

論文 コンクリート内湿度の変動メカニズムおよびその分離手法に関する研究

中田 清史*1・松沢 晃一*1・鹿毛 忠継*2

要旨：コンクリート内湿度の変動メカニズムを整理するとともに、状態空間モデルおよびカルマンフィルタを用いて、湿度データの変動要因を分離する手法について検討した。検討にあたっては湿度変動要因として含水率成分および温度成分を定式化し、それぞれの成分を推定することとした。また、分析には実際のコンクリート内の温湿度データを用いた。検討の結果、湿度データから含水率成分による変動と温度成分による変動を分離、抽出できる可能性を示すとともに、得られた含水率成分の変動が既往のコンクリート内水分状態に関する報告と矛盾しないことを確認した。

キーワード：コンクリート内湿度、湿度変動メカニズム、状態空間モデル

1. はじめに

近年、一般環境下における鉄筋コンクリート（以下、RC）造建築物の耐久性について、水分の影響の有無に基づいて評価する議論が進められている¹⁾。このような議論は、これまでの実構造物調査の結果から、中性化や鉄筋腐食といった劣化現象がコンクリートの水分状態と深い関係性があることが再確認されたことを契機としており^{例えば、2)}、鉄筋腐食環境の評価を目的として、コンクリートの水分状態の測定や分析が続けられている^{例えば3)}。

コンクリートの水分状態を把握する手法としては、コンクリート内にセンサーを埋め込み、内部の温湿度を測定する手法が近年採られている。この手法は、直接含水率を測定することはできないものの、長期間にわたって水分状態のモニタリングができるうえ、あと施工ができる（予めセンサーを設置する必要がない）ことから、測定対象が限定されづらいという利点がある。一方で、コンクリート内湿度は、特に実構造物においては、様々な要因により変動することが知られており、この変動要因を明らかにし適切に処理しなければ、鉄筋腐食環境の評価に結び付けることは困難であると考えられる。

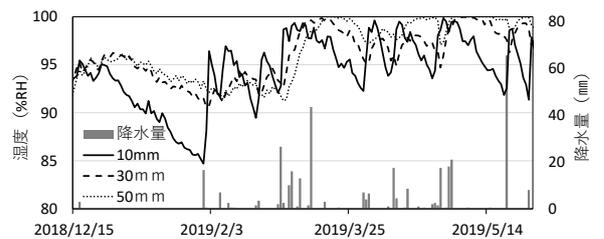
本研究では、温湿度の実測データに基づいてコンクリート内湿度の変動メカニズムについて整理するとともに、それぞれの要因を分離する手法を検討することを目的とする。検討にあたっては、湿度データを時系列データとして扱い、これを時系列分析手法の一種である状態空間モデルにより分析する。なお、本研究で用いる湿度データは、既報⁴⁾の屋外曝露試験で取得したものである。

2. コンクリート内湿度の変動メカニズム

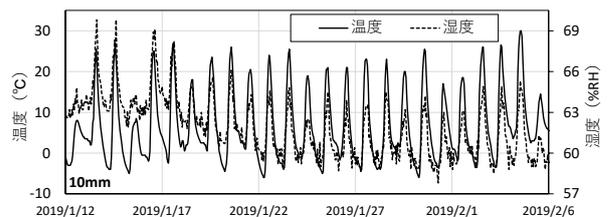
コンクリート内湿度の変動を分析するにあたり、まずこの変動がどのように生じるかを整理する。図-1 (a)に

屋外／雨掛かり有り環境のコンクリート内湿度（日平均推移）を示す。この測定結果から、コンクリート内部では降水による急激な湿度上昇とその後の乾燥による湿度低下が繰り返されていることが分かる。この乾燥繰返しは表層（10mm）部で顕著であり、深部においては表層側の湿度変動に追従する形で変化していることが確認できる。これらは、吸水や乾燥などによってコンクリート中の液水が移動し、含水率が変化することを示唆するものであり、これはコンクリート内の湿度変動の要因と考えられる。

一方、含水率変動のみでは説明がつかない湿度変動も確認されている⁴⁾。図-1 (b)は屋外／雨掛かり無し環境のコンクリート内温湿度であるが、温度の上下動にあわせて湿度も変動していることが確認できる。これは、温度上昇に伴って、コンクリートの空隙中に保持できる



(a) 降水と湿度の関係（屋外雨掛かり有）



(b) 温度および湿度の関係（屋外雨掛かり無）

図-1 屋外曝露コンクリートの内部湿度⁴⁾

*1 国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ 博士(工学) (正会員)

*2 国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ Ph.D. (正会員)

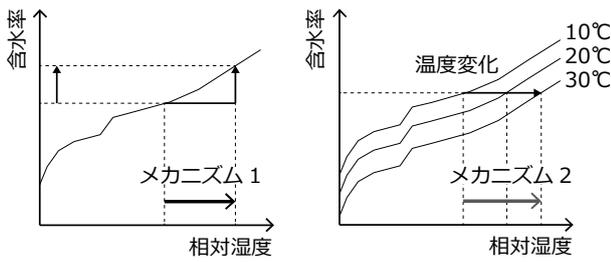


図-2 コンクリートの平衡含水率曲線および湿度変動メカニズム

液水量が減少し、余剰分が液水で満たされていない空隙中に水蒸気として放出されることで湿度が上昇すると考えられる。この湿度変動は、コンクリートの平衡含水率曲線が温度依存性を有していること⁵⁾に起因する湿度変動であり、コンクリートの含水率が変動しない場合にも生じ得る。また、冬季よりも夏季のコンクリート内湿度の方が高くなる傾向が報告されているが⁴⁾、この傾向と矛盾しないメカニズムである。

図-2は、前述の2つの湿度変動メカニズムを平衡含水率曲線に基づいて整理したものである。1つ目のメカニズムは含水率変動により生じるもの、2つ目のメカニズムは温度変動のみにより生じるものである。コンクリート内湿度の測定結果は、これらの影響が合成された結果として得られていると考えられる。

測定した湿度データとRC部材の耐久性評価を関連付けるには、それぞれの成分の大きさを分離して分析することが望ましい。そこで本研究では、式(1)のような簡易な構成式により湿度データを表現することを考える。本式は、湿度データが、2つの湿度変動メカニズムによる成分およびノイズの和により構成されると仮定したものであり、後述する分析手法(状態空間モデルの観測方程式)に対応した形式としている。

$$y_t = (\text{含水率成分}) + (\text{温度成分}) + v_t \quad (1)$$

ここに、 y_t ：時刻 t における湿度データ、 v_t ：観測ノイズ。

3. 状態空間モデルによる分析

3.1 分析手法

本研究では、温湿度データを表現する手法として、線形・ガウス型状態空間モデル^{6)~8)}を用いる。状態空間モデルは、温湿度データのように時間の経過に伴って変化するデータ群を表現する統計的手法の一種であり、以下の式により表現される。

$$x_t = G_t x_{t-1} + w_t, w_t \sim \mathcal{N}(0, W_t) \quad (2)$$

$$y_t = F_t x_t + v_t, v_t \sim \mathcal{N}(0, V_t) \quad (3)$$

ここに、 x_t ：時刻 t における状態を表す p 次元列ベク

トル、 G_t ：状態遷移を表す $p \times p$ 行列、 w_t ：正規分布に従う状態ノイズ、 W_t ：状態ノイズの分散共分散行列 ($p \times p$)、 y_t ：時刻 t における観測値、 F_t ： $1 \times p$ の観測行列、 v_t ：観測ノイズ。なお、本論ではベクトルおよび行列については、スカラーと区別するために太字で表記する⁸⁾。

式(2)、(3)はそれぞれ、状態方程式および観測方程式であり、カルマンフィルタと呼ばれるアルゴリズム^{6)~8)}により、観測値 y_t (湿度データ)から状態 x_t (含水率成分、温度成分)を推定する。

3.2 湿度変動の定式化

式(1)の含水率成分および温度成分について、状態方程式に当てはまるよう定式化することを考える。まず、含水率成分については、吸水や乾燥などにより増加または減少すると考えられ、また、単位時間当たりの変化量は外部環境やコンクリート自体の水分状態によって大きく異なると考えられる。このような変化をモデル化するために、本研究ではローカルレベルモデルを用いる。ローカルレベルモデルは、式(4)に示されるように、時間の経過とともに正規分布に従うノイズが加算されていく。これは同様の種のモデル(多項式モデル)の中でも最も単純なモデルであり、対象とする区間内で上下動を繰り返す場合に適したモデルと考えられる⁸⁾。

$$x_t^{(1)} = x_{t-1}^{(1)} + w_t^{(1)} \quad (4)$$

ここに、 $x_t^{(1)}$ ：時刻 t における含水率成分、 $x_{t-1}^{(1)}$ ：時刻 $t-1$ における含水率成分、 $w_t^{(1)}$ ：時刻 t における含水率成分の状態ノイズ。

次に、温度成分については、コンクリート内の温度に応じて変動していくと考えられる。また、温度が変化して以降、コンクリートが平衡状態に至るまでには一定の時間がかかることから、温度の影響が時間差で生じることも考慮に入れる必要がある。そこで、温度成分については、式(5)および(6)を用いて、 $\beta_t x_t' + x_t^{(2)}$ のようなモデルを用いることとした。ここで、 x_t' はコンクリート内の温度であり本モデルにおいては説明変数とみなすことができる。 β_t は温度に対する回帰係数であり、これについても式(5)に示すように、時間とともにノイズが加算され変化していくモデルとした⁸⁾。これは、コンクリートの水分状態によって温度変動に対する湿度変動が異なると考えられるためである。また、 $x_t^{(2)}$ は時間差で生じる温度の影響を表したものであり、過去の自らの状態と一定の相関(自己相関)を持つモデルとした⁶⁾。なお、このモデルを用いれば、2期前以前の影響を含めてモデル化することも可能であるが、モデルの単純化のために考慮するのは1期前のみとしている。

$$\beta_t = \beta_{t-1} + w_t^{(\beta)} \quad (5)$$

$$x_t^{(2)} = \phi x_{t-1}^{(2)} + w_t^{(2)} \quad (6)$$

ここに、 β_t ：時刻 t における回帰係数、 $w_t^{(\beta)}$ ：時刻 t に

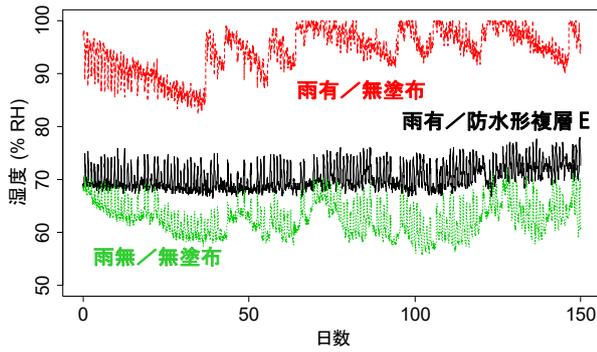


図-3 コンクリート内の湿度変動（かぶり 10mm 部）

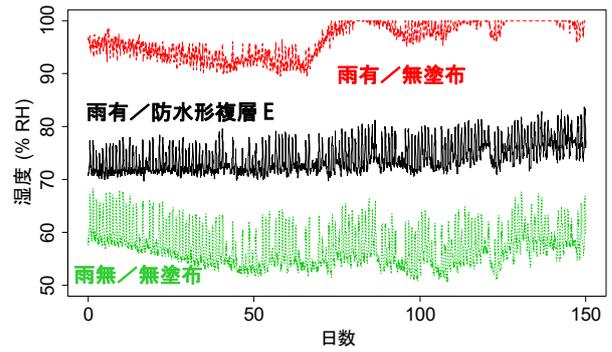


図-4 コンクリート内の湿度変動（かぶり 50mm 部）

おける回帰係数の状態ノイズ, $x_t^{(2)}$:時刻 t における自己相関項, $x_{t-1}^{(2)}$:時刻 $t-1$ における自己相関項, $w_t^{(2)}$:時刻 t における自己相関項の状態ノイズ。

以上をまとめると, 式(1)は式(7)のように書き換えられ, また, x_t , G_t , w_t , F_t をそれぞれ式(8)~(11)のように表せば, 定式化した湿度変動を式(2), (3)の状態空間モデルにより表現することができる。

$$y_t = x_t^{(1)} + \beta_t x_t' + x_t^{(2)} + v_t \quad (7)$$

$$x_t = \begin{pmatrix} x_t^{(1)} \\ \beta_t \\ x_t^{(2)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$G_t = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & \phi \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$w_t = \begin{pmatrix} w_t^{(1)} \\ w_t^{(\beta)} \\ w_t^{(2)} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$F_t = (1 \quad x_t' \quad 1) \quad (11)$$

以上のモデルに基づいてパラメータの推定を行う。推定すべきパラメータは, 状態ノイズ w_t の分散, 観測ノイズ v_t の分散および ϕ の 5 つであり, これらについては最尤法に基づいて推定した^{6)~8)}。また, 推定したパラメータを用いて各成分の平滑化分布を得た。なお, いずれの計算も R 言語 dlm パッケージを用いて行い, パラメータの推定には, dlmMLE 関数, 平滑化分布の計算には dlmSmooth 関数を用いた。

3.3 分析データ

図-3, 図-4に本研究で分析に用いた湿度データを示す。これらのデータは, 既報の屋外曝露試験で取得したものであり, 試験体および試験条件の概要については, 表-1に示す通りである。また, 外部環境および仕上種類については, 表-2に示す通り合計 3 水準である。それぞれの試験体について, 異なる深さに温湿度センサーを設置しており, 本研究で用いたのは深さ 10mm および 50mm のデータである。

図-5に本研究で分析に用いた温度データの一例を示

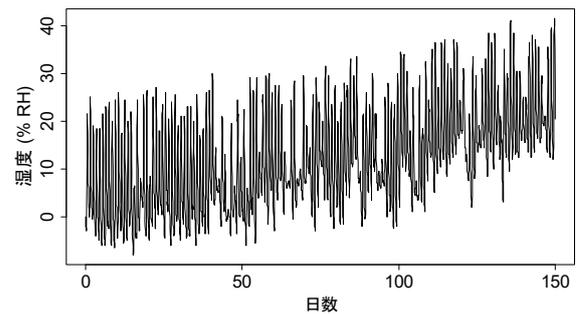


図-5 コンクリート内の温度（雨無/無塗布 10mm）

表-1 試験体の概要

コンクリート	普通, 水セメント比=0.60
寸法	150mm×150mm×150mm
湿度センサー	高分子静電容量式
試験時材齢	21~26 か月 (曝露開始 10~15 か月)
測定期間	2018 年 12 月 26 日~2019 年 5 月 24 日
測定ピッチ	1 時間

表-2 屋外曝露環境および仕上種類

	雨掛かり有り	雨掛かり無し
仕上種類	・無塗布 ・防水形複層 E	・無塗布

す。測定した温度データについては, 平均温度は 1~2°C 程度異なるものの, 概ね同様の変動を示したことから図は割愛した。なお, コンクリート内温度は, 冬季でも 20°C 以上となっている場合があるが, これは試験体が日射を受けて気温以上に温度上昇した結果と考えられる。

4. 結果と考察

4.1 パラメータの推定結果

表-3, 表-4にパラメータの推定結果を示す。 $w_t^{(1)}$ は, 本研究では含水率変動に関わるパラメータであると考えられる。この大小関係を, 外部環境および仕上種類に関して比較すると, 「雨有/無塗布」 > 「雨無/無塗布」 > 「雨有/防水形複層 E」の順であることが分かる。コンクリートの含水率変動は, 雨掛かりがある環境ほど, 仕上げが無いものほど大きいと考えられ, 上記の結果は

表-3 推定されたパラメータ (w_t の分散)

		$w_t^{(1)}$	$w_t^{(\beta)}$	$w_t^{(2)}$
雨有/ 無塗布	10mm	0.1127	0.2205	0.0000
	50mm	0.0107	0.2532	0.0000
雨有/ 防水形複層	10mm	0.0006	0.4861	0.0000
	50mm	0.0002	0.6465	0.0000
雨無/ 無塗布	10mm	0.0708	0.2317	0.0000
	50mm	0.0037	0.5131	0.0000

表-4 推定されたパラメータ (v_t の分散, ϕ)

		v_t の分散	ϕ
雨有/ 無塗布	10mm	0.2318	0.7730
	50mm	0.0641	0.7765
雨有/ 防水形複層	10mm	0.0565	0.7574
	50mm	0.0128	0.7837
雨無/ 無塗布	10mm	0.0004	0.1136
	50mm	0.0347	0.7687

このことと矛盾しないと考えられる。また、深さ方向で比較すると、「10mm」 > 「50mm」となっており、表層の含水率ほど外部環境の影響を受けやすいこととも一致する結果と言える。

次に、上記で得られたパラメータを用いて、それぞれの湿度データに関する状態 x_t の推定を行った。図-6、図-7に推定結果の一例を示す。まず、含水率成分については、図-3に示されるような変動が除去され、数日間を周期とする増減を繰り返しながら全体的には減少していく傾向が確認できる。図で示される推定結果は、雨掛かり無し環境/仕上げ材無塗布の試験体を対象としたものであり、このようなコンクリートでは、外部環境との湿度差に応じて吸湿または乾燥を繰り返しながら徐々に乾燥していくものと考えられる。図-6の結果は上記のような乾湿繰返しの傾向を表現できているものと考えられる。一方、図-7(a)の $\beta_t x_t'$ 成分については日内の周期的な上下動を繰り返しながら徐々に増加する傾向が確認でき、120日~150日付近では10%程度の値となっている。これは冬季~春季にかけての約5か月の曝露試験期間のうちで徐々に外気温が上昇し、これに応じて湿度の影響が増大していったことを表しているものと考えられる。また、図-7(b)の $x_t^{(2)}$ 成分については、0を中心として±1~2%程度の変動幅を示した。

4.2 含水率成分の比較

含水率成分についてさらに考察を加える。図-8に各条件において推定された含水率成分(赤線)および図-3、図-4で示した湿度の日内平均の推移(黒線)を示す。まず、雨掛かり無し/無塗布の(a)については、測定開始時の70%RH付近から増減を繰り返しながら55%RH付近まで低下している。(b)についても、変動幅は(a)に比べて小さいものの、緩やかに増減を繰り返しながら低下し

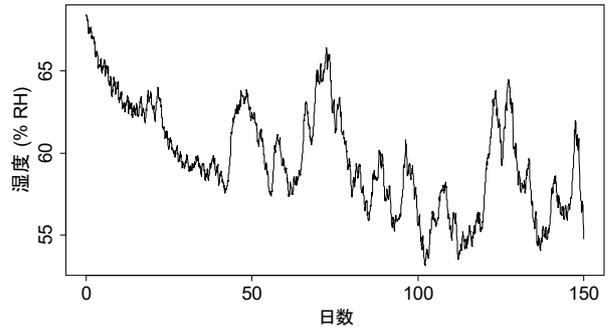
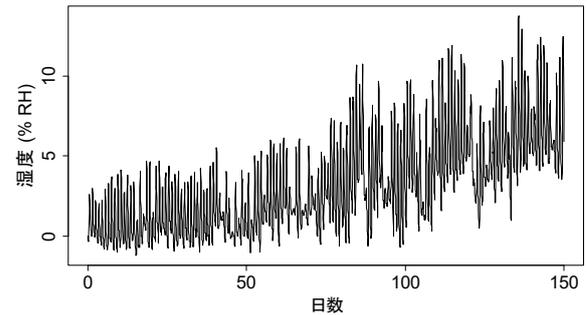
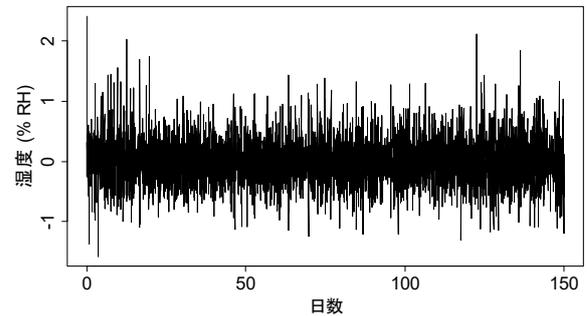


図-6 含水率成分 ($x_t^{(1)}$) の推定結果の一例 (雨掛かり無し/無塗布/10mm)



(a) $\beta_t x_t'$ 成分

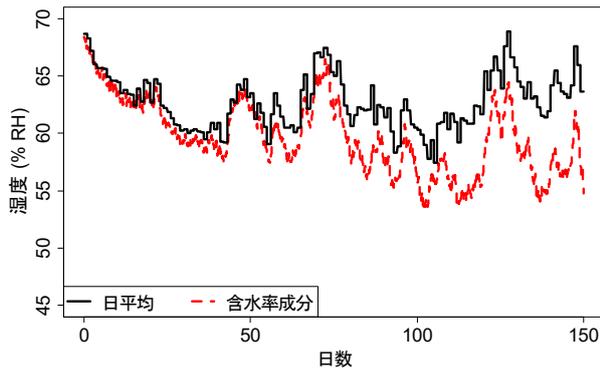


(b) $x_t^{(2)}$ 成分

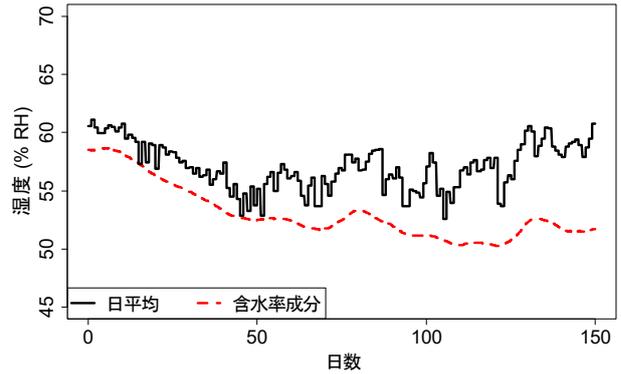
図-7 温度成分の推定結果の一例 (雨掛かり無し/無塗布/10mm)

ていく傾向が確認できる。このような傾向は、屋外雨掛かり無し環境に曝露されたコンクリート中の水分量を測定した結果⁹⁾と同様の傾向であると考えられる。また、含水率成分と日平均の推移を比較すると、気温が上昇し始める50日以降、両者の乖離が大きくなっていることが分かる。特に50mmの平均湿度を見た場合には、50日以降は低下傾向から上昇傾向へと転じると判断できるが、含水率成分の推定結果では上昇傾向は確認できず50~55%RHを推移する。

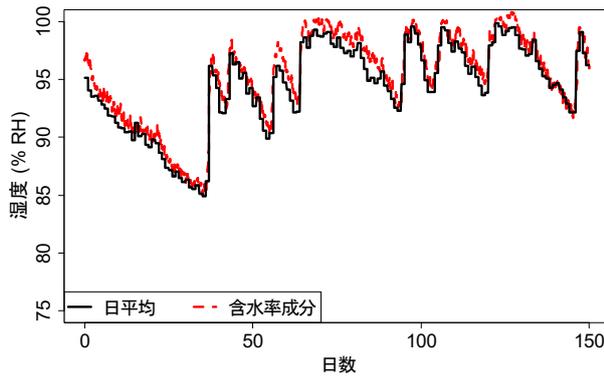
次に、雨掛かり有り/無塗布の10mmの(c)については、推定された含水率成分と日平均の推移に明確な違いは見られない。一方、50mmの(d)については、60日~80日付近の湿度上昇までは、含水率成分と日平均が同様の曲線を示すが、その後は乖離が生じる結果となった。



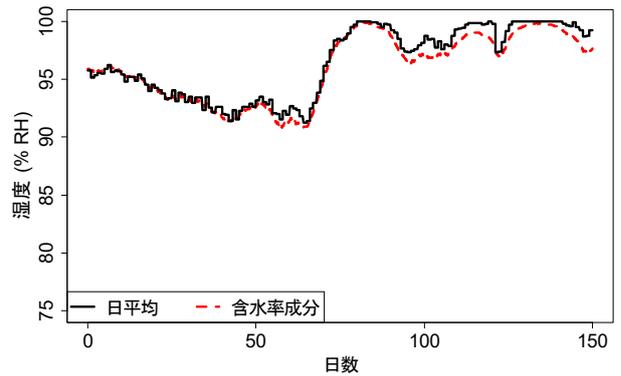
(a) 雨掛かり無し/無塗布/10mm



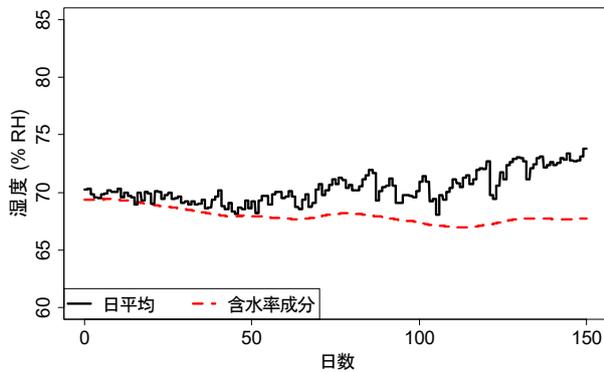
(b) 雨掛かり無し/無塗布/50mm



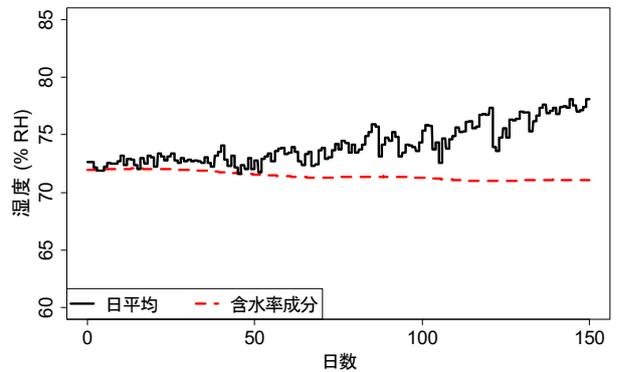
(c) 雨掛かり有り/無塗布/10mm



(d) 雨掛かり有り/無塗布/50mm



(e) 雨掛かり有り/防水形複層 E/10mm



(f) 雨掛かり有り/防水形複層 E/50mm

図-8 含水率成分(赤線)と日平均推移(黒線)の比較

雨掛かり有り/防水形複層 E の (e), (f)については、含水率成分の変動は極めて小さく、150 日間でわずかに低下している程度である。このことは、同仕上を施した場合、吸水や乾燥の影響が極めて小さくなるという既往の実験結果¹⁰⁾と矛盾しない結果と考えられる。また、(a)、(b)と同様に日平均湿度と含水率成分の乖離が 50 日以降で広がっていくことも確認された。

ここで、含水率成分と日平均推移との乖離について考察を加える。図-2 でも示した通り、コンクリート内の湿度変動は、含水率が変動しない場合にも生じうる。特に(e), (f)については、試験条件から含水率変動は極めて小さいと考えられるにもかかわらず、日平均湿度が上昇

し乖離が広がる結果となった。この原因は、(e), (f)の条件においては含水率成分よりも温度成分の影響が相対的に大きく、50 日以降の気温の上昇に伴って温度成分が増大していったためと考えられる。また、雨掛かりの影響が小さい(a), (b)においても含水率成分と日平均湿度の乖離が確認されたが、これは(e), (f)と同様に含水率成分の影響よりも温度成分の影響が相対的に大きかったためと考えられる。一方、(c), (d)については乖離がほぼ生じなかったが、これは、雨掛かり環境においては含水率成分の影響が極めて大きいためと考えられる。

4.3 モデル改良の可能性

湿度データから分離した含水率成分の変動は、概ね既

往の実験結果^{9),10)}と矛盾しない傾向を示しているものと考えられる。しかしながら、既報の曝露試験では含水率に関わるデータを測定していないことから、これらの推定結果の妥当性を定量的に検討することは困難である。今後は、コンクリート内湿度の測定と並行して含水率や重量変化などを測定し、本研究の手法で得られた含水率成分の妥当性を検証する必要がある。また本手法は、比較的単純なモデルしか用いていないが、仮にモデルの改良が必要な場合は、式(2)、(3)で表現できる範囲であれば変更可能である。推定結果と実際の含水率変動との違いを確認したうえで、より適切なモデルの提案も可能であると考えられる。

4.4 湿度データ分析の必要性

既往の研究で指摘されているように、大気中の鉄筋腐食は湿度（または、これに対応する水膜厚さ）と関連性があり¹¹⁾、鉄筋腐食環境を評価する上では湿度のみ確認できれば十分とも考えられる。しかしながら、コンクリート内においては、同じ湿度でも温度が異なれば含水率が異なる。これは、鉄筋への酸素の拡散しやすさ（供給されやすさ）が異なるということであり、鉄筋近傍の湿度が同じでも鉄筋腐食速度が異なることを意味する。特に、吸水の影響が小さいと考えられる条件においては、相対的に温度成分の影響が大きいと考えられ、例えば非腐食環境を評価する上で本研究のような手法が有用となる可能性がある。また、吸水の影響が大きいと考えられる条件においても、どの深さにまで吸水の影響が及んでいるかを定量的に示すことができる。

1章でも述べた通りコンクリート内の温湿度測定は測定対象が限定されづらいなどの利点があり、今後のデータの蓄積が進んでいくと考えられる。ここで得られた湿度データをどのように耐久性評価に結び付けるかは今後の重要な課題であり、本研究の手法はその解決策の一つになりうると考えられる。

5. まとめ

コンクリート内の湿度変動メカニズムを整理するとともに、状態空間モデルを用いて湿度変動要因を分離する手法について検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) コンクリート内の湿度変動は、含水率変動に起因するものと温度変動に起因するものとに分けられることを実際の測定データから整理した。
- (2) 湿度データを上記の湿度変動メカニズムおよび状態空間モデルに基づいて定式化し、カルマンフィルタにより各成分（含水率成分、温度成分）を推定した。
- (3) 推定した含水率成分と日平均湿度の乖離は、雨掛かりの影響が小さい条件で顕著であった。このような

条件では、含水率変動の影響に対して、温度変動の影響が相対的に大きいとめと考えられる。

- (4) 推定した含水率成分は概ね既往の研究の傾向と矛盾しない傾向を示したが、この変動が実際の含水率変動と一致するかについては今後検討する必要がある。
- (5) コンクリート内の湿度変動の分離について、RC造部材の耐久性の観点からその必要性を指摘した。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20K14880 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 日本建築学会材料施工委員会：JASS 5 大改定に向けて、研究協議会資料，2019.9
- 2) 山田宗範ほか：実構造物におけるコンクリート内部の水分が鉄筋腐食に与える影響に関する研究、コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No. 1, pp. 621-626, 2018.7
- 3) スカイティンほか：既存 RC 構造物のコンクリート内部相対湿度および腐食環境に関する検討、コンクリート工学年次論文集，Vol.42, No. 1, pp. 497-502, 2020.7
- 4) 中田清史ほか：屋外曝露試験によるコンクリート内部の水分状態に及ぼす仕上塗材の影響、日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集，pp.81-84, 2019.10
- 5) 五十嵐豪，丸山一平：セメント硬化体の処女脱着など温線および BET 比表面積の温度依存性のモデル化、日本建築学会東海支部研究報告書，Vol. 50, pp. 81-84, 2012.2
- 6) 北川 源四郎：時系列解析入門，岩波書店，2005
- 7) 馬場 真哉：時系列分析と状態空間モデルの基礎：R と Stan で学ぶ理論と実装，プレアデス出版，2018
- 8) 萩原淳一郎ほか：基礎からわかる時系列分析—R で実践するカルマンフィルタ・MCMC・粒子フィルタ—，技術評論社，2018
- 9) 女屋賢人ほか：屋外一般環境下におけるコンクリート構造物中の含水状態の長期変動解析法の高精度化、コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No. 1, pp. 760-765, 2014.7
- 10) 長谷川 拓也，千歩 修：仕上材・表面改質材を施工したコンクリートの水分移動性状、日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集，2007 巻，p. 183-186, 2007.10
- 11) 石川 雄一ほか：鉄表面における水分子の吸着とその腐食への影響、Zairyo-to-Kankyo, Vol. 40, Issue 8, pp. 540-544, 1991.8