現地氷盤先端部の形状が氷力に与える影響に関する考察

On the effect of the roughness of leading edge of natural ice sheet on ice load

竹内貴弘^{*1}、河村宗夫^{*1}、 本田秀樹^{*2}、正木孝治^{*2}、
成田恭一^{*3}、斎藤隆行^{*3}、西槇秀如^{*3}、佐伯 浩^{*2}Takahiro Takeuchi, Muneeo Kawamura, Hideki Honnda, Takaharu Masaki,
Kyoichi Narita, Takayuki Saito, Hideyuki Nishimaki, Hiroshi Saeki

ABSTRACT

The effect of the shape of leading edge of an ice sheet on ice force is investigated through the field ice indentation tests using natural freshwater lake ice. The shape of leading edge of natural sea ice near bluff in the harbour is also measured to know how the roughness of its surface is in the real world. And, the shape of leading edge of natural sea ice after ice indentation test is measured to evaluate the actual contact area of ice with structure, in turn to estimate the nature of subsequent (potential) local failure of ice sheet.

Keywords: ice load, contact area, ice indentation test

1 はじめに

海岸及び海洋構造物に作用する氷力を評価する場合は、氷盤の強度、構造物の形状と大きさ、及び氷厚が必要な入力値となる(Saeki and Ozaki, 1980)。これまでは、安全側の見地から、主に氷盤と構造物が理想的な接触条件において相互作用を開始すると仮定して、氷荷重が評価されてきた(既存氷力式に関する編集、中沢ら、1986)。実海域においては、氷盤と構造物の相互作用は理想的な条件で接触(100%の接触)しているとは限らず、氷厚も必ずしも一定ではなく、および、氷盤の強度の値も分布していると考えられる。また、氷盤の構造物への受圧面積が増大するにともなって氷圧力が減少するというスケール効果の存在が指摘されている(例えば、Sanderson, 1988)。このスケール効果の原因の一つとして、氷盤の非同時的破壊の重要性が指摘されており、この非同時的破壊は、氷盤と構造物の相互作用時におけるそれらの非一様な接触に起因していると考えられている(Kry, 1978)。しかし、実海域において構造物と相互作用を開始する氷盤先端部分の形状がどのような状態になっているか計測した報告はこれまでは見当たらない。

以上から、著者らは、実海域の氷象条件を考慮した氷荷重評価を目的として、実海域における護岸近傍の実氷盤先端部分の形状計測、氷盤先端部分を変化させた氷盤貫入試験(自然淡水湖水)、および貫入試験後(自然海水)の氷盤先端部分の形状測定を実施したので、それらの内容を報告する。

2 氷盤先端部分の形状不規則性に関する氷盤貫入試験

北海道苫小牧の白鳥湖の淡水氷を利用し、氷盤先端部分の形状を変化させて、氷盤貫入試験(図1)を実施した。構造物の供試模型幅は1mとし、氷厚は6.5~8cmであった。氷盤先端部分の形状は、図2に示すように理想の場合(TYPE a)、水平方向(TYPE b)に変化させた場合、及び鉛直方向(TYPE c)に変化させた場合の3種類とし、それぞれの場合における氷力の比較検討を行った。この場合の実験条件を表1に示す。また、氷温は、0~-2(°C)であった。貫入試験時の氷盤への供試模型の貫入量と氷力との関係を示したものが、図3~図6である。図2のa, bがある値より大きくなると、図3、図5に示されている様な卓越した初期ピークが発生せずに、継続氷力のみが作用する(図4、図6)。氷盤と供試模型の接触開始から初期のピークが発生するまでの距離を(Lf)、その時点での供試模型と接触している氷厚を(hf)、供試模型への作用幅を(Wf)、として整理したものが表2である。これらの結果から、構造物へ作用する氷荷重は、氷盤と構造物の実際の(有効な破壊直前の)接触状態に起因しており、氷盤先端部分の形状に影響を受け、さらに氷盤が破壊に至るまでの(Lf)が重要な値となる。

3 現地の自然氷盤先端部分の形状

北海道能取湖の能取漁港二見ヶ岡地区において、護岸近傍の実海氷盤先端部分の形状を計測した。一方は、湾内の護岸近傍から、もう一方は港外側の能取湖側における防波堤近傍から自然海氷を採取し、形状を測定した。図7は、護岸近傍の海氷盤を切り出し、氷厚側面の形状を測定した例である。さらに、沖合い方向の各鉛直断面

^{*1}清水建設(株)技術研究所、^{*2}北海道大学 工学部、^{*3}島田建設(株)

における氷盤先端部分の凹凸の平均値、標準偏差を計算したものを図8～12に示す。氷厚（鉛直）方向の平均値においては、氷盤表面から深さ8cmのところまでは概ね凸形の形状で、それ以深は三角形形状に約14.9～18.8度に図2（type-C）の逆形の形状となっていた。これらの形状の氷盤が水平に移動して護岸と相互作用を開始した場合には、護岸と氷盤の接触状況は沖合いの氷厚全体を考慮する必要はなく、その相互作用時点の氷盤の有効破壊直前までの変形可能量(dL)の値に応じて氷盤破壊時（直前）の接触率に基づいて推定されると考えられる。この非一様な形状は、能取漁港内の氷盤が潮汐の影響を受けて絶えず水面が上下に変動しているためと考えられる。また、同様に水平方向においても、氷盤先端部分には凹凸が存在するために、鉛直方向と同様に(dL)の値に応じて接触率が推定されることとなる。上記の白鳥湖での淡水氷を用いた現地氷盤貫入試験の結果では、水平・鉛直方向に氷盤先端部分を変化させた場合、その先端部分にある値以上の変形量(dL(Lfと関連))が与えられると、氷荷重の初期ピークが発生せずに、継続氷荷重のみが作用することとなり、その時の接触率に応じて氷荷重が構造物に作用することとなる。また、氷盤先端部分に凹凸が存在する場合の氷荷重の時系列から、氷盤の有効破壊が発生する時の氷荷重の値と、その後の変動を伴った継続時の平均的な氷荷重の値の間には大きな差は表れてはいない（図4、図6）。

以上の結果は、氷荷重を評価する場合には、継続氷荷重が作用する範囲における氷盤と構造物の接触状態の把握が重要となることを示している。

4 氷盤貫入試験時の氷盤先端部分の形状計測結果（JOIA中規模野外実験）

平成7年度に実施されたJOIAの中規模野外実験（（社）日本海洋開発産業協会、1996）では、供試模型幅が1.5～3m、氷厚が12～24cmの条件で現地の海水氷を利用して貫入試験を実施している。この時に試験後の破壊された氷盤先端部分の形状を計測した。図13にその凹凸の様子を示す。これから、供試模型がさらに進化した場合には、その氷盤の変形可能量(dL)の値に応じてその次の破壊時の供試模型と氷盤の接触状態の推定が可能となる。変形可能量(dL)をパラメータとして与えて、これに応じて接触率(C)を計算したものが、図14～図16である。ここで、接触率とは、参照する水平方向に氷厚を掛けた面積を100%とし、氷盤が(dL)変形した時に一様に平らになる部分の面積の割合である。ここには、破壊面全体、氷厚のレベル方向、および鉛直（氷厚）方向の各断面でそれぞれ計算した値が示されている。また、貫入時の氷盤破壊は、上下面の楔破壊と氷厚中心部分の水平面内のcleavage crackを伴ったcrushing破壊に対応し、継続氷荷重時の氷盤先端部分の破壊面はバラバラに近似した形状となるために、氷厚のレベル方向の特に氷厚上下面の各断面においては、(dL)の値が小さい時には接触率(C)がゼロの場合がある。

次に、供試模型の前面には幅10cmのパネルが取り付けられ、それらの背後には局部氷荷重計測用のロードセルがセットされている。測定された局部氷荷重の時系列（例図17）から図のように(dL)の値を算定し（図18～図20）、この時の接触率を図14～図16とから推定した場合、破壊面全体に関する接触率は非常に小さく、最大でも10%程度となっている。

以上により、実際の貫入試験時には、氷盤と構造物供試模型の接触は非常に小さく、氷盤の破壊に起因した氷荷重の構造物への伝達は、この接触率と局部破壊の強度を考慮して算定する必要がある。

5 まとめ

氷盤先端部分の形状を変化させた状態で構造物供試模型と相互作用をする場合には、理想的な場合に比較して氷力が低減する。これは、氷盤が理想的に接触した場合には、卓越した初期ピーク（氷力）が発生するが、氷盤の先端部分の凹凸がある値以上の不規則性を持つ場合、初期ピークが発生せずに氷盤と構造物の不規則接触に起因して継続氷力のみが発生することに因る。また、実海域の護岸近傍の氷盤先端部分の形状を測定した結果、港内外両方において氷盤先端部分の形状は、鉛直方向において三角形形状を示していた。以上の両結果から、実海域の氷盤と構造物の相互作用においては、それらの接触は理想的にはならず、さらに氷荷重に関しては初期ピークが発生せずに継続氷力が卓越するという結果が得られた。また、貫入試験時の氷盤先端部分の形状測定では、有効な破壊が発生する直前までの氷盤変形量(dL)を考慮した場合、氷盤と構造物の接触は上記試験条件下において約10%程度と算定された。

今後は、実際の接触率と局部破壊の強度を考慮した氷荷重算定法を検討する予定である。

<参考文献>

- (1) Saeki, H. and Ozaki, A. : Ice Force on Piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Berlag, pp.342-350, 1980
- (2) 中沢直樹、竹内貴弘、小野敏行、佐伯浩：海洋構造物に作用する氷力式の評価、海洋開発論文集Vol.8、pp.115-120、1986

(3) Sanderson, T.J.O. : ICE MECHANICS - risks to offshore structures, Graham & Trotman, pp.1-253, 1988

(4) Kry, PR. (1978) : A Statistical Prediction of effective Ice Crushing Stresses on Wide Structure, Proc. IAHR, Part 1, pp.33-47, 1978

(5) (社) 日本海洋開発産業協会 : 極限海域における海洋構造物の基礎調査研究、海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究 成果報告書-平成6年度-、平成7年3月

(平面図)

(側面図)

図1 氷盤貫入試験装置

図2 氷盤先端部分の形状(TYPEa, TYPEb, TYPEc)

表1 試験条件

TEST CASE	W (cm)	h (cm)	V (cm/sec)	氷盤形状角度 (度)
1	100	7.0	1.03	$\alpha=\beta=0$
2	100	6.5	1.08	$\alpha=5.09$
3	100	6.5	1.08	$\alpha=9.82$
4	100	6.5	1.11	$\alpha=29.68$
5	100	8.8	1.16	$\beta=6.27$
6	100	8.8	1.16	$\beta=13.42$
7	100	8.8	1.16	$\alpha=\beta=0$

表2 試験結果

TEST CASE	W (cm)	h (cm)	Wf (cm)	hf (cm)	初期ピーク氷力 (卓越) (KN)	継続氷力 (最大値) (KN)	圧縮強度 (MPa)	Lf (cm)
1	100	7.0	100	7.0	222.9	170.0	4.88	4.69
2	100	6.5	52.7	6.5	N.A.	190.9	4.88	5.97
3	100	6.5	27.1	6.5	N.A.	136.9	4.88	5.59
4	100	6.5	8.2	6.5	N.A.	131.0	4.88	4.67
5	100	8.8	100	8.8	273.8	239.6	4.74	1.91
6	100	8.8	100	6.7	N.A.	237.6	4.74	1.46
7	100	8.8	100	8.8	272.1	194.9	4.74	1.60

図3 氷盤貫入試験時の貫入量と氷力の時系列(CASE7)

図5 氷盤貫入試験時の貫入量と氷力の時系列(CASE5)

図4 氷盤貫入試験時の貫入量と氷力の時系列(CASE4)

図6 氷盤貫入試験時の貫入量と氷力の時系列(CASE6)

図7 実海域の護岸近傍での氷盤先端部分の形状計測結果
(3次元) (能取漁港二見ヶ丘地区)

図8 実海域の護岸近傍での氷盤先端部分の形状計測結果
(3次元) (能取漁港二見ヶ丘地区)

図9 実海域の護岸近傍での氷盤先端部分の形状計測結果
(3次元) (能取漁港二見ヶ丘地区)

図10 実海域の護岸近傍での氷盤先端部分の形状計測結果
(3次元) (能取漁港二見ヶ丘地区)

図11 実海域の護岸近傍での氷盤先端部分の形状計測結果
(3次元) (能取漁港二見ヶ丘地区)

図12 実海域の護岸近傍での氷盤先端部分の形状計測結果
(3次元) (能取漁港二見ヶ丘地区)

図13 貫入試験時の氷盤先端部分の形状計測結果 (3次元)

図 14(a) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係－(a)全体

図 14(b) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係－(b)氷厚のレベル方向

図 14(c) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係－(c)鉛直方向

図 15(a) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係－(a)全体

図 15(b) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係－(b)氷厚のレベル方向

図 15(c) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係－(c)鉛直方向

図 16(a) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係－(a)全体

図 16(b) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係－(b)氷厚のレベル方向

図 16(c) 貫入試験時の形状から計算された(dL)と接触率(C)の関係—(c)鉛直方向

図 20 各貫入試験結果に基づく(dL)の算定結果

図 17 貫入試験時の局部氷荷重の時系列と(dL)の算定

図 18 各貫入試験結果に基づく(dL)の算定結果

図 19 各貫入試験結果に基づく(dL)の算定結果