

コンクリートの耐凍害性評価試験

遠藤 裕丈* 堺 孝司** 熊谷 守晃***

1. はじめに

北海道のような寒冷地におけるコンクリート構造物は、一般に凍結融解作用を受けている。

コンクリートは、この作用を繰り返し受けることによって膨張収縮挙動を繰り返し、徐々に組織の劣化が進行する。劣化は、内部組織の微細ひび割れや表面のスケーリング（フレーク状の剥げ落ち）の形で発生する。このような現象をコンクリートの凍害という。凍害は寒冷地におけるコンクリートの典型的な劣化現象である。

写真-1, 2, 3に凍害によるコンクリートの劣化状況の例を示す。凍害を防ぐ対策はすでに確立されていると考えられているが、実際には未だに多くのコンクリート構造物で凍害が発生している¹⁾。

コンクリートの耐凍害性を評価するには適切な試験が必要となるが、ここでは現行の試験法の概要と新たな試験法の開発に向けた検討結果について述べる。



写真-3 橋台の凍害

2. 現行のコンクリートの耐凍害性評価試験法

現在、コンクリートの耐凍害性は、ASTM C 666（急速凍結融解に対するコンクリートの耐久性試験）およびASTM C 672（スケーリング試験）によって評価されている。以下に、これらの試験について概説する。

2.1 ASTM C 666 試験法

この試験法には、水中で凍結と融解を行うA法と気中凍結および水中融解を行うB法とがある。

試験には一般に、10×10×40cmの供試体を用いられている。

A法による場合、図-1²⁾に示すようなゴム製容器を使用して、供試体全面が常に3mm厚の水で覆われるようにし、これを試験槽に入れる。B法では、供試体が交互に空気と水に覆われるようにする。



写真-1 縁石の凍害



写真-2 橋脚の凍害

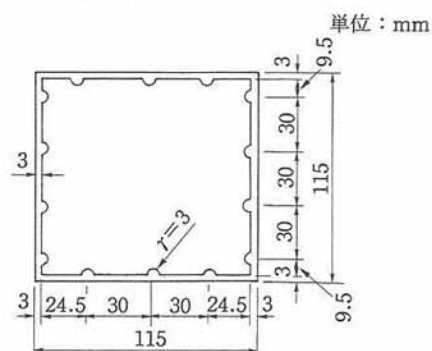


図-1 ASTM C 666試験 A法で用いられる容器²⁾

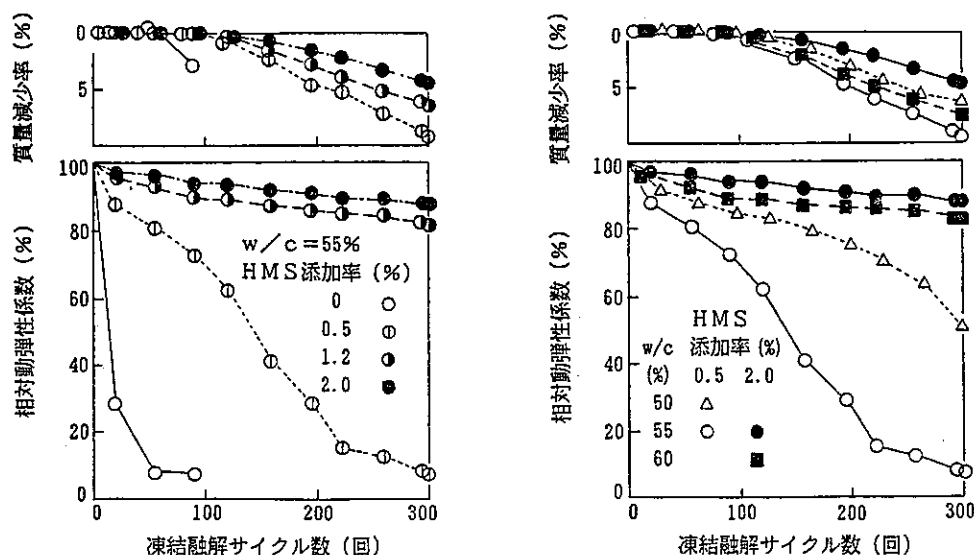


図-2 ASTM C 666 試験法による試験結果の一例³⁾

試験は、最低 $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ 、最高 $5 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲で、急速に凍結融解作用を与える。このとき凍結融解1サイクルに要する時間は3～4時間（このうち融解に要する時間は、A法の場合で25%以上、B法で20%以上）と定められている。36サイクルに1回の割合で質量減少率および相対動弾性係数を計測する。試験は300サイクルまで行るか、もしくは相対動弾性係数が60%を下回った時点で終了する。この試験法における試験結果の一例を図-2³⁾に示す。

このように、この試験法では供試体に対して全面から凍結融解作用を与えることによってコンクリートの耐凍害性を評価している。

しかし、実際の構造物では、写真-1, 2, 3からわかるように、必ずしも全面から同じ条件で凍結融解作用を受けてはいない。

2.2 ASTM C 672 試験法

この試験は、凍結防止剤に対するコンクリートの耐凍害性を評価するために行われている。

図-3⁴⁾に示す供試体の上面（試験面）に試験水を6mm程度張って凍結融解作用を与える。凍結融解サイクルは $-17.8 \pm 2.8^\circ\text{C}$ で16～18時間、 $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ で6～8時間、約1日1サイクルとされている。

試験は、5, 10, 15, 20, 25, 35, 50サイクル、その後25サイクルおきに、コンクリート試験面に生じた剝離の状況を目視で観察することになっているが、一

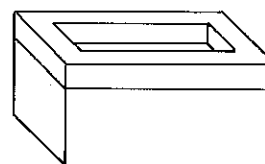


図-3 ASTM C 672 試験用供試体⁴⁾

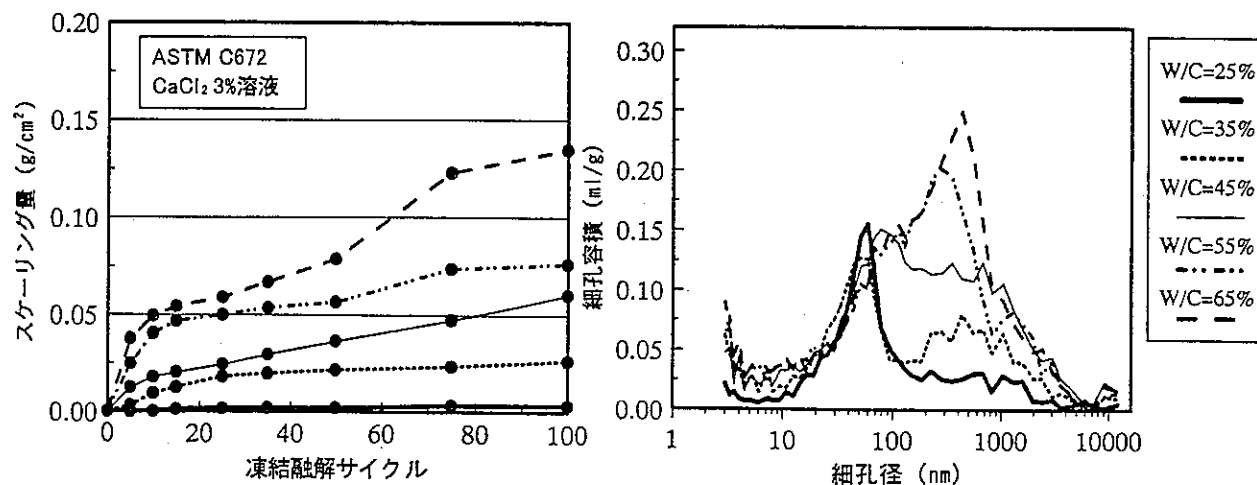


図-4 ASTM C 672 試験法による試験結果の一例⁵⁾

一般的にはスケーリング量を計測している。この試験法における試験結果の一例を図-4⁵⁾に示す。

このように、この試験法は1面に注目した耐凍害性評価法であり、多くの実構造物が受ける凍結融解作用を良くシミュレートしている。

しかし、この試験法では1日1サイクルしかできないため、結果が得られるまで長期間を要する欠点がある。

3 1面凍結融解試験法の検討

そこで、比較的短期間で結果を得ることができる室内促進試験方法（1面凍結融解試験法）について検討を行った。

3.1 概要

試験装置を図-5に示す。冷却された凍害試験機内に供試体と直径14cmの赤外線ライトを設置し、融解行程時はライトを点灯、凍結行程時は消灯させる。連続して凍結融解試験が行えるようにするためにタイマーを取り付け、ライトが一定間隔で点灯・消灯を繰り返すことができるようにした。また融解行程時に、供試体上面から内部へ熱を面的に均一に伝達させるために筒を取り付けた。

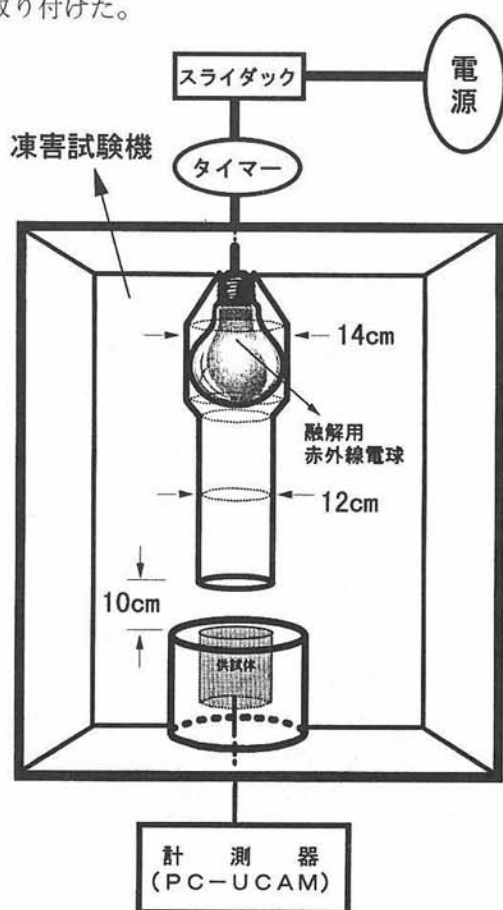


図-5 試験装置

供試体型枠を図-6に示す。供試体の寸法は $\phi 10 \times 10$ cmとした。供試体上面のみに凍結融解作用を与えるには、上面以外の面を断熱材で隙間なく覆わなければならない。このため、あらかじめ断熱材を $\phi 10 \times 10$ cmにくりぬき、その中にコンクリートを打設して供試体を作製することにした。コンクリートは水セメント比65%、細骨材率50%のプレーンコンクリートとした。粗骨材の最大寸法は10mmである。

供試体を図-7に示す。上面から凍結融解作用を受けた供試体の内部温度の変化を調べるため、供試体上面および深さ0.1cm, 0.5cm, 1.0cm, 2.0cmの位置

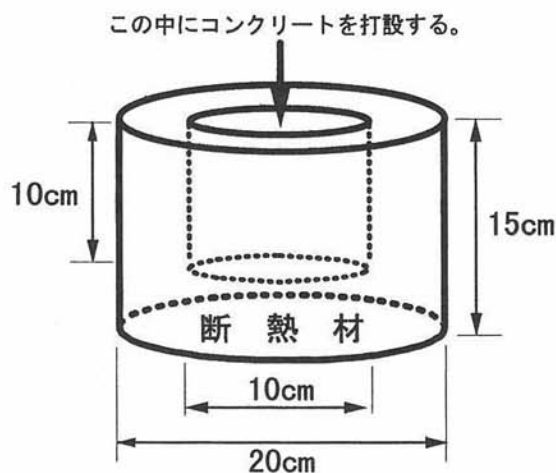


図-6 供試体型枠

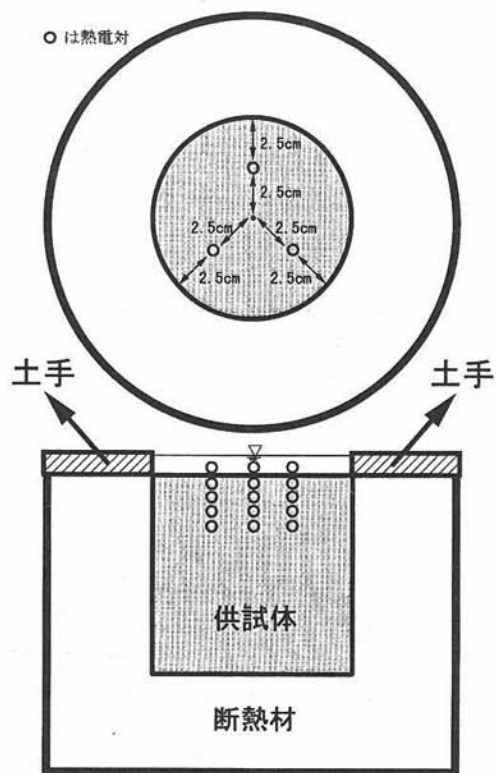


図-7 供試体

に熱電対をそれぞれ3点ずつ、計25点設置、埋設した。上面に試験水を張るために、図に示すようにエポキシ樹脂を用いて土手を設置した。

3. 2 試験

試験は最低温度 -10°C 、最高温度 5°C となるように、凍害試験機内温度を -10°C 、ライトの電圧を50Vに設定し、凍結6時間、融解1時間15分、計7時間15分を1サイクルとして30サイクル行った。試験水は水道水とした。10, 20, 30サイクル終了時に、供試体上面状況の写真撮影を行った。



写真-4 試験装置と供試体

3. 3 試験結果

一般に、凍結融解作用を受けたコンクリートが膨張収縮挙動を示すのは、凍結行程に切り替わってコンクリート中に含まれる水分が凍結して膨張し、それによる膨張圧がコンクリート内部で生じるためと説明されている^{6) 7)}。

そこで、融解行程から凍結行程に切り替わった直後

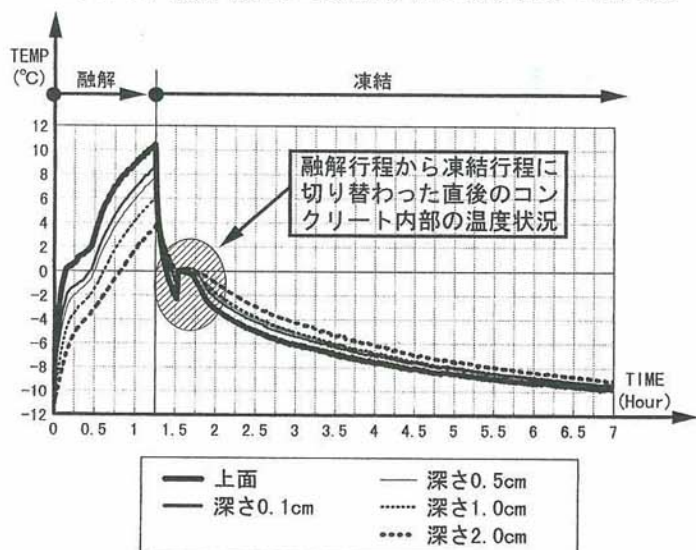


図-8 1面凍結融解試験の温度データ(1サイクル目)

の温度状況（図-8グラフの斜線部）に着目し、劣化が進行するにつれて、この状況がどのように変化してゆくのかを調べた。

3. 3. 1 健全なコンクリートが凍結融解作用を受けた場合の温度変化

写真-5に0サイクル目の（凍結融解作用を受けていない）供試体の上面写真を、図-9に1サイクル目において、融解行程から凍結行程に切り替わった直後の供試体内部の温度変化を示す。

①（TIME=1.25h）で、融解行程から凍結行程に切り替わると、 -10°C の冷気の影響で上面温度が急激に低下するが、内部の温度は遅れて低下し、上面と深さ2.0cm面で最大 2.3°C （*印）の温度差が生じた。

②（TIME=1.51h）で、上面温度が 2.5°C 上昇した。これは次式に示すように、水が凍結するときは潜熱が発生するためである⁸⁾。

$$\text{H}_2\text{O}(\text{liquid}) = \text{H}_2\text{O}(\text{solid}) + 1.44\text{kcal} \quad (1)$$

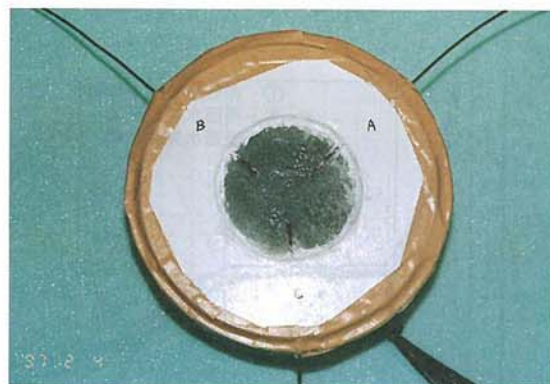


写真-5 0サイクル目の上面状況

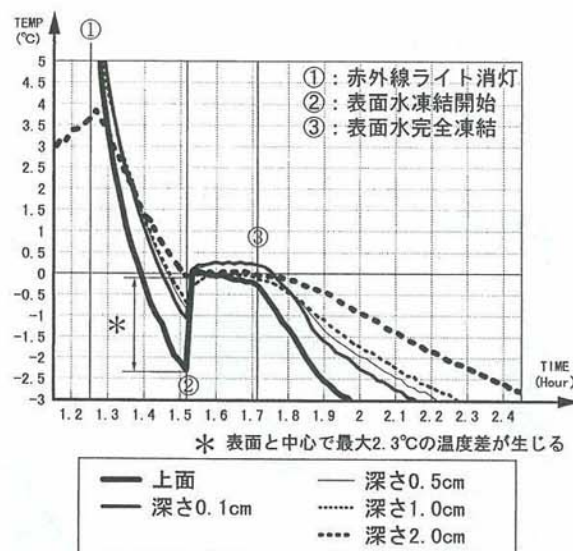


図-9 融解から凍結に切り替わった直後の温度変化図(1サイクル目)

よって、このときに試験水は凍結を開始したと判断でき、①～②間の約15分間、コンクリート上面に張った試験水およびコンクリート中の水分は、未凍結であると考えられる。

温度がしばらく停滞した後、③ (TIME=1.71 h) から再び上面温度が低下し、同時に内部温度も低下した。温度の停滞は、潜熱の発生と冷氣による冷却がバランスしているためと考えられ、②～③間は上面に張った試験水およびコンクリート中の水分は凍結水と未凍結水が混在している状態であると判断できる。

③で発熱反応が終了し、内部熱量が一斉に奪われていることから、このとき上面に張った試験水は完全に凍結し、上面は水で完全にシールされた状態になったものと判断することができる。

3. 3. 2 軽度の劣化が生じたコンクリートが凍結融解作用を受けた場合の温度変化

図-10に、5サイクル目において融解行程から凍結行程に切り替わった直後の供試体内部の温度変化を示す。

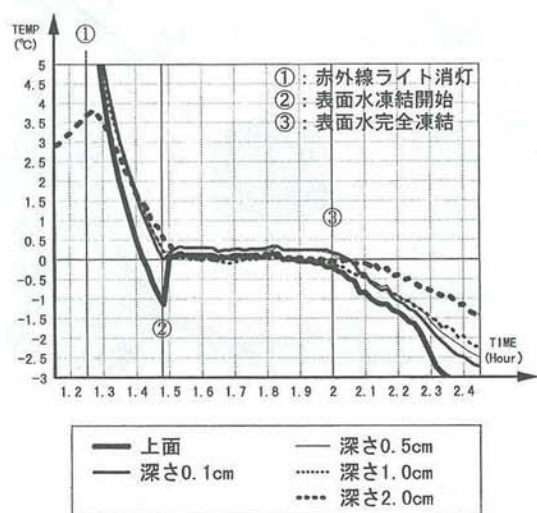


図-10 融解から凍結に切り替わった直後の温度変化図 (5サイクル目)

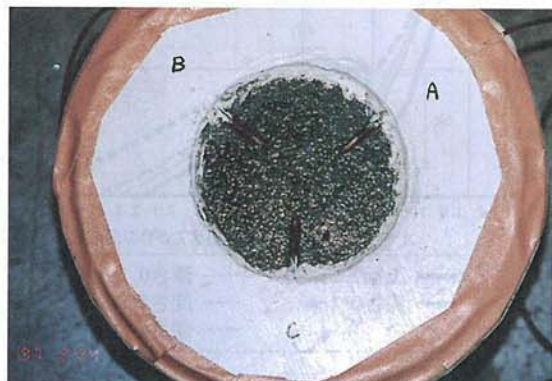


写真-6 10サイクル目の上面状況

①から②にかけての温度低下が、1サイクル目データより約1℃小さくなった。これは凍結融解試験によって上面部に生じたクラックの影響で、上面部の熱伝導性が低下したためと考えられる。

写真-6に10サイクル目の上面状況写真を示す。この写真から、軽度の剥離痕が確認できる。

3. 3. 3 劣化が進行したコンクリートが凍結融解作用を受けた場合の温度変化

図-11に、15サイクル目において融解行程から凍結行程に切り替わった直後の供試体内部の温度変化図を示す。

1サイクル目と5サイクル目では融解行程時、最高3.8℃まで上昇した深さ2.0cmにおける温度が、15サイクル目の融解行程時では5℃近くまで上昇した。これは融解された表面水が内部に発生したクラック部分に供給されたためであると考えられる。この結果、コンクリートが凍結行程から融解行程に移行した場合、コンクリート内部の温度は上昇しやすい傾向にあることがわかった。

①から②にかけての温度低下が、5サイクル目データよりさらに小さくなっていることから、供試体の劣化がさらに進行し、熱伝導性もさらに低下したと判断できる。

②で試験水が凍結を開始しているが、このとき供試体内部温度はプラスである (*印) ことが確認できた。また③で試験水が完全に凍結し、上面が氷でシールされた状態になった後も、内部温度は1サイクル目データのように一斉に低下することではなく、③から3

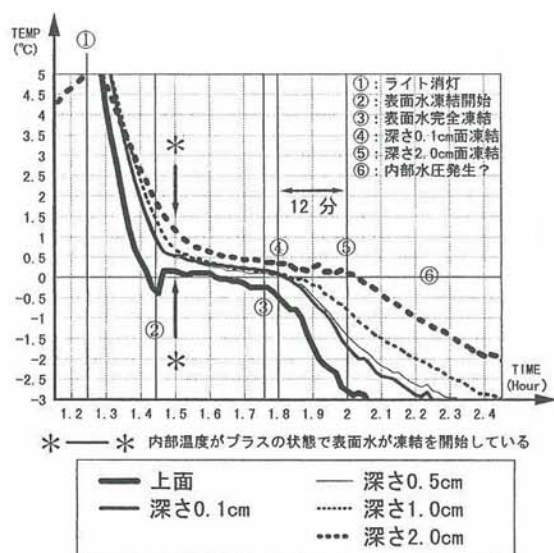


図-11 融解から凍結に切り替わった直後の温度変化図 (15サイクル目)

分後(④)に深さ0.1cmおよび0.5cmで、④から6分後に深さ1.0cmで、12分後(⑤)に深さ2.0cmでマイナスの温度になっている。

このように、融解行程から凍結行程に移行した場合、供試体の劣化が進行すると③以降は深さ方向に凍結が遅れて進行することが顕著になることが示された。

すなわち、このことは試験水が凍結して上面が氷でシールされた後も、図-12に示すようにしばらくは供試体内部の水は未凍結状態になっていると言える。

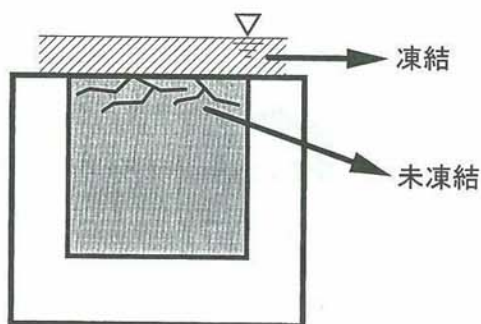


図-12 データから考察した内部状況

図-13に、20サイクル目において融解行程から凍結行程に切り替わった直後の供試体内部の温度変化を示す。この図から、15サイクル目における場合とほぼ同様の温度変化を示していることがわかる。

写真-7、8は20サイクル目における上面の状況である。表面部モルタルが供試体内部からの水圧によって押し出され、盛り上がっているのが確認できる。

これは、図-12に示した供試体内部へ供給された未凍結水が凍結する際、体積の膨張と水圧の発生によって起きたものであると考えられる。

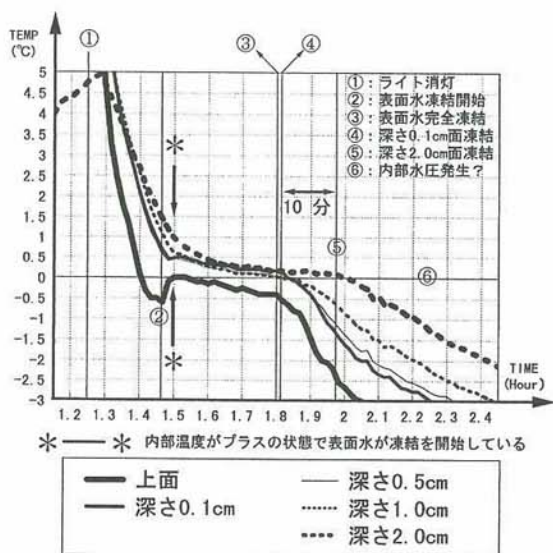


図-13 融解から凍結に切り替わった直後の温度変化図 (20サイクル目)

写真-9に30サイクル目における状況を示す。スケールリングが発生しているのがわかる。

4. おわりに

以上述べたように、凍結融解作用を受けるコンクリートは、非常に複雑な挙動を示すことから、現在われわれが用いている試験法の実際上の意味については必ずしも明瞭なものとはなっていないと言える。

しかしながら、実際の環境においてコンクリートに発生している凍害を評価するためには、様々な条件に

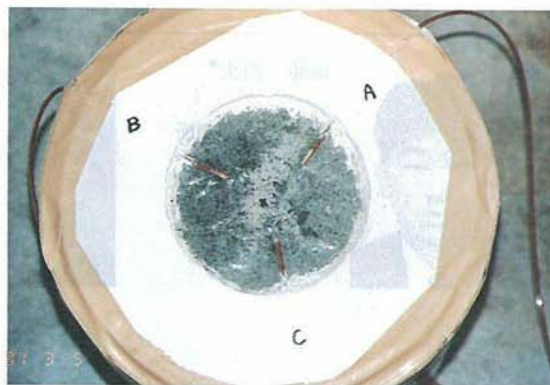


写真-7 20サイクル目の上面状況*)



写真-8 20サイクル目の上面状況 (横から撮影)

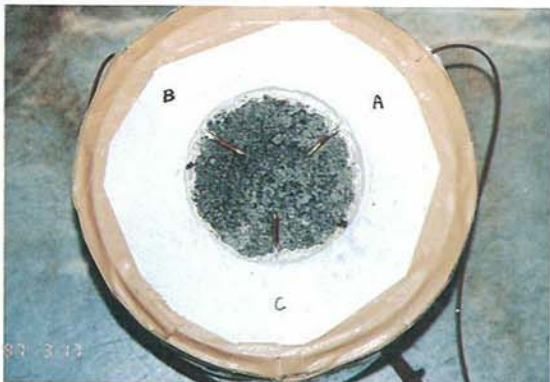


写真-9 30サイクル目の上面状況

*) 凍結行程終了後に撮影したため、上面は氷でシールされている。

おけるコンクリートの複雑な挙動を適切に把握し、それらを反映した試験法の確立が極めて重要となる。今後も、引き続き研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 高橋丞二, 堺 孝司, 山下英俊; 北海道におけるコンクリート構造物の凍害, 開発土木研究所月報, pp.29, 1995.3
- 2) 平成8年度制定, コンクリート標準示方書 規準編; pp.441, 土木学会
- 3) 渡辺 宏, 堺 孝司; 中空微小球を用いたコンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.567-572, 1994
- 4) 阿部勝彦, 堺 孝司; コンクリートのスケーリング劣化に及ぼす細孔構造の影響, 開発土木研究所月報, pp.5, 1997.1
- 5) 阿部勝彦, 堺 孝司; 凍結防止剤の作用を受けるコンクリートのスケーリング劣化に及ぼす細孔構造の影響, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 1996.
- 6) K.Sakai, N.Banthia and O.E.Gjølrv(editors); Concrete Under Severe Conditions, Environment and loading, VOLUME ONE, pp.279, E&FN SPON
- 7) 岸谷孝一, 長谷川寿夫, 西澤紀昭, 藤原忠司共著; コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 凍害, 技報堂, 1988.2
- 8) 化学; pp.84, 東京書籍, 1990



遠藤 裕丈*

開発土木研究所
構造部
材料研究室
室員



堺 孝司**

開発土木研究所
構造部長
工学博士
(前 材料研究室長)



熊谷 守晃***

開発土木研究所
構造部
材料研究室長