

論文 局所的な内部温・湿度状態がコンクリート造建築物に及ぼす影響に関する基礎的研究

鶴木 圭一*1・兼松 学*2

要旨: コンクリート構造物の耐久性のなかでも、中性化速度は環境条件により大きくことなり、実構造物の実測データは大きくばらつくことが多く、コンクリートの置かれる局所的な環境条件により劣化が異なることが予測される。しかしながら、実構造物調査においては雨がかりや方位といったレベルでの調査はされるものの、より詳細な局所劣化環境の実測と劣化調査を関連付けた研究事例は極めて少ない。そこで、本研究では、実構造物の中性化と局所温・湿度環境を実測し、それらの相関について検証を行った。その結果、中性化速度のばらつきは局所温・湿度環境に依存していることが確認された。

キーワード: 中性化, 局所環境, 温度, 湿度

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性能の劣化を及ぼす要因として、仕上げの種類や調合や施工の程度などの内部の条件と共に、その構造物が置かれた気温・湿度といった外的気象条件が挙げられる。これまで気象条件の影響は中性化深さのばらつきにも影響を与えることがこれまでにわかっており¹⁾、各種中性化速度式でもこれらの影響を考慮する手法が提案されている。しかしながら、中性化速度は局所環境によって大きく異なることが予想されるものの、局所的な内部温・湿度状態にまで及んだ測定例は極めて少ないのが現状である。一方で、JASS 5を代表とする信頼性設計手法に基づく耐久設計ではかぶり厚さやコンクリートの品質を用いて信頼性設計を行っているが、局所的な内部温・湿度状態をいかに考慮すべきか明確ではない。また、建築分野における仕様書体系を除いても、近年高度化する耐久性予測手法にはより精緻な環境劣化外力の定量が課題であると考えられる。

そこで、本研究では、局所的な温・湿度環境がコンクリート造建築物の耐久性に与える影響を検証するため、実構造物の方位別・高さ別に局所的な温度・湿度を測定し、中性化深さとの関係を明らかにすることを目的とする。

2. 研究の概要

2.1 実験概要

測定対象は、東京理科大学(千葉県野田市)実験棟に付設されたRC造養生室(築36年)とした。本建築物は、特段の補修履歴もなく、壁面にはクリア塗装やモルタルなどを含めた仕上は施されていない。測定項目について表-1、測定箇所について図-1に示す。方位別、高さ別に

計36点の小径コアの中性化深さを測定した。そしてその直後、10月29日から11月19日の期間、小径コアを採取した近傍におけるコンクリート内・外部の温・湿度を実測した。また、あわせて小径コアにより圧縮強度の確認を行った。

表-1 測定項目

測定項目	温湿度測定	(内部)小型データロガー (表面)温湿度ロガー
	中性化深さ測定	各面9本×4方位の計36本 JIS A 1152(準拠)
	小径コアの圧縮強度測定	各面9本×4方位の計36本 JIS A 1107(準拠)

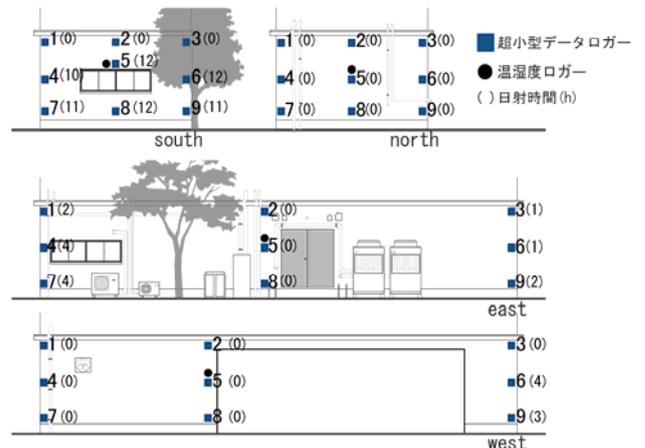


図-1 測定箇所

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科准教授 (正会員)

2.2 測定方法

(1) 温・湿度の測定

コンクリート内部の温・湿度測定には、電極法や湿度センサを用いた方法があり、実測も多数存在する²³⁾が、センサ部分のみを埋設しデータロガーを外部に置く方法が一般的である。本研究では、既存の建築物での実測のため、温湿度の測定に対する、ケーブルの取り回しによる電氣的ノイズや誤差、ならびに熱環境に及ぼす影響を考慮して、データロガー内蔵の埋設型の小型温・湿度ロガーを用いるものとした。また、表面温・湿度の測定に関しては視認性の良さからモニターつきであるデータロガーを使用した。

使用した測定器の仕様を図-2に示す。図-2に示したように、埋設型データロガーはごく一般的な測定精度を有するものの、測定結果が誤差に埋もれてしまう可能性が懸念された。そこで、高精度温・湿度計(湿度誤差±1%RH)によりあらかじめ埋設型小型データロガーの測定精度の検証を行った。その結果、平均値では測定温・湿度の誤差は、後述する実測された温室度範囲ではほぼ無視できることを確認した。

埋設方法については、事前に図-3に示す2つの仕様について別途試験体を作成し、温・湿追随性を比較する実験を行った。その結果、温度に関してはどちらも良好な追随性を示したが、湿度に関してはモルタルによる埋設方法が良好な追随性を示さなかった(図-4)。これは、モルタル中の水分がまだ安定しない状態で実験を行ったため、モルタル部分が湿潤状態であったためだと考えられる。本研究では、簡便性や埋設直後の測定を考慮した結果、より内部の温・湿度の追従性の高い断熱材を用いた埋設方法(図-3左)を選択した。

埋設方法は、コンクリートの壁面に径20mmのハンマードリルにより削孔し、その中に防水透湿シートによる耐水処理を施した小型データロガーを測定部が壁面より深さ1cmになるよう埋設した。埋設の処理としては、断熱材で空隙を埋めた上でアルミテープにより封緘し、その周りをエポキシ樹脂塗料によりコーティングし、孔の壁面からの水分浸入による影響を抑える仕様とした。

合わせて、温・湿度データロガー(図-2)によりコンクリート壁面の表面温・湿度を測定した。その際、参考値として赤外放射温度計により、躯体の表面温度の計測を行い測定結果について多角的に検証した。

また、耐久設計で用いられる一般気象情報との関係を検討することを目的として、気象庁の提供する気象データ⁴⁾のうち、該当期間の測定地の最近点である我孫子および越谷の気象データを距離の加重平均により測定地点である野田市の気象データとした。

(2) 中性化深さの測定

小径コアによる中性化深さは、内径24mm長さ50mm程度のコアを温・湿度測定箇所近傍から採取した直後、1%フェノールフタレインを噴霧し測定を行った。測定長さは、採取した小径コアの側面を測定し、粗骨材を避けた4箇所の平均とした。またこれらの測定方法はJIS A 1152に準ずるものとする。

(3) 小径コアによる圧縮強度の測定

	(内部) 小型 温湿度ロガーの仕様 (外形寸法・重量) 直径17mm x 厚さ6mm・重さ3.3g
	(測定範囲) 温度: -20°C~+70°C 湿度: 0%RH~95%RH
	(温度精度) ±0.7°C (-5°C~+50°Cの時)
	(湿度精度) ±5%RH (温度25°C、湿度20%RH~80%RHの時)
	(表面) 温湿度ロガーの仕様 (外形寸法・重量) 98W×55D×28H(mm)、重さ100g
	(測定範囲) 温度: -15°C~+60°C 湿度: 20%RH~90%RH (10°C~50°C)
	(温度精度) ±0.3°C (25°Cの時)
	(湿度精度) ±5%RH (温度25°C、湿度50%RHの時)

図-2 湿度計仕様

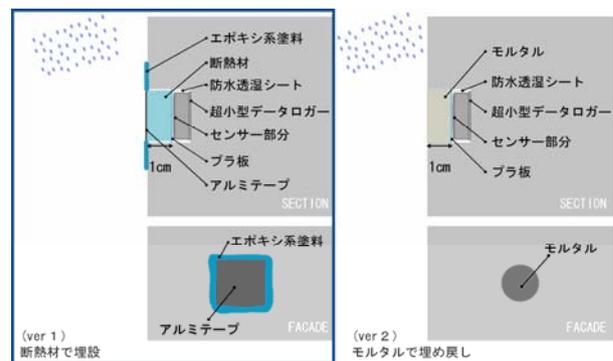


図-3 埋設方法の検討(左を採用)

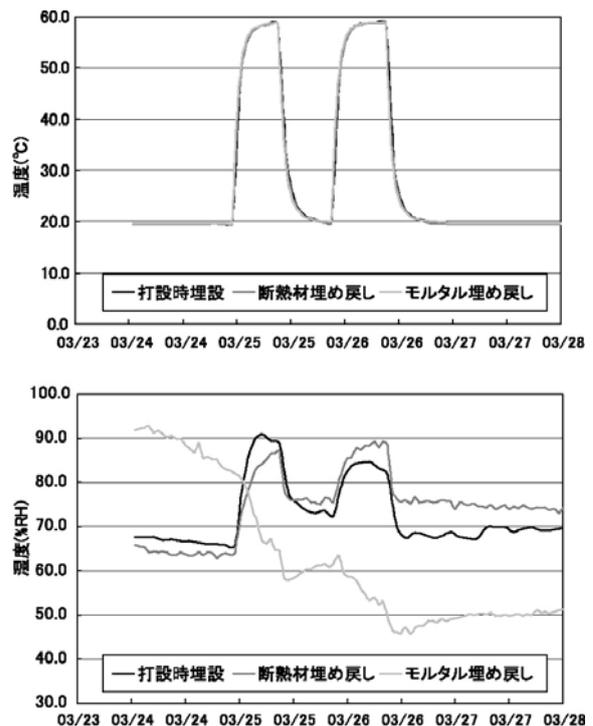


図-4 温度追随性の試験結果

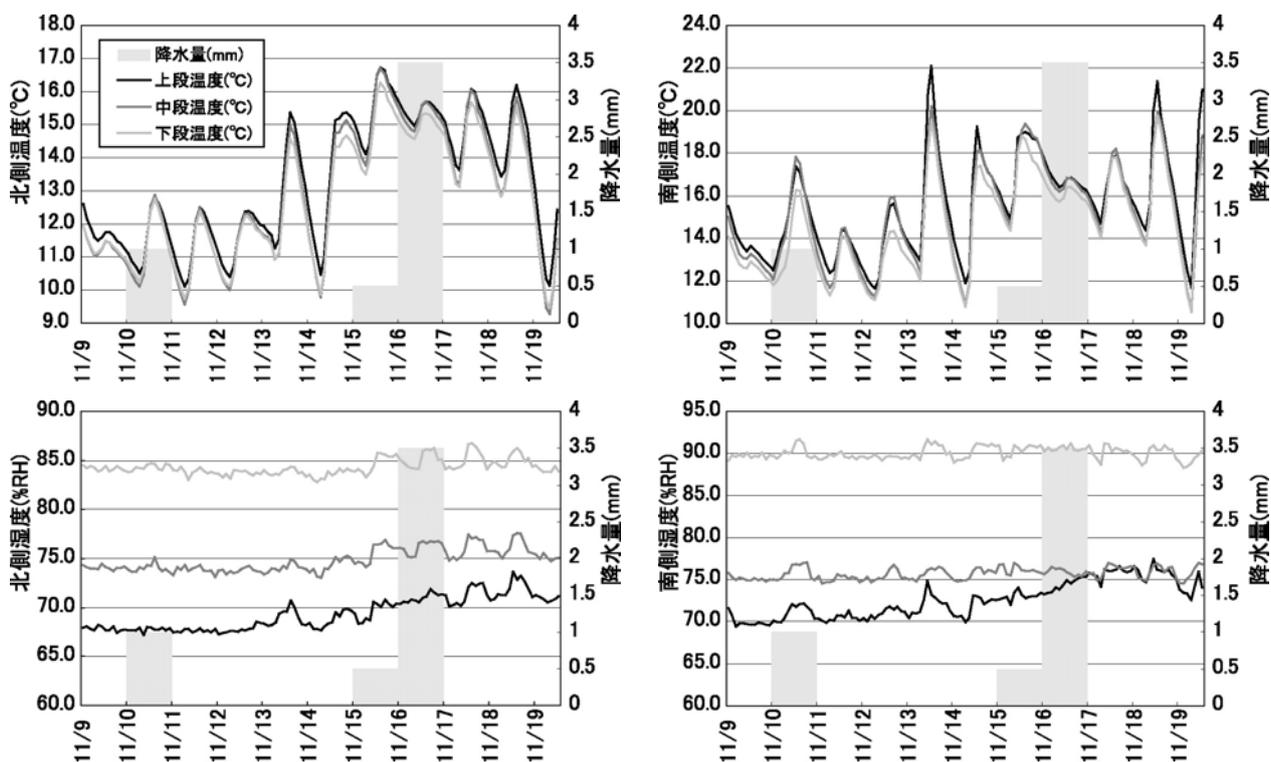


図-5 温・湿度測定結果および降水量

表-2 各地点の平均温度測定結果

温度(°C)	east	west	south	north	高さ平均
内部1(上)	15.9	13.8	16.5	13.8	15.1
内部2(上)	16.4	15.3	15.9	13.7	
内部3(上)	14.3	15.7	15.7	13.6	
内部4(中)	15.6	13.4	15.9	13.4	14.7
内部5(中)	15.9	14.6	15.6	13.2	
内部6(中)	14.1	15.4	15.5	13.2	
内部7(下)	14.9	13.1	15.8	13.3	14.3
内部8(下)	15.2	14.4	15.1	13.0	
内部9(下)	13.5	15.1	14.5	13.1	
各方位温度平均	15.1	14.5	15.6	13.4	
各方位表面温度平均	13.2	11.9	12.6	10.6	
内部温度平均	14.65				
表面温度平均	12.08				
野田温度平均	13.33				

表-3 各地点の平均湿度測定結果

湿度(%RH)	east	west	south	north	高さ平均
内部1(上)	64.0	69.8	61.0	69.9	68.3
内部2(上)	63.3	68.0	90.1	69.3	
内部3(上)	67.3	64.3	63.7	69.2	
内部4(中)	68.0	94.6	90.0	71.9	75.9
内部5(中)	68.7	79.0	68.6	78.3	
内部6(中)	72.7	75.8	67.6	75.5	
内部7(下)	81.2	94.4	80.3	84.4	85.5
内部8(下)	76.7	83.7	97.2	84.1	
内部9(下)	92.0	71.9	92.6	86.9	
各方位平均	72.7	77.9	79.0	76.6	
各方位表面湿度平均	62.2	69.1	67.3	72.1	
内部湿度平均	76.55				
表面湿度平均	67.68				
野田湿度平均	69.84				

中性化深さを測定した小径コアの切断面を整えた後、それぞれの圧縮強度を圧縮試験機により測定した。長さが基準に満たなかった小径コアの圧縮強度についてはJIS A 1107により補正した。

3. 測定結果

3.1 温・湿度測定

期間中の温・湿度の測定結果例を図-5に示す。また、期間中の温・湿度の測定結果の平均値を測定箇所ごとにまとめたものを表-2および表-3に示す。

測定結果に示すように、内部温・湿度に関しては方位、高さ毎で差異が見られた。内部温度は高さが高くなるほど高くなり、南面と北面で傾向が顕著に見られた。方位別では南側が最も温度が高く、東、西、北の順に低くなっていた。同じ東・西側面内に関しても南側よりの温度が高い結果となった。原因として日射による温度上昇が

考えられる。表面温度に関しては東側が最も高い結果を示し、順に南、北、西と低くなり、内部温度とは異なった結果になったが、表面温度測定部分付近での内部温度については同様な傾向を示した。内部湿度に関しては、高さ毎にみると高さが高いほど湿度は低く、高さが低いと湿度は高くなる結果になった。方位毎に見ると南側が最も高く、順に西、北、東と低くなっていた。表面湿度に関しては北側が最も高く、順に西・南・北と低くなり、内部湿度とは異なった結果になった。

また、あわせて図-5に降水量を示す。降雨のあった日は、降雨のない日と比較して、一日における温度の上がり下がり緩慢になり温度上昇の傾向が見られた。湿度に関しても上昇の傾向が見られ、特に上段で顕著に見られた。

3.2 中性化深さ

中性化深さの測定結果を表-4に示す。小径コアによ

る中性化深さは、高さ別に比較すると上部で大きくなる

表-4 中性化深さ測定結果

中性化深さ(mm)		east	west	south	north	平均
実測値	内部1(上)	20	15	28	24	24.5
	内部2(上)	23	20	28	26	
	内部3(上)	32	30	28	20	
	内部4(中)	9	12	18	17	17.7
	内部5(中)	20	17	28	12	
	内部6(中)	22	12	27	18	
	内部7(下)	2	3	20	13	13.8
	内部8(下)	10	18	15	28	
	内部9(下)	4	15	26	11	
内部温湿度平均		15.8	15.8	24.2	18.8	18.65
理論値	表面温湿度	13.98	11.75	11.35	9.38	11.62
	野田市温湿度					11.34

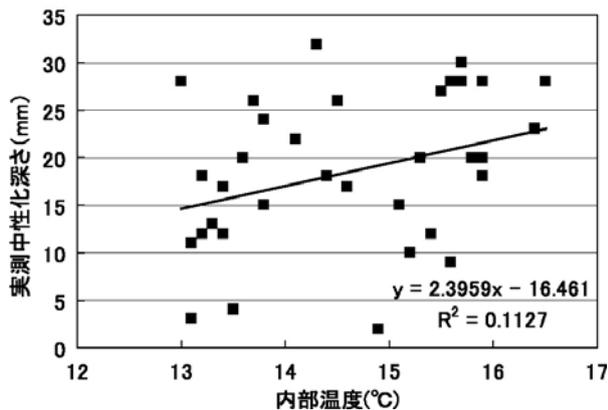


図-6 内部温度と実測中性化深さの関係

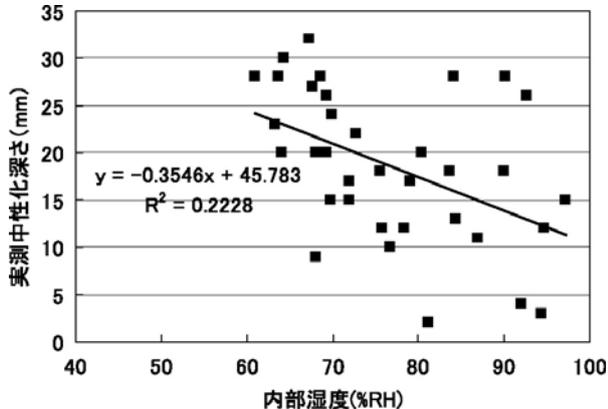


図-7 内部湿度と実測中性化深さの関係

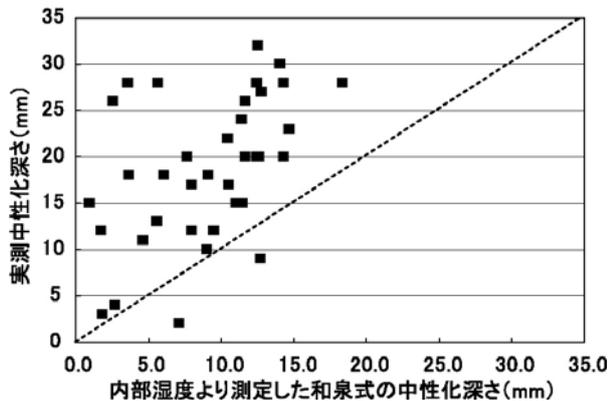


図-8 和泉式と実測値の関係

傾向が見られた。方位別に見ると最も中性化が進んでいたのが南側であった。これは並木・湯浅らの研究⁵⁾と一致する結果となった。

3.3 小径コアの圧縮強度

外部環境の他に施工上での誤差が中性化深さに与える影響を検証したが、圧縮強度の最大値は 35.5N/mm²、最小値は 13.0 N/mm²、平均値は 23.2 N/mm²と値がばらつき、系統だった傾向はみられなかった。

4. 考察

4.1 外部環境とコンクリートの内部温・湿度

温度に関しては、外気温よりもコンクリート中の内部温度の方が高い結果となった。また、温度湿度共に降雨の時期に上昇の傾向が見られた。これは、今回の測定箇所が雨がかりのある場所であったので降雨の影響を直に受けたことが原因だと考えられる。

4.2 コンクリート中の温・湿度と中性化深さの関係

温・湿度と中性化深さの関係を図-6と図-7に示す。コンクリート内部の温度と中性化深さとの関係は、内部温度が高くなるにつれ中性化深さも高くなった。そのため、内部温度が高かった南側が最も平均中性化深さが大きい傾向が見られた。また、コンクリート内部の湿度との関係は、コンクリート内部の湿度が低くなるにつれ、中性化深さが大きくなるという傾向を示した。通常、中性化速度は、湿度が50%程度で最大となることが知られているが、本測定の範囲では、湿度が60%以上であったことから、このような関係が得られたものと考えられる。続いて、気象条件による影響を検証するため、中性化深さの推定を式(1)に示す和泉式(JASS 5:2003)により検証した。

$$C = 4.91 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、C：中性化深さ (mm)

t：材齢 (週)

R₁：セメント種類・水セメント比の影響係数

R₂：セメントの種類および湿潤養生の影響係数

R₃：炭酸ガス濃度の影響係数

R₄：温度の影響係数

$$R_4 = 0.017T_{em} + 0.48 \quad T_{em}; \text{温度}(^{\circ}\text{C})$$

R₅：湿度の影響係数

$$R_5 = H_u(100 - H_u)(140 - H_u) / 19200$$

H_u：相対湿度(%RH)

R₆：仕上げの影響係数

実測で得られた中性化深さと、同じく実測で得られた局所的な環境データを和泉式に代入した結果との比較を図-8に示す。

ここで、和泉式ではR₁からR₂のセメント種類などの条件を決定する必要があるが、ここではR₁ではセメント種

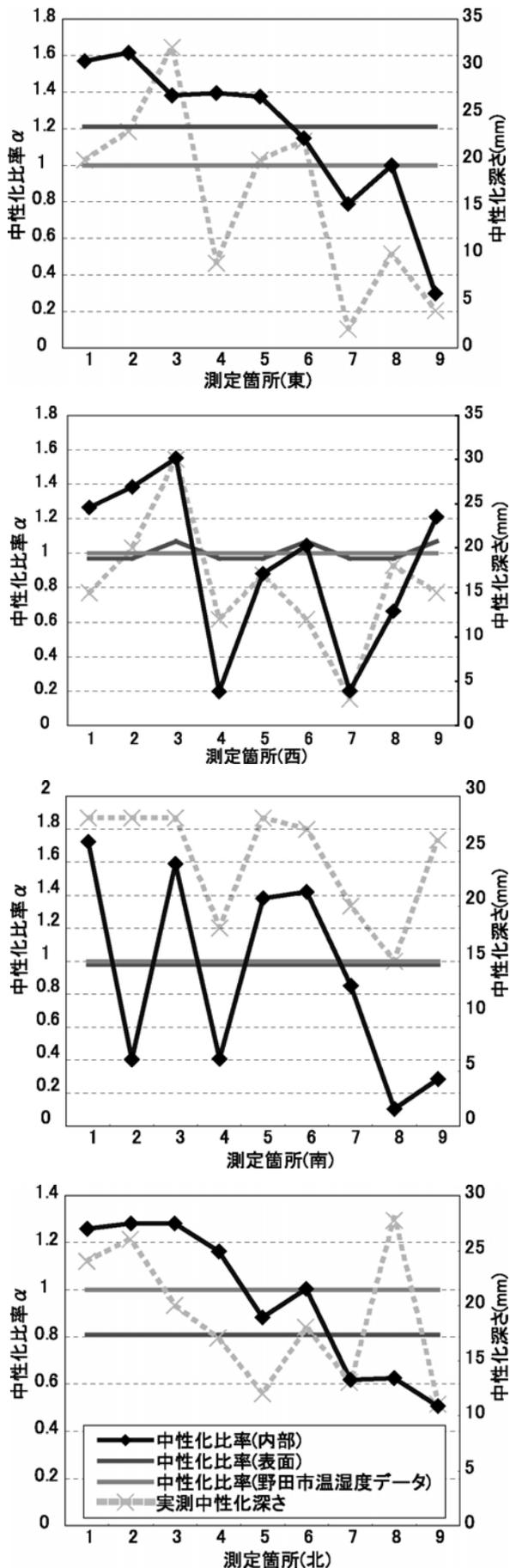


図-9 各方位における中性化比率と中性化比率

類を普通ポルトランドセメントとし、 R_2 の養生に関する影響係数は 1.0 とした。結果としては、実測で得られた中性化深さの方が式(1)を用いて算出した値よりも 2 倍程度大きくなった。

更に、 R_4 、 R_5 以外はコンクリートの品質に関わる定数であるので、厳密には与えることができない。そのため、局所的に求めた $R_4 \cdot R_5$ の平均値に対する各地点の $R_4 \cdot R_5$ の割合を中性化比率(式(2))と定義し、各地点における温度と湿度の影響を考察した。

$$\alpha_i = \frac{R_{4i} \cdot R_{5i}}{\sum (R_{4i} \cdot R_{5i}) / m} \quad (2)$$

- ここで、 α_i : 地点*i*における中性化比率
- R_{4i} : 地点*i*における影響係数
- R_{5i} : 地点*i*における影響係数
- m : 測定地点数

図-9 に方位毎の測定箇所と中性化比率の関係を示し、測定地点の数の違いが中性化比率に与える影響の度合いも検討した。その際、温・湿度データとして、埋込型データロガーによるコンクリート内部の測定結果(36 地点)を用い、参考として表面の温・湿度の実測値(4 地点)および野田市の気象データ(1 地点)による平均温・湿度データを用いた。その結果、より局所的な環境を考慮したコンクリート内部の測定結果を用いた中性化比率と中性化深さが最も相関が見られ、中性化比率の影響による中性化深さの増減は捉えることができた。しかし、図-10 に中性化深さと中性化比率の関係を示すが、良好な相関係数は得られなかった。

これらの結果より、同じ環境条件と考えられる壁面内においても、2 倍程度の中性化のばらつきが見られたが、コンクリート表層部における温・湿度環境の実測値に基づき求めた中性化比率との相関がみられたことから、中性化予測に際しては、中性化に及ぼす局所温・湿度状況

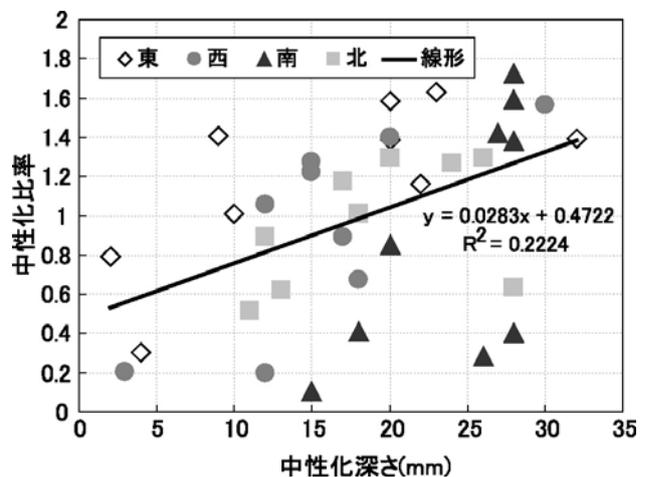


図-10 中性化深さと中性化比率の関係

の影響を検討する必要があることが示唆された。しかし、一方で目視による変状は見られなかったが、コンクリート自体の品質の違いに加え、小径コアでの測定における骨材の影響も受けている可能性も懸念され、JASS 5などに採用されている信頼性設計においてはこれら局所環境のばらつきをどのように評価するかは極めて重要な意義をもっており、今後さらなる検討が必要と考える。

5. まとめ

以上をまとめると以下の通りである。

- (1) 局所環境が及ぼす影響について、方位別・高さ別のコンクリート内部の温・湿度測定と中性化深さを実構造物において実測した。
- (2) 中性化におよぼす温・湿度環境の影響が確認され、同じ環境条件に区分されるような壁の中でも数倍程度の差をもたらすことが明らかになった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造物コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点，2008
- 2) 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，No.14，pp.61-64，2001.12
- 3) 濱幸雄，胡桃澤清文，谷口円，桂修：寒冷環境下に暴露したコンクリート内部の温・湿度変化と透過積算温度，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.819-824，2007
- 4) 気象庁 HP <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (2009.1.14 現在)
- 5) 並木洋，阿部道彦，湯浅昇：RC 造建物のコンクリートの中性化に及ぼす各種要因の影響に関する調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1153-1154，2005.9