

論文 屋外暴露された RC・PC 部材の時間依存性変形に及ぼす環境作用の影響

志賀 暢*1・阿部 哲雄*2・渡部 雅貴 *3・下村 匠*4

要旨: 屋外一般環境下におかれた鉄筋コンクリート, プレストレストコンクリート部材の時間依存性変形を数値解析で再現することを目的とし, 構造物への環境作用の影響を実験し, 解析によるその考慮の方法について検討を行った。日射と降雨を受けるかどうかにより, コンクリートの収縮量が異なり, それに伴い RC・PC はりのたわみ挙動も異なることが確認された。各時間における外気温, 相対湿度, 日射量, 降雨濃霧を精密に考慮することで, それらが再現できることが明らかになった。AMeDAS から得た環境作用のデータを用いて, 屋外の任意の環境下におかれたコンクリート構造物の将来の時間依存性変形を予測する方法を提案した。

キーワード: 収縮, クリーブ, 水分移動, 環境作用

1. はじめに

自然環境下における鉄筋コンクリート (RC) 構造およびプレストレストコンクリート (PC) 構造の時間依存性変形と応力を精緻にかつ汎用的に予測するためには, 条件が与えられた時のコンクリートの乾燥収縮, クリーブなどを精度よく表現する構成モデルが必要であると同時に, 対象構造物への荷重環境作用を入力値として適切に与えることが必要である¹⁾²⁾。本研究は, 後者に焦点を当て, 検討を行うものである。

RC および PC 構造の経時変形には持続荷重のほかには温度と乾湿作用の影響が大きい。自然環境下ではその源は, 気温, 湿度に加え, 日射, 降雨がある。それらは一日を通じておよび年間を通じて時間的に変動するだけでなく, 構造物の部位によっても作用の度合いが異なる。それらをいかにモデル化し応答値予測解析の入力値として与えるかが精度の良い予測を行うための鍵となる。

既報³⁾⁴⁾では, 乾燥, 吸湿, 吸水, 日射の影響を考慮できるコンクリート中の水分移動モデルを用いて, 気温, 湿度, 降雨, 日射の経時変化を AMeDAS や実測データに基づき考慮しつつ, 屋外に暴露されたコンクリート供試体の長期乾湿挙動を再現解析する方法を示した。

本研究では, その成果をコンクリートの乾燥収縮, クリーブを考慮した RC・PC 部材の時間依存性変形解析プログラムに導入する。そして RC はり試験体と PC はり試験体の屋外環境下での持続曲げ載荷試験を行い, 環境作用がコンクリート部材の長期変形と応力に与え

る影響を実験的に確認するとともに, 数値解析により再現する。

2. 局所的熱力学境界条件がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響

用いるコンクリート中の水分移動モデルは, 氣中に置かれた不飽和状態のコンクリート中における湿度勾配を駆動力として生じる水蒸気移動と液状水移動, ならびに降雨により表面が直接液状水に接触した場合に生じる部分飽和状態での毛細管吸水を考慮しており³⁾⁵⁾, 乾湿繰返し挙動が精度よく表現できることを確かめている。これらに加えて, 日射の影響, 温湿度の経時変化の影響として以下を考慮する。

図-1(a)は日射がコンクリートの乾燥に及ぼす影響

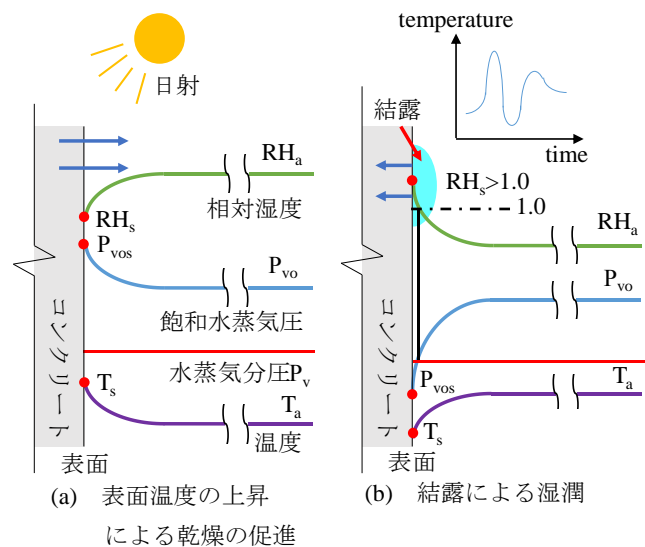


図-1 コンクリート表面付近の局所的熱力学境界条件

*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 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (学生会員)

*3 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 環境社会基盤工学専攻

*4 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 暴露試験体の環境条件

Case	試験体環境	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・日射・降雨



Case A (屋外屋根有) Case B (屋外屋根無)

図-2 試験体暴露状況



図-3 ウェザーステーション設置状況

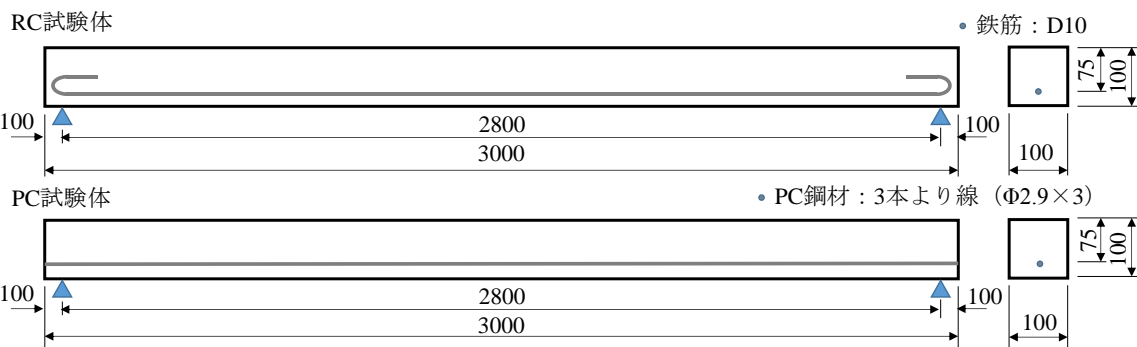


図-4 試験体寸法

を示している。コンクリートの表面温度が日射による加熱効果により大気温度よりも高くなると、コンクリート表面近傍の相対湿度は大気の相対湿度よりも低くなる。その結果、コンクリートの乾燥は、大気の相対湿度を境界条件とした場合よりも促進される。

一方、図-1(b)に示すように、気温の経時変化の結果、コンクリートの表面温度より高くなると、コンクリート表面近傍の相対湿度は、逆に大気の相対湿度よりも高くなる。その結果、コンクリートは大気の相対湿度を境界条件とした場合よりも吸湿側に向かう。さらにコンクリート表面近傍の計算上の相対湿度が 100%を超えるとコンクリート表面に水蒸気が凝縮する。凝縮水は、毛管吸引機構によりコンクリートに吸収されると考えられる。

図-1 (a)(b)いずれの場合もその影響を評価するにはコンクリートの表面温度を逐一正確に知る必要がある。コンクリートの表面温度は実測されていればそれを用い、実測されていない場合は気温と日射を考慮した熱伝導解析により評価する⁴⁾。

3. RC および PC はり部材の屋外持続載荷試験

3.1 試験環境と試験体

表-1 および図-2 に示す 2 つの条件下で RC はりおよび PC はり試験体の持続載荷試験を行った。

Case A：屋外に設けた百葉箱状の通気性のある箱内に設置する。日射、降雨を直接受けず、外気温度、相対湿度の変動の影響を受ける。

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

図-3 に示すウェザーステーションにより、試験環境下における 1 時間ごとの外気温度、相対湿度、全天日射量、降雨時間を測定した。

試験体は図-4 に示す RC はりと PC はりであり、Case A, B それぞれの環境用に 1 体ずつ計 4 体作製した。試験体は寸法が幅 100mm × 高さ 100mm × 長さ 3000mm で、有効高さ 75mm の位置に RC はり試験体は D10 の異形鉄筋を 1 本、PC はり試験体は PC3 本より線を 1 本それぞれ配置している。PC はり試験体はプレテンション方式とし、鋼材を 12kN の緊張力で緊張しておき、材齢 20 日でプレストレスを導入した。養生は濡れウエスを用いた湿布養生を 28 日間行った。

実験に使用したコンクリートの配合と使用材料を表-2 に示す。材齢 28 日の圧縮強度の実測値は 43.8N/mm²であった。

RC および PC はり試験体と同時に 100 × 100 × 400mm の自由収縮試験体も作製し、Case A, B の環境と恒温恒湿室 (20°C 50%RH) の 3 条件下において、自由収縮を試験した。

表-2 示方配合および使用材料

W/C (%)	S/A (%)	air (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
50	50	5	170	340	888	891	C×0.5%
記号	詳細						
W	水道水						
C	セメント 普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³						
S	細骨材 長岡市十日町産川砂 密度2.64g/cm ³						
G	粗骨材 長岡市十日町産砕石 密度2.65g/cm ³						
Ad	高性能AE減水剤 SP8HU						

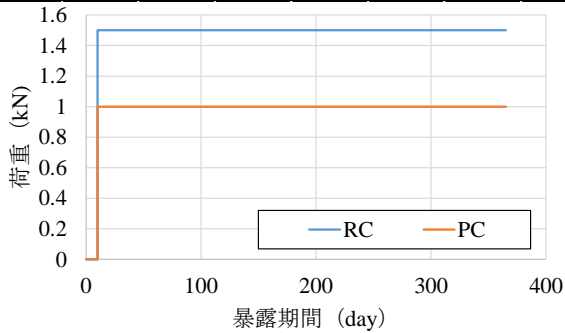


図-6 荷重パス

3.2 持続荷重試験

図-2 に示した CaseA,B のそれぞれの実験条件下において図-5 に示すようにはり試験体に鋼製プレートのおもりを用いて等曲げ区間を 1000mm とした 2 点集中持続荷重を行った。等曲げ区間においてたわみを変位計で、コンクリートの上縁と下縁のひずみをひずみゲージでそれぞれ測定した。荷重パスは図-6 に示す。RC はひび割れが発生する荷重で試験し、PC はひび割れの発生しない範囲の荷重で試験した。

自由収縮供試体のひずみは埋込み型ひずみ計で測定した。

4. 環境作用と持続荷重を受ける RC および PC はり部材の時間依存性変形挙動解析法

4.1 解析方法の概要

図-7 に解析方法の概要を示す。コンクリート中の水分移動、乾燥収縮は著者らがこれまでの研究で開発したセメントペーストの細孔構造モデルと細孔中の水分の微視的挙動ならびにセメントペーストと骨材の相互作用を考慮した解析法を用いた。今回実験を行った RC はり PC はりの解析は、以下の仮定によった。

- 1) 試験体内の水分の移動は部材軸直交方向の断面内の 2 次元移動とする。熱伝導解析も同様とする。
- 2) コンクリートと鋼材 (RC では鉄筋、PC では PC 鋼より線) は完全付着とする。
- 3) コンクリートの応力、ひずみは部材軸方向の成分のみを考慮する。
- 4) 部材の変形は平面保持に従うとする。
- 5) RC はりでは曲げひび割れ発生後引張側のコンクリートの負担する応力を無視する。

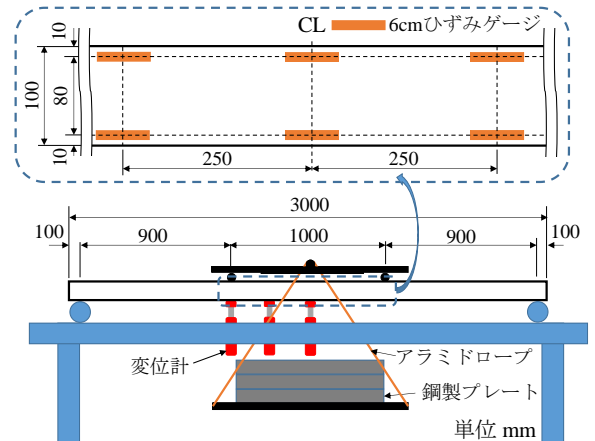


図-5 持続曲げ試験体および実験装置

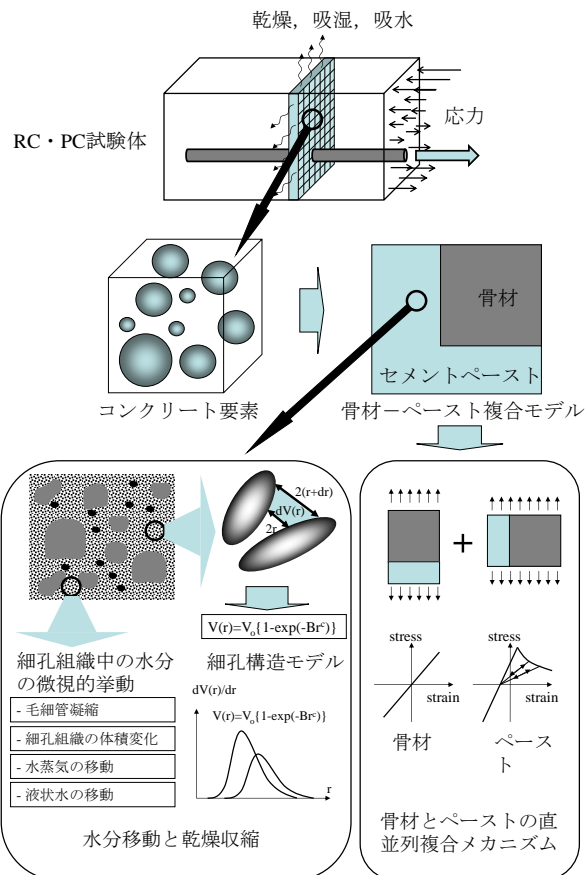


図-7 解析方法の概要

- 6) コンクリートのクリープは、骨材とセメントペーストを区別せずに両者の弾性係数を、同一のクリープ関数を用いて時間の経過とともに低減する方法により考慮する。

4.2 環境作用の考慮方法

水分移動解析および熱伝導解析の計算時間ステップは 1 時間とする。ウェザーステーションにより測定されたその時刻における外気温、相対湿度、全天日射量、降雨の有無を入力データとして用いる。まず、外気温と日射を考慮した熱伝導解析を行い、コンクリート温度を計算する。次に 2 章で述べたように、コンクリート表面温度と外気の相対湿度からコンクリート表面近

傍の相対湿度を求め、これらを境界条件としてコンクリート中の水分移動解析を行う。降雨があった場合または結露が判定された場合はコンクリート表面からの吸水計算を行う。

5. 実験結果と解析結果の比較

5.1 自由収縮試験

暴露試験環境 (CaseA,B) および恒温恒湿室 (20°C, 50%RH) におけるコンクリートの自由収縮試験体のひずみの経時変化の実測値と解析値を図-8 に示す。図-9 に試験期間中の気温と相対湿度の経時変化を、図-10 に降雨量の経時変化をそれぞれ示す。

環境条件の違いがコンクリートの収縮に及ぼす影響は相当に大きいこと、恒温恒湿室に比べて屋外環境における収縮は小さいことが確認できる。屋外環境のうち CaseB の収縮はとくに小さい。これは降雨による吸水のためである。屋根に覆われ降雨と日射の影響を直接受けない CaseA においても、恒温恒湿室における収縮よりも小さい。これは、降雨時の湿度上昇などの影響を受けるためであると考えられる。これらの結果は CaseA,B と同じ環境条件で過去に行った乾湿の経時変化に関する実験結果⁶⁾と整合する。

図-8 の実線は各試験環境下で測定された各時間における外気温、相対湿度、日射量、降雨の有無を境界条件として行った解析結果を示している。解析モデル中の材料パラメータの値は過去の知見に基づいた値を基本とし、今回の恒温恒湿室における実験値に適合するように材料特性と初期条件を修正した。いずれの環境下においても解析値は実験値の傾向を良好に再現している。既報⁴⁾では、屋外環境下におけるコンクリート供試体の長期乾湿挙動を再現できることを確認したが、今回の実験と解析により収縮挙動についても再現可能であることが明らかとなった。

なお、図-8 の実験はまだ一年を経過しておらず積雪期および気温上昇に向かう季節のデータが含まれていない。本暴露実験はさらに継続する予定である。

5.2 RC・PC はりの時間依存性変形

図-11 に 4 体の RC・PC はり試験体の中央におけるたわみの経時変化の実験値を示す。RC・PC はり試験体ともに、自由収縮の大きい CaseA の方が CaseB よりもたわみが大きい。これは、引張側では鋼材 (鉄筋または PC 鋼材) がコンクリートの収縮を拘束するので、自由収縮の増加に伴いはり試験体の正曲げ方向の曲率が増加するためであると考えられる。

全試験体の等曲げ区間の曲率の経時変化について実験値と解析値を比較したグラフを図-12~15 に示す。曲率実測値はコンクリートの上縁と下縁ひずみの測定

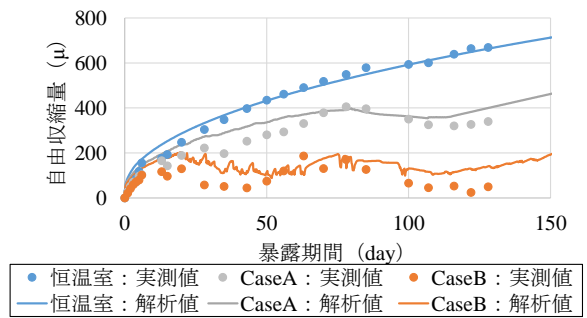


図-8 自由収縮量の実測値と再現値の比較

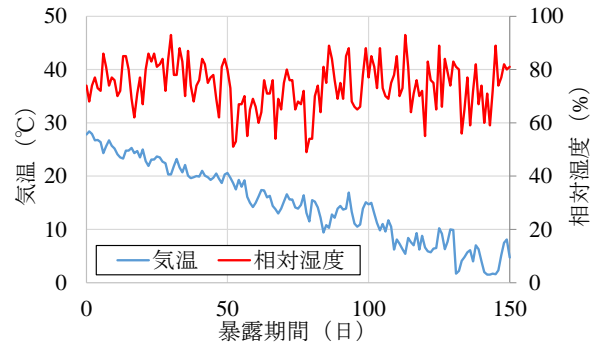


図-9 気温と相対湿度の経時変化

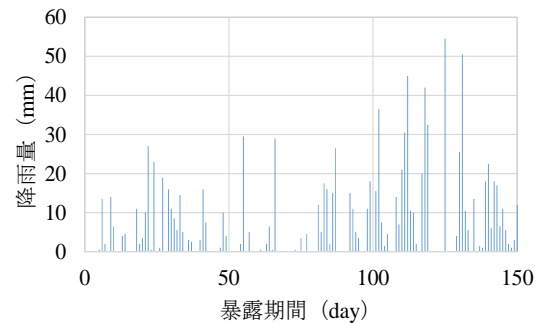


図-10 降雨量の経時変化

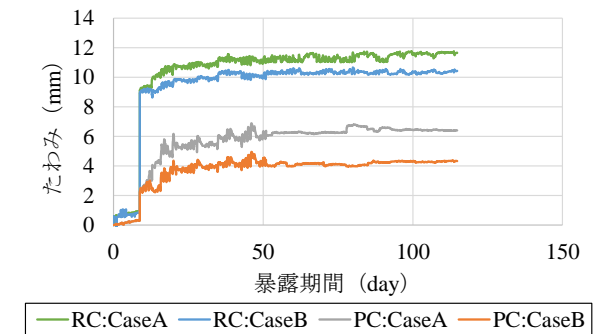


図-11 たわみ量の経時変化

値より算出した。

図-12, 13 は RC 試験体について示したものである。載荷後の曲率の解析値が全体的に実測値より大きい値となっているのは、ひび割れ発生後は引張側のコンクリートの剛性を無視して計算しているためである。載荷後の曲率が時間経過とともに増加しているのはコンクリートのクリープと収縮によるもので、解析値においても傾向が再現されている。図-13 において実測値が暴露期間 20 日以降わずかに減少しているのは、コンクリートひずみの計測はたわみ比べ計測間隔が広く、

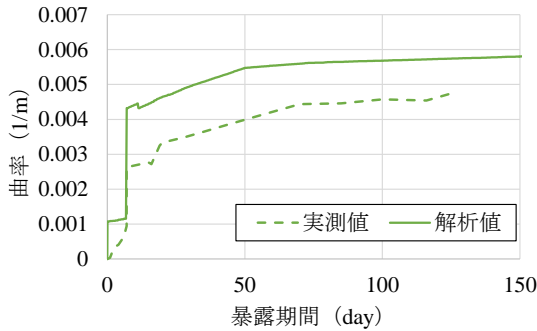


図-12 RC:CaseA の曲率の実験値と再現値の比較

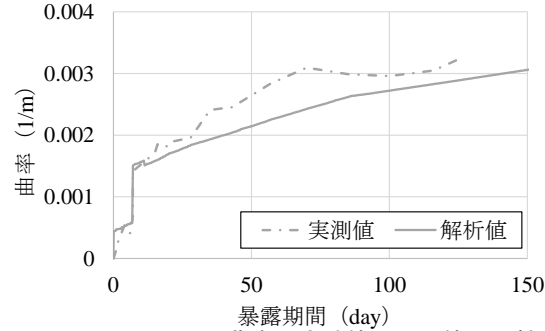


図-14 PC:CaseA の曲率の実験値と再現値の比較

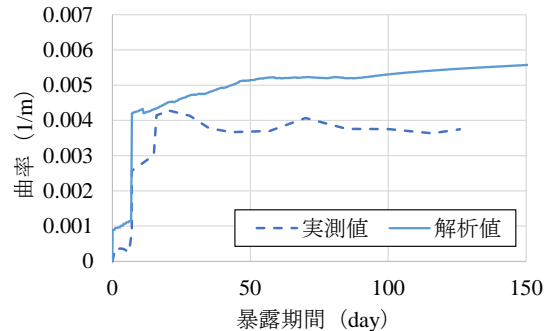


図-13 RC:CaseB の曲率の実験値と再現値の比較

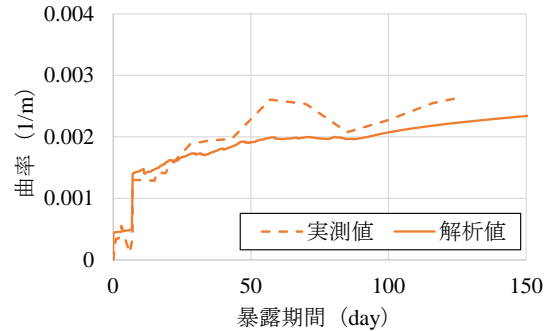


図-15 PC:CaseB の曲率の実験値と再現値の比較

測定値のばらつきが現れやすいためである。本来はたわみと同様に漸増するものと考えられる。

図-14, 15はPC試験体について示したものである。PC試験体は曲げひび割れが発生しないので、全断面のコンクリートの剛性を考慮した解析値が実験値と一致している。曲率の増加傾向、環境条件による違いもよく再現されている。

以上より、各時間における気温、湿度、降雨の有無、日射量の実測値を与えることで、屋外環境下で持続荷重を受けるRC・PCはりの時間依存性変形が数値解析により精度よく再現できることが明らかとなった。

6. 乾湿挙動と持続荷重を受ける鉄筋コンクリートはり挙動の長期予測

6.1 概要

5章に述べた解析は、環境作用の実測データが存在する場合の構造物の時間依存性変形挙動を、過去に遡って現在までをトレースするものであった。しかし、一般の構造物の場合、予測したいのは将来の経時変化であり、当然ながら将来の環境作用は未知である。また、その地点における過去の環境作用が前もって精密に測定されているとは限らない。将来における構造物の時間依存性変形挙動を予測するためには、将来予測用の環境作用モデルを何らかの方法で作成する必要がある。ここでは、既報⁴⁾において行ったAMeDASのデータを利用した乾湿挙動の将来予測に準じて、RC・PCはり試験体のたわみの長期予測を行う。

6.2 環境作用のモデル化

まず、気象庁のデータベース⁷⁾より、気温、降水量は

気温の元データ

時間	1st January	2nd January	3rd January	...	30th January	31st January	平均
0	7.8	3.7	6.3	...	1.8	4.3	3.78
1	5.2	3.2	6.5	...	1.9	4.1	3.54
2	7.6	3.2	6.2	...	1.3	3.3	3.44
3	7.4	2.2	5.9	...	1.2	3.0	3.54
4	7.2	1.6	5.2	...	1.2	4.2	3.25
...
23	5.3	6.2	6.6	...	1.4	1.2	4.28

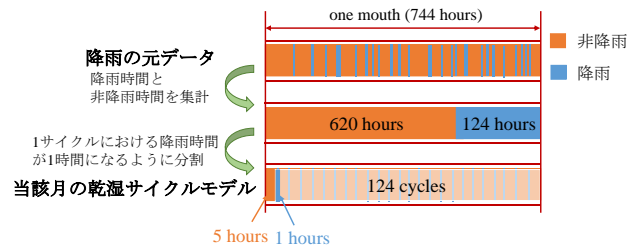


図-16 将来予測用環境作用モデルの作成方法

新潟市気象台の値を、相対湿度、全天日射量は、新潟市気象台の値をそれぞれ過去10年間分取得した。これらをもとに図-16に示す方法でモデル化する。

気温、相対湿度、日射量は1日のうち1時間ごとの同時刻の値を1か月間で平均し、当該月の一日の毎時の気温、湿度、日射モデルを作成し、これが当該月の毎日繰り返されるものとする。

コンクリートの乾湿挙動に及ぼす降雨の影響は、降水量よりも連続した降雨時間の長さが重要である。1時間における降水量が0より多ければその時間は降雨があると判断して1か月間の降雨時間を合計し、それを

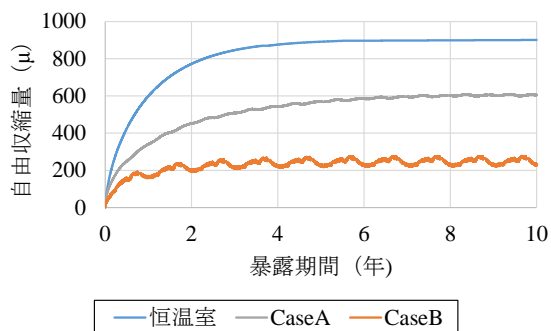


図-17 自由収縮量の予測解析結果

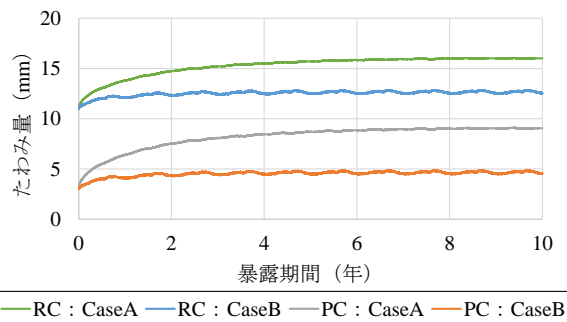


図-18 たわみ量の予測解析結果

1 サイクル内の降雨時間が 1 時間となるように等分割することで、当該月の乾湿サイクルモデルを作成した。平均の連続降雨時間の長さを 1 時間と設定したのは、実データの降雨非降雨時間を用いて計算した乾湿挙動の結果はほぼ等しくなることを感度解析により確認したからである⁴⁾。

6.3 解析結果

コンクリートの自由収縮の経時変化の予測結果を図-17に示す。新潟県では冬季の湿度が高いため夏季に乾燥収縮が進むことがわかる

RC・PC はり各試験体の中央のたわみの予測結果を図-18に示す。CaseB に比べ CaseA のたわみが大きいのは、自由収縮と対応している。また CaseA と CaseB のたわみの差が荷重直後の差に比べ増加していることから環境条件の差異が RC・PC 部材の長期変形挙動に累加的に影響を及ぼすことが確認された。

RC よりも PC のほうが CaseA と CaseB の環境の違いによる最終的なたわみの差が大きいことがわかる。これは曲げひび割れが発生せず全断面のコンクリートが荷重に抵抗する PC 構造では、コンクリートの時間依存性変形が構造全体の挙動により大きく影響することを示していると考えられる。

7. まとめ

- 1) 屋外環境下におかれたコンクリートの収縮は降雨の影響により、恒温恒湿室における収縮よりも小さいことが確認された。各時間における気温、湿度、日射、降雨の影響を考慮した解析より環境条件の違いに伴う自由収縮挙動の違いを再現することができた。
- 2) 屋外一般環境下におかれた RC・PC はり部材のたわみの経時変化は、環境条件の違いによるコンクリートの収縮の違いの影響を受けることが実験により確認された。コンクリートの収縮、クリープ、鋼材による拘束を考慮した解析により実験結果を再現することができた。
- 3) AMeDAS のデータベースより取得した環境作用

のデータを用いて、屋外におかれたコンクリート構造の時間依存性変形の将来予測を行う方法を提案した。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)「コンクリート構造物の高精度な長期供用性予測に資する環境作用評価システムの開発」(研究代表者：下村 匠，課題番号：25289131)を受けて行った。

参考文献

- 1) 千々和伸浩ら：セメント硬化体中の微視的機構モデルに基づく実PC橋の長期時間依存変形シミュレーション，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.407-412，2010
- 2) 大野 元寛，千々和伸浩，前川宏一：コンクリート中の細孔水に起因する変形駆動力が実PC橋の長期クリープたわみに及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.467-472，2011
- 3) Thynn Thynn Htut 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
- 4) 女屋 賢人，下村匠，Thynn Thynn Htut：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度化，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.760-65，2014.6
- 5) 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
- 6) 本馬 幸治，Thynn Thynn Htut，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.1631-1636，2011.6
- 7) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>