

論文 札幌市に屋外暴露したコンクリート内部の温湿度変化

長谷川 拓哉^{*1}・千歩 修^{*2}

要旨：積雪寒冷地でのコンクリート表層の温湿度の変化を明らかにすることを目的として、小型温湿度センサーを W/C25%, 45%, 55%のコンクリートに設置した試験体を札幌市に屋外暴露し、1年間温湿度の測定を行った。その結果、コンクリート温度に対する水セメント比の影響は小さいこと、コンクリート表層の相対湿度は、1年を通して水セメント比が大きいものほど大きいこと、コンクリート表面より 15mm の相対湿度は、1年を通して水セメント比が大きいものほど大きいこと等が知見として得られた。

キーワード：暴露試験, 高強度コンクリート, コンクリート温度, 相対湿度, 凍結融解

1. はじめに

コンクリート内部の温湿度は、鉄筋コンクリート造構造物の劣化現象に対して大きな影響を及ぼしていると考えられる。しかし、自然環境下でのコンクリート内部の温湿度の実測例^{1)~4)}は、数が少ないのが現状である。積雪寒冷地を対象とした場合、近年、濱らによって、高分子温湿度センサーを埋め込んだコンクリート試験体を屋外暴露し、札幌、旭川、室蘭の3都市における温湿度の測定を行った結果が報告されている¹⁾。しかし、水セメント比による違い、とりわけ高強度コンクリート内部の温湿度の変化は明らかとなっていない。

本報では、積雪寒冷地でのコンクリート表層の温湿度の変化を明らかにすることを目的として、小型温湿度センサーをコンクリートに設置した試験体を札幌市に屋外暴露し、1年間、温湿度を実測した結果を報告するものである。

2. 実験の概要

使用したコンクリートの調合および基礎性状を表-1に示す。水セメント比 55%, 45%, 25%の3種類とした。試験体の大きさは 75×75×400mm とし、温湿度センサーは、写真-1に示す直径 15mm のボタン型のもを用いた。なお、本温湿度センサーの測定範囲は、温度が-20°C~70°C、湿度が 0%R.H.~95%R.H.となっている。温湿度センサーは、図-1に示す位置に直径 18mm、長さ 60mm の発泡スチロール棒を打設時に埋込み、硬化後これを取り除いて出来た孔から入れ、コンクリート表面から 15mm の内部に設置した。温湿度センサー設置後、発泡スチロール棒で孔を埋め、孔の上面をシーリング材によってシールした。なお、直接水に触れることを避けるため、センサー表面には透湿性防水シートを表面に貼り付けて測定した。試験体は、2週間の水中養生後、1ヵ月 20°C60%R.H.気中養生を行い、その後、2007年1月5日より屋外暴露を行った。屋外暴露は、北海道大学建

表-1 使用したコンクリートの調合及び基礎性状

W/C (%)	S/A (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (C×%)	実測Air (%)	スランプ(フロー) (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)
		W	C	S	G				
55	49.4	185	336	900	942	—	2.6	20	32.7
45	48.1	185	413	846	931	0.7	1.8	(53×53)	41.8
25	41	175	222	243	350	1.25	2.4	(55×55)	102.7

*セメント:普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³) 細骨材:勇払産陸砂(表乾密度:2.61g/cm³)
粗骨材:常磐産碎石(表乾密度:2.66g/cm³) 混和剤:高性能AE減水剤



写真-1 使用した温湿度センサー

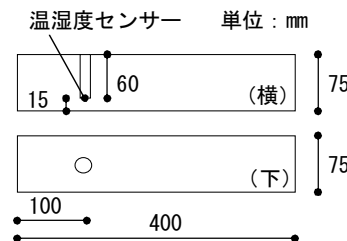


図-1 温湿度センサーの設置位置

表-2 測定日時

測定日	時刻	備考
2007年10月5日	15:00	1時間程度測定
2007年12月3日	14:00	1時間程度測定
2008年2月13日	15:00	凍結により測定困難であったため、1日室内放置後、2/14 17:00に再設置
2008年4月26日	11:00	1時間程度測定
2008年7月7日	17:00	1時間程度測定

*1 北海道大学大学院工学研究科空間性能システム専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 北海道大学大学院工学研究科空間性能システム専攻 教授 工学博士 (正会員)

築材料学実験室の屋上に水切りのよい台を設置し、その上にセンサー設置面を上面として静置した。設置場所は地上から約8mの高さとなっている。2007年8月4日より30分毎に温度・湿度の連続測定を行い、約2ヵ月毎に温湿度センサーを取り出してデータ収集を行った。データ収集日時を表-2に示す。なお、データ収集時とその前後は欠測値として扱っている。

3. 実験結果

3.1 コンクリート温度

図-2に2007年8月4日から2008年8月4日までのコンクリート温度の日平均値と日最高温度、日最低温度を示す。あわせて気象庁から発表された札幌の気温^{5), 6)}を示す。これによれば、コンクリート温度は、最高で49℃、最低で-14℃となっている。

図-3にW/C55%と45%、25%との温度差を示す。これによれば、その差は概ね±1℃であり、コンクリート温度は水セメント比によって大きな差がないことがわかる。季節による変動をみると、夏季では、55%よりも45%、25%の方が高い温度となり、冬季では、逆に低くなる傾向がみられる。これは、高い水セメント比の場合、表層の含水状態が変動しやすく、コンクリート表層の熱移動に影響したことが考えられる。しかし、その差は

±1℃程度であり、実用上、コンクリート温度に対し、水セメント比の影響は小さいと考えてよいと思われる。

ここで、コンクリート温度の推定式として、富板らによる気象因子に基づく推定式²⁾(以下「富板式」)、濱らによる熱収支式(以下「濱式」)¹⁾が提案されている。これらの式はW/Cが異なる場合の適用が明らかではないため、本測定結果を用い、その適用性について検討する。富板式は(1)式、濱式は(2)式で表わされる。

$$T_{CH} = 1.05T + 5.18S_H(1 - 0.106W) + 0.592W - 1.17 \quad (1)$$

ここに、 T_{CH} ：水平面のコンクリート温度(℃)

T ：気温(℃)， W ：風速(m/s)

S_H ：日射量(MJ/m²/hr)

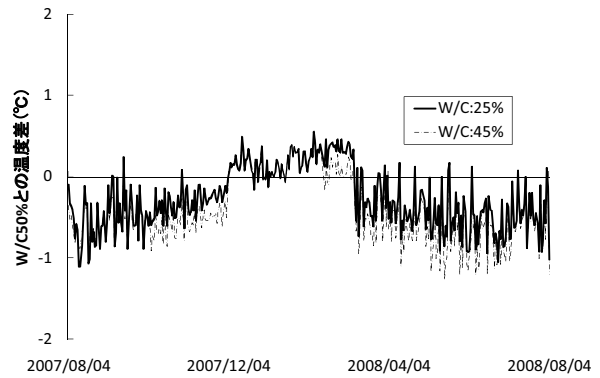


図-3 W/C50%とW/C45%、25%の温度差

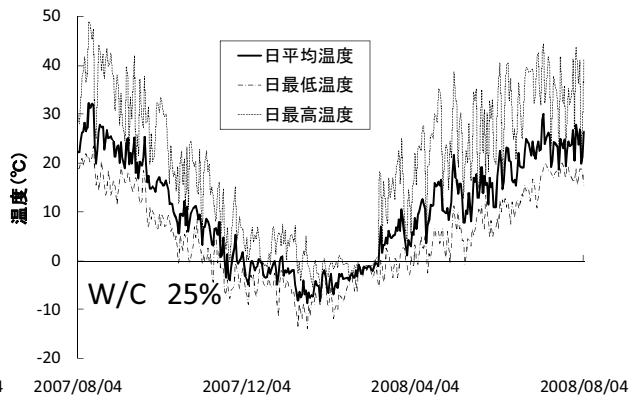
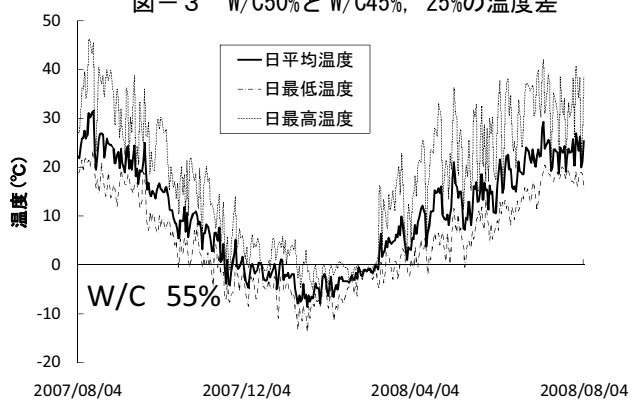
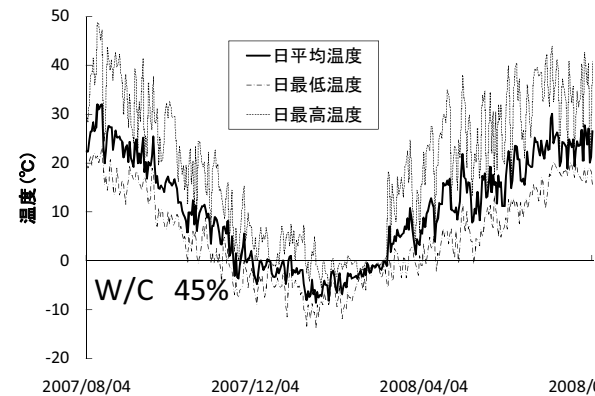
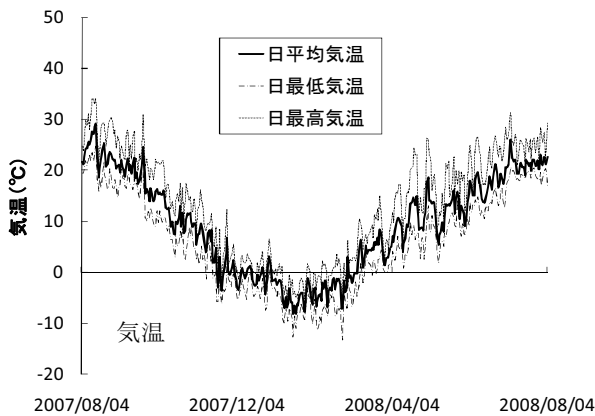


図-2 気温と各W/Cのコンクリート温度

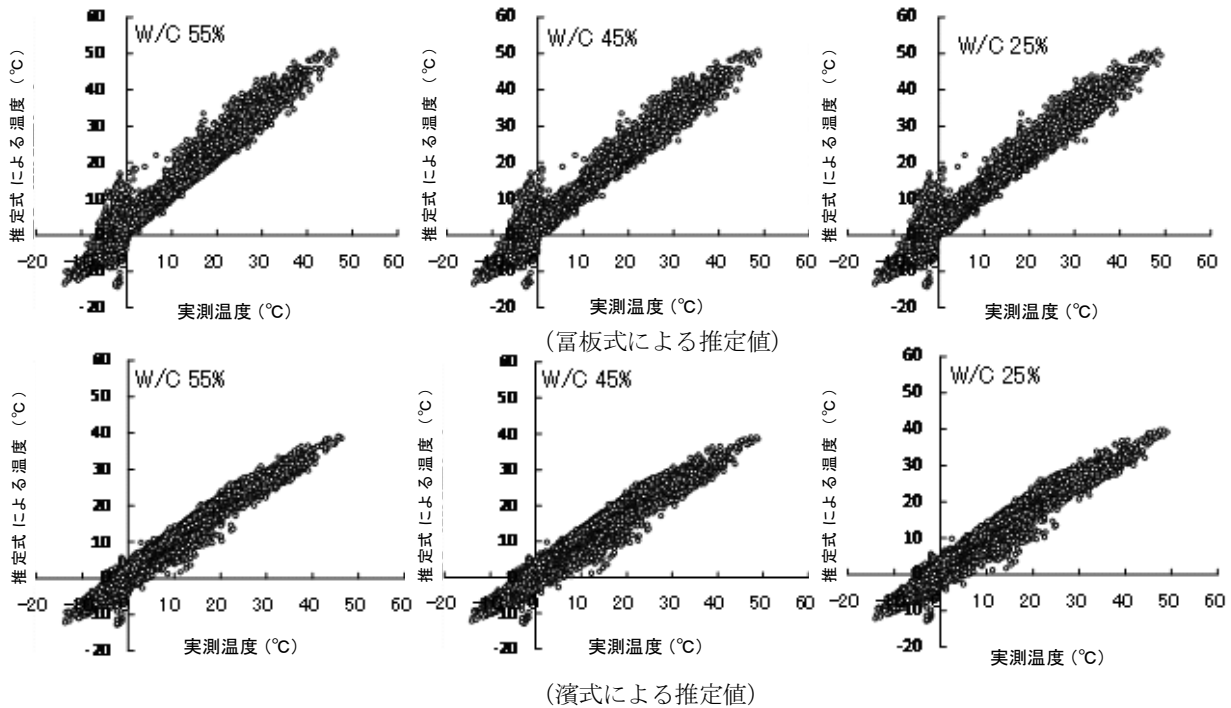


図-4 コンクリート温度の実測値と富板式と濱式による推定

$$Q_{(i-1)} + a_s \cdot J_i \cdot A = A(\theta_{s_i} - \theta_{o_i})(K_{o_i} + K_i) + Q \quad (2)$$

(i=0,1,...n)

ここに、 a_s : 日射面の日射吸収率、 J : 日射量 (W/m^2)

Q : 固体の熱量(W)、 A : 日射面の面積(m^2)

θ_s : 固体の温度($^{\circ}C$)、 θ_o : 外気温($^{\circ}C$)

K_0 : 熱伝達率($W/m^2 \cdot K$)、 K : 熱貫流率($W/m^2 \cdot K$)

(1), (2)式と、気象庁から発表されている札幌市の特別データ^{5), 6)}を用いて、コンクリート温度の推定を行った。なお、富板式に入れる風速は、札幌の測候所の風速計が57.5mの高層にあるため、風速は高さの四乗根に比例すると仮定し、本試験体の暴露場所である8mの高さの風速としている。

各水セメント比のコンクリート温度の実測値と推定値を図-4に示す。また、各推定結果の相関係数とRMSEを表-3に示す。本測定結果については、両式ともにより相関が得られている。ただし、0 $^{\circ}C$ 付近のデータはばらつきが大きくなっており、濱らが指摘している通り、凍結融解による潜熱等の影響によるものと考えられる。この結果より、水セメント比により、推定結果ごとには大きな違いが見られないことから、両式ともに高強度コンクリートを含めて、水セメント比によらず適用可能であると考えられる。

3.2 コンクリート内部の湿度

図-5に2007年8月4日から2008年8月4日までのコンクリート表面より15mm内部の湿度の日平均値と日最高湿度、日最低湿度を示す。あわせて気象庁から発表

表-3 各推定式の相関係数とRMSE

推定式	W/C	25%	45%	55%
濱式	RMSE	2.79	2.89	2.28
	相関係数	0.980	0.979	0.984
富板式	RMSE	3.53	3.43	3.93
	相関係数	0.982	0.983	0.979

された札幌の大気中の湿度^{5), 6)}を示す。測定結果には相対湿度が100%を超える値となっている場合があり、センサーの測定範囲が95%までであることを考えると、95%を超える場合、絶対値としては正しい値を示していないことが考えられる。しかし、同一条件により行った結果であるため、値の大小は正しいと判断し、以下の検討を行うこととした。また、測定を行うと、温湿度センサーを設置している孔内が乾燥し、湿度が一時的に低くなる現象がみられた。このため、測定時間前後の測定値は採用しないこととした。本センサーを用いる場合、湿度が下がらない工夫が必要と考えられる。

水セメント比の違いでは、水セメント比が高い方が年間を通して高い湿度となっていることがわかる。これは、三橋らの測定結果³⁾と同様の傾向となっており、表層の水分伝達が高水セメント比ほど大きいことが考えられる。また、全体的に緩やかに乾燥している傾向となっており、経年により乾燥が進むことが考えられる。

図-6に各水セメント比の相対湿度の日較差を示す。これによれば、最大で10%程度の日較差があり、低水セメント比ほど差が大きい結果となっている。これは、今

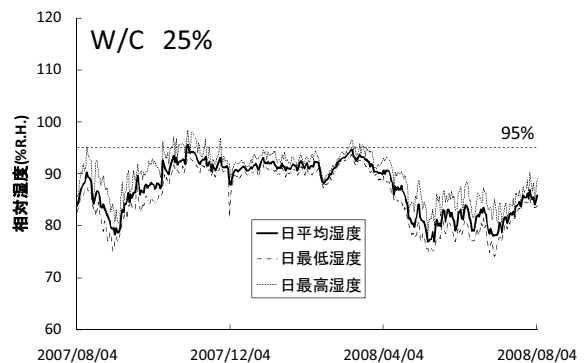
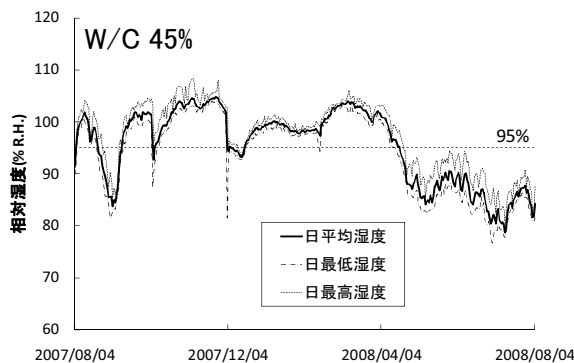
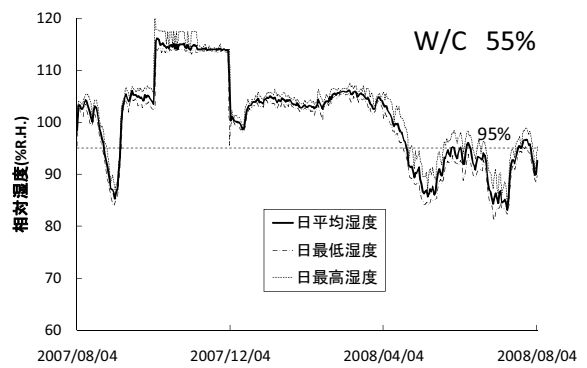
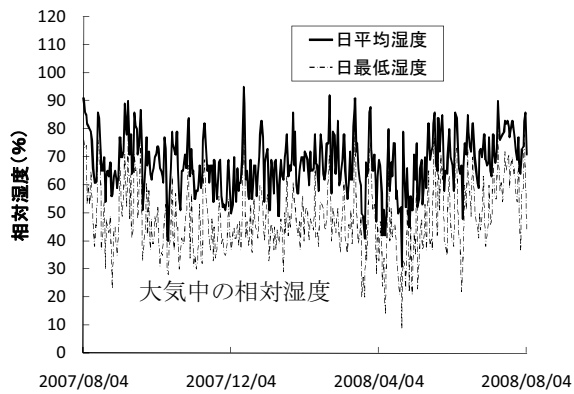


図-5 コンクリート温度の実測値と富板式と濱式による推定

回の高水セメント比の測定結果が、高い相対湿度のまま、変動が小さかったことが原因と考えられる。

ここで、乾湿繰返しによってコンクリートの耐凍害性が変化することが報告されている⁷⁾。この乾湿繰返しについて、日毎の湿度変化の繰返しが影響すると考えると、今回の結果より、低水セメント比ほど影響を受けやすいことが考えられる。しかし、断面の大きさ等、条件により結果が異なることも考えられるため、本結果だけでは明確ではなく、今後のデータの蓄積が必要と考えられる。

3.3 凍害劣化に寄与する凍結融解回数

濱らは、温湿度の実測結果から、相対湿度が低い状態で凍結融解作用を受ける場合があることを指摘している¹⁾。また、Bargerらは、相対湿度90%で平衡するよりも低い含水率である場合、凍害劣化の可能性が低下することを指摘しており⁸⁾、低い湿度で凍結融解が作用した場合、その凍結融解は凍害劣化に寄与しないことが考えられる。そこで、本測定結果から、相対湿度が低い状態で凍結融解作用を受けており、凍害劣化に寄与しない回数を除いた凍結融解回数（以下「実効凍結融解回数」）を求めることとした。

凍結融解は、-1℃で凍結、0℃で融解すると仮定し、-1℃以下が続く場合、凍結が持続しているとした。1回の凍結融解時の最低温度と最大の相対湿度を図-7に示す。前述の通り、相対湿度が100%を超えた測定値が存在し

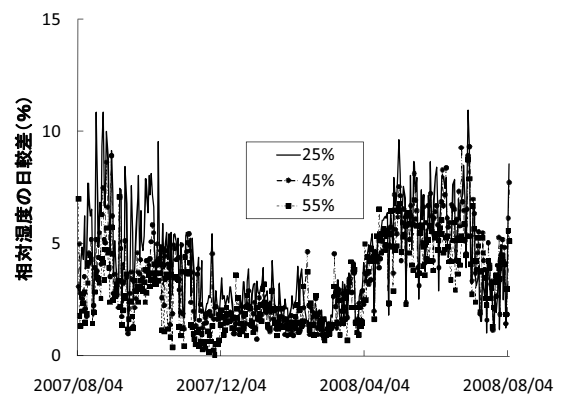


図-6 各水セメント比の湿度の日較差

ており、正しい値とは言えないが、これらの測定値が相対湿度100%であると仮定して、以下の検討を行うこととした。ここで今回は、閾値として、相対湿度95%以下であれば凍害劣化に寄与しないと仮定した。

図-7より、W/C25%ではほとんどの場合に相対湿度95%以下となった。また、W/C45%では一部が相対湿度95%以下となったが、W/C55%では全て相対湿度95%を上回る結果となった。

凍結融解回数の結果を表-4に示す。表中にASTM相当サイクル数⁹⁾(Ra_{90})を求めた結果を併せて示す。表より、水セメント比が高くなると凍結融解回数が少なくなる傾向にあった。0℃付近は凍結融解による潜熱等の影響があり、水セメント比によって温度が異なることが

あり、今回設定した凍結融解の条件では、凍結持続日数が異なることが一因と考えられる。また、W/C25%では、実効凍結融解回数、実効 R_{a90} ともに少なくなっており、凍害劣化をほとんど受けないという結果となっている。しかし、乾湿繰返し等によるコンクリートの耐凍害性の変化⁷⁾により、凍害劣化が生じることも考えられるため、本結果により W/C25%は凍害劣化を受けないとはいえないと考えられる。今後、長期的な観察によって検討することが必要と思われる。また、水セメント比によって、実効凍結融解回数が異なることから、コンクリートの耐凍害性を評価する場合、含水状態の変化を適切に考慮することが必要と考えられる。

今回の結果は一例であり、今後さらに、条件を変えて各種コンクリートの温湿度データの蓄積を行っていく必要があると考えられる。

4. まとめ

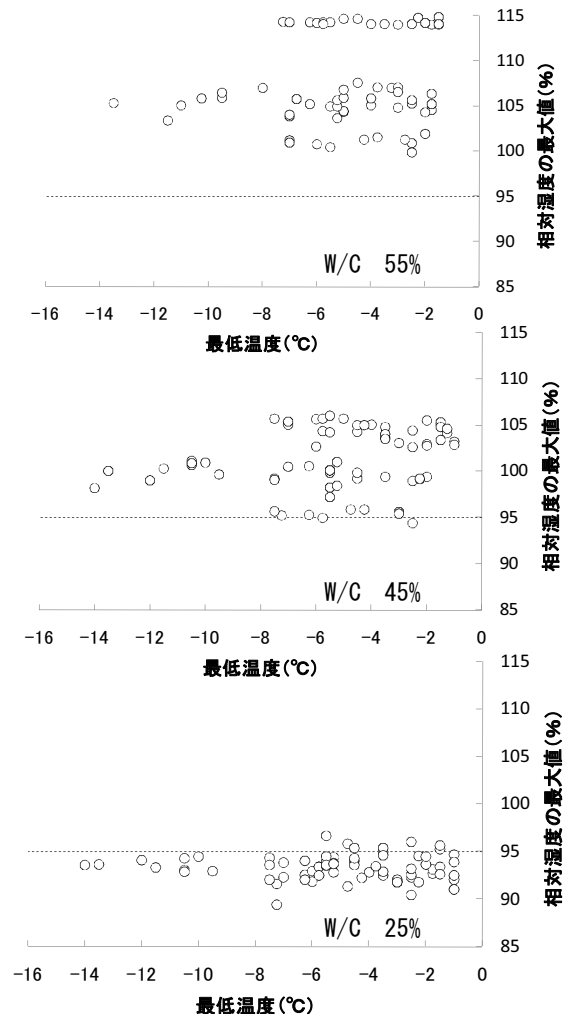
- 1) 一般に水セメント比のコンクリート温度への影響は小さい。
- 2) コンクリート表面より 15mm の相対湿度は、1年を通して水セメント比が大きいものほど大きい。
- 3) 屋外暴露して2年程度の W/C25%のコンクリートは、内部の湿度が低く、凍害劣化を受けにくい。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(B) (課題番号：19360243, 研究代表者：千歩修)によった。また、実験に際しては本研究室大学院生各位の協力を得た。ここに記して心からの謝意を表します。

参考文献

- 1) 濱幸雄他 3 名：寒冷環境下に暴露したコンクリート内部の温湿度変化と等価積算温度，コンクリート工学年次論文集 Vol.29 No.1, pp.819-824, 2007.7
- 2) 富板崇他 2 名：コンクリート供試体表面温度の気象因子による推定とその応用, JCI 自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム論文集, pp.203-208, 2005.6
- 3) 三橋博三, 周志云：コンクリート内の温・湿度状態に及ぼす環境条件の影響に関する基礎的研究, 日本建築学会技術報告集第 14 号, pp.61-64, 2001.12
- 4) Andrade.C,Sarria.J,Alonso.C: Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, CEMENT and CONCRETE RESEARCH 29,1249-1259,1999
- 5) 気象庁編集：気象庁月報 CD-ROM 版, 平成 19 年 8 月～平成 20 年 5 月



図一 7 各 W/C の 1 回の凍結融解時の最低温度と最大の相対湿度

表一 4 各 W/C の凍結融解回数

W/C (%)	凍結融解回数 (回)	実効凍結融解回数 (回)	R_{a90}^* (回)	実効 R_{a90} (回)
25	71	7	16.7	1.0
45	69	67	16.8	16.4
55	62	62	14.1	14.1

*文献 9) に基づき、コンクリート温度より下式で算出 $R_{90} = \sum (-ts/18)^{1.15}$ ts : 凍結最低温度 (°C)

6) 気象庁ホームページ

<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>

- 7) 例えば、相川葉月他 3 名：暴露条件・粗骨材種別が高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，日本建築学会大会梗概集, pp.1145-1146, 2005.9
- 8) Bager.D.H.,Sellevold.E.J.: Ice Formation in Hardened Cement Paste, Part1-Room Temperature Cured Pastes with Variable Moisture Contents, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol.16, PP.709-720, 1986
- 9) 濱幸雄他 4 名：気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測，日本建築学会構造系論文集第 523 号, pp.9-16, 1999

