

論文 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

濱 幸雄*1・胡桃澤清文*2・谷口 円*3・桂 修*4

要旨：本研究では、高分子温湿度センサーを埋め込んだコンクリートを札幌、旭川、室蘭の3都市に2年間暴露してコンクリート内部の温湿度の経時変化を測定した。その結果から、コンクリート温度推定式の提案とその検証を行うとともに、冬期間の凍結融解作用時のコンクリート内部の相対湿度と凍結最低温度の関係、コンクリート温度と相対湿度を考慮した暴露地および部材による等価積算温度の違いについて検討した。

キーワード：暴露試験, コンクリート温度, 相対湿度, 凍結融解, 等価積算温度

1. はじめに

コンクリートが所定の材齢に所要の性能を発揮するには材料、調合以外に温度、湿度、材齢の養生条件が大きく影響する。強度増進には十分な温・湿度条件下で材齢を経過することが必要となり、打設後に急激な乾燥を受けた場合にはプラスチックひび割れの発生や、強度増進の遅れが生じる。また、硬化後のコンクリートにおいて、コンクリート中の水分状態は耐久性に大きな影響を及ぼすことが知られている。凍害は湿潤な状態でのみ発生し、相対湿度90%以下に対応する含水状態では凍害による劣化は起きないとした報告もある¹⁾。湿潤な状態では、コンクリート内部への二酸化炭素の拡散が抑制され中性化の進行が遅くなること、塩分のコンクリート中への浸透が速いこと、アルカリ骨材反応が起きやすい条件となること、乾燥収縮が低減されることが知られている。

硬化後のコンクリートの含水状態や内部相対湿度については、湯浅²⁾や桂ら³⁾により静電容量や電気抵抗の測定結果から算定する方法が示されているが、含水率、相対湿度の算定に当たっては同一のコンクリートでのキャリブレーション

が必要となる煩雑さがあった。これまで、コンクリート中の水分状態を表す内部相対湿度については、その影響が大きいかかわらずデータの蓄積が十分とは言えないのが現状である。

本研究では、高分子湿度センサを備えた小型温湿度センサに防水・透湿処理をし、コンクリート中の所定の位置に埋設し、北海道内3都市での暴露試験中のコンクリート内部の温湿度変化を測定した結果を示す。

2. 実験計画および方法

使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメント ($\rho = 3.16\text{g/cm}^3$)、登別産陸砂 (表乾密度 2.69g/cm^3 , 粗粒率 2.70)、白老産碎石 (表乾密度 2.67g/cm^3 , 最大寸法 20 mm) を用い、水セメント比 50%, スランプ 18 cm の nonAE コンクリートである。コンクリートの調合を表-1に示す。封緘養生したコンクリートの圧縮強度は、材齢 28 日で $45.0\text{ (N/mm}^2\text{)}$ 、材齢 91 日で 57.7

表-1 コンクリートの調合

W/C (%)	目標空気量 (%)	スランプ (cm)	単位水量 (kg/m^3)	絶対質量 (kg/m^3)		
				セメント	細骨材	粗骨材
50	1.0	18	206	411	802	952

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教授 博士 (工学) (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科資源システム工学研究室 博士 (工学) (正会員)

*3 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部技術材料開発科 工修 (正会員)

*4 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部技術材料開発科 博士 (工学) (正会員)

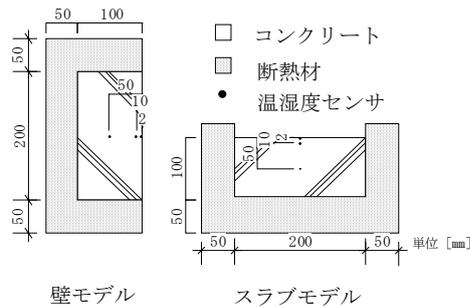


図-1 暴露試験体形状

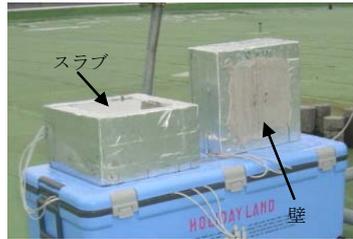


写真-1 暴露試験体

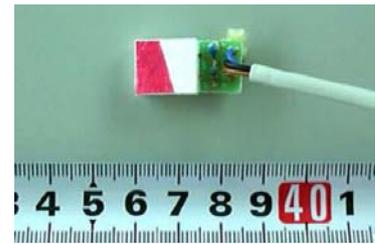


写真-2 温湿度センサ

表-2 各暴露地での温湿度測定結果の概要

暴露地	札幌						旭川						室蘭						
	外気		壁10mm		床2mm		外気		壁10mm		床2mm		外気		壁10mm		床2mm		
期間	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	
1年目	04/10/13 平均	10.2	68.2	11.7	64.7	11.1	57.6	6.6	76.6	9.5	82.1	9.0	69.6	9.7	78.0	11.0	53.5	12.5	64.4
	最高	31.6	99.0	41.5	99.0	42.1	99.0	32.5	97.7	40.1	99.0	47.8	99.0	31.8	99.0	42.7	99.0	47.2	99.0
2年目	05/10/12 最低	-12.0	6.0	-9.8	17.0	-10.4	3.0	-24.6	3.7	-22.3	26.0	-17.2	7.0	-11.5	4.0	-11.2	18.0	-10.6	21.0
	05/10/13 平均	10.3	67.0	11.5	43.5	10.0	24.9	6.6	77.6	9.4	49.2	9.5	66.6	9.4	72.4	10.8	37.4	16.4	50.3
全期間	06/10/12 最高	32.8	99.0	44.5	87.0	41.9	88.0	32.2	96.9	40.0	99.0	49.4	99.0	30.5	98.0	48.7	83.0	54.3	95.0
	04/10/13 最低	-13.3	7.0	-12.5	19.0	-9.9	5.0	-21.7	14.4	-19.3	18.0	-16.5	7.0	-14.5	1.0	-10.8	9.0	-8.9	24.0
06/10/12 平均	10.2	67.6	11.6	54.1	10.6	41.3	6.6	77.1	9.4	65.7	9.2	68.1	9.6	75.2	10.9	45.5	14.5	57.4	
	最高	32.8	99.0	44.5	99.0	42.1	99.0	32.5	97.7	40.1	99.0	49.4	99.0	31.8	99.0	48.7	99.0	54.3	99.0
06/10/12 最低	-13.3	6.0	-12.5	17.0	-10.4	3.0	-24.6	3.7	-22.3	18.0	-17.2	7.0	-14.5	1.0	-11.2	9.0	-10.6	21.0	

(N/mm²)であった。

暴露試験体は、図-1および写真-1に示すような壁（垂直モデル）およびスラブ部材（水平モデル）を想定した200×200×100mmのコンクリートであり、表面から深さ2mm, 10mm, 50mmの位置に写真-2に示す防水透湿処理を施した高分子型温湿度センサを埋め込んで、室蘭、旭川、札幌の3都市に暴露した。なお、壁部材は南向きとし、スラブ部材は雨水や雪解け水が滞留するようにしている。暴露地での外気の温湿度とあわせて1時間ごとにコンクリート内の温湿度データを2004年10月13日から2006年10月12日までの2年間測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 各暴露地の温湿度変化

各暴露地における外気および試験体の温湿度の測定結果の概要を表-2に示す。外気温は札幌と室蘭と同程度であるが、旭川は最低気温が-24.6℃と極めて厳しい環境である。コンクリート温度は外気温度よりもやや高い値となっており、風、日射および積雪などの影響で部材による差が認められるものの、深さによる変化は比較的小さい。また、1年目と2年目のデータに大

きな変化は認められない。

一方、外気の相対湿度は3地点ともRH70%前後であったが、旭川がRH77.1%と最も高い値を記録している。コンクリート中の相対湿度は、風、日射、降雨および積雪などの様々な影響を複雑に受けるため、外気の相対湿度との明確な対応は認められない。また、コンクリート中の相対湿度は、いずれの部材においても1年目に比べて2年目は低くなっている。

3.2 コンクリート温度推定式

コンクリートの劣化予測や強度管理を行う上で、コンクリート内部の温度を把握することは極めて重要である。そのため、簡単かつ的確にコンクリート内部の温度を推定できる手法が必要である。これまでにコンクリート内部の温度を推定する手法としては、富板らによる気象因子を用いた温度推定式(以下、富板式)がある⁴⁾。

富板式は、茨城県つくば市で行われた暴露試験で、コンクリートの水平面および南垂直面の表面温度を測定し、これを気象因子の重回帰分析によって導かれた推定式である。富板式を以下に示す。

$$T_{CH}=1.05T+5.18S_H(1-0.0106W)+0.592W-1.17 \quad (1)$$

$$T_{CS90}=1.09T+3.62S_{S90}(1+0.00146W_{<S>}+0.636W_{<S>}-1.06) \quad (2)$$

ここに、T：外気温(°C)

S：日射量(MJ/m²/hr)

W：風速(m/s)

添字は、H：水平面、S90：南垂直面

しかし、富板式では積雪の影響が考慮されておらず、様々な地域の気象条件に対する適用性も検証されていない。そこで、日射エネルギー、熱伝達および熱貫流などの伝熱過程⁵⁾に着目し、コンクリート温度の毎時値をコンクリートおよび積雪面の熱収支により式(3)のように表したコンクリート温度推定式(以下、熱収支式)の適用性を検証する。

$$Q_{(i-1)}+a_s \cdot J_i \cdot A=A(\theta_{s_i}-\theta_{0_i})(K_{0_i}+K_i)+Q \quad (i=0,1,\dots,n) \quad (3)$$

ここに、 a_s ：日射面の日射吸収率

J：日射量(W/m²)

Q：固体の熱量(W)

A：日射面の面積(m²)

θ_s ：固体の温度(°C)

θ_0 ：外気温(°C)

K_0 ：熱伝達率(W/m²·K)

K：熱貫流率(W/m²·K)

ここでは、暴露1年目の測定データと気象庁のホームページ⁶⁾より入手した各暴露地の気象データを用いて、富板式および熱収支式によるコンクリート内部温度の毎時値を算出した。表-3に実測温度と各推定温度の関係を示す。表中のRMSEは実測温度と推定温度の毎時値の誤差の二乗和をデータ数で除した値の平方根で、予測誤差の大きさを示す指標である。

全期間の実測温度と推定温度の対応を見ると、熱収支式は富板式より相関が高く、RMSEも小さくなっており非常に良い対応を示している。期間別に見ても、室蘭のスラブ部材の7~8月を除き、熱収支式の方が良い対応を示している。ただし、12~3月の冬期においては両式ともに他の期間と比較して相関係数が小さく、RMSEも大きい。これは、富板式では積雪の影響が考慮

表-3 実測コンクリート温度と富板式および熱収支式による推定温度の関係

暴露地	測定部材	壁部材				スラブ部材			
		富板式		熱収支式		富板式		熱収支式	
		相関係数	RMSE	相関係数	RMSE	相関係数	RMSE	相関係数	RMSE
札幌	9~11月	0.939	3.04	0.971	2.28	0.925	4.87	0.971	3.78
	12~3月	0.736	3.80	0.787	3.36	0.522	5.25	0.630	4.28
	4~6月	0.929	3.02	0.982	1.94	0.941	5.43	0.995	3.62
	7~8月	0.882	2.89	0.972	2.05	0.900	4.38	0.980	3.06
	全期間	0.957	3.26	0.974	2.55	0.945	4.83	0.971	3.70
	最低温度	0.978	2.38	0.983	1.70	0.967	2.68	0.973	2.60
	最高温度	0.928	4.21	0.953	4.39	0.963	7.96	0.973	5.35
旭川	9~11月	0.920	3.28	0.982	1.56	0.881	4.44	0.952	2.87
	12~3月	0.774	4.77	0.929	2.47	0.692	5.42	0.842	3.33
	4~6月	0.957	2.64	0.993	1.07	0.946	4.10	0.978	3.01
	7~8月	0.930	2.27	0.988	0.97	0.857	4.54	0.931	3.28
	全期間	0.959	3.58	0.989	1.75	0.944	4.77	0.975	3.17
	最低温度	0.992	1.85	0.998	0.81	0.978	2.96	0.990	1.50
	最高温度	0.922	3.13	0.981	2.34	0.960	7.61	0.969	4.64
室蘭	9~11月	0.919	3.88	0.958	2.57	0.889	5.82	0.896	4.71
	12~3月	0.653	4.18	0.731	3.82	0.707	5.35	0.765	3.68
	4~6月	0.961	3.54	0.976	3.52	-	-	-	-
	7~8月	0.883	2.88	0.957	2.46	0.688	5.28	0.527	6.92
	全期間	0.942	3.82	0.962	3.13	0.924	5.43	0.921	4.91
	最低温度	0.971	2.64	0.967	2.74	0.966	3.86	0.973	3.18
	最高温度	0.900	2.62	0.912	4.94	0.956	7.32	0.968	4.22

※-は温度センサの不具合による計測不能のためデータなし

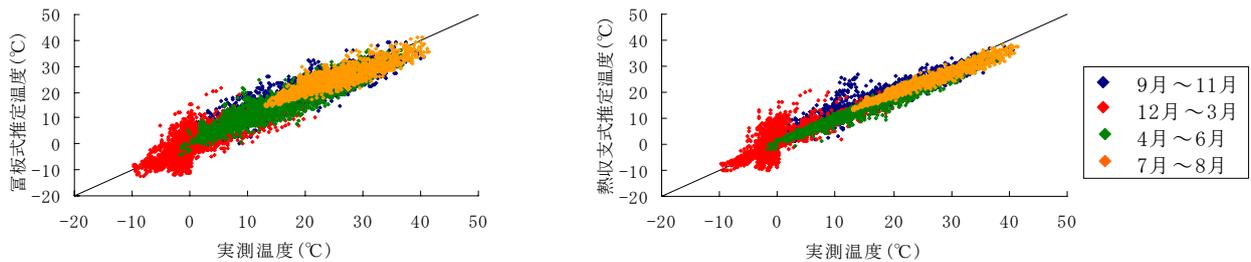
されていないためであると考えられる。一方、熱収支式では積雪の影響を考慮しているものの、気象観測所と暴露地の積雪量に差があり、根雪になる12月頃までと雪解けが進む春先に温度誤差が大きくなったためと考えられる。

図-2に全期間における実測温度と推定温度の関係を示す。いずれの式も実測温度0°C付近で推定温度との対応にばらつきが見られる。これは、凍結融解時の凝固熱および潜熱の影響が考慮されていないためであると思われる。

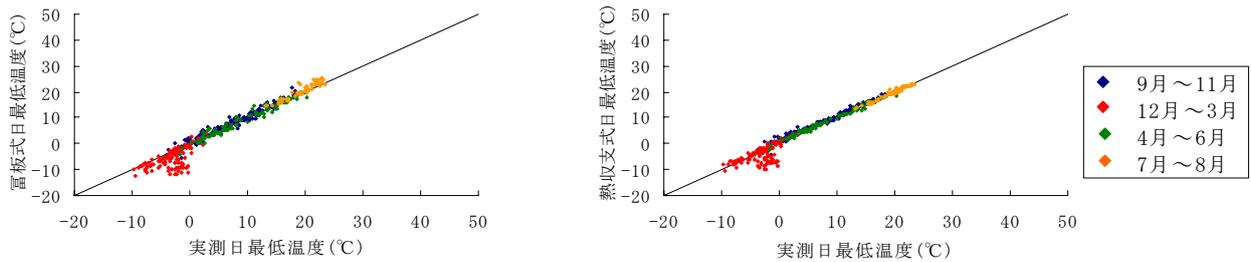
図-3および図-4に、日最低温度および日最高温度の実測温度と推定温度の対応を示す。富板式では日最低温度は実測温度と良い対応を示したが、日最高温度はRMSEが大きく若干のばらつきが見られる。これに対して、熱収支式では日最低温度および日最高温度ともに相関が高く、RMSEも小さく良い対応を示している。

3.3 凍結融解作用時の温湿度

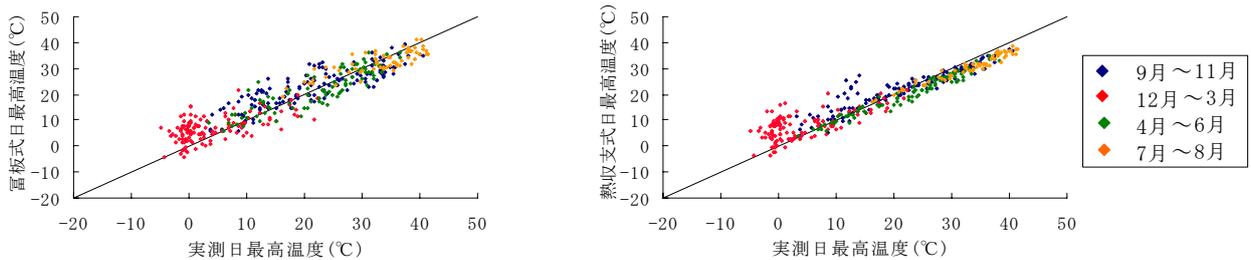
3都市の中で最も気温が低く、相対湿度の高い旭川でのデータから、暴露試験体が凍結融解作用を受けた際にコンクリート温度が-1°Cを下



図一 2 実測温度と冨板式および熱収支式による推定温度の対応（札幌・壁部材）

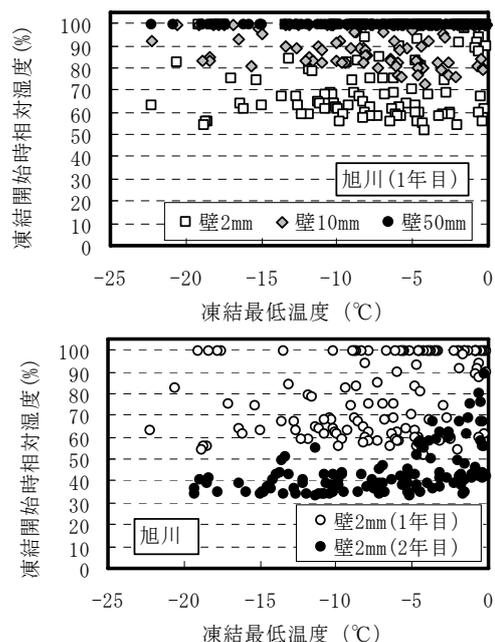


図一 3 実測温度と冨板式および熱収支式による日最低温度の対応（札幌・壁部材）



図一 4 実測温度と冨板式および熱収支式による日最高温度の対応（札幌・壁部材）

回った時の（凍結開始時）の相対湿度と凍結中の最低温度の関係を図一 5 に示す。壁部材の深さ 50mm では高い相対湿度で凍結融解作用を受けるが、深さ 2mm および 10mm の位置では比較的低い相対湿度で凍結融解作用を受けている。また、暴露 2 年目にはコンクリート表面（深さ 2mm）の相対湿度は大幅に低下して、RH30～60% 程度で凍結融解作用を受けることが多くなっていることがわかる。なお、今回用いた温湿度センサーでは RH90% 以上の高湿度域で実際の相対湿度よりも高い測定値が得られることから⁷⁾、図中の RH90% 以下の範囲は明らかに凍害劣化の生じるおそれが高い水分条件であるといえる。凍害には温度と同時に内部相対湿度が大きく影響することから、データの蓄積とともに水分条件を適切に評価、予測することが望まれる。



図一 5 凍結融解時の最低温度と相対湿度

3.4 等価積算温度とセメントの水和度

コンクリートの温湿度の変化はセメントの水和反応の進行にも大きな影響を及ぼす。コンクリートの強度発現を表す式の多くは、Nurse-Saul 式を基とした積算温度、反応の温度依存性を表す Arrhenius 則を基とした等価材齢を利用して、いずれも温度と時間の影響を表しているものの凍結状態や乾燥状態の水和反応、強度発現は考慮されていない。

凍結状態や乾燥状態が持続した場合のセメントの水和については、須藤らが化学ポテンシャルの変化に着目して水分状態の影響を考慮した式 (4) および式 (5) に示す 20°C 水中養生に対する等価積算温度の算出方法を提案している⁸⁾。

$$k = f(w/c) \cdot \exp((-Ea + b\mu) / RT) \quad (4)$$

ここに、k：反応速度定数

f(w/c)：水セメントに関する係数

$$[f(w/c) = \alpha \cdot (w/c) + \beta]$$

Ea：見かけの活性化エネルギー(J/mol)

μ ：水の化学ポテンシャル変化分

$$[\mu = RT \ln(RH)]$$

R：気体定数 (8.3145J/K·mol)

T：絶対温度 (°C)

w/c：水セメント比

RH：相対湿度

b, α , β ：実験定数

$$(b = 9.65, \alpha = 14275045, \beta = -3501659)$$

$$Me = 30 / (k_{20} / k_{\theta}) \quad (5)$$

ここに、Me：等価積算温度 (°D·D/日)

k_{20} ：養生温度 20°C での反応速度定数

k_{θ} ：養生温度 θ °C での反応速度定数

さらに、式 (4) で得られる反応速度定数を用いて、球形粒子を仮定した粒子内拡散律速の基本式 (式 (6)) から粒子内の反応深さが得られ (式 (7))、セメントの水和度 Rhyd を球形粒子内の体積比として算出できる (式 (8))。

$$dx/dt = k \cdot 1/x \quad (6)$$

$$x = (2k \cdot t)^{0.5} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Rhyd &= 1 - (4 \pi (r-x)^3 / 3) / (4 \pi r^3 / 3) \\ &= 1 - (r-x)^3 / r^3 \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、x：粒子内の反応深さ ($x \leq r$)

t：材齢

r：セメント粒子半径

ここでは、札幌、旭川、室蘭の3都市に暴露した壁部材 (深さ 10mm) およびスラブ部材 (深さ 2mm) の温湿度データから、一般的に用いられている $M = \Sigma (\theta + 10) (^\circ D \cdot D)$ による積算温度と式 (5) で得られる等価積算温度および式 (8) で得られるセメントの水和度を算出する。なお、暴露試験で測定されたコンクリート内部の相対湿度の測定値 RH を以下の2式で補正した補正相対湿度 RHc を用いて凍結状態および乾燥状態の化学ポテンシャル変化分 μ とする⁹⁾。

$$RHc = 100 \exp(\ln(RH) / (0.00142T + 0.507)) \quad (9)$$

($T \geq 275.6K$ のとき)

$$RHc = 100 \exp(\ln(RH) / (-0.0516T + 15.11)) \quad (10)$$

($T < 275.6K$ のとき)

図-6 に旭川のスラブ部材 (深さ 2mm) を一例として等価積算温度とセメントの水和度の変化を示す。セメントの水和度の増加は等価積算温度の増大と対応している。また、等価積算温度が大きく増加している期間のコンクリート内部の相対湿度は RH80% 以上であった。

表-4 に各暴露地の外気の積算温度と壁部材

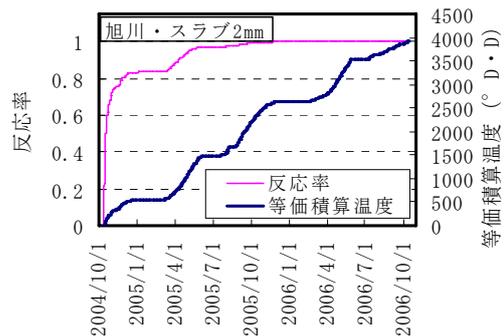


図-6 等価積算温度と反応率の経時変化

表-4 積算温度と等価積算温度の算定結果

期間	部位	暴露地	外気			壁10mm		床2mm	
			M (D·D)	M (D·D)	Me (D·D)	M (D·D)	Me (D·D)		
1年目	04/10/13 ~ 05/10/12	札幌	7357	7915	1246	7708	1208		
		旭川	6053	7109	2294	6920	2327		
		室蘭	7189	7665	662	8218	834		
2年目	05/10/13 ~ 06/10/12	札幌	7413	7856	20	7315	5		
		旭川	6049	7064	202	7128	1595		
		室蘭	7089	7590	4	9645	279		
全期間	04/10/13 ~ 06/10/12	札幌	14770	15771	1266	15023	1213		
		旭川	12102	14174	2496	14049	3923		
		室蘭	14278	15256	666	17864	1113		

(深さ 10mm) およびスラブ部材 (深さ 2mm) での積算温度と等価積算温度の算定結果を示す。積算温度は温度のみに依存する値であるため、気温の低い旭川では札幌、室蘭に比べて小さな値となっている。しかし、コンクリート中の相対湿度の影響も含んだ等価積算温度は、相対湿度の高い旭川が札幌、室蘭よりも大きな値となっている。特に、コンクリート内部の平均相対湿度が RH50%以下となった札幌、室蘭の 2 年目には等価積算温度の増加はほとんどみられない。等価積算温度は温度より相対湿度の影響の方が大きいことがわかる。

4. まとめ

- (1) 日射エネルギーおよび伝熱過程に着目し、積雪を考慮したコンクリート内部の温度推定式を提案した。ここで提案した熱収支式は、従来の富板式より実測温度との対応が良いことが確認された。
- (2) コンクリート表面では比較的低い相対湿度で凍結融解作用を受けている。また、暴露後の年数の経過によりコンクリート内部の相対湿度は低下し、RH30~60%程度で凍結融解作用を受けることが多くなっている。
- (3) 凍結状態や乾燥状態が持続する時のセメントの水和および強度増進を表す等価積算温度は、コンクリート内部の相対湿度の影響を大きく受け、RH80%以上では大きく増加するが、RH50%以下ではほとんど増加しない。
- (4) コンクリートの凍害や強度増進には温度だけでなく内部の相対湿度が大きく影響することから、今後は水分条件を適切に評価し、予測するためのデータの蓄積が必要である。

謝辞

本研究は北海道重点領域研究課題「自己修復コンクリートの開発」として、北海道立北方建築総合研究所、北海道大学、室蘭工業大学、北

海道電力総合研究所、日鐵セメントの共同により行われた研究の一部である。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Bager D. H, Sellevold E.J. : Ice Formation in Hardened Cement Paste, Cement and Concrete Research, Vol.16, pp. 709-720, 1986
- 2) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, NO. 498, pp. 13-20, 1997. 8
- 3) 桂修, 吉野利幸, 田畑雅幸, 鎌田英治: 交流 2 電極法によるコンクリート中の含水率測定についての理論的検証, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 735-740, 1994
- 4) 富板崇, 浜幸雄, 濱崎仁: 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, 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委員会報告・論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 203-208, 2005
- 5) 坂本守正ら: 環境工学, 朝倉書店
- 6) 気象庁ホームページ
<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- 7) 桂修, 谷口円, 関口岳彦, 濱幸雄, 松村宇: 高分子湿度センサーを用いたコンクリート中の相対湿度測定 (その 1 センサーの精度), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1208-1209, 2005
- 8) 須藤由美子, 桂修, 吉野利幸, 三森敏司, 浜幸雄: 凍結および乾燥を受けたセメント硬化体の水和反応速度と強度増進, 日本建築学会構造系論文集, NO. 542, pp. 17-22, 2001. 4
- 9) 桂修, 濱幸雄, 谷口円, 関口岳彦: コンクリート内部の相対湿度測定, (社)日本非破壊検査協会シンポジウム・コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集, Vol. 2, pp. 1-6, 2006. 8