

V-25

水中急速凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化メカニズム

北海道開発局 開発土木研究所 正会員 ○渡辺 宏

北海道開発局 開発土木研究所 正会員 堺 孝司

1. まえがき

コンクリートは、一般に、凍結融解作用を受けると凍結時にコンクリート内部の空隙に含まれている水が凍結することにより膨張し、融解時に収縮する膨張収縮挙動を示し、その繰り返しによつて組織の劣化が進行していくと考えられている。このような挙動に関する研究は、気中凍結融解試験によるものが多い。鎌田、洪¹⁾らは、差動トランスタイプの膨張計を用いて、硬化セメントペースト供試体全体の膨張収縮挙動と凍結水量との関係について検討した。同じく、藤井、藤田²⁾は、硬化セメントペースト供試体全体の膨張収縮挙動を熱機械的分析 (TMA) を用いて調べ、塩化物が熱的挙動に及ぼす影響について検討した。また、李、三浦³⁾は、コンクリート、モルタル、ペースト、および骨材の膨張収縮挙動を表面に貼付したひずみゲージを用いて調べた。これに対し、大和³⁾の研究は水中急速凍結融解によるコンクリートの膨張収縮挙動を供試体中心に埋設したカールソン型ケージを用いて調べた。しかし、これらの研究は凍結融解作用下におけるコンクリート内部の複雑な膨張収縮挙動について検討したものではない。

そこで、本研究は、水中急速凍結融解試験によるコンクリートの膨張収縮挙動を供試体中に複数埋込んだひずみゲージを用いて調べ、コンクリートの劣化過程の解明を試みたものである。

2. 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。

骨材は苫小牧市樽前産の海砂 (比重2.79、吸水量0.89%粗粒率2.74)、小樽市見晴産の碎石 (比重2.66、吸水量1.93%) を使用した。また、混和剤はAE減水剤、空気量調節剤を用いた。

コンクリートの配合は、スランプ $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 5% を目標とした、表-1 に示すものとした。

3. 実験方法

コンクリートの練り混ぜは50ℓの強制練りミキサを用いた。実験に使用した供試体は10×10×40cmの角柱体とし、この供試体に凍結融解時のコンクリートの長さ変化を測定するために、長さ120mm、幅15mm、厚さ4mmの埋め込み型ひずみゲージを埋設した。ひずみゲージの設置状況を写真-1 に示す。あわせて、供試体の残留ひずみをダイヤルゲージで測定するため写真-1 に示すように供試体の両端に径が9mmで埋め込み長さが25mmのプラグを埋め込んだ。

養生は標準養生 (20℃) と低温養生の2種類とした。低温養生温度の供試体は+5℃の恒温室に6時間前養生し、その後、-5℃の低温室に材令14日まで保存した。

凍結融解試験は3槽式の試験機により木学会基準 (案) に準

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 w/c (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 (ℓ)	空気量 調節剤 (ml)
50	45	147	294	891	1,040	0.735	117.6

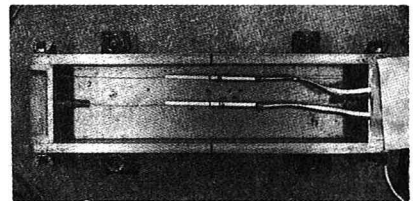


写真-1 ひずみゲージ設置状況

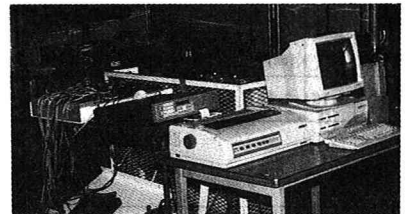


写真-2 計測装置

じて行い、凍結融解時のコンクリートのひずみと温度を、埋設したひずみゲージおよび熱電対からデジタル測定器を介してパソコンにより収録し、合わせて処理をした。この装置を写真-2 に示す。また、所定のサイクルでダイヤルゲージによる残留ひずみを測定した。使用したひずみゲージは、コンクリートに埋め込んだ場合、常温で温度変化してもひずみが生じない自己温度補償型であるが、マイナスの温度領域まで温度補償がなされていない。そこで、マイナスの温度に変化させたときのひずみの変化を調べ、補正を行った。マイナスの温度に変化させたときのひずみの測定は、凍結融解試験を行う前のひずみゲージを埋め込んだコンクリート供試体を用いて、供試体表面と中心の温度差による内部拘束が起こらないように、24時間で $+5^{\circ}\text{C} \sim -18^{\circ}\text{C} \sim +5^{\circ}\text{C}$ となるような温度条件で行った。その結果の一例を図-1 に示すが、 -1.5°C までは温度変化によるひずみはほとんどなかった。しかし、それより温度が低下すると収縮ひずみが増大した。なお、測定は気中で行ったが、供試体は封かん状態においた。

4. 実験結果と考察

4.1 標準養生したコンクリートの膨張収縮挙動

図-2 に中心および側面の表面から15mmの位置（以下、側面15mmと略称）、図-3 に中心および側面10mmにひずみゲージを埋設したコンクリートの膨張収縮挙動を示す。初期サイクルでは凍結融解試験の工程が融解工程から凍結工程になる直前までは中心が膨張ひずみであったが、融解から凍結になると中心のひずみが収縮し、側面15mmの場合と同じであった（図中A）。その後、コンクリート温度がマイナスになると中心のひずみが大きく収縮し、側面15mmのひずみも収縮した（図中B）。さらに温度が低下すると中心および側面15mmのひずみとも膨張となった。凍結融解試験の工程が凍結工程から融解工程になると中心のひずみが急激に膨張した（図中C）。

この膨張収縮挙動を中心と側面15mmおよび側面10mmとの差の変化として示すと図-4、5 のようになる。図-4、5 が示すように、中心と側面15mmおよび側面10mmとの温度差がプラス（中心の温度が側面15mmおよび側面10mmの温度より高いことを意味する）であるとひずみ差がマイナス（中心のひずみが側面15mmおよび側面10mmのひずみより収縮が大きいことを意味する）となる。これに対して、温度差がマイナスになるとひずみ差がプラスになる。このように、温度差が大きくなるとひずみ差が大きくなる。

図-6 は、供試体の深さ方向の温度およびひずみ分布を示す。側面10mmおよび15mmの位置におけるひずみの測定を同一供試体では行っていないが、側面10mmおよび15mmの位置にひずみゲージを埋め込んだそれぞれの供試体の中心温度およびひずみがほとんど同じであったことから、図-6 では両方の供試体の測定結果を合成した。中心が側面10mmより温度が高い場合は中心では収縮ひずみで、表面に近くなるとひずみは小さくなる。これは中心と表面の温度差によって内部拘束が生じたためであり、表面では膨張ひずみが生じる。逆に中心が側面10mmより温度が低い場合は中心では膨張ひずみで、中心が側面10mmより温度が高い場合と逆の現

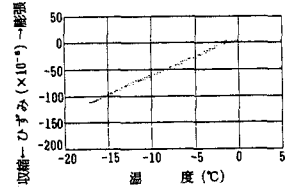


図-1 コンクリートに埋設したひずみゲージの温度特性

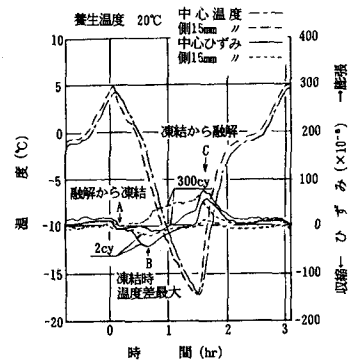


図-2 膨張収縮挙動

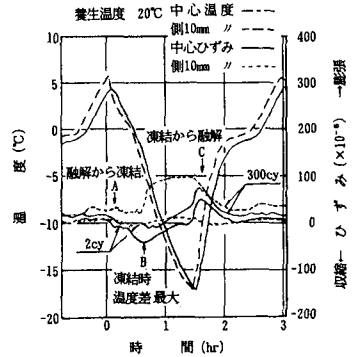


図-3 膨張収縮挙動

象が起こり、表面では収縮ひずみが生じている。しかし、実際には中心と側面10mmの単位温度差当りのひずみ差は図-5に示すように異なり、内部拘束によるひずみだけでなく凍結水による膨張が加わったものであると類推される。すなわち、融解工程から凍結工程に変わる直前までは中心が表面より温度が低いため内部拘束により中心に膨張ひずみ、表面に収縮ひずみであるが、融解工程から凍結工程に変わると表面の温度が急激に低下し、中心の温度が遅れて低下するため中心と表面で温度差が起こり、内部拘束により表面に膨張ひずみ、中心に収縮ひずみが生じる。その後、温度差が小さくなるが、さらに温度が低下するとコンクリート温度がマイナスになり、表面から間隙水が凍結し凍結に発生する熱によって表面温度が中心に伝わりにくくなるため、中心の温度が下がりにくくなり、中心と表面の温度差が拡大し中心に大きな収縮ひずみが、表面に内部拘束による膨張ひずみと凍結水による膨張ひずみが合わさったひずみが生じる。凍結工程から融解工程に変わると、融解工程から凍結工程になったときと逆の現象が起こり、中心に膨張ひずみ、表面に収縮ひずみが生じる。このように、急

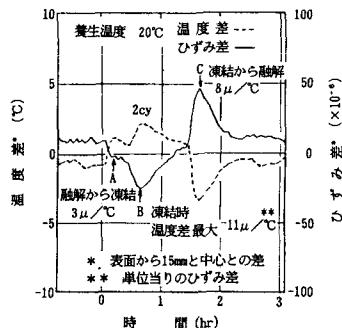


図-4 温度差およびひずみ差の経時変化

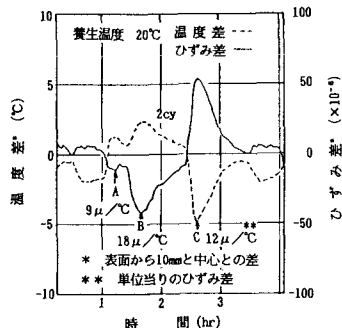


図-5 温度差およびひずみ差の経時変化

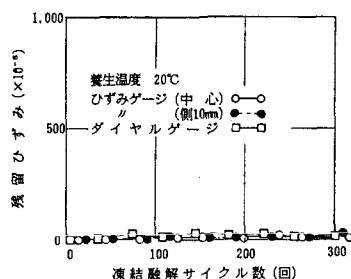


図-7 凍結融解サイクル数と残留ひずみの関係

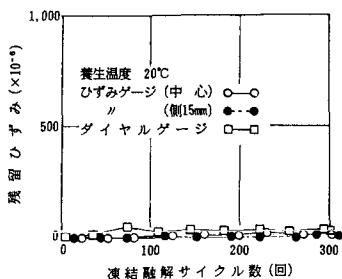


図-8 凍結融解サイクル数と残留ひずみの関係

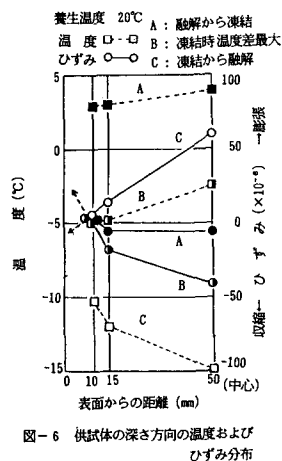


図-6 供試体の深さ方向の温度およびひずみ分布

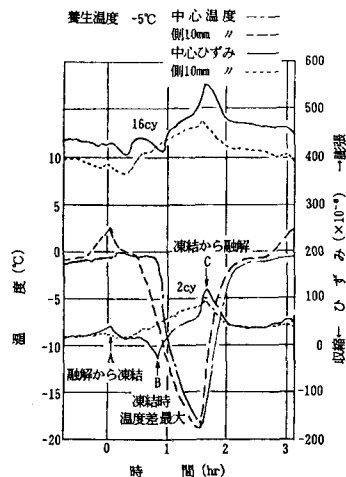


図-9 膨張収縮挙動

速凍結融解作用下におけるコンクリートの膨張収縮挙動はコンクリート中の間隙水の凍結による膨張ひずみと内部拘束によるひずみが合わさったきわめて複雑なものとなっていることがわかる。

さらに、凍結融解のサイクルが進行するとコンクリートの劣化が進み、図-2、3に示すように300cyでは2cyの場合と比べて中心で最大となる収縮ひずみが小さくなり、側面15mmおよび側面10mmでは膨張ひず

みが大きく、とくに、側面10mmで顕著となった。これは、凍結水による膨張ひずみが増大したためであると思われる。

図-7、8 に凍結融解サイクル数と残留ひずみの関係を示す。側面15mmより側面10mmの方が残留ひずみが大きくなっており、表面から劣化が進行しているのがわかる。

4.2 養生温度-5℃としたコンクリートの膨張収縮挙動

-5℃で養生したコンクリートであるため凍結する間隙水が多く、中心は凍結したままとなった。図-9 の膨張収縮挙動が示すように、融解工程から凍結工程に変わる前後の中心の温度はマイナスで変化が少ない。これに対し、側面10mmの温度は融解工程から凍結工程に変わった直後にピークになり（図中A）、このとき中心のひずみが膨張した。その後、側面10mmの温度が低下したが、中心の温度は変化が少なく温度差が拡大し、温度差が最大になったとき中心の収縮ひずみが最大となった（図中B）。また、側面10mmのひずみは温度がマイナスになると膨張した。その後、中心のひずみが収縮から膨張に転じ、凍結工程から融解工程に変わった直後に膨張ひずみがさらに大きくなった。（図中C）

図-10に側面10mmと中心との温度差およびひずみ差の経時変化を示す。養生温度20℃の場合と同様に温度差がプラスのときひずみ差はマイナス、温度差がマイナスのときひずみ差はプラスとなった。

また、図-11に示した供試体の深さ方向の温度およびひずみ分布においても養生温度20℃の場合と同様に内部拘束によるひずみ分布が認められたが、凍結時の膨張ひずみが大きいいためその分布は標準養生のものと異なった。養生温度を-5℃とした場合、残留ひずみが大きく凍結融解作用による劣化が著しいが、膨張収縮挙動は凍結水による膨張ひずみと内部拘束によるひずみとが合成された複雑なものであることがわかる。

5. まとめ

急速凍結融解試験によるコンクリートの膨張収縮挙動をひずみゲージを用いて調べたが、この膨張収縮挙動は凍結水による膨張と温度差による内部拘束ひずみからなる複雑な挙動であることがわかった。融解過程から凍結過程になると表面では温度差による内部拘束ひずみと凍結水による膨張が共に膨張ひずみとして生じ、このひずみの一部が残留ひずみとなり表面よりコンクリートを劣化させていくと思われる。また、凍結過程から融解過程に変わった後、中心では凍結水による膨張と温度差による内部拘束ひずみが加わった大きな膨張ひずみが生じ、このことも、劣化の進行に寄与すると思われる。

参考文献

1) 鎌田英治, 名和豊春, 藤井弘司, 洪悦郎; 硬化セメントペーストの凍結水量と凍結挙動の測定, セメント技術年報, 33, pp. 298-301, 1979年
2) 藤井卓, 藤田嘉夫, 硬化セメントペーストの凍結水量と凍結挙動に及ぼす塩化物の影響, セメント技術年報, 39, pp. 110-113, 1985年
3) 李道憲, 三浦尚; 低温の繰返しを受けたコンクリートのひずみと劣化との関係に関する研究, 土木学会第43回年次学術講演会, pp180-181, 昭和63年10月
4) 大和竹史, 凍結融解作用によるコンクリートの長さ変化, セメント技術年報, 30, pp. 299-301, 1976年

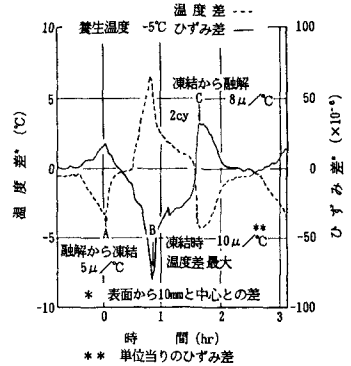


図-10 温度差およびひずみ差の経時変化

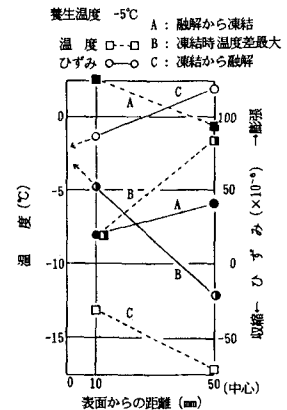


図-11 供試体の深さ方向の温度およびひずみ分布