

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 11日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760435

研究課題名（和文）建築壁体の凍結融解挙動と水分移動特性の相互作用に関する基礎的研究

研究課題名（英文）A Study on Interaction between Freezing and Thawing Behavior and Moisture Transfer Properties of Building Wall

研究代表者

岸本 嘉彦（KISHIMOTO YOSHIHIKO）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30435987

研究成果の概要（和文）：力学的作用と材料内の熱水分移動，特に液水移動を同時に考慮した建築壁体の耐久性予測手法開発の一環として，まずは測定が容易な ALC を対象に材料内部の凍結融解挙動およびそれに伴う破壊・損傷と水分特性（含水率分布，平衡含水率曲線，水分移動係数）の相互作用を明らかにし，その相互作用を考慮可能な解析手法の確立を目的とした検討を行った。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to establish an analytical model taking into account the interaction between micro-cracking and moisture transfer properties as a part of development of durability prediction method for building wall.

It was investigated that the interaction under freezing-thawing process based on the result of gamma-ray irradiation experiment and analytical result by using three-phase equilibrium heat and moisture transfer equation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学,建築環境・設備

キーワード：耐久性予測，含水率，凍結融解

1. 研究開始当初の背景

一般にコンクリートの劣化現象の多くは，材料内部の水の影響を大きく受ける。そのため，適切な耐久性予測のためには，材料内の水分の挙動を把握する必要がある。特に，凍結・融解過程を受けるコンクリートにおいては，結氷による微細な破壊と，それに伴う水分移動係数の増大を繰り返しながら，凍害は進行する。しかし，結氷性状と劣化性状が相互の進行に及ぼす影響は明らかになってい

ない。

また，試験体にセンサーを埋め込まず，材料の含水率分布を経時的に測定可能な方法として γ 線照射装置がある。材料厚に変化がない場合には， γ 線の透過量は内部の水分量が多いほど減衰する。つまり，水の凍結時の密度変化により，透過線上の水分子の数が減少するため γ 線の透過量は増加する。すなわち，凍結前の水分量が既知であれば，透過量の増加分から含水率の算出が可能であ

ると考えられる。

一方、既設構造物への適用が可能であり、施工が容易かつ比較的安価であることから、コンクリート構造物の塩害防止、凍害防止、中性化抑制など、総合的に劣化を抑制する手法として表面改質材の利用が期待されている。表面改質材はケイ酸質系とシラン系に大別され、ケイ酸質系は材料の空隙構造の緻密化、シラン系は撥水層の形成により、塗布した材料の吸水を抑制する効果を有する。

しかし、既往の実験結果においては、表面改質材の塗布により材料の吸水性は抑制されたが、凍結融解の繰り返しにより剥離が促進する結果が得られている。さらに、この剥離促進のメカニズムは明らかになっていない。

2. 研究の目的

- 1) γ 線照射装置を利用した非破壊含水率測定手法の確立
- 2) 微量な水分移動係数変化を検出可能な測定装置の開発
- 3) 空隙構造変化を考慮可能な解析モデルを開発

3. 研究の方法

1) γ 線照射装置を用いた含水率測定

ここでは非破壊含水率測定装置として利用される γ 線照射システムを応用した非破壊含水率測定理論を提案し、飽水 ALC 試験体を用いた凍結融解実験により、その妥当性を検討した。

①□試験体

既製の ALC パネルを幅 200×高さ 100×奥行 30[mm]に切断した ALC 試験体に真空飽水処理を行い実験に用いた。

真空飽水処理終了後、試験体内部の水の凍結を補助的に確認するために材料幅の中心軸に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。

②□試験装置

図 1 に実験装置の模式図を示す。図 1 に示すように、垂直軸に移動可能な線源と検出器の間に、内部に冷媒を循環させた銅箱と、その上に防湿処理した断熱箱を設置した。断熱箱内部において γ 線が試験体の中央を透過するように試験体を設置した。実験は凍結過程、融解過程の順に行い、実験中は銅箱内の冷媒の到達温度を制御した。冷媒の温度は、初期値を 25[°C]とし、凍結過程の到達温度を -12[°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時間変化勾配は制御できないため、時間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、試料幅の中心軸上において、試験体底面（高さ 0[mm]）から上面（高さ 98[mm]）まで 1[mm]毎の計 99 点に対し行った。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 回と定義する。測定は温度が定常状態に達するまで行っており、凍結過程 11 時間および融解過程 6 時間における γ 線の照射回数は、それぞれ 10 回および 5 回となった。

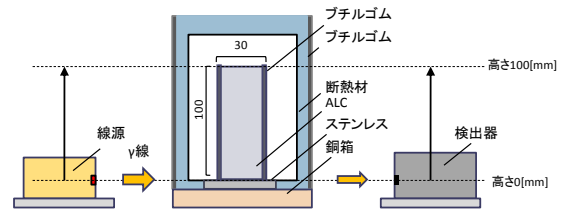


図 1 実験装置概略図

2) 水銀圧入法による細孔径分布測定に基づく結水量の比較検討

ここでは、水銀ポロシメーターにより ALC 試料の細孔径分布測定を行い、細孔径分布の結果と実験 1 において得られた試料の温度分布から、熱力学的理論値としての含水率分布を算出した。次に、 γ 線透過量の測定値に基づく含水率と熱力学的理論値として算出した含水率を比較することにより、 γ 線透過量に基づく含水率測定の妥当性を検討した。

3) 測定時に要する加圧による材料の変形を防止するため、難透水性材料においても常気圧下において透水係数を測定可能な装置を作成し、その妥当性を検討した。ここで提案する透水係数測定装置は、液水により満たされたアクリル容器により試験体の透水面を密閉し、さらに、上面、下面のアクリル容器と内径 4 [mm]以下の目盛付きガラス管をそれぞれ接続している。二本のガラス管の鉛直方向の位置を調整することにより、試験体の上下面に水頭差を発生させる機構である。

4) 三相系熱水分同時移動方程を用いた解析により、表面改質材の浸透深さが含水率分布に及ぼす影響について検討した。

ここでは、既報において実施した凍結

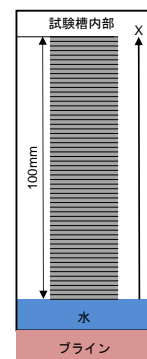


図 2 解析対象

融解試験 (RILEM CIF/CDF 試験) を想定した解析を行う。解析対象としたコンクリート試験体を要素分割とともに図2に示す。解析対象は、試験槽内に設置された高さ 100[mm]のコンクリート円柱試験体である。図2に示すように、試験体下面は液水に接しており、その位置における試験槽の外側を流れるブラインが試験条件として温度制御されている。ここでは、この試験体の高さ方向を X 方向とし、熱水分の移動は X 方向のみに生じると近似した 1 次元モデルとして取り扱った。

4. 研究成果

1) γ 線照射装置を利用した非破壊含水率測定手法の確立

①凍結過程

表面ひずみおよび表面温度の時間変化、 γ 線透過量の測定値から算出した 10[mm] 間隔毎の含水率分布の時間変化を、図3、図4にそれぞれ示す。図3の上部の②~⑩は γ 線の照射回数を表し、トーンによる色分けの範囲内において、その照射回数に相当する測定が行われていたことを示している。

図3より、底面からの距離が 10, 20, 30, 40[mm] の 4 箇所全てにおいて、それぞれ 3, 5, 6, 8 回目の照射間にわずかではあるが、瞬間的な温度の跳ね上がりが検出された。おそらく過冷却解消によるものと考えられる。

次にひずみの挙動に着目すると、収縮から膨張に転じるタイミングは、10, 20, 30, 40[mm] の順に、それぞれ 4, 5, 7, 8 回目の照射回数時となっており、温度の跳ね上がりの発生とは明確に合致しない。

図4より、結氷は材料底面から始まり、凍結過程の測定終了までに高さ 50[mm] 程度の領域にまで及ぶことがわかる。また、高さ 50[mm] 以上の領域においては、含水率が負の値を示している。これは、その位置において γ 線透過量が増加したことを示している。飽水しているにもかかわらず透過線上の水分が増加、もしくは材料の収縮による影響等が考えられるが、現時点で原因は明確に解明できていない。今後、原因解明のための追加実験を予定している。

そこで、ここでは含水率が増加した領域にのみ着目する。底面からの距離 10, 20, 30, 40[mm] の位置において、それぞれ、4, 5, 7, 9 回目の γ 線照射時に含水率の増加が見られる。これらのタイミングは、各測定位置において検出された温度の跳ね上がりのタイミングよりも、ひずみが膨張に転じたタイミングに近い。すなわち、検出した温度の跳ね上がりが過冷却解消によるものだとしても、それに起因する結氷量は少なく、ひずみにより検出される結氷量が相対的に多いものと考えられる。

以上より、飽水状態の ALC では、少なくと

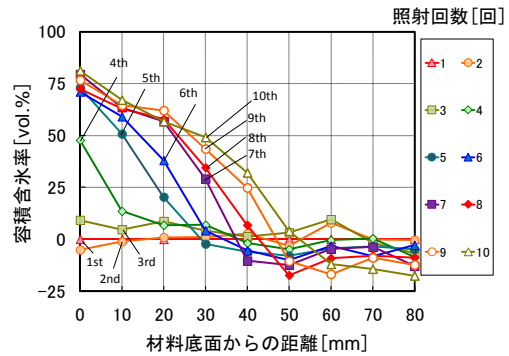


図3 表面温度と表面ひずみの経時変化 (凍結過程)

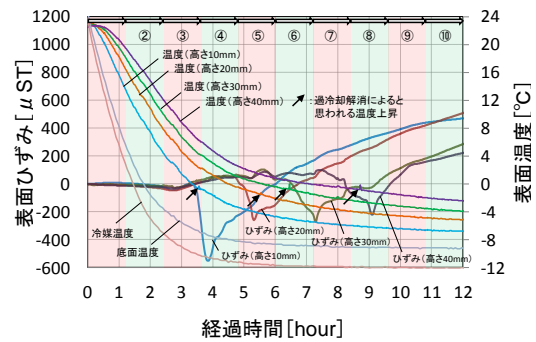


図4 含水率分布の経時変化 (凍結過程)

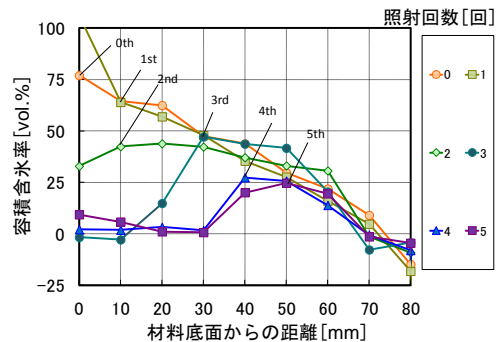


図5 表面温度と表面ひずみの経時変化 (融解過程)

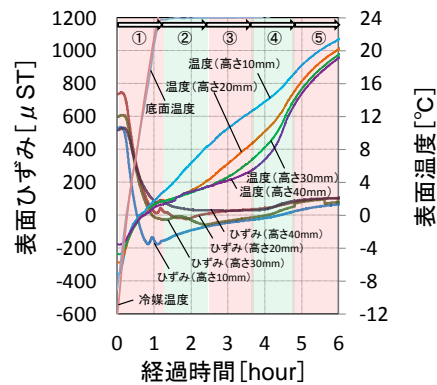


図6 含水率分布の経時変化 (融解過程)

も下面から 50[mm]の領域において凍結が生じており、 γ 線によりその凍結を検出できたと考えられる。ただし材料内の水の移動について不明な点が残っており、絶対値については今後の検討が必要である。

②融解過程

表面ひずみおよび表面温度の時間変化、 γ 線透過量の測定値から算出した 10[mm]間隔毎の含水率分布の時間変化を、図5、図6にそれぞれ示す。

図5より、底面温度が急激に上昇している1時間後までは、試験体の各測定位置の温度はほぼ同じ温度で変化している。そこから各点の温度が0°Cを超え、底面から離れた位置ほど温度変化が緩やかになるが、4時間後程度から温度変化が再度大きくなる。これは底面に近い位置では、底面から離れるほど緩慢に結氷が融解しているが、底面に近い位置、特に底面からの距離が10[mm]の点においては、結氷の融解による温度変化の停滞が見られないほどに底面からの加熱量が大きいと考えられる。

次にひずみの挙動に着目すると、融解過程開始から1時間後までは膨張ひずみが減少、すなわち収縮するが、測定点の温度が0°C近傍に達すると、底面に近い点ほど膨張側に凸となる挙動が見られる。詳細な原因は不明であるが、融解速度が大きい場合には、材料、氷の熱膨張、融解に伴う体積変化、液水の移動などが相互に影響し、その結果、複雑な変形挙動を生じている可能性が高い。また、測定終了時には、わずかに膨張側のひずみが残留する結果となった。

図6より、照射回数が2回目になると底面側から融解が始まり、照射回数3回目では、底面からの距離が30[mm]までの領域では結氷がほとんどなくなっている。これは温度、ひずみの変化から想定される融解挙動と一致する。しかし、底面からの距離が40~70[mm]の領域においては、結氷が残存している結果となった。照射回数5回目では表面温度が20[°C]に達しており、内部に氷が残っている可能性は低い。水分が移動した可能性があるが、他の測定点に含水率の増加は認められなかった。水平方向の分布について、今後、検討する必要がある。

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7に水銀ポロシメーターにより測定したALCの細孔径分布を示す。また、図中には底面からの距離が10[mm]の点における最低温度であった-6.5[°C]の凍結温度と平衡する径も示す。-6.5[°C]における凍結量は約51[%]であった。

次に、図7に示す細孔径分布から算出した含水率の熱力学的理論値と γ 線による測定

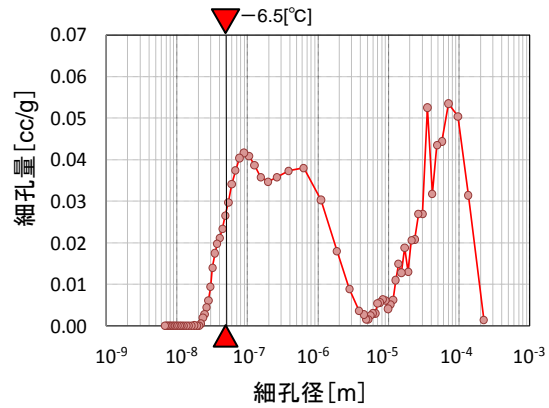


図7 細孔分布の測定結果

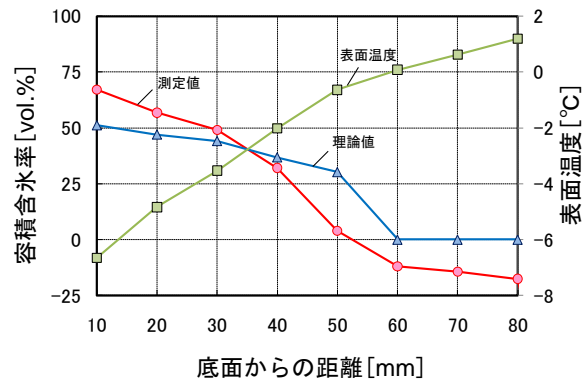


図8 含水率の熱力学的理論値と γ 線透過量に基づく測定値の比較

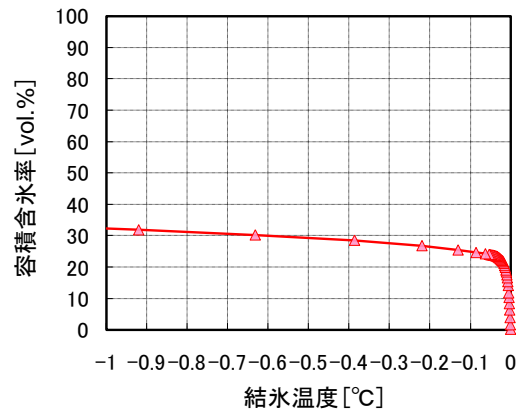


図9 結氷温度0°C付近の平衡含水率

結果から算定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図8に示す。また0°C付近の結氷温度と平衡含水率の関係を図9に示す。

図8より、実験1の結果から凍結したと考えられる高さ10~40[mm]の領域において、底面側ほど測定値が理論値よりも大きく、底面から10[mm]の位置では、その差は約20[vol.%]となった。これは、水銀圧入法では全細孔を測定できていないこと、さらに

は、周辺温度が表面温度より高いことから、内部温度が表面温度より低いと考えられるため、表面温度を用いて算出した含水率の熱力学的理論値が、 γ 線透過量より算出した実験値より低い値になった可能性が考えられる。

また、高さ 40 から 60[mm]では測定値が理論値より小さく、底面部と逆の傾向となった。最大誤差となった高さ 50[mm]の位置において、測定値は理論値より約 25[vol.%]小さい。

図 9 より、0[°C]近傍の結氷温度と含水率の関係は曲線勾配が大きい変化であることがわかる。特に $-0.1 \sim 0.0$ [°C]の間では 25[vol.%]も変化しており、温度の測定には十分な精度が必要であると言える。実験 1 の凍結融解過程において、試料の内部温度が表面温度より 0.1[°C]低かった可能性は十分に考えられる。

γ 線により測定した含水率は、細孔径分布から算出した含水率と、分布範囲は概ね一致していた。しかし、含水率の絶対値については算出が適切にできていない可能性がある。

3) 提案する透水係数装置の測定環境に関する検討

この装置は各材料の線膨張の影響を大きく受けるため、必要な温湿度制御精度について検討し、 ± 0.1 [°C]、 ± 5 [RH%]の環境下において、コンクリート等の難透水性材料に対し十分な測定が可能であることが明らかになった。

4) 空隙構造変化を考慮可能な解析モデルによる表面改質材の浸透深さが含水率分布に及ぼす影響について

各凍結融解サイクルの 8 時間経過時における含水率分布のサイクル数による経時変化を、浸透深さ 0, 10, 20, 40[mm]の場合について、それぞれ図 1 0 ~ 図 1 3 に示す。

表面改質材が無塗布（浸透深さ 0[mm]）の場合、結氷が生じ始める位置は材料表面であり、サイクル数の増加に伴い、結氷が材料内部へ進行することがわかった。この場合には、結氷の体積膨張により未凍結水は材料内部へ向かって押し込まれるが、未凍結水は材料内部側へ容易に移動できるため、材料表面層を外側に押し出す圧力は発生し難い。

表面改質材の浸透深さが 10[mm]以下の場合には、含水率の最大値が材料表面ではなく、浸透深さ位置近傍に見られた。結氷の体積膨張により、未凍結水が材料内部側だけでなく表層側へも押し込まれると考えられる。また、表層側は改質されていることから透水抵抗が増加しており、未凍結水が押し込まれた場合には、非改質層に比して圧力の上昇が増加する。すなわち、材料表層部を外側に押し出す圧力が発生しやすい。さらには、含水率の

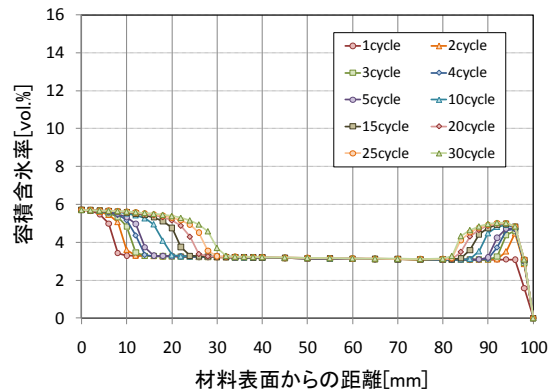


図 1 0 含水率分布の変化（浸透深さ 0 [mm]）

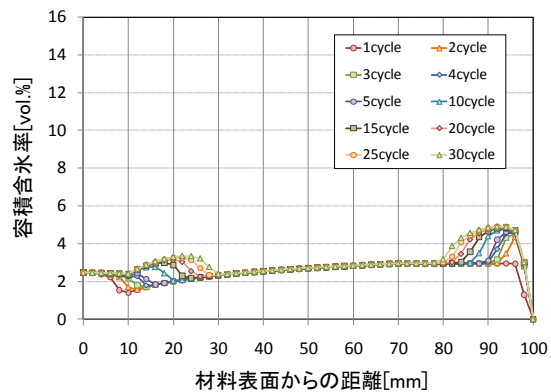


図 1 1 含水率分布の変化（浸透深さ 10 [mm]）

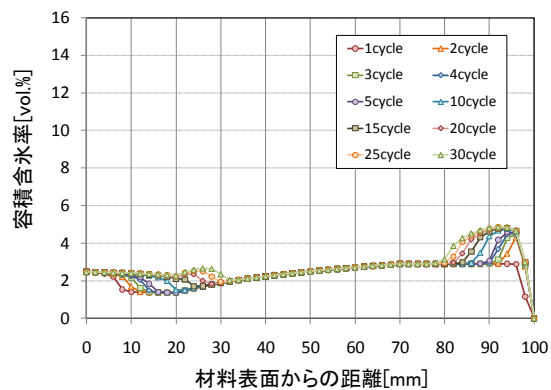


図 1 2 含水率分布の変化（浸透深さ 20 [mm]）

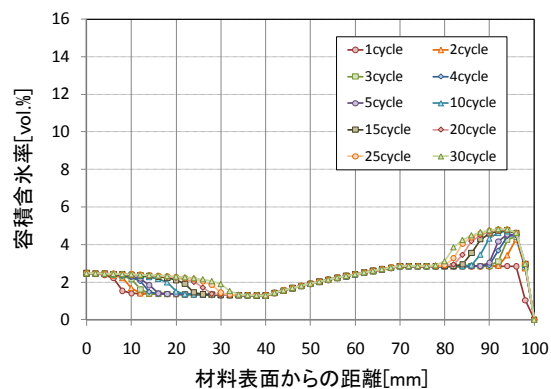


図 1 3 含水率分布の変化（浸透深さ 40 [mm]）

最大値を示す位置と材料表面までの距離が短いため、表層部が剥離する可能性は高いと言える。

浸透深さが20[mm]以上の場合には、無塗布の場合と同様の傾向を示した。すなわち、表面改質材により、材料の劣化を抑制するためには、表面改質材を20[mm]程度の深さまで十分に浸透させる必要があると言える。

想定される表層剥離メカニズムの模式図を図15に示す。表層が改質されている場合には、結氷の体積膨張により、未凍結水が材料内部側だけでなく表層側へも押し込まれると考えられる。表層側は改質されていることから透水抵抗が増加しており、未凍結水が押し込まれた場合には、非改質層に比して圧力上昇の程度が増加する。すなわち、材料表層部を外側に押し出す圧力が生じやすと考えられる。また、最大含氷率を示す位置と材料表面までの距離が短く、さらに最大含氷率が高くなるほど、表層部が剥離する可能性は高いと言える。表面改質材の浸透深さが小さい場合には、改質層と非改質層の境界域に結氷量の最大値が見られ、その位置における結氷量の増加が剥離を促進させている原因であることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

1. 岸本嘉彦, 濱幸雄, 鈴木好幸, 谷本文由, “表面改質材の浸透深さがコンクリート内部の結氷性状に及ぼす影響および表面剥離メカニズムに関する検討, 査読有, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, 2011, pp. 671-676.

[学会発表] (計5件)

1. Yoshihiko Kishimoto, “A Study on Measurement Method for Water and Ice Contents in Porous Building Material by the Gamma-ray Irradiation System”, Life Cycle Prediction and Management of Concrete Structures, 6th March 2012, China·Qingdao.
2. Tohru Nakamura, A Study on Applicability of the Gamma-ray Irradiation System to Measurement of Ice Content Distribution in Porous Building Structure under Freezing and Thawing Process, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2011, 9th March 2012, 北海道・室蘭工業大学.
3. 中村暢, “ γ 線照射装置を利用した建

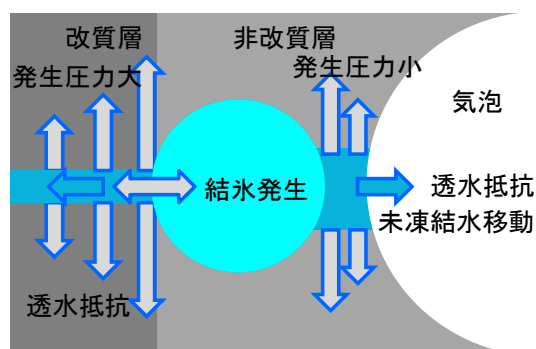


図15 想定される表層剥離メカニズム

築壁体の非定常含氷率測定法に関する研究,” 日本建築学会大会, 25th Aug. 2011, 東京・早稲田大学.

4. Tohru Nakamura, “A Study on Measurement Method for Ice Content in Porous Building Wall by the Gamma-ray Irradiation System,” 5th International Symposium between Japan, China and Korea, Performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure, 9th Aug. 2011, 北海道・北海道立総合研究機構建築研究本部建築総合研究所.
5. 中村暢, “ γ 線照射装置を利用した築壁体の非定常含氷率測定法に関する研究,” 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2nd July. 2011, 北海道・札幌市立大学.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

該当事項無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸本 嘉彦 (KISHIMOTO YOSHIHIKO)
室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 30435987