論文の内容の要旨

１　申 請 者

防衛大学校　　中尾　友紀

２　論文題目

高ひずみ速度における純氷の変形・破壊特性

３　論文の内容の要旨

本研究では，純氷の変形・破壊特性に着目した研究を行った．氷の塑性変形特性およびクリープ変形特性の研究は盛んに行われており，氷の変形は転位の運動によって支配されていることが知られている．また，氷には材料強度のひずみ速度依存性があり，氷の最大圧縮応力は，ひずみ速度の増加に伴い延性域では単調に増加する．しかし，延性から脆性に遷移すると圧縮応力は減少またはほぼ一定の値を示すようになる．この圧縮応力の推移は，クリープ変形のひずみ速度依存性や亀裂の進展による脆性破壊に起因すると考えられている．

動的から衝撃の高ひずみ速度における氷の圧縮変形特性評価には，近年スプリット・ホプキンソン棒（SHB）法を用いた研究が行われ，氷の最大圧縮応力はひずみ速度とともに増加することが報告されている．しかし，先行研究では高ひずみ速度で脆性挙動を示す氷の圧縮変形特性を SHB 法により正しく評価できているか判断できず，また，高ひずみ速度での最大圧縮応力の増加原因については解明されていないのが現状である．一方，実際の氷の破壊現象を考える際には，単軸のような均一変形で破壊するのではなく，局所的な応力集中によって破壊が生じる．そのため，氷の研究分野では，氷が衝突した際に海洋構造物や船舶に作用する荷重や圧力を評価するためにインデンテーション試験が用いられている．しかし，これらの研究は，局所的な高圧領域と表面層での破壊に着目しており，内部の高速亀裂進展や試験片全体の破壊に着目した研究例は見当たらない．また，インデンテーション試験において圧子形状を変化させた時の影響やその速度依存性および脆性破壊メカニズムについては検討されていない．

そこで本研究では，これまで不明な点が多かった単軸圧縮試験における高ひずみ速度下の変形・破壊特性や，インデンテーション試験の変形・破壊挙動に及ぼす圧子形状やひずみ速度の影響について検討し，高ひずみ速度における純氷の変形・破壊特性を解明することを目的とした．

まず，単軸圧縮試験を行い，純氷の圧縮特性を検討した．その結果，試験片と治具の接触状態は得られた応力―ひずみ関係に大きく影響し，接触状態が悪い場合，最大応力が低下するとともに，最大応力時のひずみ量は増加することが確認された．また，

衝撃試験において，SHB 法とハイスピードカメラによる観察の結果，亀裂の生成・進展と応力の時間微分である応力速度の変化には相関関係があることが明らかになった．さらに，ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上においては，最大応力と破壊時の応力は一致しないことを見出した．このことから，応力速度が減少に転じた点で氷が破壊したと定義し，破壊時の応力を圧縮強度とすると，圧縮強度は，少なくともひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近から増加する傾向にあることが示された．高ひずみ速度では粒界すべりよりも転位のすべり運動が支配的であると考えられ，脆性域での圧縮強度の増加は，転位の熱活性化過程によるものと判断できる．

次に，球圧子および円錐圧子によるインデンテーション試験を実施し，純氷の変形および破壊挙動に及ぼす圧子形状とひずみ速度の影響について考察した．インデンテーション試験における破壊荷重は，球圧子の直径や円錐圧子の圧子角度が大きくなるほど増加する傾向を示した．一方，氷が破壊された際の各ひずみ速度における圧子の接触半径は，圧子形状に関わらずほぼ変化しなかった．接触半径が等しい場合，軸方向のひずみ分布は類似することから，氷内部の変形場が氷の変形・破壊に大きく関与していることが示唆された．また，ハイスピードカメラを用いて亀裂の進展を観察すると，変形初期に亀裂が一定時間停滞または減速することが確認された．この亀裂進展挙動は，表層の破壊に伴い生成される氷片の飛散と圧子直下に形成される凝集体に伴う変形場の広がりに関連していると考えられ，単軸圧縮試験とは異なるインデンテーション試験における脆性破壊メカニズムを提案した．さらに，破壊までの荷重―変位関係を積分し，変形・破壊エネルギーを算出すると，球圧子の直径や円錐圧子の圧子角度が大きくなるほど，また，円錐圧子より球圧子の方が，変形・破壊エネルギーが小さくなる傾向がみられた．脆性域では，ひずみ速度の増加に伴い表層で破壊された氷が氷片として飛散することで変形量が増え，結果として変形・破壊エネルギーが増加する．そのため，氷片がほぼ飛散しないひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近の速度において氷を最も効率よく破壊できることが明らかになった．

以上のように，本研究では単軸圧縮試験において，特に高ひずみ速度下の応力と破壊挙動の関連性を検討し，氷の破壊の基準と圧縮強度を定義するとともに，材料強度のひずみ速度依存性を誘起する要因を考察した．また，インデンテーション試験における圧子形状やひずみ速度の影響を検討し，インデンテーション試験特有の脆性破壊メカニズムを明らかにした．さらに，インデンテーション試験は，氷を効率的に破壊する有効な手段であることを示した．これらの結果から，高ひずみ速度における純氷の変形・破壊特性の一端を解明したと言える．

4　キーワード

「氷」，「速度依存性」，「インデンテーション」，「圧縮強度」，「可視化」