柱状多結晶氷のアコースティック・エミッションについて*

内田 武^{*1}, 安藤 司文^{*2}, 楠本 韶^{*3}

Acoustic Emission from Columnar Grained Ice

Takeshi UCHIDA, Shimon ANDO and Sho KUSUMOTO

Acoustic emission (AE) from two types of columnar grained ice specimens, plain and sharply notched, subjected to bending load at -5°C was examined. Two different levels of thresholds, 25 mV and 125 mV, were set for the "average signal" of AE, and the signals which exceeded these levels were counted. The count of the AE signal from the sharply notched specimen was less than that from the plain specimen. The Kaiser effect on AE was observed in the reloading stage and it vanished when the pause time was over after about three minutes. The pop-in of the sharply notched specimen can be detected by AE. The ratio of σ_{AES} and σ_f , which express the calculated stress at the start of AE and the broken stress respectively, was nearly proportional to the value of σ_{AES} .

Key Words: Ice, Acoustic Emission, Bending, Fracture Toughness, Crack Propagation, Kaiser Effect

1. 緒 言

天然氷の結晶条件を模倣して人工的に製造した氷の力学的性質に関する研究⁽¹⁾が盛んに行われている。また、著者らのこれまでの研究により、氷においても最終破断以前に部分的な破壊(ポップ・イン)が起こることがわかってきた⁽²⁾が、それはほとんどが目視による観察に頼っていたため、かなり低負荷速度領域での議論にとどまっていた。本研究は、ポップ・インをアコースティック・エミッション(以下 AE)として捕えることを試み、より高負荷速度領域でのポップ・イン現象の有無の議論に拡張することを主目的としている。

これまでも氷の発する AE(可聴音を含む)に関する実験的研究^{(3)~(6)}はなされているが、それらは一軸圧縮負荷時の AE のものがほとんどである。そこで、本研究ではまず基礎的実験として、柱状多結晶氷の試験片を用いて試験温度 -5°C のもとで三点曲げ試験を行い、AE 特性と曲げ強さ、ポップ・インとの関係および

カイザー効果について検討を行った。

2. 試 験 方 法

2.1 氷試験片 柱状多結晶氷(Columnar Grained Ice)の製造⁽²⁾は、フリーザ内温度を -20°C 、容器上面ヒータ電力を 35 W として、底面に種氷を敷き詰め 0°C の蒸留水を注ぎ込んだ容器の底面から上向きに 35 時間をかけて凍結させた。

試験片寸法は、図 1 に示すように平滑試験片では厚さ $25 \times$ 幅 $50 \times$ 長さ 250 mm 、切欠き試験片では $50 \times 50 \times 250 \text{ mm}$ である。切欠き試験片は、中央部に厚さ

図 1 試験片の形状・寸法

* 平成元年 11 月 21 日 九州支部・中国四国支部合同企画長崎地方講演会において講演、原稿受付 平成 2 年 5 月 14 日。

^{*1} 正員、北九州工業高等専門学校 (〒803 北九州市小倉南区志井 5-20-1)。

^{*2} 正員、長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町 1-14)。

^{*3} 正員、九州産業大学工学部 (〒813 福岡市東区松香台 2-3-1)。

0.1 mm, 先端角 11° のカミソリ刃を切欠き深さ 20 mm になるようにあらかじめ試験片製造過程で埋め込み, 試験直前に抜き取ることによって得られる鋭い切欠きを有している。得られた試験片の結晶粒径は, 図示の試験片上面で 5 mm, 切欠き底で 10 mm, 下面で 12 mm となった。

成形された氷試験片は, 直接空気に触れることによる昇華変形を防ぎ残留応力の影響を除去するため, 試験温度 -5°C の灯油中に一昼夜以上保存した。

2.2 AE 計測 AE 計測には, 140 kHz 付近に共振点を持つ PZT を圧電素子とする AE センサ (NF 社製, $\phi 12\text{ mm}$) を使用し, AE テスタ (NF 社製) で計測信号の各種処理を行った。この AE テスタは, 小形軽量な簡易 AE 計測装置であるため十分な解析は期待できないが, 図 2 に示すようなブロック図を構成しており, AE 計測に必要な最小限の信号処理ができる。ここで, RF 信号は増幅された AE 原波形 (減衰波形) であり, 設定したしきい値を越すと Event 信号として負のパルスが出力され, その発生率が Recorder 信号として出力される。Average 信号は, RF 信号を半波整流したものである。今回は, 総合利得を 66 dB とし, 図中の Event 信号・Average 信号を計測することで, しきい値を 25 mV・125 mV の 2 段階とした AE 発生数の計数を行った。ここでの計数法は, 休止時間を持つイベント計数法⁽⁷⁾である。

2.3 試験方法 試験は, 低温室内に設置された MTS 万能試験機を利用し, 試験温度 -5°C , 支点間距離 200 mm で三点曲げを行った。その際, 荷重は氷結晶の成長方向に負荷した。平滑試験片では AE のカイザー効果・曲げ強さに対する AE 計数の関係を, 切欠き試験片ではポップ・インと AE 振幅の関係について検討した。

AE センサは, 氷試験片表面に 0°C の水を接着剤として固着し, 支点と氷試験片の間には吸振シート (厚さ約 2 mm) を挿入することで, 治具のガタ・支点とのこすれ等による AE の発生防止を心がけた。

3. 試験結果および検討

3.1 AE 発生数の特徴 平滑試験片では負荷速

図 2 AE テスタの内部構成ブロック図

度 $\dot{\sigma}$ を 75 と 750 kPa/s, 切欠き試験片では負荷速度 $\dot{K}_I$ を 4.2 と 390 kPa $\sqrt{\text{m/s}}$ のそれぞれ高低二条件で 6~10 本の試験片を用いて試験を行った。図 3(a), (b) は, それぞれ平滑試験片および切欠き試験片で得られた, 低負荷速度での荷重と AE 信号の計測結果の代表例である。

これによると, 平滑試験片では 25 mV を越える AE 発生数 N_{25} は, 荷重上昇とともに滑らかな指数関数的に増加するのに対し, 切欠き試験片では AE 発生数自身が少なく階段状の不連続な増加となっている。これは, 氷試験片中での滑りが平滑試験片では広範囲で発生するのに対し, 切欠き試験片では切欠き先端部に限られることに起因するものである。この傾向は, 高負荷速度での結果も同様であった。図中に示した Average 信号として観察されるような大振幅 AE は, 切欠きの有無および負荷速度によらず負荷の途中で突発的に発生している。

また, 切欠き試験片では 125 mV および 25 mV を越える AE の発生総数比 (N_{125f}/N_{25f}) が, 平滑試験片より数倍以上大きく, 125 mV を越える AE が試験片の最終破断を強く支配しているようであるが, 上述のように AE 発生数自身が少ないこと, 試験本数が少ないことにより, AE と応力拡大係数との相関を見るまでには到らなかった。

(a) 平滑試験片 ($\dot{\sigma} = 75\text{ kPa/s}$)

(b) 切欠き試験片 ($\dot{K}_I = 4.2\text{ kPa}\sqrt{\text{m/s}}$)

図 3 荷重と AE 信号の計測結果 (低負荷速度)

3.2 ポップ・インと AE 振幅 氷試験片は透明であるため、切欠き試験片を用いた低負荷速度領域での試験において、切欠き先端付近を注意して観察すると試験片の最終的破断以前に切欠き先端にき裂が発生し、停留するのが目視で観察されることがある。この現象は荷重～時間曲線記録上での変化は検出できないがポップ・インの一種とみなせ、これに伴ってかすかな可聴音が時として観測される。そこで、この現象を AE として捕えることを検討した。

その結果、低負荷速度 ($\dot{K}_1 = 4.2 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$) においてポップ・インが目視により観察されると、同時に測定レンジを越えるくらいの大振幅 AE (Average 信号で 500 mV 以上) が検出され、この大振幅 AE を捕えることでポップ・インを把握できることがわかった。図 4 は、これまで目視による観察が不可能であった高負荷速度 ($\dot{K}_1 = 390 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$) での AE 計測の例である。上述した大振幅 AE の発生が認められ、高負荷速度領域でもポップ・イン現象が存在し、それは AE での検出が可能であることがわかった。数多くの試験を行うことで、氷試験片の破壊挙動の解明につながるものと思われる。

3.3 氷試験片でのカイザー効果 カイザー効果とは、供試体に応力履歴がある場合、以前に加えられ

た最大応力に達するまではほとんど AE が発生しない現象のことを言う。本研究では、平滑試験片を用いた氷試験片でのカイザー効果の確認とカイザー効果の消失に要する時間について検討した。試験は、同形試験片に 3 タイプの繰返し荷重をかけることで行った。すなわち、除荷の後休止することなく次の負荷をかける A タイプ、負荷間に 50 分以上の大休止をとる B タイプ、負荷間に 15 秒の小休止から 6 時間の大休止までをとる C タイプとし、それぞれ 4 本程度の試験片を使用した。負荷速度 $\dot{\sigma}$ は、100～160 kPa/s で行った。

図 5 に、A タイプの繰返し負荷の場合の結果を示す。これをみると除荷後、前負荷重に達するまで、すなわち図中 $K_1 \cdot K_2$ 領域では、ほとんど AE の発生が認められず氷でもカイザー効果が成立することの確認ができた。B・C タイプの繰返し負荷の結果、15 秒の小休止ではカイザー効果が現れるが、3 分の小休止およびそれ以上の大休止をとればカイザー効果の消失が起こることがわかった。

岩石・コンクリート等では、まだいくらかの問題はあるが、このカイザー効果を利用した供試体の先行荷重の決定⁽⁸⁾がなされている。しかし、氷の場合は、この決定には除荷後の放置時間がかなり短い時間内に限られるようである。これは、試験を -5°C という氷にとっては融点付近で行ったため、ある程度以上の負荷の休止(ここでは 3 分以上)をとることで熱処理効果が起こり、滑りの固定が生じカイザー効果が消失したものと思われる。

3.4 曲げ強さと AE 計数 平滑試験片を用いた負荷速度 75 と 750 kPa/s の二条件での試験の結果、最終破断までに発生した小振幅 AE の累積値 (N_{25f}) は負荷速度の増大で減少するのに対し、大振幅 AE の累

図 4 荷重と AE 信号の計測結果(高負荷速度)
(切欠き試験片, $\dot{K}_1 = 390 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$)

図 5 氷によるカイザー効果(A タイプ負荷)

図 6 σ と N_{25} の関係

図7 σ_{AES} と σ_f の関係 図8 σ_{AES} と σ_{AES}/σ_f の関係

積値(N_{125f})は負荷速度の影響をあまり受けないようである。また、AE 累積計数のバラツキは、高負荷速度のほうが小さかった。

負荷をかけてから破断するまでの任意応力 σ とその応力に達するまでに発生した 25 mV を越える AE の累積計数 N_{25} を図6のように両対数表示し、次式により直線回帰を行った。

$$N_{25} = b \cdot \sigma^a \dots\dots\dots (1)$$

この時、グラフの傾き a 値は負荷速度に関わりなく 2~4 で、平均すると 3.04 という値が得られた。次に、式(1)より $N_{25}=1$ すなわち 25 mV を越える AE が発生し始める応力 σ_{AES} を求め、曲げ強さ σ_f との関係を図7に示す。これによると、 σ_{AES} の値は低負荷速度では 0.21~0.44 MPa、高負荷速度では 0.10~0.40 MPa となり、負荷速度の高いほうが若干早くから AE が発生するようであるが、ほとんどのものが 0.4 MPa までには AE が発生することがわかる。著者らが別途行った切欠き試験片を用いた COD 試験の結果、氷試験片の降伏応力は 0.07~0.2 MPa となり、今回の σ_{AES} の値とよい一致を示している。すなわち、25 mV 付近の AE は氷試験片における滑りに深い関わりを持っているものと思われる。

また、図をみると σ_{AES} の値が大きくなるほど、すなわち AE が遅くから発生するほど曲げ強さ σ_f が大きくなるようであるが、その傾向は負荷速度により差を生じている。一方、図8に示した σ_{AES} と σ_{AES}/σ_f の関係をみると、負荷速度に関わりなく両者にはほぼ比例関係が成り立つことがわかる。これは、25 mV をしきい値としたイベント計数において、注意深い AE 計測を行い第一発目の AE イベントを捕えることで、平滑氷試験片の曲げ強さ予知の可能性があることを意味している。

4. 結 論

柱状多結晶氷の AE について、平滑試験片・切欠き試験片を用いた基礎的実験において以下の知見を得た。

(1) 平滑試験片では 25 mV を越す小振幅 AE の発生数が多いが、切欠き試験片では少なくその累積は階段状の増加を示す。

(2) AE によりポップ・インの検出ができることがわかり、特にこれまで目視観察が不可能であった高負荷速度領域への議論の拡張が可能であると思われる。

(3) 氷の場合もカイザー効果が現れるが、それは約 3 分程度の負荷の休止により消失する。

(4) 平滑試験片では、 σ_{AES} と σ_{AES}/σ_f との間にほぼ比例関係が成立するため、AE 計測結果からの曲げ強さ予知の可能性がある。

最後に、本研究の実施に当たり熱心な協力をいただいた長崎大学大学院生、橋口 正君〔現 三菱電機(株)〕に心より感謝致します。

文 献

- (1) 例えば、浦辺、鉄と鋼, 67-7(1981), 908.
- (2) 楠本・木村・高瀬・木寺, 材料, 35-395(1986), 887.
- (3) Gold, L. W., *Can. J. Phys.*, 38-9(1960), 1137.
- (4) Zaretsky, Yu. K., ほか2名, *Eng. Geol.*, 13(1979), 299.
- (5) St. Lawrence, W. F. and Cole, D. M., *Cold Regions Science and Technology*, 5(1982), 183.
- (6) Shinha, N. K., *Proc. Joint Conference on Experimental Mechanics, Society of Experimental Stress Analysis/ Japan Society for Mechanical Engineers, Honolulu/ Maui, Hawaii, (1982), Part II, 767.*
- (7) 大津, アコースティック・エミッションの特性と理論, (1988), 19, 森北出版.
- (8) 金川・林・仲佐, 土木, 258(1977), 63.