

円断面杭に氷盤が衝突したときの氷盤の変形挙動

Deformation of Ice Sheets at the Time of Collision with Pile Structures

花田真州*、山口建章**、川合邦広***、早川哲也****、佐伯 浩**

M. Hanada, T. Yamaguchi, K. Kawai, T. Hayakawa and H. Saeki

Judging from the mechanical properties of ice sheet, ice sheet is an elastic-plastic substance, and in high strain region, it is seemed as elastic material. Generally ice load acting on structures and mechanisms of its fracture mode depend on the strain and stress rate. In the case of large moving ice sheet colliding with structure, the decision of deformation area of ice sheet was very difficult. In this paper, therefore the authors clarified the deformation area of ice sheet which collides with pile structures at high speed.

Keywords : strain, strain rate, deformation, indentation

1. はじめに

氷は弾塑性体の性質を持ち、氷力や破壊の仕方は例えば歪速度などの条件によって著しく異なる。氷に力を加えたときにどの程度の範囲までが弾塑性体の挙動をするのか、言い換えれば、どの範囲まで歪が生じるのかという問題は、過去多くの研究者によって考えられてきた。杭状構造物に氷盤が貫入する場合の範囲を Ralston¹⁾は杭径の2倍、Michel et al²⁾は杭径の4倍程度と主張している。

この弾塑性体の範囲を以下の理由により明らかにする必要がある。

- ・氷力は歪速度によって変化するが、歪の定義をする際に、変形領域(長さ)の基準長として必要である。
- ・氷盤の変形および破壊等を個別要素法等で解析する際、変形領域縁部の境界条件を経済的に設定する必要がある。
- ・貫入試験時に、氷盤の変形や氷荷重をより正確に求めるためには、氷盤の変形領域より広い氷盤での実験が必要で、実験規模の設定にも重要である。

そこで今回、高速で杭に衝突する氷の変形領域を探る実験を行った。

2. 観察方法

氷盤が杭に貫入するときの氷盤の歪みを観察するための実験は、1996年2月に紋別港で衝撃氷力を求める実験と同時にに行った。杭に作用する衝撃氷力については、昨年発表済みである³⁾。したがって、今回変形領域解析をする実験ケースはすべて、氷盤が杭に高速で貫入しており、歪速度は $10^0 \sim 10^1(1/sec)$ のオーダーである。

実験は矩形氷盤を所定の高さから落下させ、装置下部に設置した円断面杭に衝突させた。氷盤と杭の位置関係を図1に示す。杭径は10cmである。杭への衝突速度は6.5~8.7m/sであった。氷盤は幅150cmの水槽に5‰の海水を入れ凍結させたものを用い、厚さ(h)は約20~25cm、そして切断する長さを変えることにより氷盤の重量を変化させた。ここで、氷盤の長さは2~3m、重量(W)は528~984kgf、運動量(M)は361~843kg・m/secの範囲であった。海水の一軸圧縮強度(σ_c)は円筒形供試体(直径10cm、高さ20cm)を歪速度が約 $10^{-3}sec^{-1}$ で破壊することにより求めた。供試体数は18個で平均の一軸圧縮強度は21.1kgf/cm²であった。また、強度試験時の氷温は-2℃で、これは衝撃試験時の平均気温と同じである。

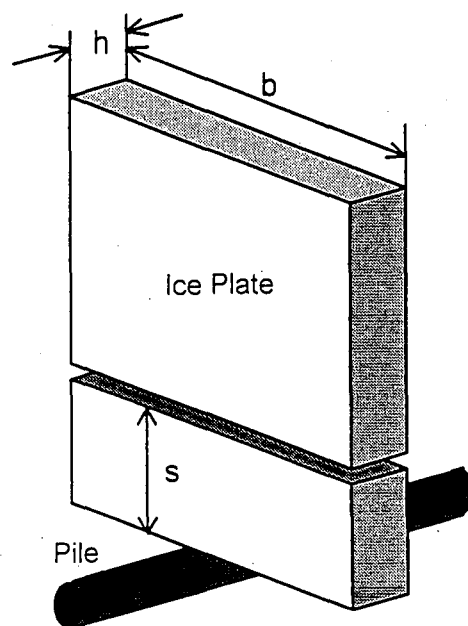


図1 氷盤と杭の関係

- * 正会員 鹿島建設(株)札幌支店土木部
- ** 正会員 北海道大学大学院工学研究科 (060 札幌市北区北13条西8丁目)
- *** 正会員 (株)西村組紋別支店
- **** 正会員 北海道開発局開発土木研究所

衝突時の氷の変形領域は大きく分けて2つの方法により調べた。

1つは氷盤を落下させる前にあらかじめ、氷盤表面に 10cm 間隔で格子状に印を付けておき、杭に衝突する直前から、衝突後氷盤にクラックが入る直前までの印の移動量を、正面から撮影した高速度ビデオ(毎秒 500 コマ)を再生した画面上で計測した(写真1、2)。この場合、ビデオに映っていた氷盤全表面の印の移動量を実際に計測し、杭を中心とした 10cm ごとの同心円に入る印の移動量を平均することにより、その距離における印の移動量とした。この、杭からの距離によって印の移動量を整理し、そこから変形量を求めて解析した。

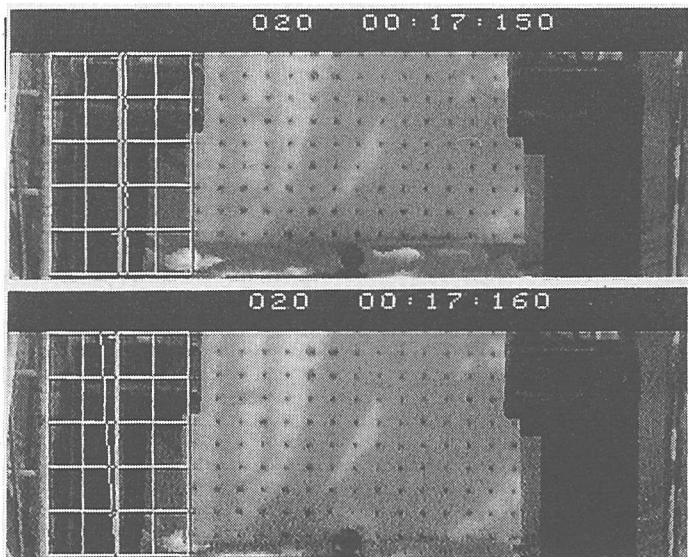


写真1、2 高速度ビデオカメラ映像

もう一つは、落下させる氷盤にあらかじめ水平に切断面を入れておくこととし、切断位置(s)を氷盤の下端(杭と衝突する面)から 15, 25, 35, 45, 65, 85cm と変化させたとき(図1参照)の直径 10cm の円断面杭にかかる荷重の違いを見る方法と、その時刻歴の違いを見る方法。この2つから衝突時に氷が変形する影響範囲を判断した。

3. 観察結果

3-1 ビデオ解析結果

ビデオ解析したのは4ケースである。氷盤の長さは、歪みの影響が及ばないと考えられる十分な距離を考えて、どのケースも 1.5m 以上である。衝突直前から、衝突後氷盤にクラックが入る直前程度まで 1/100 秒間の移動量を測定した。また各ケースとも、杭を中心に 50~100 点程度の移動量を測定した。なお、杭径は 10cm である。

氷盤上の各点の移動量をテレビの画面上で計測し、それを実距離に換算拡大した移動量を図2に示す。杭からその点までの距離(X)と杭径(D)の比(X/D)で整理した。その結果、ばらつきは大きいものの、杭に近いと衝撃による応

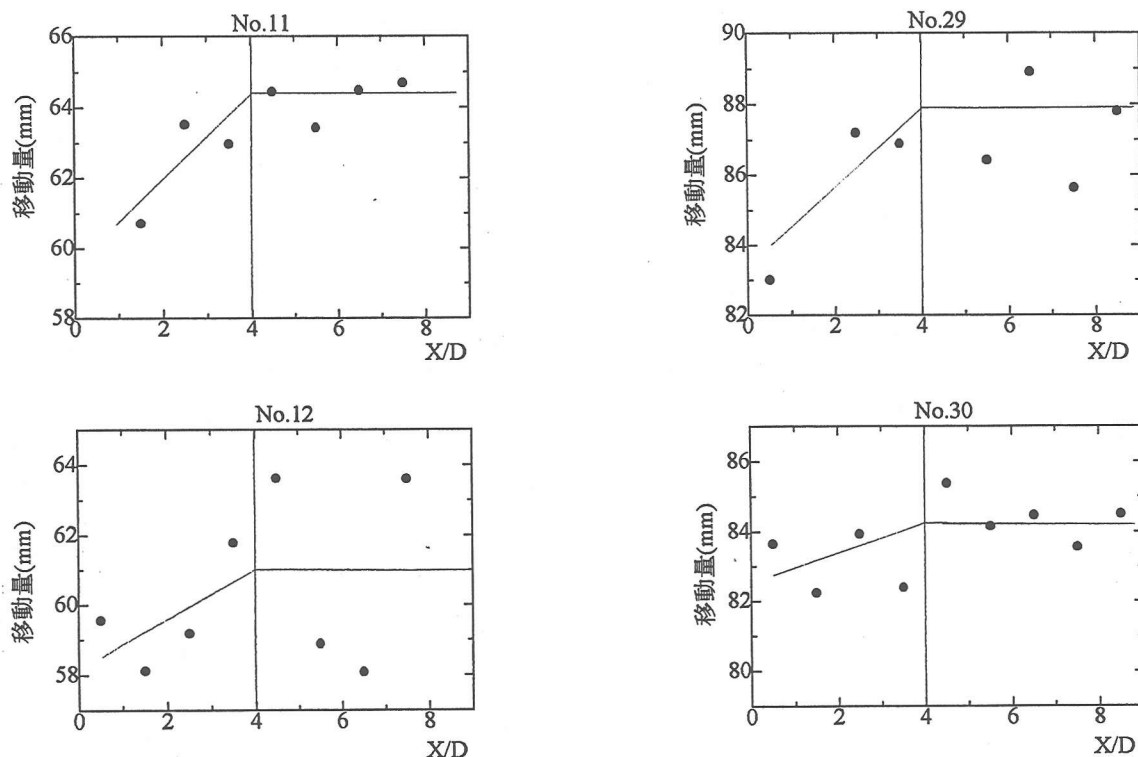


図2 氷盤各点の移動量(1/100秒間)

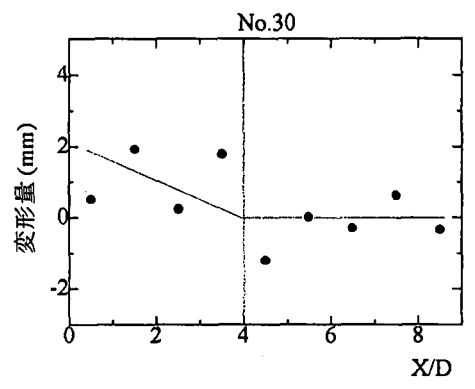
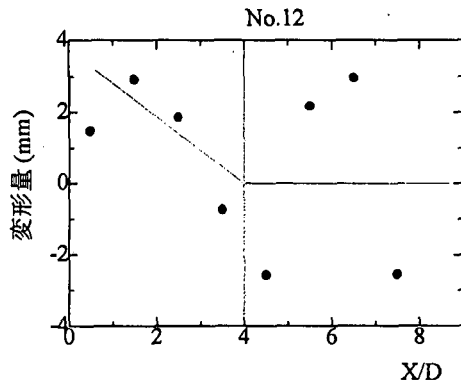
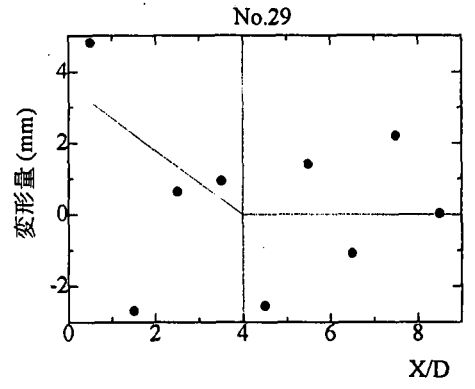
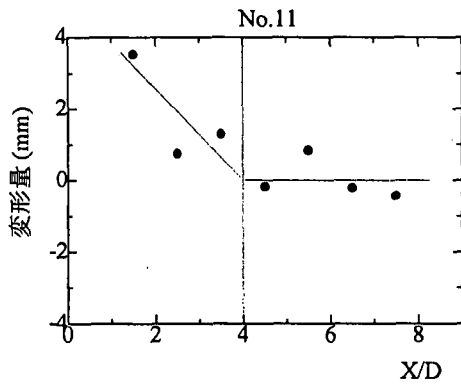


図3 氷盤各点の変形量

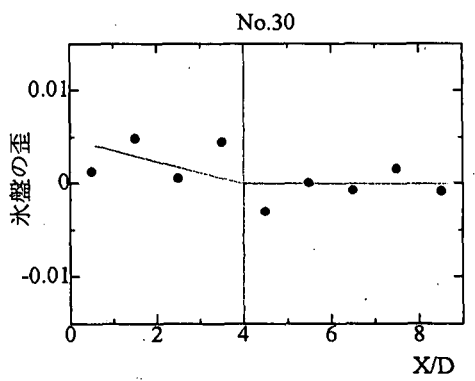
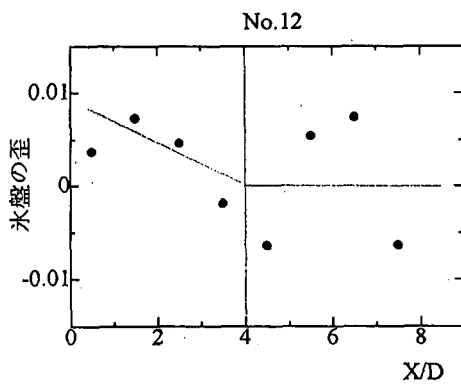
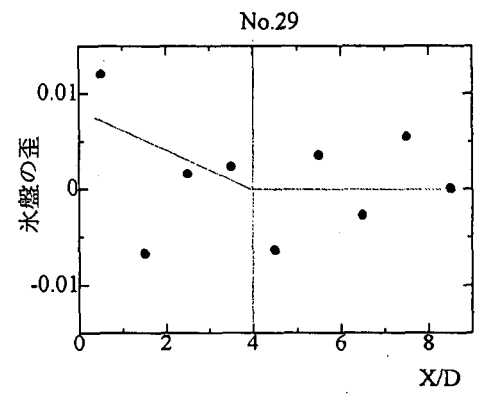
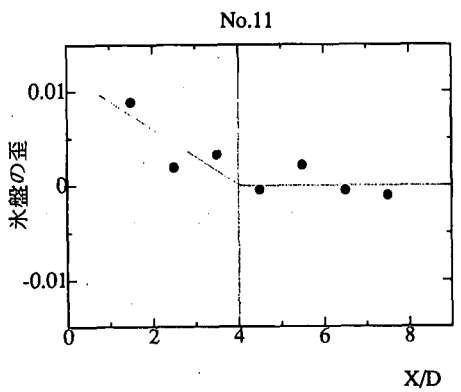


図4 氷盤各点の歪み

力が伝わって氷盤が歪むが、杭から離れるにしたがい徐々に応力が伝わなくなり歪みが小さくなって、各点の移動量は氷盤全体の移動量と等しくなる傾向がみられた。この境界ははっきりとは断定できないが、 X/D が 4 のあたりとみることができる。すなわち、弾性体の範囲は $4D$ 程度と考えられる。

そこで、 $X/D > 5$ の移動量の平均値をその氷盤全体の移動量と見なして、杭周辺各点の移動量との差、すなわち変形量を算出した。これを図 3 に示す。杭から離れるにつれて変形量が小さくなっている。

またこの変形量を、弾性体の範囲と見なした杭径の 4 倍で除して、氷盤の歪みを求めた。これを図 4 に示す。

次に、氷盤下端から $s=25\text{cm}$ 離れた位置に切断面を入れた氷（図 1 参照）を杭に衝突させたときの移動量を同様の方法で求めた。結果を図 5 に示す。杭の位置から各点までの距離(X)と杭径(D)の比(X/D)で、かつ、切断面より上側の氷盤と下側の氷盤とにわけて移動量を整理した。杭に直接衝突している下側の氷盤の移動量は、杭に近いほど衝撃を吸収して歪んでいるため小さいが、杭から離れるにつれて大きくなっている。直線的に移動量が増加しているが、これは、氷盤の大きさが小さいため、杭を支点に曲げ破壊が生じ、氷盤の両脇が落ちつつあることを示している。切断面より上側の移動量は、杭から離れるにつれてわずかに微増しているのみであり、上側と下側の氷盤の各点の移動量は明らかに異なる。これは、氷盤に切断面を入れたことによって応力が伝わっていないことを示している。

3-2 氷力解析結果

氷盤にあらかじめ水平に切断面を入れておき、その状態で落下させたときの荷重と荷重の時刻歴を調べる実験の結果を述べる。実験は 7 ケース行い、杭径は 10cm 、衝突速度は約 6.7m/s 、運動量はほぼ 375 kg m/s である。図 6 は、氷盤の下端（杭と衝突する面）から切断面までの距離(s)を変えたときの衝撃荷重の時刻歴であり、縦軸が荷重、横軸が時間である。図を見ると、切断面までの距離(s)が短い場合には荷重の peak は 2 つあり 2 個の氷盤が時間差で衝突しているが、距離(s)が長くなるとともに第 2 波が第 1 波に吸収されていき、実質 2 つの氷盤は 1 つのものとみなすことが出来る。 $s/D > 4.5$ では、切断面のない氷盤の荷重時刻歴と比較してもなんら変わりなく、この境界は $s/D=4$ 程度であるといえる。

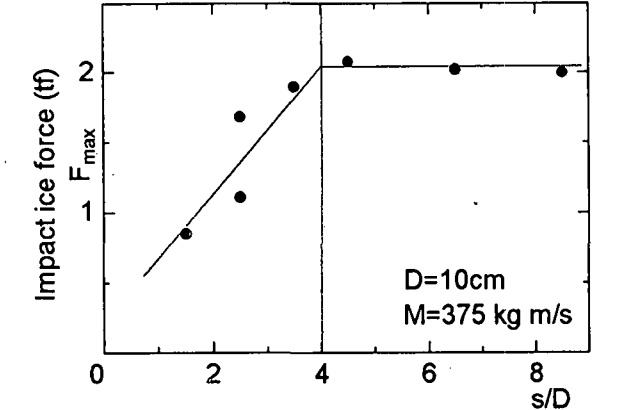


図 7 氷の切断位置を変えたときの衝撃氷力

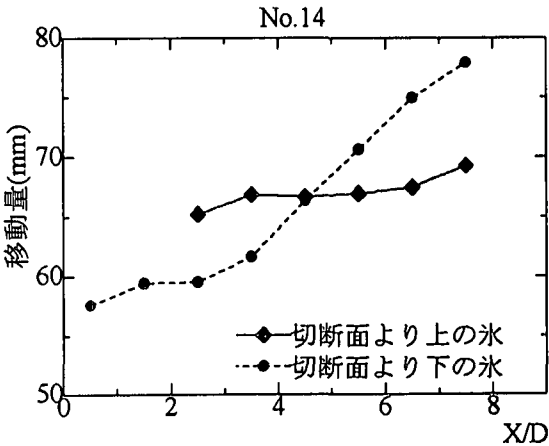


図 5 氷盤に切断面を入れたときの各点の移動量

$D=10\text{cm}$, $V=6.7\text{m/s}$

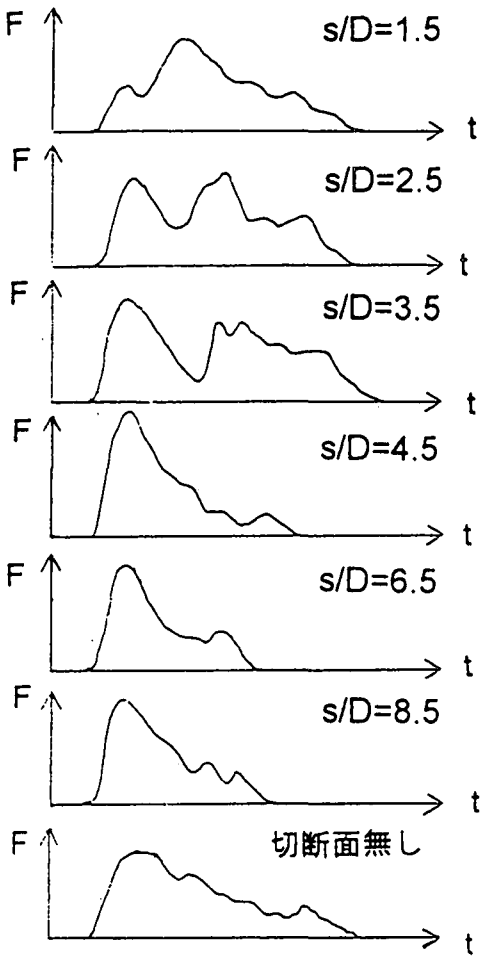


図 6 氷の切断位置を変えたときの荷重時刻歴

図7は氷荷重第1波の peak 値と氷の切断位置の関係を示したものである。最初氷力は小さく、切断位置が長くなるにつれて大きくなっていくが、切断面からの距離が 40cm を越えると ($s/D > 4$) 衝撃氷力は一定となる。 s/D が小さいと氷力が小さくなる理由としては、同じ運動量の氷盤が杭に衝突したとき、切断面が杭から離れていれば、ある程度歪んでからクラックが入るが、歪みの伝わる範囲内に切断面が存在すると、応力が途中までしか伝わらないためと考えられる。

これらのグラフから、氷の変形領域は杭直径(D)の4倍程度であると考えられる。

4. まとめ

- ・氷盤の弾塑性体の範囲を明らかにする目的を列举した。
- ・氷盤が杭に衝突した瞬間の氷盤表面につけられた印の移動量をビデオから計測した。この結果、杭に近いほど氷盤が歪むため移動量が小さく、杭から杭の直径の4倍程度離れると、移動量は一定になる。
- ・落下させる氷盤にあらかじめ水平に切断面を入れておき、切断位置を変化させたときの杭にかかる荷重を比較した。この結果、切断面までの距離が短いほど衝撃氷力は小さく、杭から杭の直径の4倍程度離れると、氷力は一定になる。
- ・落下させる氷盤にあらかじめ水平に切断面を入れておき、切断位置を変化させたときの杭にかかる荷重の時刻歴を比較した。この結果、切断面までの距離が短いと、2個の氷盤が別々に衝突するため荷重の peak は2つであり、切断面までの距離が杭径の4倍以上離れると2個の氷盤は1つのものとして挙動している。
- ・以上3つの実験より、氷の変形領域（弾塑性体の範囲）は杭直径の4倍程度であると考えられる。

参考文献

- 1) Ralston, T.D.; Sea ice loads, In Technical Seminar on Alaskan Beaufort Sea gravel island design. Exxon Company, USA, 1979
- 2) Michel, B. et al; Mechanisms and Theory of Indentation of Ice Plates, Journal of Glaciology, Vol.19, No.81,1977
- 3) 笹島隆彦他：円断面杭に作用する衝撃氷荷重に関する研究、海洋開発論文集、Vol. 12、pp.、1996