

平成 22 年 5 月 13 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2009

課題番号：19760349

研究課題名（和文）海氷盤が構造物へ及ぼす衝撃荷重に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Impact Load by an Ice Floe against a Structure

研究代表者

木岡 信治 (KIOKA SHINJI)

(独) 土木研究所・寒地土木研究所寒地水圏研究グループ寒冷沿岸域チーム・主任研究員

研究者番号：20414154

研究成果の概要（和文）：港湾・海岸構造物，家屋などの構造物へ海氷が高速で衝突する現象に関する要素実験として，中規模程度の自由落下による杭構造物への人工海氷の衝突実験を様々な条件で実施した．その結果，衝突力は氷温の低下にともなって直線的に増加し，本実験の範囲の運動エネルギーの変化よりもその依存性が大きかったほか，一軸圧縮強度の氷温依存性よりも大きいこと，氷が構造物に衝突して脆性破壊を生じ，その破壊氷片が自由に運動・飛散する場合（特に構造物規模に比べ氷塊の規模が大きい場合）には，衝突力や力積は小さくなり，運動エネルギーがあるレベルに達すると一定値になる事，など様々な特性が明らかとなった．また，海氷以外の漂流物も考慮し，同じ条件で木材等の他材料の衝突実験も実施した結果，脆性破壊を生じない材料の場合，衝突力（支点反力）は海氷と比べて，およそ 1 オーダー大きくなることが分かった．さらに，DEM を適用した海氷の衝突破壊に関する数値シミュレーション手法を開発し，氷塊衝突力を推定するための実用的な支援ツールを獲得した．

研究成果の概要（英文）： We performed medium-scale experiments regarding the impact applied by ice floes against a structure using free-falling ice floes under various conditions. The impact load increased linearly with decreasing ice temperature; accordingly, it was presumed that the effect of ice temperature on the impact load was larger than that on compressive strength. The impact load was also more strongly influenced by ice temperature than by kinetic energy under the test conditions of this study. When ice caused brittle failure/splitting, and fragments moved freely after impact with a structure (especially when the ice floe is large compared to the structure), the impact load or the impulse was small compared to cases without failure, and became a constant value regardless of the level of the kinetic energy or the momentum. We also made experiments regarding timbers and steels along with sea ice, considering tsunami-related debris such as timber, containers and vessels. In case of the timbers and the steels without brittle failure, their impact loads were generally one order of magnitude larger than those of sea ice. We also developed a numerical method using DEM to simulate the impact on a structure and its failure, and we obtained a practical tool for estimating an impact load of sea ice.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19 年度	2,200,000	0	2,200,000
20 年度	600,000	180,000	780,000
21 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,300,000	330,000	3,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：海氷、衝撃、衝突、個別要素法、津波、破壊

1. 研究開始当初の背景

氷海域において、低気圧に伴う海面上昇、波浪、津波にともなって大量の氷盤が防波堤・護岸等を越える「越氷」や、陸へ「遡上」する現象があり、過去に、港湾・海岸構造物、家屋の損壊など様々な被害を及ぼしている。その際ともなう氷塊の衝突が、港湾・海岸構造物その他陸域における一般構造物へ及ぼす影響の評価や、その対策工法としての流水制御施設、越氷防止施設、防潮堤や津波バリアなどを経済的に設計するには、海氷の衝撃破壊現象とそれによる構造物の応答特性を十分知る事が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、主に中規模程度の構造物への海氷の衝突実験を実施し、海氷の衝撃荷重特性や破壊機構を明らかにするとともに、衝撃破壊を再現する基礎的な数値計算手法を開発する。これにより、構造物へ作用する衝撃的冰荷重の推定法の構築に資する基礎的ツールを獲得することを主な目的としている。

3. 研究の方法

(1) 衝突実験の概要

図-1に示すように、衝突実験は自由落下方式により、人工海氷を落下高 $h=0.001\text{m}\sim 1.5\text{m}$ (衝突速度 V_0 は $0.14\sim 5.4\text{m/s}$) と変化させて、杭構造物 (梁) へ衝突させることにより行った。海氷 (供試体) は人工海氷を用い、約 $25\text{kg}\sim 100\text{kg}$ の質量 (M) となるよう直方体に整形した (厚さ t を約 0.16m と一定)。破壊強度に敏感な氷温を -10°C (目標値) を中心とし、 $-15\sim -5^\circ\text{C}$ (目標値) の範囲で変化させた。衝突を受ける構造物として、防護柵などを想

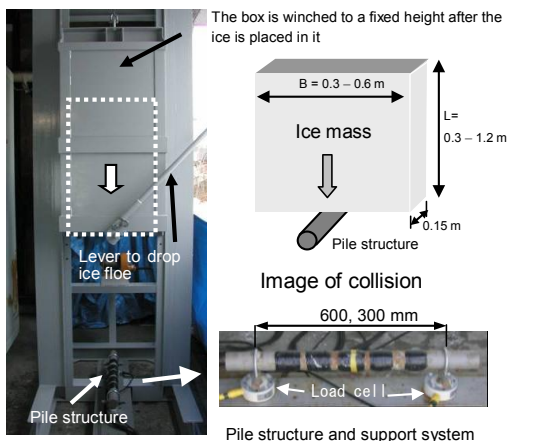


図-1 海氷の衝突実験装置

定した杭構造物とし、杭は、両端単純支持で、その支間長を 0.6m 、 0.3m とした固有周期 T の異なる2種類のSS材の丸棒 (直径 $d:60\text{mm}$ 、固有周期 T : それぞれ $3\times 10^{-3}\text{sec.}$ 、 $5\times 10^{-4}\text{sec.}$) で、両支点部にロードセル (定格容量: 20kN)、杭の下側に歪ゲージを配置し、衝突時の支点反力やひずみをサンプリング間隔 5kHz で計測した。破壊モードは高速ビデオカメラなどで観察するとともに、個々の供試体の氷温、密度、塩分量、人工海氷の結晶粒径 (偏光装置による撮影写真より推定) などを計測した。これらの実験により基本的な海氷の衝撃破壊特性を明らかにした。また、海氷以外の漂流物も想定し、同じ条件で木材等の他材料の衝突実験も実施し、海氷の衝撃破壊特性と比較した。

(2) 簡易的な力学モデルによる衝突力推定の検討

図-2に示すように、物体 (氷) を弾性体と仮定し、氷の持つ力学的エネルギーは氷と杭の変形による弾性歪みエネルギーに等しいと仮定し、さらに物体と杭との間の接触にヘルツの弾性接触理論を適用すると、最終的に衝突力 (破壊が生じない) P の方程式が得られ、これを数値的に解くことにより得られる。

■エネルギー保存則

$$\frac{1}{2}(M+m')v^2 + (M+m')g(\delta + \alpha) = \int_0^{\delta_p} P_p d\delta + \int_0^{\alpha} P_i d\alpha$$

■運動量保存則

$$MV = (M+m')v'$$

■ヘルツの弾性接触理論適用

$$P_p = K_p \delta_p = P_i = P = n' \alpha^{3/2}$$

where,

$$n' = \left(\frac{16}{3\pi(k_1' + k_2')} \right) \left(\frac{C_R}{s} \right)^{1/2}, \quad k_p' = \frac{1-v_p^2}{\pi E_p}, \quad k_i' = \frac{1-v_i^2}{\pi E_i}$$

■衝突力 P に関する方程式

$$f(P) = \frac{1}{2K_p} P^2 + \frac{2}{5} \frac{1}{n'^{2/3}} P^{5/3} - \frac{(M+m')g}{K_p} P - \frac{(M+m')g}{n'^{2/3}} P^{2/3} - \frac{1}{2} \frac{M^2}{(M+m')} v^2 = 0$$

M, m' : 物体および杭の質量, V, v' : 物体の衝突前後の速度
 K_p : 杭の等価剛性, α, δ_p : 物体と杭の変形量, P は衝突力, v, E はポアソン比とヤング率, C_R, s などは物体の形状 (曲率) に関する定数

図-2 杭への衝突の簡易モデル

(3) 個別要素法による氷の衝突破壊のシミュレーション手法の検討

計算手法として、粒子間に引張抵抗を与えた2次元の個別要素法を用いた。本検討では、構成粒子は円柱の等径要素6角形配置とし、パラメータ設定については、初期値に一般に考えられる海氷の機械強度（例えば、Cammaert, 1988）を参照し、破壊モードや衝突力を実現現象と合うように適宜調整した。杭構造物は、はり要素のFEM（要素数30）で解析し、動的解析のための時間積分はニューマークのβ法を用いた。なお、減衰マトリクスはレーリー減衰によるものとした。

パラメータの設定は、本実験で標準的な条件（氷温-10℃、B=0.6m、L=0.6m、h=1m）での結果を用いた。実際の破壊モードや静的な変形特性に合わせてパラメータ設定すると、衝突荷重はやや実験値よりも大きな値となるため、主なパラメータにバラツキを与えることにより、良好な結果が得られた。実際の海氷内の種々の物性値も空間的にバラツいており、このため機械強度も多少バラツキがあることを考えると、不都合な考え方ではない。ここで、表-1に設定した主なパラメータを示すが、重要と思われる幾つかのパラメータを対数正規分布に従う確率変数として扱い、仮に0.4の変動係数を与えた。

表-1 主な計算条件

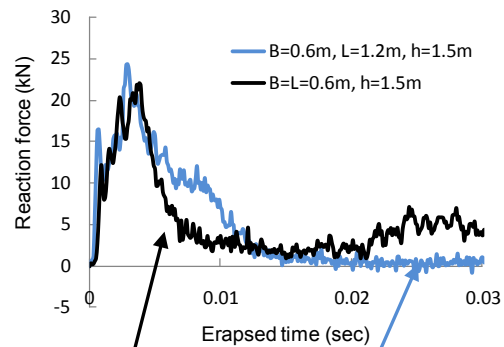
確定量		確率変数	平均	C.V.
粒子配列	等径要素6角形	粒子間摩擦係数	0.2	0.4
時間ステップ	10 ⁻⁴ s	法線方向バネ定数	3.2MN/m ²	0.4
粒子径	0.02m	粘着力	420kPa	0.4
粒子減衰定数	0.01	引張限界歪みのパラメータ	0.01	0.4

4. 主な研究成果

(1) 海氷の衝突破壊特性について

- 衝突力（支点反力）は、衝突後2-3×10⁻³sec程度で荷重がピークを迎えた。またその時の破壊モードは、比較的、海氷の寸法、特に衝突方向の寸法が小さい場合には、引張によるスプリット破壊が卓越し、海氷上端部までクラックが及んで海氷が二つに破壊・分離した。一方、海氷の寸法が大きい場合は、クラッシング（貫入）が卓越して、その後クラックが生じる破壊モードであった。しかし、海氷上端部まで及ばず、途中で分岐して側部に到達した(図-3)。
- 衝突力は氷温の低下にともなって直線的に増加し、準静的に得られる一軸圧縮強度の氷温依存性よりも大きく、温度の低下に比例するとした引張に基づく力（Saeki et al.,1978）の氷温依存性と同等程度であった(図-4)。これより、比較的小規模な氷塊については、引張による破

壊が卓越し、Saeki et al.(1978)に基づく引張応力に関連づけた衝撃力の概略推定が可能である。また、衝突力は、運動エネルギーの変化よりも氷温依存性の方が大きいことも推察された。これは、ある程度氷塊が大きくなると、その寸法に依存しないような有限の（引張）クラック長や、構造物規模で定まる（圧縮）破壊領域に支配されている事を示唆しているとも考えられる。



(a) B=L=0.6m (b) B=0.6m, L=1.2m

図-3 衝突力波形及び破壊モードの例 (Pile: T=5×10⁻⁴sec)

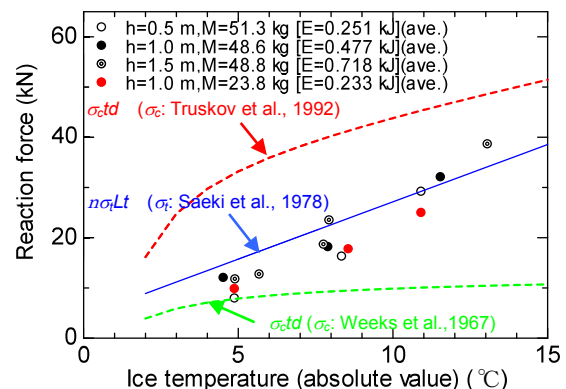


図-4 氷温（絶対値）と衝突力（最大値）との関係 (Pile: T=3×10⁻³sec)

The dotted lines show the values of estimated compressive strength converted to a force, which was multiplied by the diameter of the pile (d) and the ice thickness (t). The curves in the figure were estimated from the equations given by Truskov et al. (1992) and Weeks (1967). The formula by Weeks (1967) excludes the effects of loading and the strain rate to form a compressive strength index. The blue line shows the force to the tensile strength, multiplied by the length (L) of the ice and the ice thickness, was converted. The values were multiplied by 0.5.

- 衝突力のピーク値発生時刻（立ち上がり時間）は運動エネルギーによらず、一定値となること、また破壊荷重や衝突力に大きな影響を与える氷温にもよらずほぼ一定値となることが分かった（図-5）。

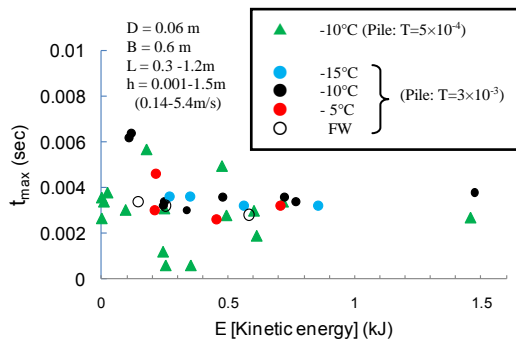


図-5 運動エネルギーと立ち上がり時間（衝突力がピークとなる時間）との関係

- 本実験の場合、衝突力（支点反力）は、およそ 2m/s 以上の衝突速度で運動エネルギー E の大きさにかかわらず一定値となった。加えて、エネルギー保存則と材料間の接触にヘルツの接触理論を適用した簡易モデルによる予測値より 1 オーダー小さくなった（図-6）。

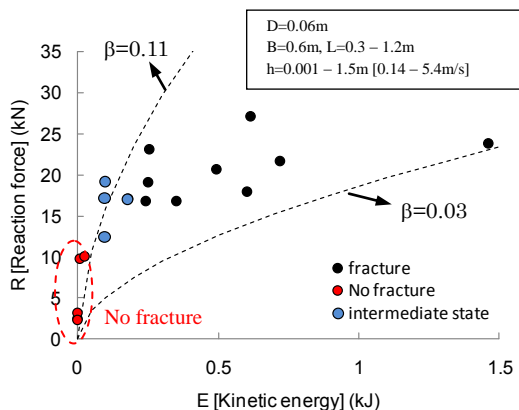


図-6 海氷の衝突力特性（波線はエネルギー保存則と材料間の接触にヘルツの接触理論を適用した簡易モデルによる予測値、 β は補正係数）($T=5 \times 10^{-4}$ sec)

- 氷が構造物に衝突して脆性破壊を生じ、その破壊氷片が自由に運動・飛散する場合（特に構造物規模に比べ氷塊の規模が大きい場合には、衝突力は小さくなり、運動エネルギーがあるレベルに達すると一定値になる事が推察された。
- (2) 他材料（海氷以外の漂流物を想定）の衝突破壊特性と海氷との比較について
- 人工海氷の質量や寸法・形状を同一となるよう調整した木材（無垢のカラマツ）や

鋼製材料の衝突実験を実施した。海氷と異なり、脆性破壊を生じない（破壊後の飛散が伴わない）鋼材や木材の場合、衝突力は海氷と比べて、およそ 1 オーダー大きくなること、速度および質量に応じてほぼ比例して増大することが明らかとなった。

- 木材の衝突力は木の繊維の方向に大きく依存し、衝突方向が木の繊維に平行となる場合の衝突力は、垂直とした場合より、およそ 2 倍程度大きくなることが分かった（図-7）。
- エネルギー保存則と材料間の接触にヘルツの接触理論を適用した簡易モデルによる推定値は、材料の塑性変形を考慮していない分過大評価する傾向にはあったが、実測の衝突力の傾向をよく説明できた（図-7）

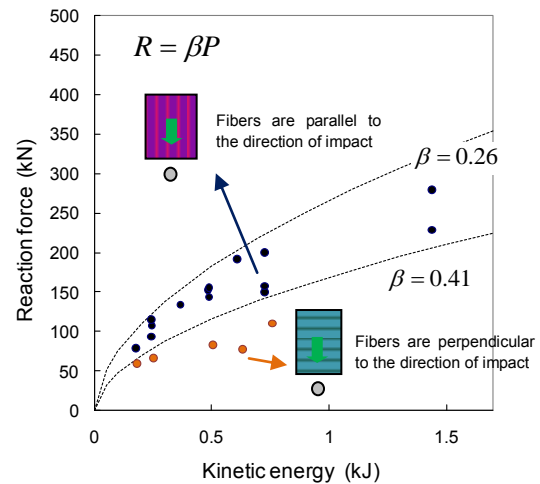


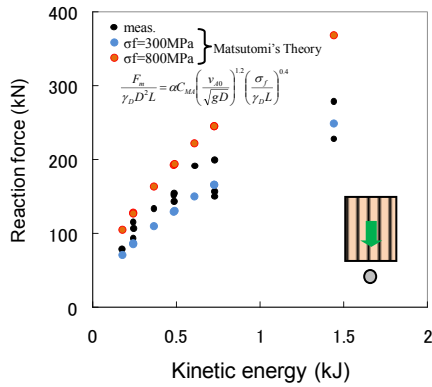
図-7 海氷以外（木材；カラマツ）の衝突力特性（波線はエネルギー保存則と材料間の接触にヘルツの接触理論を適用した簡易モデルによる予測値、 β は補正係数）($D=0.06m$, $B=0.6m$, $L=0.3-1.2m$, $h=0.36-1.5m$) ($T=5 \times 10^{-4}$ sec)

- 松富らによる流木の衝突力推定式（松富理論）と本実験結果を比較した結果、松富理論も本実験結果の傾向を概ね表す事がわかった。特に、木材の繊維が衝突方向と平行の場合、降伏応力 $\sigma_f=300-800MPa$ 、そして垂直の場合その 15%くらいと仮定すると、衝突力が概ね一致することが分かった（図-8）。

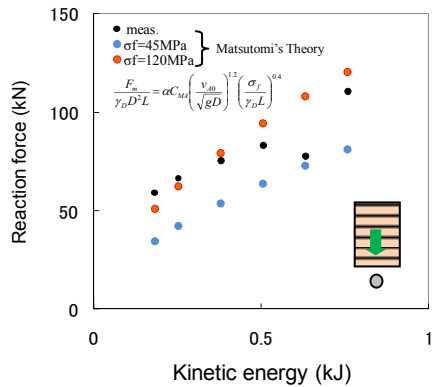
(3) 個別要素法による氷の衝突破壊のシミュレーション手法の検討結果について

- DEMを用いたシミュレーション結果は、実験の衝突力波形や破壊モードを良好に再現するとともに（図-9）、衝突力（最大値）の種々の条件変化による推移・傾向特性、それから速度、質量による衝突

力の推移・傾向特性を良好に再現した(図-10)。

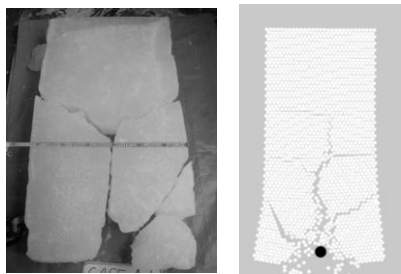
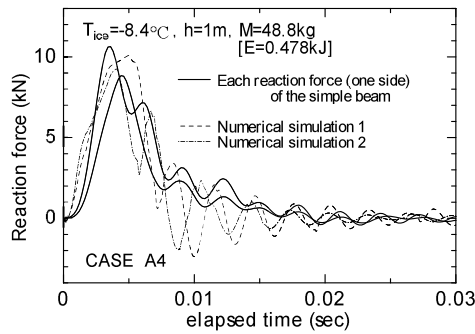


(a) 落下方向が繊維と平行



(b) 落下方向が繊維と垂直

図-8 木材の衝突力の実験結果と松富理論との比較 ($T=5 \times 10^{-4}$ sec)



$B=0.6m, L=1.2m, h=1.5m$ [$T_{ice} = -8.2^\circ C$]
($T=3 \times 10^{-3}$ sec)

図-9 衝突力波形及び破壊モードの実測とシミュレーションとの比較例(支点反力は片側づつ表示)(比較的フレキシブルな杭の場合)

■ さらに、本計算手法により、アイスブームにトラップされている比較的影響長の小さい氷盤の後方から、質量の大きな氷盤が高速で衝突してくる場合など、衝突する氷と構造物との間に氷群が介在している場合の間接的衝撃荷重を推定することも可能となる。

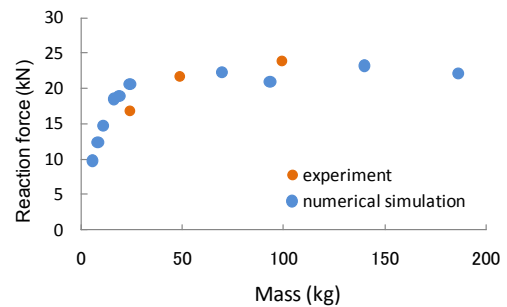
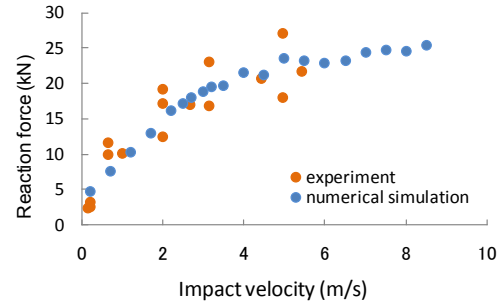


図-10 速度および質量をパラメータとした時の衝突力の変化のシミュレーションおよび実測値との比較 ($T=5 \times 10^{-4}$ sec)

■ 本計算手法により、津波来襲時の被害予測あるいは重要構造物の設計に資する実用的な氷塊衝突力の簡易推定式を構築するための条件を整備した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

木岡信治・森昌也・山本泰司・竹内貴弘 (2008) : 流水期の津波来襲を意図した流氷の構造物への衝突に関する中規模実験およびその数値計算手法の基礎的検討, 海岸工学論文集, Vol.55, pp.851-855.

Kioka, S., Y. Yamamoto, M. Masaya and T. Takeuchi (2009) : Medium-scale Test and Numerical Simulation using DEM for the Impact Load by a High Speed Ice Floe against a Structure, Proc. 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions 2009 (CD-ROM).

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木岡信治（KIOKA SHINJI）

（独）土木研究所・寒地土木研究所寒地水圏
研究グループ寒冷沿岸域チーム・主任研究員

研究者番号：20414154