

論文 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

女屋 賢人*1・下村 匠*2・ThynnThynnHtut*3

要旨: 屋外一般環境下におかれたコンクリート構造物中の含水状態の経時変化を数値解析で再現することを目的とし、水分移動モデルの高精度化と、構造物への環境作用の考慮の方法について検討を行った。屋外ではコンクリートの表面温度と外気温度は異なり、表面温度に対応したコンクリート表面近傍の相対湿度がコンクリートの乾湿挙動に影響を及ぼしていることを明らかにした。表面近傍の相対湿度を境界条件として用いることで、水分移動解析の精度を向上できることを確認した。コンクリートの表面温度は外気との熱伝達、コンクリート内部の熱伝導、日射による熱放射を考慮することで精度よく推定できることを確認した。

キーワード: 水分移動, 含水状態, 熱伝導, 結露, 環境作用

1. はじめに

塩害, 凍害, 乾燥収縮といったコンクリート構造物の劣化現象の多くには, コンクリート中の水分または水分を媒介とする物質の移動が関係している。そのため, コンクリート構造物の耐久性・長期供用性を適切に評価するには, 供用環境下における含水状態の経時変化を予測することが重要である。

これまでの研究により, 条件が制御された実験室内におけるコンクリート中の水分移動はかなり精度よく再現可能となっている^{1),2),3),4)}。一方, 実構造物においては, 温度, 湿度, 降雨, 日射など時空間的に変化する自然界からの種々の作用を受ける。したがって実構造物の含水状態の予測には, 複雑で多岐にわたる環境作用の影響をどのように評価するかが課題となる。

本研究では, 実環境下におかれたコンクリート構造物中の含水状態の経時変化を数値解析により再現することを目的とし, 著者らの既往の水分移動モデルの高精度化と, それに見合った構造物への環境作用の適切な考慮の方法について検討を行った。

2. コンクリート表面における水分の凝縮による吸湿のモデル化

2.1 従来モデルによる長期屋外暴露実験の解析

著者らは, 空気中における乾燥と吸湿, および液状水に接した際に生じる吸水を考慮したコンクリート中の水分移動モデルを開発し^{1),2)}, 条件が制御された室内環境では高い精度でコンクリートの乾湿挙動を再現できることを確認している^{3),4)}。しかし, 屋外において温度・湿度の変動の影響は受けるが, 降雨, 日射の影響を受けない環境下(屋外屋根有)では, 冬季において実測値は湿

潤傾向であるのに対し解析値は乾燥傾向を示す結果が2年続けて得られた(図-1)。一方, 降雨, 日射の影響も受ける環境下(屋外屋根無)では, 逆に実測値と解析値にそのような乖離は見られなかった(図-2)。これらの結果より, 冬季の屋外屋根有環境下では従来の解析で考慮されていない事象が起きていると考えられた。

2.2 表面における凝縮現象についての考察

図-1, 図-2の屋外暴露実験^{3),4)}ではコンクリートの表面温度を実測しており, 表面温度と外気温度が異なることを確認している。飽和水蒸気圧は温度に依存するので, 水蒸気分圧がコンクリート表面からの距離によらず一定と仮定した場合, コンクリート表面の仮想相対湿度は, 式(1)で与えられる。

$$RH_s = RH \times \frac{P_{vo}}{P_{sv0}} = \frac{P_v}{P_{sv0}} \times 100 \quad (1)$$

ここに, RH_s : 表面近傍の仮想相対湿度[%RH], RH : 外気の相対湿度[%RH], P_{vo} : 外気温度に対応する飽和水蒸気圧[Pa], P_{sv0} : 表面温度に対応する飽和水蒸気圧[Pa], P_v : 外気の水蒸気分圧[Pa]である。

外気温度に比べコンクリートの表面温度が低く, $P_v > P_{sv0}$ となる時, コンクリート表面において水分が凝縮し, 結露が発生すると考えられる(図-3)。実測した外気の温度・相対湿度, およびコンクリートの表面温度を用い, 結露の判定を行ったところ図-4のような結果となり, 冬季に表面結露が発生していることが確認できた。屋外屋根有の環境下において, 冬季における実測値と解析値の乖離はこの結露による吸湿の影響であると考えられる。一方, 屋外屋根無の場合は降雨による吸水が支配的となるため, 結露の影響が考慮されていなくても解析値が実測値を再現できたものと考えられる。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (学生会員)

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系 教授 工学博士 (正会員)

*3 元長岡技術科学大学大学院生

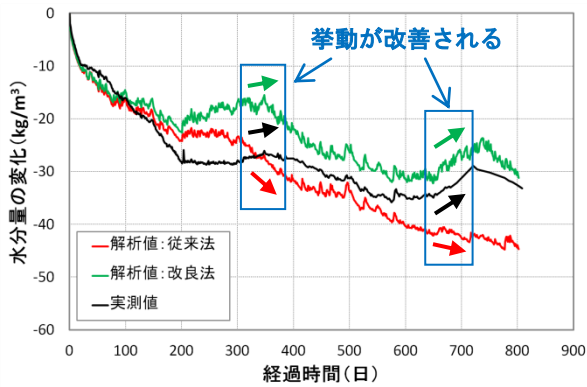


図-1 実測値と解析値の比較（屋外屋根有）

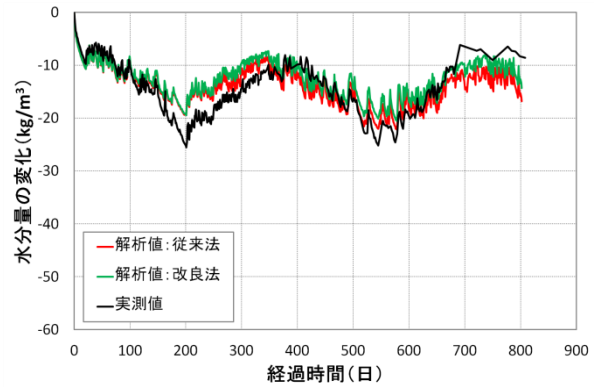


図-2 実測値と解析値の比較（屋外屋根無）

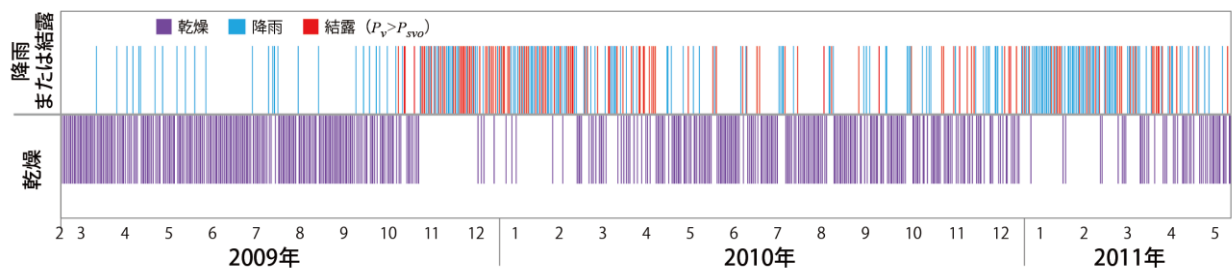


図-4 実験期間における結露の発生判定

2.3 結露による吸湿のモデル化

コンクリート表面温度と気温の差異に起因した結露の影響を考慮するため、実測された表面温度と周囲環境の気温、相対湿度から計算される表面近傍の仮想相対湿度を用いて解析を行った結果と、実測値を比較したグラフを図-1、図-2に示す。結露の発生が判定された時は表面近傍の仮想相対湿度を99.9%RHとして計算している。

図-1は屋外屋根有環境下での結果を示したものである。仮想相対湿度を使用したケースでは、実測値に対し全体的にやや湿潤側となっているが、環境の相対湿度を境界条件に用いた従来の解析値と比較すると、実測値の傾向をよりよく再現しており、特に冬季における傾向の不一致は解消されている。

3. 解析による表面温度の評価法の検討

2章において実構造物の水分移動解析の精度向上にはコンクリート表面温度を考慮する必要性が明らかになった。実構造物では表面温度を常に実測することは現実的でないため、表面温度は環境条件をもとに温度解析により求めることが望ましい。そこで、暴露供試体と実構造物で温度測定を行い、数値解析による再現を試みた。

3.1 屋外暴露実験

(1) 供試体による暴露実験

暴露実験に用いた供試体の概要を図-5に示す。実験には水セメント比50%の普通コンクリートを用い、φ100×300mmの型枠に打設し、水分の逸散を防ぐために打設

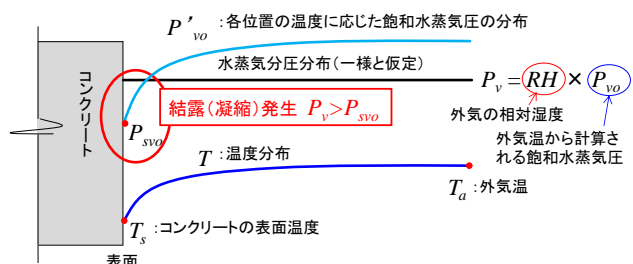


図-3 結露発生メカニズム

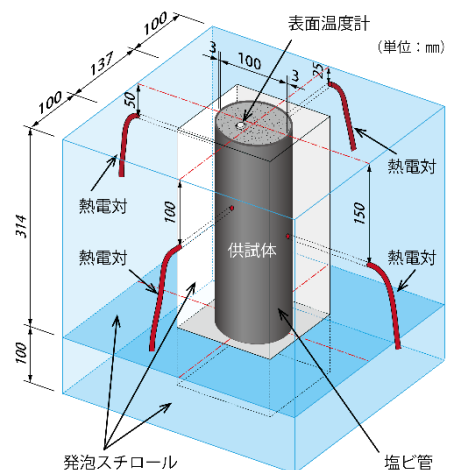


図-5 供試体概要

後から実験開始までの111日間、封緘養生を施した。型枠は内径100mmの塩ビ管と発泡スチロールを組み合わせたものであり、表面からの深さ方向のみの一次元的な熱の移動を再現するために、発泡スチロールの周囲をさらに断熱材で覆い、熱の流出入の抑制を図った。

表一 暴露供試体の環境条件

Case	試験環境	概要
A	屋外屋根有	温度・湿度変動
B	屋外屋根無	温度・湿度変動，降雨，日射



Case A(屋外屋根有) Case B(屋外屋根無)

図一六 供試体暴露環境

表一三 解析に使用したパラメータ

名称	記号	数値	単位
密度	ρ	2.3×10^{-3}	$[\text{g} \cdot \text{mm}^3]$
比熱	c	1.2	$[\text{J} \cdot \text{g} \cdot ^\circ\text{C}]$
熱伝導率	κ	2.6×10^{-3}	$[\text{J} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}]$
熱伝達係数1 (コンクリート-大気間)	m_1	1.2×10^{-5}	$[\text{J} \cdot \text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}]$
熱伝達係数2 (コンクリート-断熱材間)	m_2	0.4×10^{-5}	$[\text{J} \cdot \text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}]$

供試体は、内部温度計測用と水分量計測用の2種類を用意し、内部温度計測用の供試体には、表面からの深さが25mm, 50mm, 100mm, 150mmの位置に熱電対を埋設し、表面には表面温度計を設置した。水分量計測用の供試体は、断熱材が吸水して重くなることが懸念されたため、発泡スチロール部材から塩ビ管を抜き出せる機構にし、コンクリート部分のみの重量を計測した。

外気温度、相対湿度、全天日射量は供試体近辺に設置したウェザーステーションにより測定した。コンクリート表面近傍の温度は、表面温度計にて1時間毎に自動計測し、コンクリート内部の温度は熱電対で定期的に計測した。コンクリート供試体中の水分量の経時変化は、供試体重量を電子天秤で定期的に計測し、初期重量との差から算出した。

供試体を暴露する環境は、表一に示す2種類とした(図一六)。いずれも新潟県長岡市にある本学構内である。暴露実験は2013年5月13日より開始した。

Case A: 屋外に設けた百葉箱状の箱内に設置する。日射、降雨の影響を受けず、外気温度、相対湿度の変動のみの影響を受ける環境条件である。

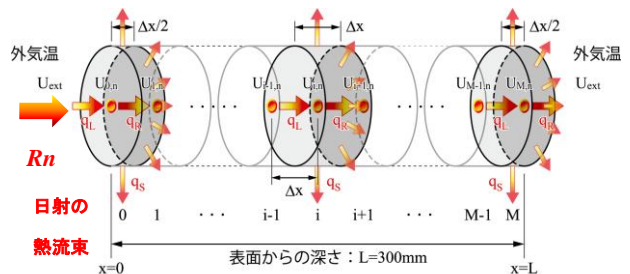
Case B: 屋外一般環境下に設置する。一般的な屋外構造物が経験する外気温度、相対湿度の変動、降雨、日射等の影響を受ける環境条件である。

表一四 対象実構造の計測位置の環境条件

記号	試験環境	概要
BRR	ボックス内	温度・湿度変動
UL1R	西向き擁壁	温度・湿度変動，降雨，夕日
UL1L	東向き擁壁	温度・湿度変動，降雨，朝日



図一七 対象実構造物および計測位置



図一八 差分法による熱伝導解析

(2) 実構造物の温度計測

表面温度の計測を行った実構造物の写真を図一七に示す。対象構造物は新潟県柏崎市に建設されたボックスカルバートである。計測位置は図に示す3か所であり、供試体を使用したものと同じ表面温度計をそれぞれの壁面に設置した。各計測位置は表一四のような特徴がある。表面温度の計測は2012年11月7日より開始した。

3.2 コンクリート中の熱伝導解析と水分移動解析

(1) 解析手法

供試体の表面温度は、外気からの熱伝達と、コンクリート内部の熱伝導、さらに屋外一般環境下では、晴天時の日中に日射を受けるため、太陽からの熱放射の影響を受ける。熱伝達、熱放射の影響を考慮するために、表面における境界条件式として式(2)を使用した。式(2)の R_n は観測された全天日射量を単位変換して使用した。

$$q_L = -m(T_s - T_a) + R_n \quad (2)$$

ここに、 q_L : 表面に流入する熱流束 $[\text{J}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})]$ 、 m : 熱伝達係数 $[\text{J}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s})]$ 、 T_s : 表面温度 $[^\circ\text{C}]$ 、 T_a : 外気温度 $[^\circ\text{C}]$ 、 R_n : 日射の熱流束 $[\text{J}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})]$ である。

また、暴露実験を行った供試体は、断熱材により熱の流出入の抑制を図っているが、完全に断熱ではないため、供試体側面および底面においても熱の流出入が生じると考えられる。以上を考慮した熱伝導解析を行った。数値解析法は差分法によった(図一八)。

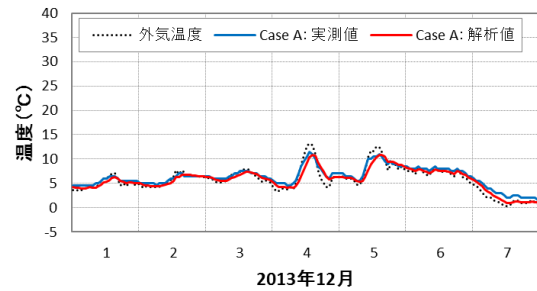
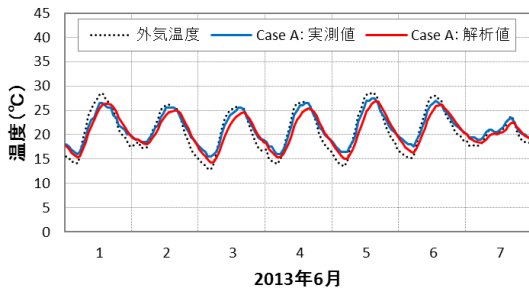


図-9 供試体の表面温度の実測値と解析値の比較 (Case A)

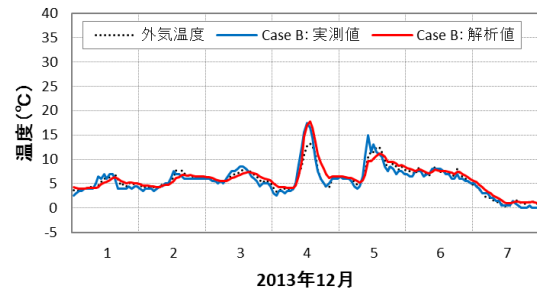
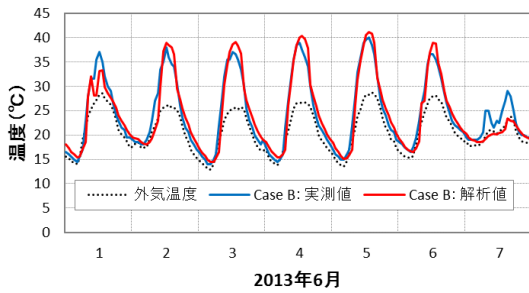


図-10 供試体の表面温度の実測値と解析値の比較 (Case B)

コンクリート中の水分移動解析は既往の水分移動モデル^{1),2)}に、2章で改良したようにコンクリート表面温度の影響を考慮した表面近傍の相対湿度を境界条件に用いた。表面温度は温度解析により求めた値を用いた。

(2) 材料パラメータ

温度解析には表-3 の特性値を使用した。コンクリート—断熱材間の熱伝達係数は、Case A の解析結果が実測値に近づくように定めた。実構造物の場合、壁厚方向への一次元的な熱の移動のみを考え、コンクリート—断熱材間の熱伝達係数は0として計算した。

水分移動の解析には水セメント比と養生条件から推定される材料パラメータの値を使用した¹⁾。供試体は封緘養生を行っていたが、封緘が完全ではなかったため暴露実験前に若干乾燥していた。その結果、特にCase B では実験を通して湿潤する傾向が見られた。暴露前の乾燥の影響を表現するため、供試体内部の初期湿度を変化させた解析を複数回試行し、初期空隙湿度をCase A は92%、Case B は70%と設定した。実構造物は竣工後からを解析対象とし、初期空隙湿度を99.9%と設定した。

(3) 環境作用

温度解析および水分移動解析において環境作用として考慮するものは、外気温度、相対湿度、日照時間、全天日射量、降雨履歴の1時間毎の気象データである。日照時間は、その時間における日射の有無の判定に使用した。なお、日射を受けない環境下 (Case A および、実構造物のBRR) における温度解析では、外気温度のみを境界条件として与えた。

供試体の解析に使用する外気温度、相対湿度、全天日射量は、暴露実験場所に設置したウェザーステーションの測定値を使用し、日照時間、降雨履歴には気象庁のデ

ータベース⁵⁾の新潟県長岡市の測定値を使用した。降雨履歴は1時間における降水量の有無によって判定し、降水量が0より多ければその時間は降雨時間とした。

実構造物の解析に使用する外気温度、日照時間、降雨履歴は気象庁のデータベース⁵⁾の新潟県柏崎市の測定値を使用し、相対湿度、全天日射量は、気象庁のデータベース⁵⁾より、最寄り地方観測所である新潟気象台の値を使用した。UL1R、UL1Lは鉛直な面であり、なおかつ壁の向きが異なるため、気象庁で計測している日照時間と実際に日射を受ける時間が異なる。そのため、日照時間はUL1Lでは日の出から午前10時までのみ、UL1Rでは午前9時から日の入りまでのみの値を使用した。

3.3 実測値と解析値との比較

(1) 供試体の表面温度の解析結果

本学構内で実施した温度変動の暴露実験について、実験ケース毎に実測値と解析値を比較したグラフを図-9、図-10に示す。夏季と冬季の参考として、左図に2013年6月1日から7日までの温度の変動、右図に2013年12月1日から7日までの温度変動を示している。また、解析に使用した外気温度もプロットしている。

図-9は日射の影響を受けず、外気温度の変動のみによって温度が変化する環境下 (Case A) の再現解析結果である。夏季、冬季においても、表面温度の実測値は外気温度の変動に対し、少し遅れて変動する傾向を示しており、解析値においてその変動傾向が正確に再現されていることがわかる。

図-10は天候・時間帯により日射の影響を受け、外気温度の変動によって温度が変化する環境下 (Case B) の再現解析結果である。実測値より、日中はコンクリート表面において日射による温度上昇が生じ、表面温度が

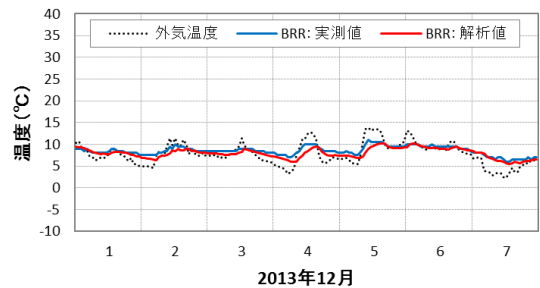
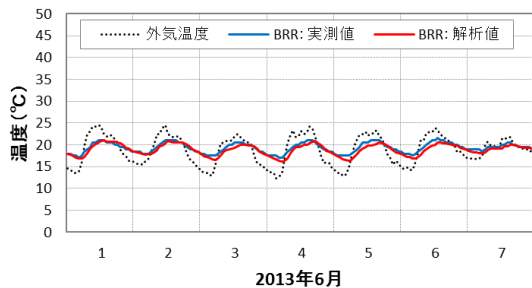


図-11 構造物の表面温度の実測値と解析値の比較 (BRR)

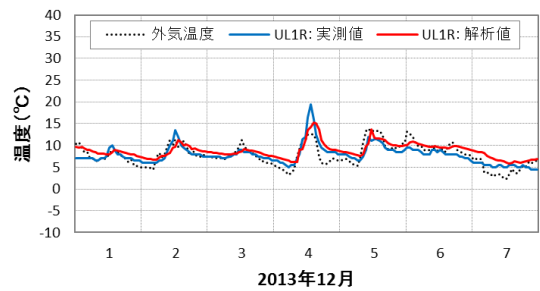
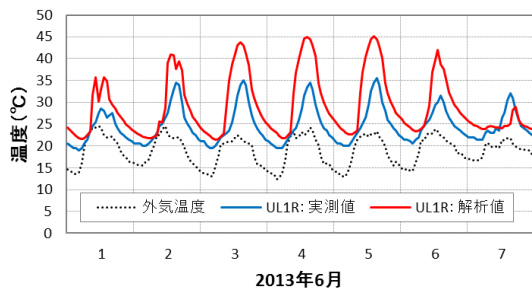


図-12 構造物の表面温度の実測値と解析値の比較 (UL1R)

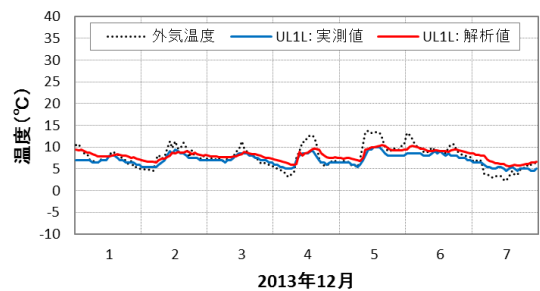
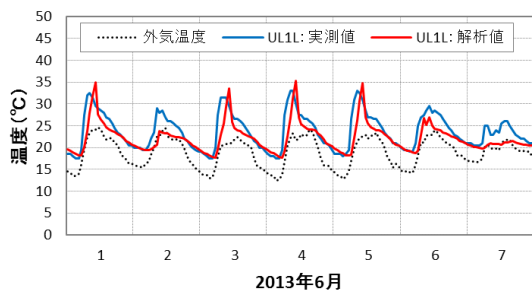


図-13 構造物の表面温度の実測値と解析値の比較 (UL1L)

外気温度を大きく上回っていることが確認できる。解析値においてもこの傾向を再現できている。しかしながら、実測値が外気温度を上回り解析値が外気温度を下回る傾向を示している個所も見受けられる(6月7日、12月1, 2, 3, 5日)。これは、長岡の四要素観測所で観測された日照時間と、供試体が日射を受けた時間が異なることに起因していると考えている。

(2) 実構造物の表面温度の解析結果

新潟県柏崎市の実構造物で計測した表面温度について計測位置ごとに実測値と解析値を比較したグラフを図-11から図-13に示す。供試体同様、左図に2013年6月1日から7日までの温度の変動、右図に2013年12月1日から7日までの温度変動を示し、解析に使用した外気温度もプロットしている。

図-11はBRRの再現解析結果であり、供試体のCase Aと同様の環境条件下である。Case Aと同様、実測値は外気温度の変動に対し、少し遅れて変動する傾向を示しており、解析値においてもその傾向が再現されている。冬季においては若干の乖離が見られるものの、表面温度の変化傾向を定性的に表現できている。

図-12、図-13はUL1R、UL1Lの再現解析結果であり、供試体のCase Bに近い環境条件下である。UL1Rと

UL1Lは鉛直の壁面であり、それぞれ向きが異なるため、日照時間が異なる。

UL1Rについては、表面温度の解析値が、夏季においては実測値よりも高く、冬季においては実測値よりもやや低くなっている。解析に使用している全天日射量は、水平面に作用するすべての日射量を計測しているものであるが、水平面と鉛直面とは作用する日射量は異なる。夏季は太陽高度が高いため水平面に作用する日射量が大きくなり、逆に太陽高度が低くなる冬季では鉛直面に作用する日射量が大きくなる。日射を受ける構造物の表面温度を正確に計算するためには方向性を考慮した日射量を与えることが必要であり、今後改良の余地があるといえる。

(3) 供試体の乾湿挙動の解析結果

本学構内で実施した暴露実験における水分量の変化について、実験ケースごとに実測値と解析値を比較したグラフを図-14、図-15に示す。図中の赤の実線は、実測された外気温度・相対湿度を境界条件にそのまま使用した従来法による解析結果であり、図中の緑の実線は改良法による解析結果であって、温度解析によって計算された表面温度と周囲環境の気温、相対湿度から計算された表面近傍の相対湿度を使用している。

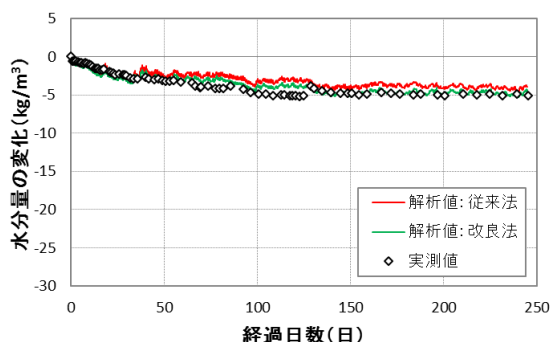


図-14 供試体の重量変化の実測値と解析値の比較 (Case A)

図-14は、降雨・日射を受けず外気温度と相対湿度の変動のみの影響を受ける環境条件である Case A の結果である。改良法による解析値は、従来法による解析値に比べより実測値に近い挙動を示していることが確認できる。実験開始から70~120日経過した期間において実測結果と解析結果に少々乖離が見られるが、実験全期間の平均的な含水状態の変化傾向は一致している。

図-15は、外気温度と相対湿度の変動に加え降雨と日射の影響を受ける環境条件である Case B の結果である。本条件下では重量増加の原因としては降雨による吸水の影響が支配的となるため、従来法による解析結果と改良法による解析結果の違いはごくわずかである。Case A と同様に、実験の中期において実測結果と解析結果に乖離が見られるが、全体的に水分量の変動の傾向を良好に再現できている。

なお、図-14, 15 の実験期間には冬季のデータが含まれていないので、表面に結露は生じていない。本暴露実験はさらに長期間継続する予定である。

(4) 実構造物中の水分量の解析結果

実構造物の水分量の変化の数値解析について、各計測位置の解析値を比較したグラフを図-16に示す。降雨を受けないBRRと、降雨を受けるUL1L, UL1Rとでは水分量の変化に大きな差が見られたが、日射を受ける時間が異なるUL1LとUL1Rとでは差は小さかった。このことから、供試体の場合と同様に、屋外環境下におかれた構造物の乾湿には、降雨による吸水の影響が大きいことが確認できた。

5. まとめ

- (1) 屋外におかれたコンクリートでは気温の時間的変動、および日射の影響により、気温とコンクリート表面温度に差異が生じることがある。その結果、表面近傍の相対湿度が大気相対湿度と異なり、コンクリート表面に水分が凝縮することがある。
- (2) 屋外におかれたコンクリートの乾湿挙動を精度良く予測するには、コンクリート表面温度の影響を受

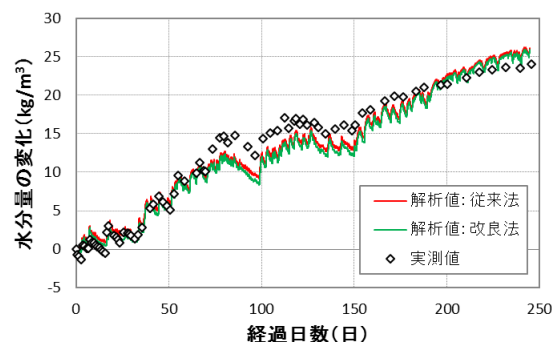


図-15 供試体の重量変化の実測値と解析値の比較 (Case B)

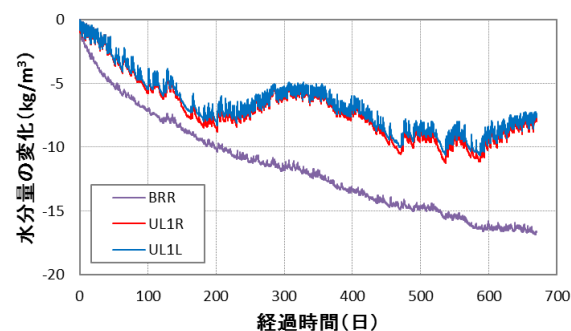


図-16 実構造物中の水分量の変化の解析結果

けた表面近傍の相対湿度を考慮して水分移動解析を行うのがよい。

- (3) コンクリート表面と外気との間の熱伝達、コンクリート内部の熱伝導、日射による熱放射を考慮することで、コンクリートの表面温度を数値解析により精度良く評価することができる。

参考文献

- 1) 下村 匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520, pp.35-45, 1995.8
- 2) ThynnThynnHtut and Takumi Shimomura: Hybrid Computational Method for Capillary Suction and Nonsaturated Diffusion in Concrete, 4th International Conference on Construction Materials (ConMat'09), pp.1075-1080, 2009
- 3) 本馬幸治, ThynnThynnHtut, 下村 匠: 乾湿を受ける実環境下におけるコンクリート中の水分量に及ぼす表面含浸材の効果とそのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1631-1636, 2011.7
- 4) ThynnThynnHtut and Takumi Shimomura: Modeling of environmental action for prediction of long-term water content in concrete, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.34, No.1, pp.688-693, 2012.7
- 5) 気象庁: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>