

論文 コンクリート中の水分凍結に関する実験的研究

松村 光太郎*1・川瀬 清孝*2・土井 希祐*3

要旨：コンクリートの凍害について、コンクリート中の水分の凍結挙動については、未だに解明されていない部分も多い。そこで、本研究では、凍結のメカニズムを把握するために、コンクリート中の水分が凍結していく挙動に着目し、「コンクリート自由水の凍結温度実験」と、「外気温の変化によるコンクリート内部温度の追従性実験」とに分けてそれぞれ検討を行い、併せて外気温とコンクリートの凍結温度との関係について総合的な解析を行った。その結果、コンクリート中の水分が凍結する可能性がある外気温の変動を把握できた。

キーワード：凍害, 凍結, 凍結融解作用, 外気温, コンクリート自由水

1. はじめに

凍害は、コンクリート中の水が凍結融解作用を受けることにより発生する。コンクリート中で、凍結融解作用が繰り返して起こると、コンクリートにはひび割れが発生し、劣化が加速され崩壊に至る。この要因としては、大別すると、地域の気象条件による外的要因と、コンクリート中の水の存在による内的要因とがある。特に、コンクリート中の水の凍結挙動との関係については、未だに解明されていない部分も多い。

そこで、本研究では、凍結のメカニズムを把握するために、コンクリート中の水が凍結する挙動に着目し、外気温とコンクリートの凍結温度との関係について検討することを目的とする。

2. 実験概要

コンクリートの内部は、多孔質構造である。そのため、コンクリート内部の凍結問題に関して、毛管凝縮理論が用いられる。これは、コンクリート内部の空隙にある水が、温度降下にしたがって、空隙の大きいものから微細なものへと順に凍結するため、細孔径内の水は、凝固点降下を起こすという理論である。⁶⁾しかし、

コンクリートの孔径寸法は、約 $10 \sim 10^5 \text{ \AA}$ とさまざまであり、広い範囲に分布している。⁶⁾そこで、凍害の危険性を考慮して、細孔径による凝固点降下以前の、ごく初期段階の凍結を考えた。

図-1のように、コンクリート中の水(自由水)が凍結する際の温度は、コンクリート温度と深い関係があり、また、コンクリート温度は外気温と関係がある。そのため、これら2通りの関係をそれぞれ調べることによって、最終的には外気温とコンクリート中の水の凍結温度との関係が導き出せると考えた。そこで、本研究では、「3. コンクリート自由水の凍結温度実験」と「4. 外気温の変化によるコンクリート内部温度の追従性実験」及び、「5. コンクリート温度の変化による自由水温度の追従性実験」に分けてそれぞれ検討を行い、併せて総合的な解析を行った。

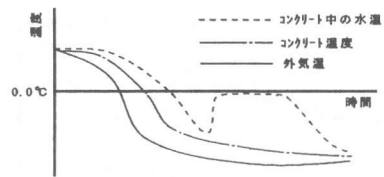


図-1 外気温と凍結温度との関係(概念図)

*1 新潟大学大学院生	自然科学研究科環境科学専攻	工修(正会員)
*2 新潟大学教授	工学部建設学科	工博(正会員)
*3 新潟大学講師	工学部建設学科	工博(正会員)

3. コンクリート自由水の凍結温度実験

3.1 実験目的

大気圧(1気圧1013hPa)下におけるコンクリート温度とコンクリート中の水の凍結温度との関係を実験的に明らかにすることを目的とする。

3.2 実験方法

コンクリート中の自由水は、コンクリート中から抽出することは困難であるため、本実験では、15φ×20cmのプラスチック容器にコンクリート片(10φ×20cm)を入れ、これに蒸留水を満たして一定期間浸せきして、そこから得られた水を自由水と同等品と考えた。なお、浸せき期間により、コンクリートからの抽出物の量が異なるため、浸せき期間を1週、2週、4週(1週、2週、4週浸せき水)としたもの、および、砕いたコンクリートを4週浸せきさせたもの(砕粉浸せき水)の4種類を試料として用いた。これらの溶液(以後、水溶液と呼ぶ)を図-2のような試験管に注入し、その試験管を図-3のようなインキュベータ槽(変温式恒温槽)内に設置して実験を行った。また同時に、ICP発光分光分析装置を用いて、水溶液の成分および定量を分析した。

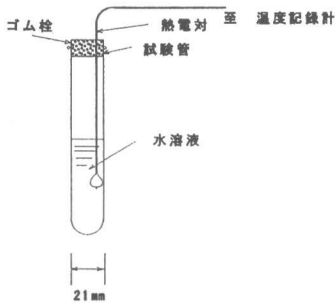


図-2 水溶液の凍結装置部分

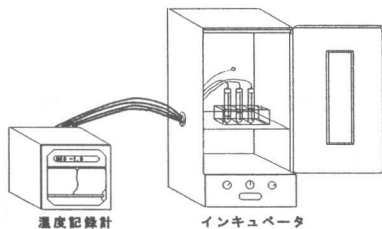


図-3 実験装置の全景

実験は、インキュベータ槽内をコンクリート温度と仮定し、図-4のように初期温度を+2.0

℃とした。また、水溶液の凍結温度は、予備実験より-4.0℃付近と判明していたので、装置の誤差を考慮して、最低温度を-3.8℃~-4.2℃の範囲で表-1に示す値として実験を行った。

表-1 実験計画

要因	水準
水溶液の種類	1週・2週・4週・砕粉浸せき水
水溶液の量	3cc・6cc・9cc
温度下降勾配	1.0℃/15分
実験継続時間	720分
初期温度	+2.0℃
最低温度	-3.8・-3.9・-4.0・-4.1・-4.2℃

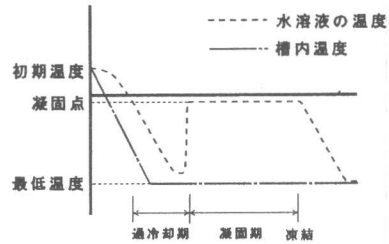


図-4 槽内温度と水温の関係(概念図)

3.3 実験結果

水溶液の成分および定量分析結果を、表-2に示す。

表-2に示すように、浸せき期間による差はあまり見られなかった。よって、本研究では、水溶液の種類による差はないと考えた。

また、水溶液の凍結温度測定の結果の例を図-5~図-6に示す。

表-2 水溶液の成分・定量分析結果

水溶液の種類	含有成分	定量
1週浸せき水	C a	5.28×10^3 ppm
2週浸せき水	C a	6.01×10^3 ppm
4週浸せき水	C a	6.31×10^3 ppm
砕粉浸せき水	C a	4.71×10^3 ppm

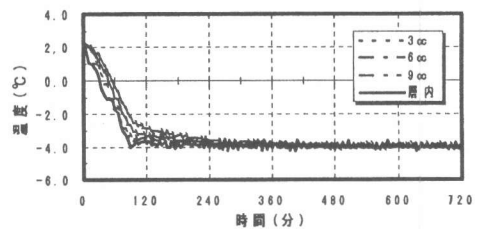


図-5 最低温度-3.9℃(2週浸せき水)

図-5に示すように、槽内の最低温度が-3.9℃以上では、最低温度を12時間継続しても水溶液は過冷却期が続き、凍結しなかった。

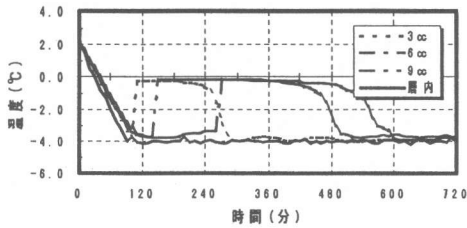


図-6 最低温度-4.0°C(2週浸せき水)

また、図-6に示すように、最低温度を-4.0°C以下にすると、水溶液は過冷却状態から急激な温度上昇を伴って凝固点に達し、凝固期が終了すると凍結した。なお、凝固点は-0.2~-0.3°Cであった。

次に、水溶液が凍結に要した時間を、槽内温度が0°C以下になってから、図-4に示す凝固期が終了するまでの時間とし、表-3に示す。なお、表-3に示すように、水溶液の種類による凍結温度の差は、明確には認められなかった。

表-3 凍結に要した時間(分)

最低温度	水溶液の種類	水溶液の量		
		3 cc	6 cc	9 cc
-3.8°C	1週浸せき水	-	-	-
	2週浸せき水	-	-	-
	4週浸せき水	-	-	-
	砕粉浸せき水	-	-	-
-3.9°C	1週浸せき水	-	-	-
	2週浸せき水	-	-	-
	4週浸せき水	-	-	-
	砕粉浸せき水	-	-	-
-4.0°C	1週浸せき水	-	-	-
	2週浸せき水	200	450	380
	4週浸せき水	250	-	-
	砕粉浸せき水	310	400	380
-4.1°C	1週浸せき水	360	-	-
	2週浸せき水	200	400	460
	4週浸せき水	205	290	-
	砕粉浸せき水	290	360	450
-4.2°C	1週浸せき水	360	-	-
	2週浸せき水	250	450	480
	4週浸せき水	300	315	-
	砕粉浸せき水	315	380	450

注) 表内の-は、凍結しなかったことを示す。

3.4 考察

実験結果より、コンクリート中の水溶液が凍結するときのコンクリート温度の上限は-4.0°Cと考えられる。よって、水溶液の凍結時間は、槽内温度が-4.0°C以下になってから、凝固期を終了するまでの時間とすることができる。この結果を表-4に示す。

表-4 凍結時間(分)

最低温度	水溶液の種類	水溶液の量		
		3 cc	6 cc	9 cc
-4.0°C	1週浸せき水	-	-	-
	2週浸せき水	140	390	320
	4週浸せき水	190	-	-
	砕粉浸せき水	250	340	320
-4.1°C	1週浸せき水	300	-	-
	2週浸せき水	140	340	400
	4週浸せき水	145	230	-
	砕粉浸せき水	230	300	390
-4.2°C	1週浸せき水	300	-	-
	2週浸せき水	190	390	420
	4週浸せき水	240	255	-
	砕粉浸せき水	255	320	390

注) 表内の-は、凍結しなかったことを示す。

4. 外気温の変化によるコンクリート内部温度の追従性実験

4.1 実験目的

3. コンクリート自由水の凍結温度実験から、水溶液が凍結するときのコンクリート温度の上限は-4.0°Cであることが判明した。

そこで、本実験では、図-7に示すように、外気温が降下して-4.0°Cに達した時からコンクリート温度が-4.0°Cに達するまでに要する時間(以後、遅れ時間Iと呼ぶ)を求めることを目的とする。

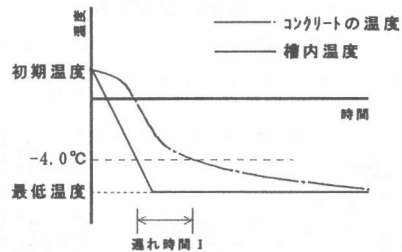


図-7 外気温とコンクリート温度との関係(概念図)

4.2 実験計画

試験体には水セメント比65%、スランプ18cmのコンクリートを用い、図-8のように10×10×30cmの角柱体とした。また、外壁面を想定したため、打込み面(10×30cm)を残して断熱材で覆った。なお、試験体の打込み面には、深さ方向(5mm・15mm・25mm・50mm)に熱電対を埋め込み、コンクリート温度を測定した。試験体は3個とし、図-9に示すようにインキュベータ槽内に

配置し、それぞれの値を平均値で表すことによって槽内の温度分布の影響を小さくした。

4. 3 実験方法

実験では、インキュベータ槽内温度を外気温と仮定し、槽内温度を変化させてコンクリート温度を測定した。槽内温度の変動は初期温度を $+2.0^{\circ}\text{C}$ とし、温度降下勾配は、3. コンクリート自由水の凍結温度実験同様 $1^{\circ}\text{C}/15\text{分}$ とした。なお、最低温度は予備実験の結果を基に、 $-4.5\sim-7.0^{\circ}\text{C}$ に変化させた。

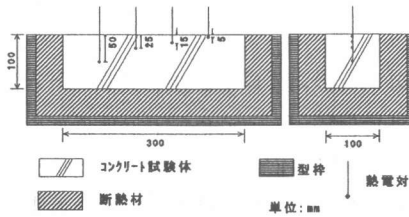


図-8 試験体の断面図

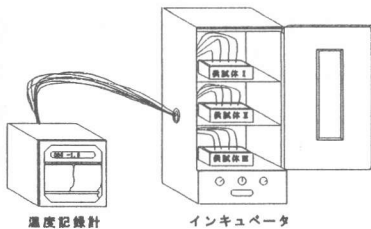


図-9 実験装置の全景

4. 4 実験結果

実験結果の例を図-10～図-14に示す。

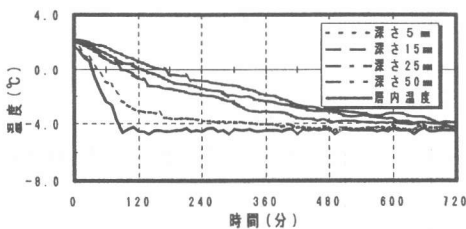


図-10 槽内最低温度 -4.5°C (平均)

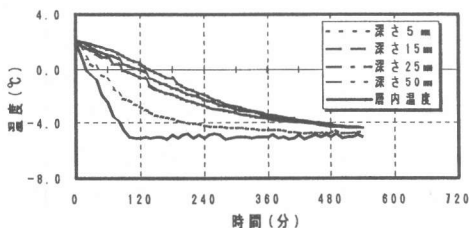


図-11 槽内最低温度 -5.0°C (平均)

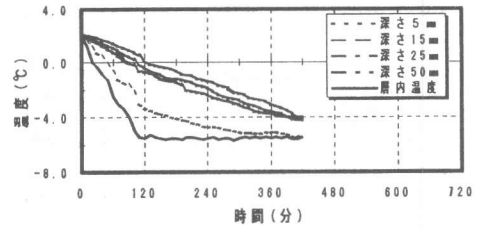


図-12 槽内最低温度 -5.5°C (平均)

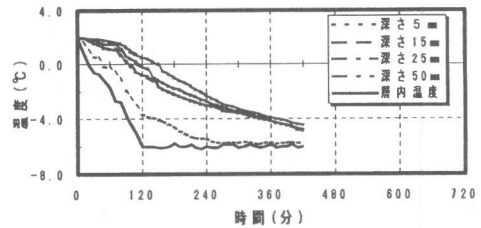


図-13 槽内最低温度 -6.0°C (平均)

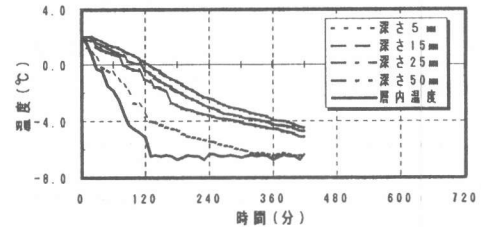


図-14 槽内最低温度 -6.5°C (平均)

図-10～図-14に示すように、外気温の変化に対してコンクリート内部(深さ方向)の温度分布は大きいので、ここでは、遅れ時間Iを外気温の変動に一番近い深さ5mmの遅れ時間とした。その結果を表-5に示す。

また、深さ方向の温度分布の値は、今後の研究(深さ方向の凍結)に活用する。

表-5 遅れ時間I (分)

最低温度	深さ			
	5mm	15mm	25mm	50mm
-4.5°C	240	480	550	600
-5.0°C	120	320	340	360
-5.5°C	80	290	300	320
-6.0°C	60	250	260	280
-6.5°C	40	200	250	280
-7.0°C	40	150	200	230

5. コンクリート温度の変化による自由水温度の追従性実験

5. 1 実験目的

本実験では、図-15に示すように、4. 外気温の変化によるコンクリート内部温度の追従性

実験で求めたコンクリート温度(深さ5mm)の降下勾配に対するコンクリート自由水の凍結時間(以後、遅れ時間Ⅱと呼ぶ)を求めることを目的とする。

5.2 実験方法

槽内温度の温度変化は、4. 外気温の変化によるコンクリート内部温度の追従性実験で得られた深さ5mm位置のコンクリート温度の勾配と同一とし、実験を行った。なお、水溶液の量は3ccを3本用いた。最低温度は、-4.5・-5.0・-5.5・-6.0・-6.5℃とした。また、実験装置、水溶液の種類、および初期温度は、3. コンクリート自由水の凍結温度実験と同様とした

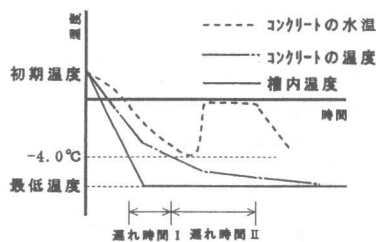


図-15 コンクリート温度の変化による自由水温度の追従性実験の概念図

5.3 実験結果

実験結果の例を、図-16～図-17に示す。

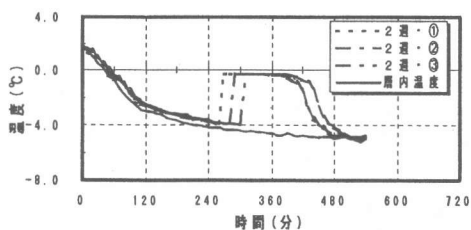


図-16 最低温度-5.0℃(2週浸せき水)

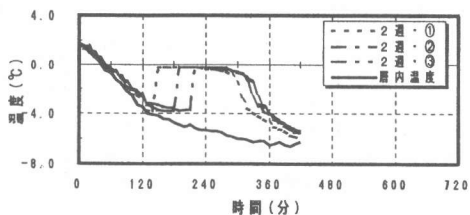


図-17 最低温度-6.5℃(2週浸せき水)

ここで、図-15に示す遅れ時間Ⅱは、表-6に示すようになり、ばらつきはあるものの、水溶液の種類による差は見られなかった。

表-6 遅れ時間Ⅱ(分)

水溶液の種類		最低温度(°C)				
		-4.5	-5.0	-5.5	-6.0	-6.5
1週浸せき水	①	-	-	-	-	-
	②	-	-	-	-	-
	③	-	-	-	-	-
	平均	-	-	-	-	-
2週浸せき水	①	180	180	150	140	140
	②	210	180	160	180	160
	③	190	200	170	180	160
	平均	193	186	160	166	153
4週浸せき水	①	270	200	150	170	160
	②	-	180	150	180	180
	③	230	240	160	190	180
	平均	-	206	153	180	173
砕粉浸せき水	①	-	-	150	140	210
	②	-	-	160	150	230
	③	230	210	160	190	210
	平均	-	-	156	160	217

注)表中の-は凍結しなかったことを示す。

6. 考察

以上の実験結果より、実際のコンクリートの凍結時における外気温の影響について、次のような検討を行った。

3. コンクリート自由水の凍結温度実験より、水溶液が凍結するコンクリート温度の上限は、-4.0℃となり、5. コンクリート温度の変化による自由水温度の追従性実験より、凍結するまでの時間は、凍結の危険を想定して、それぞれの最短時間を遅れ時間Ⅱと考えた。また、4. 外気温の変化によるコンクリート内部温度の追従性実験より、外気温が-4.0℃を下回ってから、コンクリート温度が-4.0℃になるまでの遅れ時間Ⅰは、凍結の危険を想定して、最短時間である深さ5mm位置と考えた。よって、実験における最低温度に対する凍結するまでの時間は、それぞれの合計(遅れ時間Ⅰ+Ⅱ、以後、遅れ時間と呼ぶ)で表-7中に示すようになる。よって、コンクリート中の水溶液は、外気温が表-7の時間継続すれば凍結する可能性がある。

表-7 遅れ時間(分)

最低温度:°C	-4.5	-5.0	-5.5	-6.0	-6.5
遅れ時間Ⅰ	240	120	80	60	40
遅れ時間Ⅱ	193	186	153	160	153
遅れ時間	433	306	233	220	193

ところで、外気温の変動を1日周期のサインカーブで近似すると、図-18に示すように、サ

インカーブの時間軸が仮想外気温の平均温度(α °C), 仮想外気温の最低温度が $-A$ °Cの時, 時間 t に対する仮想外気温 θ_t は式(1)で表される。

この仮想外気温が -4.0 °Cを下回るP点と, 実験の最低温度 J °Cに戻る点Qまでの時間 K を実験値と比較した。なお, 仮想外気温の変動は, 1日(24時間以内)で凍結および融解を1回発生する場合と限定した。すなわち, 水溶液の融解温度を 0.0 °Cと仮定し, それぞれの場合で, 最高温度が 0.0 °C以上になるように仮想外気温の平均温度の範囲を設定した。

$$\theta_t = (A + \alpha) \sin\left(\frac{2\pi}{1440} t\right) + \alpha \quad (1)$$

ここで, θ_t : 仮想外気温(°C)
 $-A$: 仮想外気温の最低温度(°C)
 α : 仮想外気温の平均温度(°C)
 t : 時間(分)

これらの結果の一部を表-8に示す。表-8から, 仮想外気温の最低温度が -5.2 °Cでは, 時間 K が実験値を下回るため, 凍結しないことがわかる。また, -5.3 °Cでは, 一部の時間 K が実験値を上回るため, 凍結の危険を想定し, 凍結すると見なすことができる。

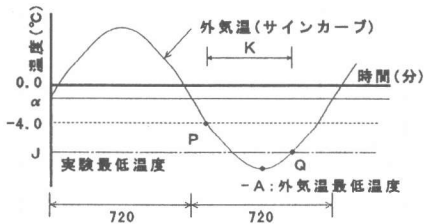


図-18 外気温のサイクルモデル

表-8 時間 K と遅れ時間との比較(分)

仮想外気温	実験の最低温度 J (°C)				
	α	-4.5	-5.0	-5.5	-6.0
-5.2	0.0	279×	223×	-	-
	-1.0	312×	249×	-	-
	-2.0	360×	287×	-	-
-5.3	0.0	291×	242×	-	-
	-1.0	325×	269×	-	-
	-2.0	374×	310○	-	-
-5.4	0.0	303×	258×	-	-
	-1.0	337×	287×	-	-
	-2.0	387×	329○	-	-
-6.0	0.0	358×	327○	287○	193×
	-1.0	394×	359○	315○	212○
	-2.0	445○	406○	356○	240○
	-3.0	522○	475○	416○	282○

注)表中の○は凍結可能を, ×は凍結不可能を示す。

7. まとめ

本研究において得られた成果を要約すると, 以下のものである。

- ①コンクリート中の水溶液は, コンクリート温度 -4.0 °C以下の時に凍結した。また, 凝固点は -0.2 ~ -0.3 °Cであった。
- ②外気温が -4.0 °C以下になってからコンクリート温度が -4.0 °Cに到達するまでの遅れ時間 I は, コンクリート内部の温度分布は深さ方向に大きいことがわかった。
- ③コンクリート温度が -4.0 °C以下になってから, コンクリート中の水溶液が凍結するまでの遅れ時間 II は, 水溶液の種類による差はあまり見られなかった。
- ④まとめ②③より, 外気温が, -4.5 °Cを433分, -5.0 °Cを306分, -5.5 °Cを233分, -6.0 °Cを220分, あるいは, -6.5 °Cを193分継続すると, コンクリート中の水溶液は凍結する可能性がある。
- ⑤1日の外気温の変化をサインカーブで近似して検討すると, コンクリートの表面(深さ5mm)では, 外気温が最高温度 0.0 °C以上で, 最低温度が -5.3 °C以下の温度になるときに, コンクリート中の水溶液は凍結すると考えられる。

参考文献

- 1) 松村光太郎・鷹巣正典・川瀬清孝: コンクリートの凍害に関する研究 その2, 日本建築学会北陸支部研究報告集, pp183-186, 1994.7
- 2) 鷹巣正典・松村光太郎・川瀬清孝: コンクリートの凍害に関する研究 その3, 日本建築学会北陸支部研究報告集, pp54-57, 1996.7
- 3) 松村光太郎・塚本和一・原田佳和・川瀬清孝: コンクリートの凍害に関する研究, その4 日本建築学会北陸支部研究報告集, pp37-40 1997.7
- 4) 松村光太郎・塚本和一・原田佳和・川瀬清孝: コンクリート中の水分凍結に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1 材料施工, pp161-162, 1997.9
- 5) 樋口泉: 多孔体の毛細管に分散した物質の性質と毛管構造(I), 表面, Vol. 6, No.3, pp168-176, 1968
- 6) 岸谷孝一・西澤紀昭他編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害, 技法堂出版(株) 1988
- 7) 福迫尚一郎・稲葉英男: 低温環境下の伝熱現象とその応用 (株)養賢堂 1996
- 8) 実験化学便覧編集委員会編: 実験化学便覧 共立出版(株) 1954