

セメント硬化体内部水分の潜熱評価に関する研究

千葉工業大学 大学院 建築都市環境学専攻 学生会員 ○長沼 直人
 千葉工業大学 工学部建築都市環境学科 正会員 内海 秀幸

1. はじめに

近年、セメント系材料の劣化・損傷問題に対するメカニズムの解明や長期耐久性の観点からセメント硬化体の内部における水分の移動特性を把握することは重要であるものと認識されている。セメント硬化体のような多孔質体内部における水分移動の駆動力は、一般に空間的な温度勾配や湿度変化(含水率勾配)に起因して生じるが、図-1に示すように、含水状態に応じて多様な様相を示し、吸着と脱着、すなわち凝縮と気化が複雑に絡み合った状況で生じており、その移動を精度よく調べるためには内部における水分の吸脱着に関わる潜熱を考慮する必要があるものと考えられる。

既往の研究において、セメント硬化体内部水分の潜熱に関する研究はなされておらず、コンクリートの水分移動解析における潜熱の値は、水が気化する際の蒸発熱の値である 40.7kJ/mol として設定されている場合が多い¹⁾。そこで本研究では、セメント硬化体内部の水分に対する潜熱に着目し、その含水率依存性を実験的に明らかにするとともに、潜熱推定のための数理モデルの構築を目指す。

2. 実験

2. 1 試料

試料は28日間 20°C の水中養生を施した硬化セメントペースト(W/C=40%)を用いた。これらは普通ポルトランドセメントにより作成されたものである。

2. 2 実験方法

105°C に設定した乾燥機で試料の乾燥時間を調整する事で様々な飽和度の試料を作成した。飽和度を評価するための含水率は熱重量分析器を用いて計測した。熱重量分析器については 0.001g のオーダーで検出できる質量センサーを使用し精密な測定が可能である。

図-2に潜熱を測定するための実験装置を示す。潜熱は次節に示すファントホッフ・プロットにより求めるため、温度変化に応じた湿度変化を計測できる装置を考案作製した。この実験装置は水分センサーを外付けの温度設定が可能な恒温水循環装置と連

結させ、水(温水)を循環させることで、水分センサーによりモニタリングされた閉じた実験系内の温度をコントロールできるようになっている。この水分センサーの精度は湿度に対して $\pm 1.5\%$ rh, 温度に対しては $\pm 0.5^\circ\text{C}$ である。

2. 3 ファントホッフ・プロット

潜熱の評価をするにはグラジウス・クライペロンの式から導かれた次式(1)を用いる。

$$\ln(p) = -\frac{L}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + C \quad (1)$$

ここで、 L は潜熱[kJ/mol], p は水蒸気分圧 [Pa], R はガス定数[J/mol · K], T は絶対温度[K], C は定数である。すなわち、平衡の状態にある閉じた実験系において温度を変化させた場合の湿度を計測し分圧 p を求め、図-3のファントホッフ・プロットと呼ばれるように実験結果をプロットすれば、潜熱 L を求めることができる。

潜熱は蒸気相から液相への凝縮も含む物質の相変化に応じた単位物質当たりのエネルギーを意味し、物質の相変化に応じて生じるエネルギーの総称であり、熱力学的には各相でのエンタルピーの差として定量的な記述がなされる。

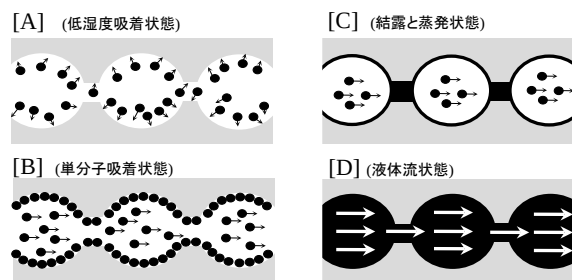


図-1 多孔質内部での水分移動の概念図

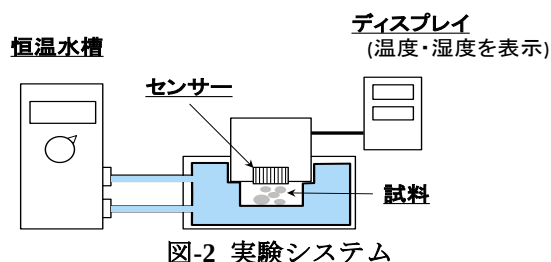


図-2 実験システム

2. 4 潜熱推定モデル

セメント系材料固有の空隙径分布特性を反映した水分基準の吸着等温線モデルとして次式が提案されている²⁾.

$$V = \frac{\Omega V_0}{\Omega - \ln(h)} \quad (2)$$

ここで, h は相対湿度 $[p/p_{\text{sat}}]$, V は水分の吸着媒の乾燥質量基準の含水率 $[\text{g/g}]$, V_0 は $h=1.0$ に平衡して定まる飽和含水率 $[\text{g/g}]$ である. Ω は無次元の定数であり, 空隙径の分布するレンジを定める定数 U $[\text{m}^3/\text{J}]$, 試験における吸着温度に対応した絶対温度 T $[\text{K}]$, ならびに, 用いた吸着質の比容積 v $[\text{m}^3/\text{mol}]$, ガス定数 R $[\text{J/mol} \cdot \text{K}]$ より次式のように表される.

$$\Omega = \frac{v}{U \cdot R \cdot T} \quad (3)$$

相対湿度 h は $p_{\text{sat}}[\text{N/m}^2]$ を飽和水蒸気圧として $h=p/p_{\text{sat}}$ で定義されることから, 式(2)は水蒸気分圧 p に対して次式のようにも表される.

$$\begin{aligned} p &= p_{\text{sat}}(T) \cdot \exp\left[\frac{\Omega \cdot (V_0 - V)}{V}\right] \\ &= p_{\text{sat}}(T) \cdot \exp\left[\frac{v}{U \cdot R \cdot T} \cdot \frac{(V_0 - V)}{V}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

飽和水蒸気圧 $p_{\text{sat}}[\text{N/m}^2]$ は Tetens(1930)によれば温度の関数として次式のように表される.

$$p_{\text{sat}}(T) = 611.1 \left(\frac{7.5(T-273.15)}{(T-273.15)+273.15} \right) [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

式(2)で示す吸着等温線モデルは陽な形式で吸着温度の項 T $[\text{K}]$ が含まれていることから, 式(4)ならびに式(5)より, 所定の空隙径分布, 飽和度, 飽和含水率に対応した水蒸気分圧の温度変化を計算することが可能である. すなわち, ファントホッフ・プロットに必要な温度変化に応じた蒸気圧変化に関する情報を得ることができ, 飽和度に依存した潜熱の値を数値的に表現することが可能である.

3. 実験結果

実験結果を図-4 に示す. 図中の赤丸は実験結果, また実線は吸着等温線モデルに基づく潜熱推定モデルより計算した結果であり, 定数 U の値はトライアルに決定した.

図-4 より, 飽和度が 0.6~1.0 付近では潜熱の値はほぼ一定値を示すが, 飽和度が 0.4 以下においては急激に増加する傾向を示す. 全体を通して潜熱は 40.7kJ/mol を上回り, 飽和度が 0.1~0.2 では水の蒸発潜熱の値の 2 倍以上の値となった.

また, 潜熱推定モデルは実験結果の基本的傾向を表現できている.

4. まとめ

本研究では, セメント硬化体内部の水分に対する潜熱に着目し, その含水率依存性を実験的に明らかにした. 結果として, 飽和度が 0.6~1.0 付近では潜熱の値はほぼ一定値を示すが, 飽和度が 0.4 以下においては急激に増加する傾向を示した.

全体を通して潜熱は 40.7kJ/mol を上回り, 飽和度 0.1~0.2 では水の蒸発潜熱の値の 2 倍以上の値となった. また, 潜熱推定モデルは実験結果の基本的傾向を表現することが可能であることを確認できた.

参考文献

- 1) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫 : 乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, 土木学会論文集, No. 490, V-23, pp. 101-110, 1994.
- 2) 内海秀幸: セメント硬化体の水蒸気吸着等温関係式, 土木学会論文集 E, Vol. 64, No. 4, pp. 560-571, 2008.

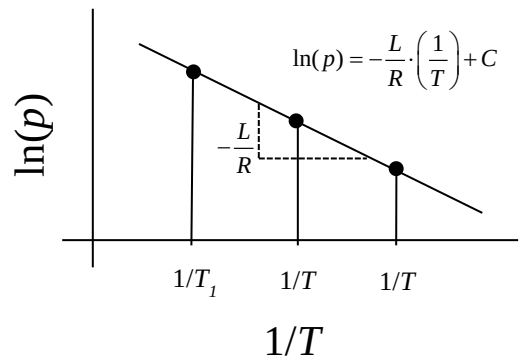


図-3 ファントホッフ・プロット

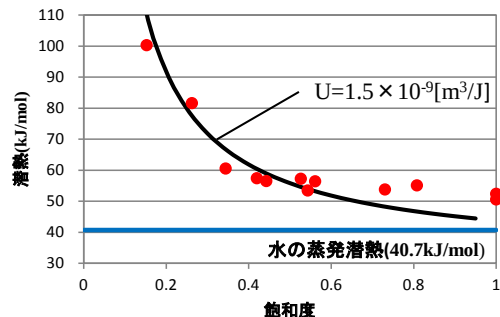


図-4 w/c=40%における飽和度と潜熱の関係