縦置き氷板による鉛直壁構造物の破壊モード観察

INDENTATION TEST WITH VERTICALLY PLACED ICE SHEET

亀崎一彦¹・山内 豊²

Kazuhiko KAMESAKI and Yutaka YAMAUCHI

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

It is postulated that the failure mode of flaking with crushing is dominant for small scale laboratory indentation tests. However rubble piles accumulated in front of an indenter preclude either direct observation or video analysis that might allow an estimation of flaking length. The authors attempted to conduct indentation tests using a vertically placed ice sheet set up in the testing machine so as to measure the flaking length by video analysis. The test results and analysis are presented. It is shown that the flaking length tends to increase with increasing compliance of indentors and to decrease with increasing indentation rate

Key Words: Offshore structure, ice, flaking, indentation, local load, vibration, simultaneous failure

1. まえがき

著者らは鉛直壁構造物に氷板が押し寄せてくる時に構造物に作用する全体氷荷重、局部荷重、氷との相互作用時に発生する振動を予測することができる数値シミュレーションプログラムの開発を行っている。このためには実際に構造物が氷板中に貫入するときの破壊モードを観察し、数値計算では煩雑な圧壊過程を単純化しモデル化することが必要である。種々の貫入試験が過去に実施され、インデントが氷板に貫入するときの破壊モデルが提案されている。Saeki & Ozaki¹⁾, Timco²⁾, Sodhi³⁾は貫入時の破壊モードとして楔状に氷片が割れるフレーキングを伴う圧壊モードを提案している。一方、Joensun & Riska⁴⁾は楔状の氷のブロックを用いた圧縮試験を実施しフレーキング破壊の一種ではあるが、フレーキングにより楔状に剥離する氷片が左右交互に発生するモデルを提案している。著者⁵⁾も数値計算シミュレーションプログラムの検証データを得るために一連の氷海水槽試験を実施した。氷海水槽試験ではインデターが貫入した時、氷板の上側と下側にほぼ同じ量だけ圧壊された氷片が排出されているように見える。しかしながら写真-1に示すように上側に排出された氷片はインデターの前方にラブルとして堆積するために氷板とインデターの接触部で起きている破壊プロセスを直接目視観察することは困難である。従って、氷海水槽試験を補足するために直接観察できる試験を別途行った。この補足試験では氷板を水槽から出し鉛直にセットした状態でインデターを

押し付けた。この方式ではフレーク状に割れた氷片は重力により落下し極めて観察が容易である。試験ではコンプライアンスのフレーキング長さに与える影響を見るためにインデターのコンプライアンスを三段階に変えた。観察された破壊モードとフレーキング長さの特徴について報告する。

2. 試験装置

安定した貫入速度を得るためにパルスモーターで駆動される既存の万能試験機を用いた。この試験機は本来、氷の圧縮試験用であるためにクロスヘッドの最高速度は1000mm/min.である。図-1に試験装置の配置図を示す。試験用の氷板は試験機のフレーム

写真-1 インデター前に堆積したラブル

図-1 試験装置

図-2 バネ付きインデンター

と直行するように縦に配置した。氷板の大きさは幅 800mm、高さ 600mm である。インデンターはバネ、ロードセル、ウェイトから構成されるブロックを介して試験機のクロスヘッドに取り付けた。横力から試験機を保護するために試験機は 2 本のガイドを取り付けた。バネを付けたインデンターの配置を図-2 に示す。作動トランスと加速度計を取り付けインデンターの相対変位と加速度を測定した。2 台の小型 CCD カメラをクロスヘッドに取り付け、裏と表の両面から破壊モードを撮影した。

氷としては尿素を添加した粒状氷と柱状の淡水氷を使用した。氷板は氷海水槽で製氷した後、低温試験室に搬入した。試験時の温度は一定に保ち -2°C とした。氷板はバンドソーで整形し、ゴム付きの枠にボルトで圧縮し、試験装置にセットした。インデンターの幅は 50 と 100mm である。バネを 2 種類と丸棒によりコンプライアンスを 3 段階に変化させた。ここでは、コンプライアンスの大きな順に LS、MS、HS と呼ぶ。固有振動数は LS、MS で各々 5、7Hz である。HS モデルは丸棒で試験機に剛結されてお

り、ここでは LS、MS に比べ十分固有振動数は高く、「剛」と標記した。供試氷板の氷厚は、尿素粒状氷では 49mm と 62mm を使用した。また淡水柱状氷は 37mm と 42mm を使用した。貫入速度は 5、10、16.7 mm/sec の 3 段階とした。表-1 に試験条件を示す。合計 21 ケースの貫入試験を実施した。

表-1 試験条件

Ice	Test No.	Breadth of Indenter Di (mm)	Model ID & Natural freq.	Ice thick. h (mm)	Comp. Strength σ_c (kPa)	Indentation velocity Vi (mm/sec)
Granular Urea Ice	U1,U2,U3	50	LS	49	219	5,10,16.7
	U4,U5,U6	100	(5Hz)			5,10,16.7
	U8,U9	50	HS			10,16.7
	U10,U11	100	(sufficient high freq.)	62	235	5,16.7
	U12,U13,U14	50	MS			5,10,16.7
	U15,U16	100	(7Hz)			5,16.7
Columnar F.W. Ice	P1		HS	39	3130	5
	P2	50	(sufficient high freq.)	36		10
	P3			37	2670	16.7
	P4,P5,P6	100		42	2400	5,10,16.7

3. 試験結果

破壊モードをビデオ画像から解析した。高速度ビデオが利用できなかったが、シャッター速度 $1/1000\text{sec}$ で撮影した。再生時には $1/5$ 倍速で再生したものを通常速度で再録し解析に供した。尿素粒状氷の試験では安定したフレーキングを伴う圧壊モードが観測された。ビデオ解析の結果、フレーキングは表と裏の両面ではほぼ同時に発生している。図-3 に観察された側面から見たフレーキングのスケッチを示す。50mm インデンターでは図-3(a)に示すようにインデンターの幅全面に広がる半楕円形のフレーキングが主として観察された。フレーキングの長さは貫入速度及び剛性が増加すると図-3(b)に示すように減少する傾向を示した。100mm インデンターでは図-3(c)に示すように側面から見た形状はほぼ矩形となる。しかしながら、HS モデルでは図-3(d)、(e)に示すように不完全な矩形となった。淡水柱状氷は尿素粒状氷に比べ格段に脆く、貫入すると直ちにインデンター前方 $30\sim 45^{\circ}$ の方向に大きなクラックが発生し氷板は幾つかの氷片に分割される。しかしながら、氷板は十分な残存強度を有しおり、氷圧力は大きなクラックが発生しても急激に減少することはなかった。尿素粒状氷に比べるとより小さなフレークが観察された。インデンターが接触した部分が白化していた。インデンター停止時の位置から採取した氷板たん部の断面写真を写真-2 に示す。4～

図-3 代表的なフレーキングのパターン

5層程度の層状クラック(Cleavage Crack)が発生している様子が窺える。尿素氷についても結晶写真の撮影を試みたが、氷板たん部が脆くなり過ぎてガラス上に固定することができなかった。しかしながら写真-3に示すような明瞭なフレーキング破壊による断面が観察された。

図-4に代表的な時系列データ(相対変位、速度、加速度、荷重)としてMSインデーター、Test-U12の結果を示す。荷重は明瞭な鋸刃上の波形を呈している。大きな破壊が発生した後、次に氷板に接触するまでの間、インデーターは自由振動を起こしている。このような自由振動の時間は氷海水槽試験と比べると著しく長い。氷海水槽では氷板が大きいためにインデーターの進行方向のコンプライアンスも大きく、破壊後、弾性変形した氷板が戻り直ちにインデーターと接触することになる。しかしながら、本試験では氷板は小さい上に枠に固定されているために氷板のコンプライアンスは氷海水槽と比べると極めて小さい。図-5に幅50mm、貫入速度10mm/sec.のLS、MS及びHSの試験結果を比較した。

写真-2 氷板端部の断面写真

写真-3 フレーキングによる破壊断面(尿素氷)

LS及びMSモデルでは、荷重はほぼ単調に増加しているが、HSモデルでは複雑に変化しており、明確に異なった傾向を示す。インデーター幅について比較したものを図-6に示す。100mm幅のインデーターは50mmに比べると二次的なピークを多く含んでいる。これは図-3(d)に示したように100mmインデーターでは幅方向全面に亘りフレーキングが発達していないために、非同時破壊が発生していると解釈できる。

図-7はLS、MSモデルで観察された貫入中のプロセスと時系列データの関係を示す。ステップ(a)で大きなフレーキングが発生するとスプリングバックにより後退する。インデーターは氷板から離れ荷重は一旦零まで落ち、次にフレーキングよりテーパ状になった氷板たん部に接触するまで自由振動を起こす。再び、ローディングが始まり次の荷重ピーク(b)に達し二次的な破壊が発生した後、スプリングバックによりインデーターは戻り自由振動を繰り返す。同様なイベントは(c)でも起きる。最終的には、

図-4 貫入試験の代表的な時系列データ ($V=5\text{mm/s}$, $h=62\text{mm}$, MS 50mm 幅インデント)

図-5 インデント剛性による荷重時系列の比較 (Test U2, U13, U8, $V=10\text{mm/s}$, 50mm 幅インデント)

図-6 インデント幅による荷重時系列の比較 (Test U1, U4, $V=5\text{mm/s}$, $h=49\text{mm}$, LS)

図-7 氷板の破壊プロセスと過重時系列の関係

インデントはテーパ状になった氷板たん部を進み終え、(a)のステップに戻りこのサイクルを繰り返している。多くのケースでは(a)のピーク値が (b)、(c)より大きい、幾つかのケースでは(a)と (b)、(c)間の差は小さい。LS のケースでは大きなフレーキングが (b)、(c)のステップで発生し、テーパ状になった部分を超える場合もあり、圧壊プロセスは複雑になる場合もある。

4. 考察

フレーキング長さと同時破壊のメカニズムはコンプライアンスが大きな構造物、即ち、剛性の低い構造物では密接に関連しているものと考えられる。著者ら⁹⁾は氷海水槽の試験から構造物の氷板に対する貫入速度が遅く、コンプライアンスが大きい場合は同時破壊が発生することを示した。ここではフレーキングの大きさと、コンプライアンス、貫入速度の関係を次の二通りの方法により調べた。一つはビデオ画像から直接フレーキング長さを解析する方法である。Lf は図-3 に示すようにフレーク片が氷板か

ら落下した時のインデントからフレック先端までの距離と定義した。図-8 に 50mm 幅のインデントについての解析結果を示す。Lf はコンプライアンスが大きくなると増大し、貫入速度が速くなると小さくなる傾向を示す。コンプライアンスが大きくなると載荷時の応力速度はバネの効果により更に減少し、広い領域に亘りダメージが発達するものと考えられる。

もう一つは荷重と相対変位から調べる方法である。図-9 に荷重 F_x とインデントの絶対変位 dg の関係を示す。載荷時には、 dg は小さくなる。フレッキングが発生するとスプリングバックが起こり dg は一気に大きくなるために、図に示すように階段上の変位となる。載荷時から次の載荷時までをここでは L_c と定義し、 dg の時系列データから L_c 値を解析した。図に示すように載荷時に一旦、除荷を伴うイベントは解析から除外した。図-10 に L_c の解析

図-8 ブレーキング長さ(50mm 幅インデント)

図-9 インデントの絶対変位と荷重の関係

図-10 クラッシング長さ(50mm 幅インデント)

図-11 Layer Model

結果を示す。Lf と L_c は共に 1 サイクルの破壊するイベントであり、同じ大きさとなるはずであるが、 L_c の値は Lf の約 50% の値となった。これは図-7 に示すように実際には 1 サイクルには 2～3 個の二次的なフレッキングのイベントを含む。 L_c の解析ではこのような二次的なフレッキングを含む解析になり、値が減少したものと考えられる。しかしながら、図-8 の傾向ほど明瞭ではないが、解析結果は貫入速度とコンプライアンスに関して同様な傾向を示している。

5. 結言

本試験では氷板の大きさに制限があり、計測された氷荷重は周囲の拘束条件の影響を受けていると考えられる。しかしながら本試験で考案した方法は破壊プロセスを観察するには有効な方法であり、有意義な知見が得られた。既存の試験機を使用した為に、

載荷速度に制限があり十分な速度範囲をカバーできなかったが、今後より規模が大きく載荷速度範囲が広い試験が期待される。著者らは、本試験結果から図-11に示すようなlayer modelを氷と構造物の局所的な破壊モデルとして数値シミュレーションプログラムに適用している⁸⁾。載荷速度に応じて、フレーキングサイズを変更している。本試験結果からまとめとして以下の知見が得られた。

- (a) フレーキングは氷板の両面でほぼ同時に発生している。
- (b) 氷板厚さ以上の100mm幅のインデントでは部分的にフレーキングが発生する。他の実験結果から、独立破壊領域がほぼ氷厚程度とした推定した事⁷⁾と良く一致する。
- (c) フレーキング長さはインデントのコンプライアンスが大きくなる連れて増大し、貫入速度が速くなる程、減少する。画像解析の結果、フレーキング長さは、氷厚の大よそ0.4~1.0倍の間に分布する。
- (d) 淡水氷では、明瞭なクリベージクラックが観察された。またフレーキング長さは尿素添加の粒状氷と比較すると遥かに小さくなる。

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) Saeki, H., Ozaki, A.: Ice Force on Piles, *Proc. of the IUTAM Physics and Mechanics of Ice Symposium*, Copenhagen, Denmark, pp.342-350, 1979.
- 2) Timco, G.W.: Indentation and penetration of edge-loaded fresh water ice sheets in the brittle range. *Proc. 5th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE) Tokyo*, Vol.4, pp.444-452, 1986.
- 3) Sodhi, D.: Ice-structure interaction with segmented indentors, *Proc. 11th LAHR Ice Symp.*, Banff, Alberta, Vol.2, pp. 909 - 929, 1992.
- 4) Joensuu, A., Riska, K.: Ice and Structure Interaction, *Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, Report, M-88*, Espoo, Finland, 57p, 1989.
- 5) Kamesaki, K. and Yamauchi, Y.: FY 95 annual report for Ice load research project, Japan Ocean Industries Association, 1995.
- 6) Kamesaki, K., Yamauchi, Y., Kärnä, T. : Ice force as a Function of Structural Compliance, *Proc. 13th LAHR Ice Symp.*, Beijing, Vol 1, pp. 395 - 402, 1996.
- 7) Kamesaki, K., Yamauchi, Y., Horikawa, T., Kawasaki, T., Ishikawa, S and Tozawa, S.: Experimental Study on independent failure zone of ice crushing, *The 10th International Symposium on Okhotsk Sea, Sea Ice & Peoples*, pp.146-151, 1995.
- 8) Kärnä, T., Tsukuda H., Kamesaki, K., Yamauchi, Y.: Layered flaking model of ice-structure interaction, *Proceedings of 14th LAHR symposium on ice*, pp.575-582, 1998.

(1999. 4. 19 受付)