

γ 線照射装置を利用した建築壁体の非定常含水率測定法に関する研究

正会員 ○中村 暢^{*1} 同 岸本 嘉彦^{*2}
同 濱 幸雄^{*3} 同 銚井 修一^{*4}
同 小椋 大輔^{*5}

1.材料施工ー2.モルタル・コンクリートの物性
 γ 線、含水率、ALC、凍害、細孔径分布、凍結挙動

1. はじめに

凍害によるコンクリートの劣化は結氷量と強い関係性があるが、結氷性状と劣化性状が相互の進行に及ぼす影響については明らかになっていない。そのため、まずは含水率分布の経時変化を把握する必要がある。試験体を破壊することなく連続的に含水率を測定する方法は、交流2電極法などが挙げられるが、センサー類の作製に手間がかかり、微小な間隔の分布を容易に測定できない。

試験体にセンサーを埋め込むことなく材料の含水率分布を経時的に測定する方法には、 γ 線照射装置を利用する方法がある¹⁾。 γ 線は、材料内部の水分量が多いほど透過量が減衰する性質を有するため、 γ 線の透過量の変化から含水率の算出が可能である。一方、材料内部の水が凍結により膨張すると γ 線透過線上の水分子の数が減少するため、 γ 線の透過量が増加する。つまり、凍結前の水分量が既知であり、水分の移動が生じなければ、透過量の増加分から含水率の算出が可能と考えられる。

そこで本研究では、 γ 線照射装置を用いた含水率分布の経時変化を測定する手法の確立を目的とし、空隙構造が比較的一様であるALCを用いて、試験体を材料内部で含水率勾配による水の移動が生じない飽水状態とした基礎実験を行った。

2. 実験計画および方法

2.1 実験1： γ 線照射装置を用いた含水率測定

a) 試験体

同じ温度における結氷量が異なると想定される2種類のALC（気泡有り、気泡無し）を試験体として用意した。試験体寸法は $100 \times 200 \times 30$ [mm]

である。これらの試験体を飽水状態とするため、2日間の真空飽水处理を行った。試験体内部の水の凍結を補助的に確認するために貼付した熱電対、ひずみゲージの位置を図1に示す。試験体の底面から高さ10[mm]毎にひずみゲージを4点、熱電対を8点貼付した。試験体側面からの水分の蒸発を防ぐため、これらセンサー類の上からブチルゴムテープを貼り付けた。

b) 測定方法

ここでは、材料内の結氷と γ 線の透過量の変化についての検討を目的とする。実験装置の模式図を図2に示す。図2に示すように、線源と検出器の間に、銅箱と、その上に防湿処理した断熱箱を設置した。銅箱内部には冷媒を循環させ、実験中はこの冷媒温度を制御した。断熱箱内において、 γ 線が試験体の中央を透過する位置に試験体を設

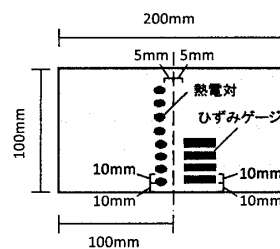


図1 熱電対およびひずみゲージの貼付位置

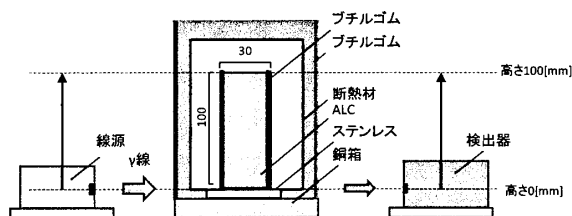


図2 実験装置の模式図

A Study on Measurement Method for Ice Content in Porous Building Wall by the Gamma-Ray Irradiation System

NAKAMURA Tohru et al.

置した。実験は凍結過程、融解過程の順に行った。冷媒の温度は、初期値を 25[°C]とし、凍結過程の到達温度を-10[°C]、融解過程の到達温度を 25[°C]に設定した。この装置では冷媒温度の変化は成り行きとなり、各過程の開始から定常状態に達するまでに、凍結過程では 11 時間ほど、融解過程では 6 時間ほどを要した。 γ 線の照射は冷却中に試験体下部から上面まで 1[mm]毎に行った。1 点に対する照射時間は 40 秒に設定した。試験体の底面から上面までの 1 回の測定に 71 分を要し、これを照射回数 1 回とした。測定は定常状態に達するまで行い、凍結過程および融解過程における γ 線の照射回数は、それぞれ 10 回および 5 回となる。測定は、気泡無しの ALC、気泡有りの ALC の順に行った。

2.2 実験 2：水銀圧入法による細孔径分布測定に基づく結氷量の比較検討

a) 試験体

実験 1 と同様の ALC（気泡有り、気泡無し）を 5[mm]角に切断し、絶乾状態にした試料を用意した。

b) 測定方法

ここでは、 γ 線透過量に基づく含水率測定の妥当性の検討を目的とする。まず、水銀ポロシメーターにより気泡有りと気泡無しの ALC 試料の細孔径分布を測定した。次に、式(1)に示す Kelvin 式から細孔径に応じた相対湿度を求めた。

$$r = \frac{2\sigma M \cos \theta}{\rho RT \ln(f/f_0)} \quad (1)$$

ここで、 r は細孔径[m]、 σ は表面張力[N/m]、 M は分子量[kg/mol]、 θ は接触角[°]、 ρ は密度[kg/m³]、 R は気体定数[J/(mol・K)]、 T は絶対温度[K]、 f は水蒸気圧[Pa]、 f_0 は飽和水蒸気圧[Pa]である。

次に、式(2)に相対湿度と水分化学ポテンシャルの関係式、式(3)に結氷温度の平衡関係式を示す。式(2)を用いて、式(1)より算出した相対湿度および試験体の表面温度から水分化学ポテンシャルを算出した。次に、式(3)より、算出した水分化学ポテンシャルから細孔径に応じた凍結温度を求めた。

$$\mu = \frac{RT}{M_w} \ln\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (2)$$

$$\mu = H_{li} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (3)$$

ここで、 μ は水分化学ポテンシャル[J/kg]、 M_w は水の分子量[kg/mol]、 H_{li} は固相と液相の水分の

相変化熱[J/kg]、 T は自由水の凍結温度[K]である。

その後、凍結温度と細孔量の関係から含水率の理論値を算出し、 γ 線透過量に基づく測定値と比較することにより、測定の妥当性を検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験 1： γ 線照射装置を用いた含水率測定

a) 凍結過程

まず、絶乾および飽水状態の試料質量から算出した含水率は、気泡有りの ALC では 77.6[vol.%]、気泡無しの ALC では 52.4[vol.%]であった。つまり、この値が飽和含水率であり、含水率の最大値となる。

気泡無しの ALC の γ 線透過量から算出した含水率分布の凍結過程における時間変化を図 3 に 10[mm]間隔毎に平均化して示す。また、図 4 に表面ひずみおよび表面温度の時間変化を示す。図 3 に負の値が見られる理由は、 γ 線の透過量にバラツキが大きいためである。

図 3 より、いずれの高さにおいても含水率に 10 から 15[vol.%]の増加が見られるが、照射回数によるバラツキとの区別が困難である。図 4 を見ると、照射回数 5 回目の高さ 10[mm]においてのみ凍結によると思われる膨張を検出している。このことから、 γ 線による検出に対して、高さ 10[mm]の点では結氷量が十分ではなく、10[mm]以上の点では結氷が生じていないか、あるいは結氷量が少なす

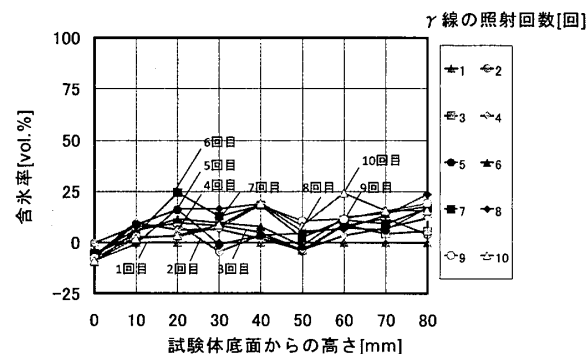


図 3 気泡無し ALC の含水率分布の時間変化（凍結過程）

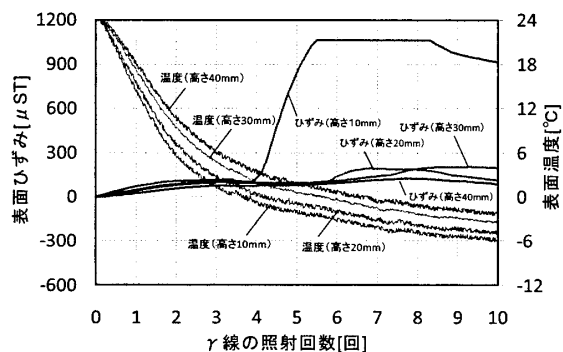


図 4 気泡無し ALC の表面ひずみおよび表面温度（凍結過程）

ぎてひずみが検出できなかったと考えられる。気泡有りの ALC の γ 線透過量から算出した含水率分布の凍結過程における時間変化を図 5 に 10[mm] 間隔毎に平均化して示す。図 6 に表面ひずみおよび表面温度の時間変化を示す。

図 5 より、気泡有りの ALC では、高さ 10、20、30、40[mm] の位置において、それぞれ、4、5、7、9 回目の γ 線照射から、含水率の増加が見られる。図 6 より、高さ 10 から 40[mm] の 4 箇所全てにおいて、過冷却解消によると思われる膨張および温度上昇が検出された。この膨張および温度上昇と図 5 に示す含水率の増加した照射回数が一致している。また、気泡有りの ALC では、全てのひずみ測定箇所に急激な収縮が起き、その後急激な膨張に転じた。これは、測定位置よりも冷却面に近い部位で凍結が生じると、周辺の未凍結水が凍結部位へ移動することにより凍結収縮が起こり、その後、測定位置にも凍結が生じた際に、急激な膨張に転じたと考えられる²⁾。

以上より、気泡有りの ALC の場合には、少なくとも下面から 40[mm] の範囲において凍結が生じており、 γ 線によりそれを検出できたと考えられる。ただし水の移動が生じている可能性があるため、絶対値については今後の検討が必要である。

b) 融解過程

気泡無しの ALC の凍結過程では含水率の検出が困難であったため、融解過程の検討においては、気泡有りの ALC の結果のみを示す。図 7 に気泡有りの ALC の融解過程における含水率の時間変化を 10[mm] 毎に平均化して示す。また、図 8 に表面ひずみおよび表面温度の時間変化を示す。

図 7 より、10 から 40[mm] の位置において、照射回数 2 回目から含水率の減少が見られる。図 8 より、照射回数 1 回目までに全てのひずみ測定箇所に収縮が生じ、その後、緩やかに膨張している。このことから、融解過程では、まず試験体と水が収縮し、その後、温度上昇による緩やかな膨張と同時に氷が溶け始めていると考えられる。その後、0 から 40[mm] の位置において、照射回数を重ねる毎に含水率が減少している。また、照射回数 5 回目で高さ 40 から 60[mm] において、含水率が 25[vol.%] であった。図 8 を見ると、照射回数 1 回目以降に温度上昇に伴う緩やかな膨張が見られたが、氷の融解によると思われる収縮が見られなかった。しかし、図には示していないが、凍結過程開始前と凍結過程終了後の含水率を比較すると、

高さ 40 から 60[mm] においては含水率が減少していた。しかし、高さ 0 から 30[mm] および 70 から 80[mm] の領域では含水率の変化が見られなかったことから、高さ 40 から 60[mm] の位置の水は高さ方向に移動しておらず、照射回数 5 回目においても、氷が溶けずに存在している可能性が高い。

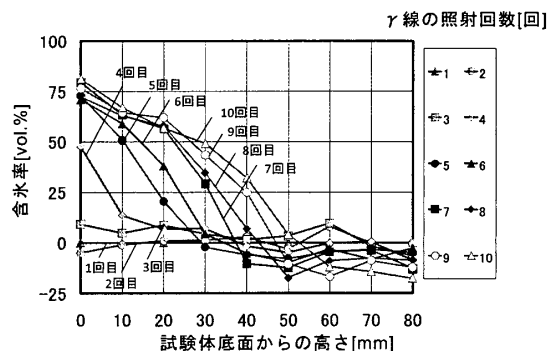


図 5 気泡有り ALC の含水率分布の時間変化（凍結過程）

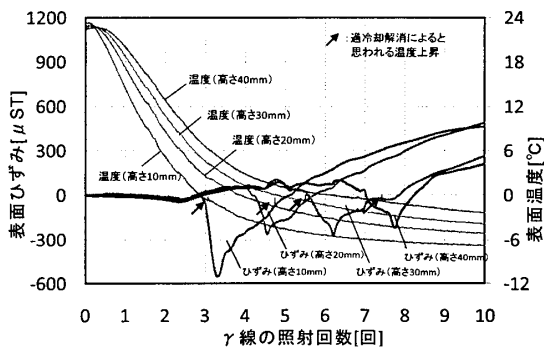


図 6 気泡有り ALC の表面ひずみおよび表面温度（凍結過程）

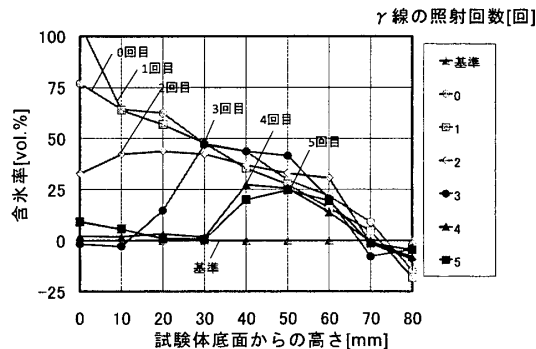


図 7 気泡有り ALC の含水率分布の時間変化（融解過程）

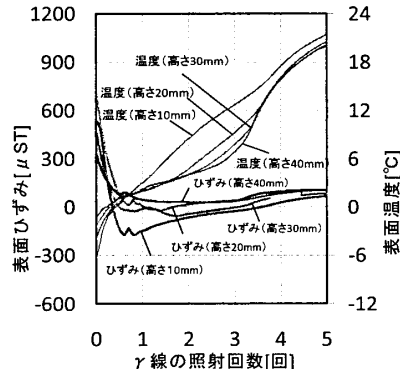


図 8 気泡有り ALC の表面ひずみおよび表面温度（融解過程）

ただし、高さ方向の水の収支が合わず、試験体の長辺方向に水の移動が生じた可能性があるため、今後、水平方向についての検討が必要である。

以上のことから、気泡有り ALC の場合には、 γ 線により試験体内部の水が減少する様子を概ね検出できた可能性が高いと考えられる。

3.2 実験 2：水銀圧入法による細孔径分布測定に基づく結氷量の比較検討

図 9 に水銀圧入法により測定した気泡有りおよび気泡無しの ALC の空隙径分布を示す。また、図中には $-6.5[^\circ\text{C}]$ の凍結温度と平衡する径も示す。

図 9 より、気泡無しの ALC より気泡有りの ALC において、 $30[\mu\text{m}]$ 以上の空隙（気泡）が多いことを確認できた。

実験 1 の気泡無し ALC の高さ $10[\text{mm}]$ における照射回数 10 回目の最低到達温度は $-6.5[^\circ\text{C}]$ であった。図 9 の結果を用いて算出される結氷量の理論値は $15.4[\text{vol.}\%]$ となる。つまり、試料が ALC の場合には結氷量がこの値以下では表面ひずみの検出は困難だと言える。

次に、図 10 に気泡有りの ALC について、図 9 に示す空隙径分布から算出した含水率の理論値と γ 線による測定結果から算出した含水率の測定値（照射回数 10 回目）の比較を表面温度分布とともに示す。

図 10 より、実験 1 の結果から凍結したと考えられる高さ 10 から $40[\text{mm}]$ の領域において、測定値と理論値の相対誤差は、 $20[\%]$ 前後であった。

γ 線により測定した含水率は、空隙径分布から算出した含水率と、分布範囲は概ね一致しており、絶対値については今後検討が必要である。

4. まとめ

本研究は、 γ 線照射装置を利用した建築壁体の非定常含水率測定手法に関する研究として、空隙構造が比較的一様であり材料内部で水の移動が生じない飽水状態の ALC を用いて含水率勾配による水の移動が無い基礎実験を行った。

得られた知見を以下に示す。

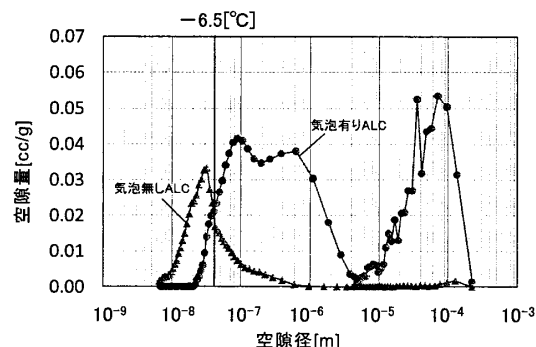


図 9 空隙径分布

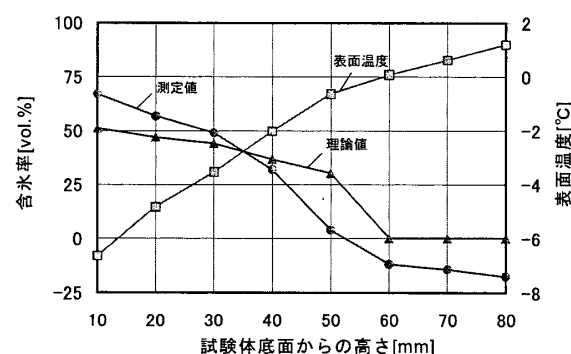


図 10 含水率の理論値と測定値の比較

- (1) 試験体が ALC の場合は、 $15.4[\text{vol.}\%]$ 以下の結氷量に対して表面ひずみの検出は困難である。
- (2) 細孔径分布の結果に基づく熱力学的な理論値と比較すると、 γ 線の測定結果は結氷の生じている範囲が概ね一致しており、妥当な結果が得られることがわかった。絶対値については今後も検討が必要である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（若手研究（B）、No.21360259）により行ったものである。記して謝辞を表す。

【参考文献】

- 1) 小椋大輔, 銚井修一, 松下敬幸, 恩村定幸, 小南和也, 安井義貴, 「強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性に関する研究: その5 ガンマ線含水率測定装置を用いた吸水実験による水分物性値の同定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 339-340, 2006.
- 2) 三橋博三, 周志云, 多田眞作: 微視的メカニズムを考慮したコンクリートの凍結作用による変形挙動の数値モデル, コンクリート工学論文集, 第14巻3号, 2003年9月.

- *1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程
- *2 室蘭工業大学大学院 助教 博（工）
- *3 室蘭工業大学大学院 教授 博（工）
- *4 京都大学大学院 教授 工学博士
- *5 京都大学大学院 准教授 博（工）

- Graduate Student, Muroran Institute of Technology
- Assist. Professor, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.
- Professor, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.
- Professor, Kyoto University, Dr. Eng.
- Associate Professor, Kyoto University, Dr. Eng.