# 論文 コンクリート中の水分移動解析手法について

堀部 謙\*1・森川 友博\*1・中村 恭香\*1・森本 博昭\*2

要旨:本研究では,コンクリート中の水分移動に関する物性値である蒸発率とこれに及ぼ す風速などの影響を実験的に明らかにするとともに,本研究で用いるコンクリート中の湿 気移動支配方程式の合理性を実験により検証した。その結果,蒸発率は高湿度領域におい て大きな相対湿度依存性を有すること,および 5.5m/sec の風をあたえることにより 0.1~ 0.3(g/m<sup>2</sup>·hr·mmHg)程度増大する傾向にあることを明らかにした。また,ASR 進行抑制な どに用いられる表面被覆材は蒸発率を小さくするが,水分を遮断することはないことが確 認できた。水分移動実験をもとに蒸発率を相対湿度の関数として評価し,水分移動解析に 適用することにより解析精度の向上を計ることができた。

キーワード:水分移動,蒸発率,乾燥収縮,透湿率,湿気容量

1. はじめに

コンクリートに生じる乾燥収縮はひび割れ の主原因となるので,コンクリート構造物の耐 久性および機能性を確保する上で重要な位置を 占める。乾燥収縮応力・ひび割れ幅解析を行う ためには,まず初めに,コンクリート中の水分 の移動を明らかにする必要がある。水分移動解 析では,透湿率λ<sub>P</sub>,湿気容量(dq/dP)<sub>P</sub>などの湿 気流れ特性の他に,境界面における蒸発率 を 適切に設定する必要がある。しかし,蒸発率 についての既往の実験データはほとんど見当た らないのが現状である。そこで本研究では、小 |型角柱供試体(図-1)および風洞実験装置(図 -2)を用いた水分移動実験により水分移動に関 する物性値である蒸発率について、蒸発面上の 風速などの影響を実験的に検討した。また,本 研究で提案する水分移動解析法の合理性を検証 するために,解析結果と実験結果を比較した。

2. コンクリート中の水分移動解析<sup>1)</sup>

コンクリート中の水分移動解析の基礎となる 湿気移動則として湿流は蒸気圧勾配に比例する とした次式を用いる。



$$J = \lambda_P S \cdot \left(\frac{dP}{dn}\right) \tag{1}$$

ここで,J:湿流 (g/hr),S:湿流が通過する 面積 (m<sup>2</sup>),λ<sub>P</sub>:透湿率 (g/hr・m・mmHg),P: コンクリート中の蒸気圧 (mmHg)である。ただ し,コンクリート中の蒸気圧 Pと相対湿度 RH との関係は次式で表せる。

$$P = P^* \left(\frac{RH}{100}\right) \tag{2}$$

\*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

ただし,

$$P^* = \frac{6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_c}{237+T_c}}}{1.3336} \tag{3}$$

ここで,  $P^*$ :コンクリート中の温度(K)に対す る飽和蒸気圧 (mmHg), RH:コンクリート中 の相対湿度 (%),  $T_C$ :温度 ()である。

式(1)の湿気移動則から,次の水分移動の非線形 支配方程式が導かれる。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_{P}\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right) = \nabla(\lambda_{P}\nabla P) - \left(\frac{dq}{dt}\right) \tag{4}$$

また,境界条件式として,次式を仮定すること ができる。

$$-\lambda_P \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha (P - P_0) \tag{5}$$

ここで,q:湿気密度  $(g/m^3)$ ,  $(dq/dP)_P$ :湿気 容量  $(g/m^3 \cdot mmHg)$ , (dq/dt):水和による湿気 密度変化  $(g/hr \cdot m^3)$ , t:時間 (hr), :蒸発率  $(g/m^2 \cdot hr \cdot mmHg)$ ,  $P_0$ :コンクリート周囲の蒸 気圧 (mmHg)である。

## 3. コンクリート中の水分移動実験と解析概要

実験では、150×150×150mmの小型角柱供試体 (図-1)を用いた。側面に,蒸発面から10mm,3 0mm,および50mmの位置に小孔(10mm)を設け た供試体(相対湿度計測供試体)と,蒸発面近 傍に1つだけ小孔を設けた供試体(水分蒸発量 計測供試体)の2種類を作製した。それぞれの供 試体の温度は 乾燥中に20 一定に保つものと, 50 一定に保つものの2種類とした。供試体の 温度コントロールは、コンクリート中に埋設し た温床線で行った。供試体は1面のみを蒸発面と し,他面はシール(封緘処理)を施した。コン クリートの配合を表-1に示す。セメントは普通 ポルトランドセメントを使用した。水セメント 比57%の供試体については,図-2に示す風洞実 験装置を用いて風を与える場合と与えない場合 および蒸発面に表面被覆材(シラン・シロキサ ン系)を塗布したものについて実験を行った。 供試体は材齢3日で脱型し,封緘処理した後,乾

燥開始材齢まで湿布養生(封緘養生)を行った。 乾燥開始後の小孔中の温度と相対湿度を小型電 気湿度計(S社,SK-80P4型)にて計測した。水 分蒸発量は供試体の重量減から算出した。また, 供試体蒸発面の蒸気圧は,表面近傍の湿度と温 度の測定値から算出した。本研究で行った実験 概要をまとめて表-2に示す。解析では,透湿率

<sub>P</sub>と湿気容量(*dq/dP*)<sub>P</sub>は,図-3~4に示すように 相対湿度の関数<sup>2)</sup>として評価した。また,蒸発 率は次節で述べるように水分移動実験から求め た。

表-1 示方配合

-								
W/C	Sl	Air	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
(%)	(cm)	(%)	(%)	W	С	S	G	Ad
30	18.0	3.8	44.2	132	440	840	1060	$22^{*1}$
45	1.1	5.1	42.1	156	342	760	1046	$1.37^{*2}$
57	4.8	7.5	43.0	180	316	851	926	3.16*2
65	8.0	4.5	44.1	189	292	770	976	$0.73^{*2}$

\*1:高性能AE減水剤,\*2:AE減水剤



表-2 実験概要

4. 蒸発率の同定方法

(5)式の左辺はコンクリートからの水分蒸発 量∆*Q*を表すので,供試体の時間 *t* における 蒸発量(重量減)を秤にて計測するとともに供 試体蒸発面の温度と相対湿度を計測して式(2) および式(3)に代入することにより蒸気圧Pを算 出すれば,蒸発率 は次式により算出すること ができる。

$$\Delta Q = S \cdot \alpha \cdot (P - P_0) \cdot \Delta t \tag{6}$$

ここで,S:供試体蒸発面の面積( $m^2$ ), :蒸 発率( $g/m^2$ ·hr·mmHg),P:供試体蒸発面の蒸気 圧(mmHg), $P_0$ :周囲の蒸気圧(mmHg)である。

### 5. 実験結果と解析結果

#### 5.1 水分蒸発量と表面近傍の相対湿度

図-5~8に,供試体温度20 の供試体について の水分蒸発量と表面近傍の相対湿度の経時変化 を示す。図-5,6から,表面被覆材を塗布するこ とにより,蒸発量および表面近傍の相対湿度の 低下は小さくなるが,水分を遮断することはな い。図-5,7から,水セメント比が低いほど相対 湿度の低下が大きくなり,蒸発量は小さくなる。 図-5,8から,風の影響により,相対湿度の低下 が大きくなる。蒸発量については,風の影響は 明確には認められなかった。

5.2 蒸発率

図-9~12に,蒸発量の実測値に式(5)を適用す ることにより同定した蒸発率の値を示す。図 -9は,配合および周囲蒸気圧がそれぞれ異なる 場合の蒸発率を示す。図-9より,蒸発率は,多 少のばらつきが認められるが,配合に関わらず コンクリート表面近傍の相対湿度の低下に伴い 小さくなり,蒸発率=0.1~0.2(g/m<sup>2</sup>·hr·mmHg) に収束していく傾向がある。このように蒸発率

は,表面近傍のコンクリート中の相対湿度に 大きく依存しており,コンクリート中の水分の ポテンシャルが蒸発率に関与することを示すも のと解釈することができる。図-10は,50 供試 体の蒸発率を示す。50 供試体の蒸発率は,20 供試体に比べ若干小さくなり,0.1(g/m<sup>2</sup>・hr・ mmHg)に収束していく傾向が見受けられた。図 -11より,表面被覆材は,高い相対湿度領域では 蒸発率を大きく低下させる傾向にあるが,相対 湿度の低下に伴って,表面被覆材なしと同様の 0.2(g/m<sup>2</sup>·hr·mmHg)程度に収束していく。図-12 から,蒸発率は風(5.5m/s)をあたえることに より0.1~0.3(g/m<sup>2</sup>·hr·mmHg)程度増大する。





5.3 相対湿度変化

実験結果を踏まえて図-13 に示すように,蒸 発率 を透湿率 <sub>P</sub>と湿気容量(dq/dP)<sub>P</sub>と同様, 相対湿度の関数として評価し,解析に用いるこ とにした。図-14 に, W/C=57%の供試体におけ る相対湿度の経時変化の実測値と解析値を示す。 図-15,16 は,比較のためにそれぞれ蒸発率を上 限値と下限値に近い =0.3 および 1.2(g/m<sup>2</sup>·hr· mmHg (一定)として解析を行ったものである。 図-14 から,相対湿度の解析値は,乾燥開始後 初期は実測値に比べ相対湿度低下が小さくなる 傾向がある。表面から 30 mmおよび 50 mmの位置 における相対湿度は 乾燥開始材齢 50 日付近ま では実測値に比べ大きく評価した。しかし,そ れ以後は若干小さく評価する傾向にあった。し かし,全体的に相対湿度の推移をよく表してい る。図-15から,蒸発率を下限値の0.3(g/m<sup>2</sup>・hr・

mmHg)とした場合は,相対湿度の解析値は, 材齢初期において実測値に比べ大きく評価する。 しかし 乾燥開始材齢 60 日付近からは実測値に 比べ小さく評価した。一方,図-16から,蒸発 率を上限値の 1.2 (g/m<sup>2</sup>·hr·mmHg) とした場合 は,乾燥開始後初期を除いては全体的に相対湿 度を小さく評価する。図-14~16 から,いずれ のケースについても,コンクリート中の相対湿 度が 100%から低下を開始する初期が解析では 実測値に比べ遅い傾向にあった。また,表面か ら 30 mmおよび 50 mmの位置における相対湿度の 解析結果は,経過時間とともに実測値より小さ く評価する傾向にあった。これらの点について は,物性評価さらには解析手法の両面から改善 を加える必要がある。しかし,本研究で明らか にしたように,蒸発率を表面近傍の相対湿度の 関数として評価し,解析に適用することにより 解析精度の向上を計ることができた。



図-15 相対湿度変化:実測値と解析値( :0.3)



図-16 相対湿度変化:実測値と解析値(:1.2)



図-17 解析モデル

6. マスコンクリートの乾燥収縮応力解析

## 6.1 解析概要

図 -17に示すように,橋脚柱部(10000 × 4000mm)の水平断面をモデル化して,水分移 動・温度解析および乾燥収縮応力解析を実施し た。水分移動に関する物性値<sup>2)</sup>の透湿率 $\lambda_p$ およ び湿気容量  $(dq/dP)_p$  は図-3,4に示すように相 対湿度の関数として評価した。蒸発率αは,前 節で述べた著者らの実験をもとに表面近傍の相 対湿度の関数としたもの(図-13参照)および比 較のため蒸発率 =0.3(g/m<sup>2</sup>·hr·mmHg)(一定) の2ケースの解析を行った。水和による湿気密 度変化(dq/dt)はないものとした。一方,温度 解析では表-3に示すコンクリート標準示方書<sup>3)</sup> に記載される物性値を用いた。水分移動および 温度解析における解析条件を表-4に示す。乾燥 収縮応力解析では、次式のCEB-FIP MODEL1990 の収縮ひずみ予測式<sup>4)</sup>に湿気移動解析によりも とめた相対湿度分布を適用することにより乾燥 収縮ひずみをもとめた。

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm})\beta_{RH} \tag{7}$$

ここで, cso:乾燥収縮ひずみの最終値( $\mu$ ), RH:相対湿度による係数, s(fcm):圧縮強度 とセメントの種類による係数である。また,有 効弾性係数は, $f'_{ck}(28) = 36.5$  (N/mm<sup>2</sup>) として土 木学会式<sup>3)</sup>を適用した。コンクリートと鉄筋の 熱膨張係数は10×10<sup>-6</sup>(1/),コンクリートのポ アソン比は0.16とした。

表-3温度解析に用いた物性値

			単位	数値
٦	比熱		kJ/kg•	0.92
シ	密度		kg/m <sup>3</sup>	2300
5	熱伝導率		W/m•	2.32
ij	熱伝達率		$W/m^2$ •	11.6
Τ	断熱温度	Q		47.4
٢	上昇式(5)	γ	-	1.30

表-4 解析条件

	単位	数値
コンクリートの打ち込み温度		23.0
周囲の温度		20.0
周囲の相対湿度	%	50.0
解析期間	E	150

#### 6.2 解析結果

図-18に温度の経時変化,図 - 19に相対湿度の 経時変化を示す。図-18から,コンクリートの温 度は材齢2~3日付近でピークに達し,その後は 周囲温度20 に近づいていく。図-19から,蒸発 率を相対湿度の関数として用いたケースでは, コンクリート表面の相対湿度は乾燥開始ととも に急激に低下していき,材齢10日付近で55%程 度まで低下する。そして,それ以降は次第に周 囲の相対湿度50%に近づいていく。一方,蒸発 率を =0.3 (g/m<sup>2</sup>・hr・mmHg)としたケースは, 乾燥開始とともに相対湿度は,緩やかに50%に 向かって低下していく。表面から50mmの位置 では相対湿の変化は極めて緩やかである。図-20



図-18 コンクリートの内部温度の経時変化

に,コンクリート表面に発生する乾燥収縮応力 の解析結果を示す。表面の乾燥収縮応力は、相 対湿度の低下にともなって,乾燥開始後初期か ら比較的大きな発現を示している。蒸発率 を 相対湿度の関数としたケースの方がこの傾向が 顕著である。これは,図-19に示すように, を 非線形とした場合,材齢初期における表面の湿 度低下が大きく算定されるためである。本研究 の乾燥収縮応力解析では,コンクリートを弾性 体として扱っているため大きな応力を示す結果 となっている。実際はクリープ,塑性変形およ び極表面近傍の微細クラックの発生により応力 が緩和されると考えられるが, 初期材齢におけ る表面近傍の乾燥収縮応力の増大は、この部位 におけるひび割れの危険性を示唆するものであ る。さらに材齢中期以降も,応力は緩やかに長 期にわたり発現していく。

7. まとめ

本研究では,実験によりコンクリート中の水 分移動に関する物性値である蒸発率を明らかに した。本研究で得られた成果を用いてマスコン クリートの乾燥収縮応力解析を行った。本研究 で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 蒸発率は,表面近傍の相対湿度に大きく依存し,相対湿度が低下すると減少する傾向にある。特に相対湿度100~70%の領域において大きく変化する。
- (2) 表面被覆材は,特に高湿度領域における蒸
  発率を低下させるが,水分を遮断すること
  はない。また風速の影響により,蒸発率は
  0.1~0.3(g/m<sup>2</sup>・hr・mmHg)程度増大する。



図-20 乾燥収縮応力の経時変化 (表面近傍)

- (3) 50 供試体の蒸発率は,20 供試体に比べ 若干小さくなる。
- (4) 蒸発率を表面近傍の相対湿度の関数として評価し,解析に適用することにより水分移動解析精度の向上を計ることができた。
- (5) 乾燥収縮応力は,表面近傍では乾燥開始後 初期から大きな発現を示す。そして,それ 以降も長期にわたり緩やかに進行していく。

参考文献

- 1)篭橋 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
- 2) 西岡栄香,原田 有:多孔質物質の透湿率お よび湿気拡散について,セメント技術年報, , pp.274 278,1961
- 3) 土木学会:平成11年版 コンクリート標準示方書 設計編, pp.34-35, 1999
- 4 ) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990 ,pp.57-58 , 1990