

温度変化を考慮したコンクリートの非線形湿気移動解析に関する研究

岐阜大学大学院工学研究科 学生会員 ○堀部 謙
 岐阜大学大学院工学研究科 伊藤佑樹
 岐阜大学工学部土木工学科 正会員 森本博昭
 大日本土木(株) 正会員 竈橋 忍

1. はじめに

本研究では、コンクリート中の蒸気圧を未知量とする非線形湿気移動支配方程式にもとづくコンクリート中の相対湿度分布の解析法を提案するとともに、実験により本解析法の合理性を検証する。

2. コンクリート中の湿気移動解析

湿気移動開始から次の湿気移動の非線形支配方程式が導かれる。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_P \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_P \cdot \nabla P) + \left(\frac{dq}{dt}\right) \quad (1)$$

また、境界条件式として、次式を仮定する。

$$-\lambda_P \cdot \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha \cdot (P - P_c) \cdot f_w \quad (2)$$

ここに、 λ_P : 透湿率 ($\text{g/h} \cdot \text{m} \cdot \text{mmHg}$)、 P : 蒸気圧 (mmHg)、 S : 湿流が通過する面積 (m^2)、 q : 湿気密度 (g/m^3)、 t : 時間 (h) (dq/dP): 湿気容量 ($\text{g/m}^2 \cdot \text{mmHg}$)、(dq/dt): 水和による湿気密度変化 ($\text{g/h} \cdot \text{m}^3$)、 α : 蒸発率 ($\text{g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$)、 P_c : コンクリート周囲の蒸気圧 (mmHg)、 f_w : 空気流動に関する係数、である。すなわち、解析では、式(1)を式(2)のもとで解けばよいことになる。

3. コンクリートの湿気移動実験と解析

湿気移動に関する物性値の検討と解析手法の精度検証のために湿気移動実験を行った。実験では、図-1に示す $150 \times 150 \times 150 \text{mm}$ の小型角柱供試体の乾燥に伴う重量変化と体内の湿度変化を測定した。小型供試体の側面に、相対湿度測定用は、上面から 10mm 、 30mm 、および 50mm の位置、蒸発量測定用は、上面近傍にそれぞれ湿度測定用の小孔 ($\phi 10 \text{mm}$) を設けた。供試体の上面のみを蒸発面とし、側面および底面は封緘処理を施した。コンクリートの配合を表-1に示す。供試体は材齢 1 日で脱型し、封緘処理した後、1週間湿布養生（封緘養生）を行った。乾燥開始後、小孔中の温度と相対湿度を小型電気湿度計で、蒸発量は適宜秤にて測定した。各供試体には、 $20 \sim 50^\circ \text{C}$ の温度変動を与えた。一方、蒸発量測定用供試体では 20°C (一定) の場合についても検討した。供試体の温度コントロールは、コンクリート中に埋設し

た温床線より行った。環境条件は、温度 20°C の一定とし、相対湿度は $80 \sim 30\%$ の間を変動させた。解析では、透湿率 λ_P と湿気容量 (dq/dP) は、図 2~3 に示すように相対湿度の関数として評価した。また、蒸発率は次節で述べるように湿気移動実験から求めた。さらに、水和による湿気密度変化 (dq/dt) は無視した。

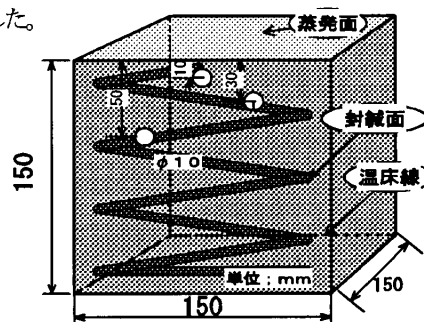


図-1 小型供試体

表-1 示方配合

W/C	スラブ (cm)	空気量 Air(%)	単位量(kg/m^3)					
			水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G	AE減水剤 ボゾリス No.70	高性能 AE減水剤 レベト SP8S-3X
30	18	3.8	132	440	840	1060	—	22.0
45	7	4.2	153	342	760	1046	1.37	—
57	8	4.5	175	309	726	1041	1.24	—
65	8	4.5	189	292	770	976	0.73	—

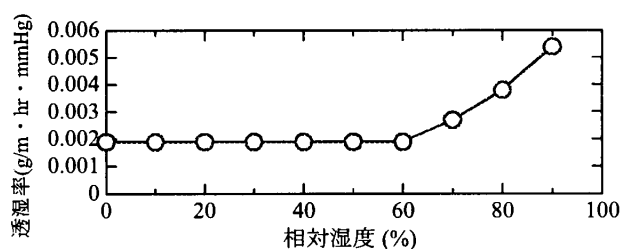


図-2 透湿率の相対湿度依存性

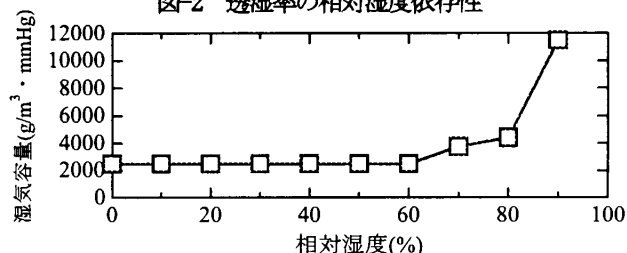


図-3 湿気容量の相対湿度依存性

key words : 湿気移動、蒸発率、透湿率、湿気容量

〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 TEL 058-293-2406 岐阜大学大学院工学研究科土木工学専攻

4. 蒸発率の測定法

(2)式の左辺はコンクリートからの水分蒸発量を表すので供試体の時間 t (h)における蒸発量 $\Delta Q(t)$ (g)は次式で表される。

$$\Delta Q(t) = \int_0^t S \cdot \alpha \cdot (P - P_0) dt \quad (3)$$

ここに、 S : 供試体上面の面積(m^2)、 α : 蒸発率($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$)、 P : 供試体上面の蒸気圧(mmHg)、 P_0 : 周囲の蒸気圧(mmHg)、である。(3)式の左辺はコンクリートからの水分蒸発量を表すから、適当な供試体の乾燥に伴う単位時間 Δt 当りの重量減 (水分蒸発量) ΔQ を測定すれば、蒸発率 α は上式により算出することができる。

5. 実験結果と解析結果

5.1 水分蒸発量変化

図-4~5に、蒸発量の実測値に式(3)を適用することにより算出した蒸発率の算定値を示す。図から、50℃供試体と20℃供試体における蒸発率 α は、表面と外気との蒸気圧差 ($P - P_0$) (mmHg)と配合にかかわらず $\alpha = 0.1 \sim 0.4 (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg})$ の範囲にある。以上の結果から、コンクリート表面からの蒸発率 α は配合及び蒸気圧差にかかわらず $\alpha = 0.1 \sim 0.4 (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg})$ の範囲にある。従って、実用的には $\alpha = 0.3 (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg})$ 前後の値を用いればよいと考えられる。

5.2 相対湿度変化

図-6に相対湿度の経時変化の計測結果を示す。表面から10mm および30mm の位置における相対湿度は、乾燥開始後、供試体温度の上昇に伴って速やかに低下していき、表面から10mm の位置の相対湿度は、材齢20日付近以降、周囲の相対湿度より低い相対湿度を示すようになる。表面から50mm の位置においても、材齢15日付近から相対湿度の低下が生じ始め、それ以降は速やかに乾燥が進行していく。また、100日付近での周囲の相対湿度の上昇に伴い、供試体各点の相対湿度が一旦、増加する現象がみられるが、その後、相対湿度の低下が再び進行する。

図-7 に相対湿度の経時変化の解析結果を示す。解析結果を計測結果と比較すると、表面から10mm の位置では、解析値の方が計測値より相対湿度の低下を大きく評価しているが、表面から30mm および50mm の位置では、計測値に対応した良好な値となっている。また、100日付近での周囲の相対湿度の上昇により、表面から10mm の位置では相対湿度が増加する現象がみられるが、その増加量は実測値に比べ小さい。また、表面から30mm および50mm の位置では、周囲の相対湿度の上昇による相対湿度の増加はみられない。しかし、全体的には解析結果は、供試体中の相対湿度の推移をよく表現していると考えられる。

6. まとめ

本研究で提案した解析法では、コンクリートの温度変化が湿気移動に与える影響が反映されているので、コンクリート構造物の湿気移動に伴う相対湿度分布を解析する方法として適当であると考えられる。また、コンクリート表面からの蒸発率 α は、配合及び蒸気圧差 ($P - P_0$) にかかわらず $\alpha = 0.1 \sim 0.4 (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg})$ の範囲内にあり、実用的には $\alpha = 0.3 (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg})$ 前後の値を用いればよいことが明らかになった。

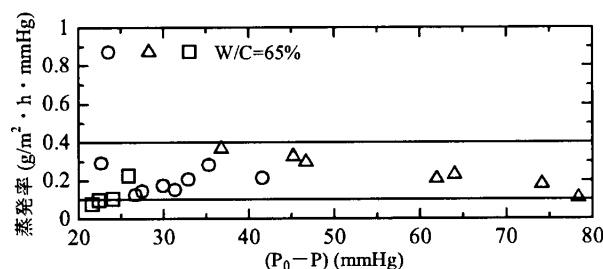


図-4 蒸発量算定値 (供試体温度; 50℃)

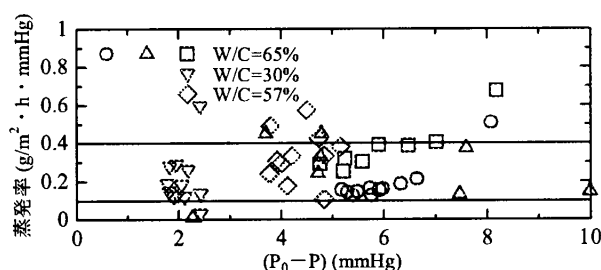


図-5 蒸発量算定値 (供試体温度; 20℃)

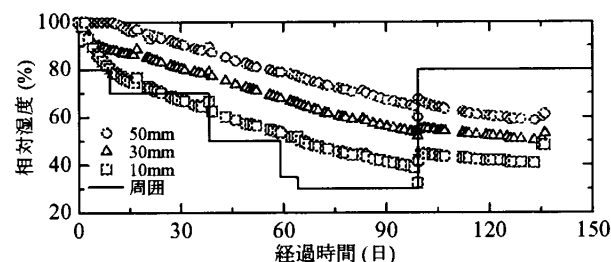


図-6 相対湿度変化計測結果

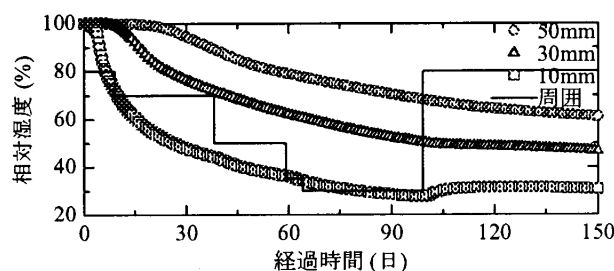


図-7 相対湿度変化解析結果

【参考文献】1) 籠橋 忍, 秦 泳, 小澤満津雄, 森本博昭: 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.685-690, 2001.7