論文 降雨を含む一般環境下におけるコンクリート部材の乾燥収縮予測

蓑輪 圭祐*1·下村 匠*2

要旨:設計用乾燥収縮予測式に温湿度の変動や日射・降雨の影響を反映する方法を提案するため,暴露環境 条件・気象データ・乾燥面の数を種々変化させて水分移動に基づいた収縮ひずみ解析を実施し,乾燥収縮予 測式による算定結果と比較・検討した。実環境下の収縮ひずみは20℃,60%RHの恒温恒湿環境下の収縮ひ ずみより小さいこと,日射・降雨を直接受けずに温湿度の変動のみの影響を受ける場合の収縮ひずみは,暴 露環境の年平均相対湿度を乾燥収縮予測式に入力して算定できること,日射・降雨を受ける屋外環境下の収 縮ひずみは乾燥収縮予測式に85~90%RHの見かけの相対湿度を入力することで算定できることを示した。 キーワード:乾燥収縮予測式,降雨,日射,見かけの相対湿度,水分移動,収縮ひずみ解析

1. はじめに

乾燥収縮は、構造物のひび割れや不静定力の発生、有 効プレストレスの減少、ひび割れ幅、たわみの増大等の 原因となる。このため、供用環境下における構造物中の 収縮を精度よく予測することが求められている。

コンクリートの部材の乾燥収縮は、結合材や骨材といった使用材料の物性値やコンクリートの配合、構造物周辺の温湿度や日射・降雨などの環境条件、部材の形状や 断面寸法、乾燥面の影響を受ける。2012年制定コンクリ ート標準示方書[設計編]では、部材の乾燥収縮ひずみ予 測式 (1)が掲載されている¹⁾。

$$\varepsilon'_{sh}(t,t_0) = \frac{\frac{1 - \text{RH}/100}{1 - 60/100} \cdot \varepsilon'_{sh,inf} \cdot (t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)}$$
(1)

ここに、 $\varepsilon'_{sh}(t,t_0)$:部材の収縮ひずみ、RH:構造物の 置かれる環境の平均相対湿度 [%],d:有効部材厚 [mm], $\varepsilon'_{sh,inf}$:乾燥収縮ひずみの最終値、 β :乾燥収縮ひずみの 経時変化を表す係数である。使用材料や配合の影響は $\varepsilon'_{sh,inf} と \beta$ で考慮される。環境作用の影響については、 相対湿度により考慮される。断面寸法、形状、乾燥面の 影響はdで考慮される。

これらの影響因子のうち、本研究では環境作用をより 適切に考慮できる方法を検討する。設計用の収縮予測式 (1)では、環境作用の影響を相対湿度に代表させているの で、温湿度の変動、日射・降雨の影響を直接考慮するこ とはできない。そこで本研究では、降雨・日射等の暴露 環境条件および部材寸法や乾燥面の影響を考慮できるコ ンクリート中の水分移動・乾燥収縮解析プログラムを用 いて、種々の条件下における部材の乾燥収縮挙動の数値 解析結果から、温湿度の変動、日射・降雨の影響を受け た場合と等価な収縮予測結果をもたらす見かけの相対湿 度を同定し、これを乾燥収縮予測式に入力することで多 様な環境作用の影響を簡便に考慮する方法を検討する。

2. 収縮ひずみ解析の概要

2.1 水分移動・乾燥収縮モデル

本来ならば、実験結果と予測式を比較して検討するこ とが望ましいが、多くの水準の実験を系統的に行うのは すぐには難しいこと、寸法の大きい試験体は収縮に時間 を要することを考慮し、信頼性の検証された数値解析プ ログラムを用いた解析結果を実験結果の代わりになるも のとみなし、検討を行うこととした。解析には、著者ら がこれまで開発した細孔構造に基づくコンクリート中の 水分移動・乾燥収縮モデルを組み込んだコンクリート部 材の経時変形・応力解析プログラムを用いた²⁾。温湿度 の変動、日射・降雨の影響を受ける屋外一般環境下にお けるコンクリート部材の乾湿ならびに時間依存性変形予 測への本手法の適用性については、既報において検証し



*1 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(学生会員)

*2 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)

ている 3), 4), 5)。

図-1 に解析方法の概要を示す。今回の検討では、以下の計算仮定を設けて棒部材の軸方向変形の経時変化を 解析する。

- 試験体内の水分の移動および熱伝導は部材軸直交 方向の断面内の2次元移動とする。
- コンクリートの応力、ひずみは部材軸方向の成分の みを考慮すること、断面の平均ひずみを収縮ひずみ とする。
- 3) 部材の変形は平面保持に従うとする。

計算対象は 200×200 mm 断面を有するコンクリート 棒部材とする。環境条件や乾燥面の数,いくつかの都市 の実際の気象データをそれぞれ組み合わせた解析を実施 する。計算時間ステップは1時間とし,1時間ごとに温 湿度,日射量などの気象条件を境界条件として設定する。

日射による熱エネルギー(全天日射量)の影響につい ては,式(2)に示した熱伝導解析の表面の境界条件式を用 いてコンクリートの表面および内部の温度分布を計算す ることで考慮している。

 $q = m(T_{surf} - T_{ext}) + \lambda \cdot R_n$ (2) ここに、q: 熱流束 [W/m²], m: コンクリート表面の 熱伝達係数 [W/m²/℃], T_{surf} : コンクリートの表面 温度 [℃], T_{ext} : 外気温 [℃], λ : 放射率, R_n : 全天 日射量 [W/m²]である。コンクリート表面の温度上昇 によって表面近傍の相対湿度が低下し、乾燥が促進され る 4)。

用いたコンクリート中の水分移動解析法は、コンクリ

解析	考慮する気象条件			
ケース	温湿度	日射	降雨	
0	20°C, 60 % RH	×	×	
1	年平均温湿度	×	×	
2	実データ	×	×	
3	実データ	0	×	
4	実データ	×	0	
5	実データ	0	0	

表-1 暴露環境条件

表-2 選定都市の気象データの代表値(2016年)

	年平均		年間		
都市	気温 [℃]	湿度 [%RH]	降水量 [mm]	降雨時間 [hour]	
А	14.5	74.0	1499	1017	
В	9.3	66.1	1360	925	
С	24.1	74.1	2368	809	
D	16.5	68.8	1779	695	
Е	17.5	68.5	1286	546	

ートが大気に接した不飽和状態で進行する乾燥・吸湿過 程を表現するモデルと、コンクリート表面が液状水に接 した部分飽和状態で生じる表面からの吸水過程を表現す るモデルを組み合わせたもので、降雨がある時間ステッ プでは表面からの吸水計算を行うことで降雨の影響を表 現している³⁾。吸水により液状水が直接浸入すれば、表 面付近の水分量が急激に上昇する。

4 面乾燥のケースではすべての面に日射・降雨を作用 させた。実際にすべての面に日射と降雨による吸水が作 用することは考えにくいが、今回の検討では外部環境の 影響を理想化して比較を行うこととした。2 面および 1 面乾燥の場合は、開放面にのみ日射・降雨を作用させた。 2.2 検討項目

環境作用(温湿度,降雨,日射)の影響,乾燥面数の 影響,地域による気候差の影響についてそれぞれ検討を 行う。検討の流れを図-2に示す。図中の括弧の数字は 検討結果を示した節を表す。

環境作用については,**表**-1 に示した環境下における 収縮ひずみの解析結果から,温湿度の変動がある場合, 日射を考慮した場合,降雨を考慮した場合の収縮挙動の 差異および見かけの相対湿度の必要性について検討する。

乾燥面数の影響については,乾燥面が4面の場合・2面の場合・1面の場合の解析を実施し,乾燥面数の違いが 収縮の経時変化に与える影響について検討を行う。

地域による気候差の影響については,我が国の気候特 性を考慮し,いくつかの都市における気温,湿度,降水 量,日射に関する1年間のアメダスデータを用いて検討 することとした。選定した都市の気象データの代表値を 表-2に示す。



図-2 検討の流れ

2.3 見かけの相対湿度 RHap の導入

屋外のコンクリート構造物は温湿度の変動に加え、日 射・降雨の影響を受ける。降雨による吸水はコンクリー ト中の水分量に与える影響が大きく,湿度の変動による 乾燥・吸湿のみを受ける場合よりも,含水量は高くなる。 そのため、降雨を受けるコンクリートの収縮挙動を、降 雨の影響を相対湿度に置き換えて乾燥収縮予測式で表現 するには、実際の相対湿度よりも高い値を入力値として 与えなければならない。本研究では、その相対湿度を見 かけの相対湿度 RHapと呼ぶ。

2.4 コンクリートの使用材料・配合と解析に用いる材料 パラメータ

収縮ひずみ解析および乾燥収縮予測式に用いるコンク リートの配合および材料の物性値を表-3 と表-4 に示 す。また、解析に使用したパラメータを表-5、予測式に 使用したパラメータを表-6 に示す。解析に使用したパ ラメータは、既往の研究で使用したものを参考にしてい

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm ³
如母社	信濃川産川砂
和'月'村	表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水率 1.63 %
如母社	砕石 最大寸法 20 mm
租有材	表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水率 1.10 %,
混和剤	AE 減水剤
水	水道水

表-5 解析に使用したパラメータ

単位体積中の総細孔容積 Vo

細孔容積分布関数の形状を

決定するパラメータ B

細孔容積分布関数の形状を

決定するパラメータ *C*

水蒸気移動に関する材料係数 Kv

液状水移動に関する材料係数 KL

表面からの液状水の吸水に関する材料係数 Kla

E'sh, inf

995

d

200

表-6 予測式に使用したパラメータ

β

46.89

表-3 使用材料の物性値

る 3), 4), 5)。予測式で使用したパラメータについては,使用 材料と配合から求めたものである。

3. 解析結果

3.1 解析結果と予測式の整合性の検証

まず,4 面乾燥の100×100 mm 断面の供試体の恒温恒 湿環境下での断面の平均ひずみについて、数値解析プロ グラムによる解析結果と乾燥収縮予測式による計算結果 の整合性を確認したものが図-3である。

解析結果は乾燥収縮予測式よりも早い段階で収縮が 最終値に収束する傾向にあることが認められた。しかし, 構造物の設計において構造物の変形や応力を求める際に は、その最大値がまず問題となるので、今回の検討では 収縮ひずみの最終値の比較に焦点を当てることとした。 設計において収縮の経時変化が問題となることはあるが, 進行曲線を含めた検討は今後の課題とする。なお、最終 値による検討には進行曲線の形状は影響を及ぼさない。



図-3 恒温恒湿環境における解析結果と予測式の比較



表-4	コンクリー	-トの配合
-----	-------	-------

0.15

14100

0.5

0.15

0.003

0.09

t0

3

粗骨材の	水セメント比	細骨材率	単位量 (kg/m ³)				
最大寸法			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
(mm)	(%)	(%)	W	С	S	G	Ad
20	50.0	44.0	168	336	796	1002	3.36

3.2 環境作用の影響

地点Aの気象データを用いた場合の解析結果から環境 作用が収縮に及ぼす影響を検討する。全面乾燥の 200× 200 mm 断面の供試体の解析結果を図-4 に示す。

日射の影響を考慮した場合(解析ケース3),表面温度 が上昇し,乾燥が促進される。また,降雨の影響を考慮 した場合(解析ケース4,5)は、コンクリート表面からの 吸水により水分量が増加し、収縮の進行が一時的に緩慢 になる。

温湿度については、変動する実際のデータを与えた場合(解析ケース 2)と平均値を与えた場合(解析ケース 1)とで時間的な平均値はほぼ同じ値となった。このことから、部材断面が 200 mm 以上の場合には温湿度の時間 変動が収縮ひずみに与える影響は小さく、一定の温湿度 を与えても適切に収縮を算定できるといえる。

日射・降雨の影響を含む屋外環境下においては,暴露 環境の年平均相対湿度を与えるだけでは収縮の予測結果 が過大になる可能性が示された。

3.3 乾燥面数の影響

暴露環境が同一であり、乾燥面の数のみが異なる供試体の収縮ひずみの違いについて考察する。二面乾燥と一面乾燥の 200×200 mm 断面の供試体の解析結果をそれ ぞれ図-5、図-6 に示す。図-4 に示した全面乾燥の場 合と比べて,二面乾燥と一面乾燥の場合は水分の逸散が 抑制されるため収縮の進行が緩慢になることがわかる。

乾燥面の数が多いほど、日射・降雨の影響を大きく受けていることがわかる。今回の解析結果では、全面乾燥の収縮ひずみの変動が最も大きくなっており、乾燥面の減少とともに変動の幅が小さくなっている。しかし、乾燥面数が異なっても各環境条件下における収縮ひずみの最終値は同じになっている。これは、置かれる環境が同じであれば、乾燥面の数によらずコンクリートの平衡含水率は計算上同じになるためである。

同様のことが、断面寸法が異なる場合にもいえる。断 面寸法が大きくなっても収縮ひずみの進行速度が遅くな り、変動の幅が小さくなるだけで、暴露環境が同じであ れば収縮ひずみの最終値は計算上同じになる。

3.4 地域の気候差が収縮ひずみに及ぼす影響

我が国では、地域によって平均温湿度や降水量、降水 時間が異なる。表-2に示した都市Aを基準として「年 平均気温が低い地域(B)と高い地域(C)」、「冬季の降 水量が少ない地域(D)」、「年間を通して降水量が少ない 地域(E)」を対象として検討を行った。

200×200 mm 断面,両面乾燥における各都市の気象デ ータを用いた場合の結果を図-7,図-8,図-9,図-10 に示す。









図-5に示した都市 A の結果と図-8の都市 C の結果 を比較すると,年平均温湿度を与えた場合の解析結果は, 双方の年平均気温に 10 ℃ ほどの差があるが収縮ひず みの最終値に差はみられない。このことから,外気温が 収縮ひずみに及ぼす影響は小さく,相対湿度の影響が大 きいことがわかる。そのため,ほかの都市における収縮 ひずみの解析結果の違いは,平均湿度の平均値の差に起 因していると考えられる。

降雨の影響については、降雨時間の少ない都市 D や都市 E の収縮ひずみの低減量は小さいと予想された。しかし、いずれの地点においても平均温湿度を与えた場合の 解析結果から 400 µ 程度小さな値となっている。この結果から、国内の地域による降水量、降水時間の違いは収縮ひずみの違いを生じないことが推察される。

4. 日射・降雨の影響を予測式に反映させる方法の提案4.1 日射・降雨の影響を受けない場合

日射・降雨の影響を受けない屋外構造物の場合,温湿 度の変動のみで収縮ひずみが変化する。

都市Aの気象データを用いた解析結果における,温湿 度の変動を考慮した場合(解析ケース 2)および年平均 温湿度を与えた場合(解析ケース 1)の解析結果と,年 平均湿度を入力した乾燥収縮予測式による算定結果とを 比較したものが図-11である。予測式による算定結果が 解析結果に最も近似するのは予測式に72%RHを入力し たときであった。この値は相対湿度の年平均値である 74%RHと大差ないことから,降雨や日射を受けない屋 外構造物の収縮は年平均相対湿度を乾燥収縮予測式に入 力することで予測できるといえる。

4.2 日射・降雨の影響を受ける場合

日射・降雨の影響を考慮した場合の解析結果と等価な 予測結果をもたらす乾燥収縮予測式の RH(見かけの相 対湿度 RH_{ap})を求める。新潟の気象データを用いた解析 結果の場合,図-12のような結果となった。乾燥収縮予 測式に 91% RH を入力することで解析結果の平均値を再



現し,85% RH を入力することで解析結果の振幅の最大 値をほぼ再現した。本例では、年平均相対湿度よりも 11% 高い見かけの相対湿度を予測式に適用することで 日射・降雨の影響を受ける屋外構造物の収縮ひずみの最 大値を予測することができる結果となった。

乾燥面の数によって、収縮ひずみの変動の幅が異なる。 4 面乾燥の場合は 2 面・1 面乾燥に比べて変動の幅が大 きいため、最大値を再現する見かけの相対湿度と平均値 を再現する見かけの相対湿度の差が大きくなる。しかし、 断面寸法が大きい実構造物の場合は乾燥面数によらず収 縮ひずみの変動が小さいため、最大値を再現する見かけ



都市	平均 相対湿度 (2016) RH _{ave}	見かけの 相対湿度 (最大値) RH _{ap}	見かけの 相対湿度 (平均値) RH _{ap} [%]	
	74.0		01	
A	/4.0	85	91	
В	66.1	86	90	
С	74.1	85	88	
D	68.8	86	89	
Е	68.5	83	86	

表-7 各都市の見かけの相対湿度 RHap

の相対湿度と平均値を再現する見かけの相対湿度の差は 小さくなると考えられる。

同様の検討を別の4都市の解析結果を用いて実施し, それぞれの地点における見かけの相対湿度を同定した。 その結果を表-7に示す。いずれの地点においても,最 大値を再現する見かけの相対湿度は85%RH程度となっ ており,平均値を再現する見かけの相対湿度は88%RH 程度となっている。このことから,日射・降雨の影響を 受ける屋外一般環境条件下における構造物中のコンクリ ートの収縮ひずみは,その地域の年平均相対湿度や気候 特性による日照時間や降雨の差によらず,85~90%RH 程度の見かけの相対湿度を乾燥収縮予測式に入力するこ とで算定できる可能性がある。

5. まとめ

乾燥収縮予測式において,日射・降雨,温湿度の変動 などの環境作用の影響を考慮する方法を検討するため, 水分移動に基づいた収縮ひずみ解析を行い乾燥収縮予測 式による算定結果と比較した。以下のことが明らかとな った。

(1) 我が国の一般的な環境下では、屋外におけるコンク リートの収縮ひずみは 20℃ 60% RH の恒温恒湿環境 下の収縮ひずみよりも一般に小さくなる解析結果を 示した。特に、降雨による吸水はコンクリートの含水 率を高い状態にするため、収縮ひずみは小さくなる。

- (2) 降雨を受ける屋外構造物における長期の収縮ひずみの解析結果は、その地域における降水量、温度、湿度によらず、同じ程度の小さい値を示した。
- (3) 日陰のように、日射・降雨を直接受けず温湿度の変動のみを受ける屋外環境下では、収縮ひずみは、その地域における年平均相対湿度を収縮予測式に入力することにより評価することが可能である。
- (4) 日射・降雨を受ける屋外環境下の収縮ひずみを,乾燥 収縮予測式で評価するために,それらの作用の影響 を含んだ見かけの相対湿度を数値解析により同定し た。見かけの相対湿度をわが国の代表的ないくつか の都市の気象データを用いて算定した結果,85~ 90%RH程度の値となった。

なお、今回の検討は解析的な検討にとどまっているた め、実環境での暴露実験を含めた検討を今後進めていく 予定である。

参考文献

- 1) 土木学会:2012 年制定 コンクリート標準示方書 設 計編,土木学会,pp.105-106,2013.3
- 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
- 3) 本馬幸治,下村 匠,Thynn T. HTUT: 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
- 女屋賢人,下村 匠, ThynnThynnHtut: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
- 志賀暢,阿部哲雄,渡部雅貴,下村匠: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,コンクリート工学年次論文集, Vol.38,No.1, pp483-488, 2016.7