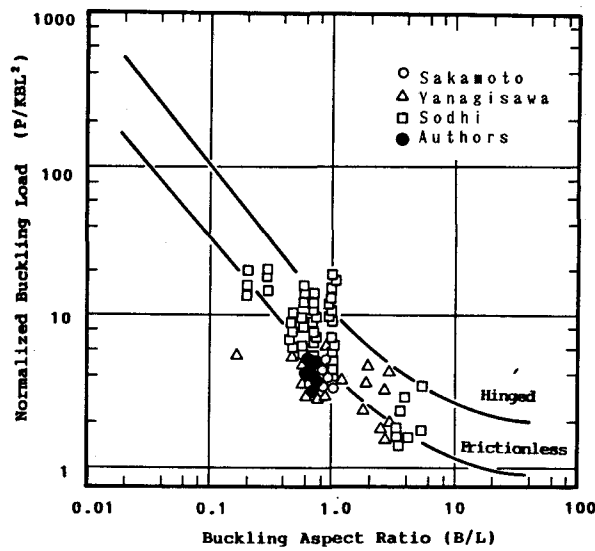


図7 無次元座屈荷重とアスペクト比の関係

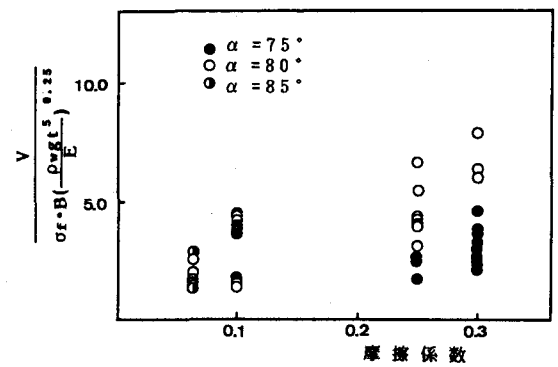


図8 曲げ破壊無次元氷荷重（鉛直成分）と摩擦係数の関係

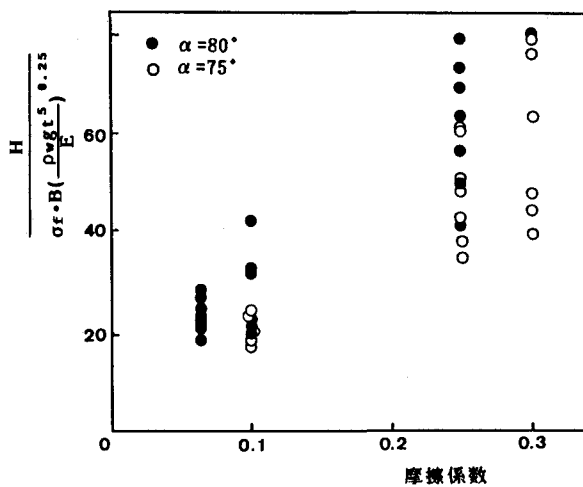


図9 曲げ破壊無次元氷荷重（水平成分）と摩擦係数の関係

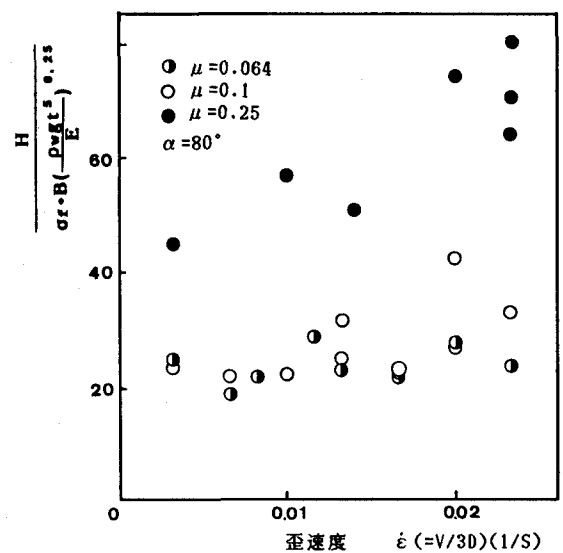


図10 曲げ破壊無次元氷荷重（水平成分）と歪速度の関係