

論文 外断熱が施工されたコンクリート内・外壁面の中性化速度に及ぼす屋外の温度環境の影響

船坂 健介*1・塚越 雅幸*2・上田 隆雄*3・中山 一秀*4

要旨: 外断熱コンクリート壁面に対して、屋内・外面の2方向から異なる温度環境が作用した場合の中性化速度について検討を行なった。試験体の屋内側を想定した面は20°C一定、屋外側面は夏季と冬季をそれぞれ模擬した高温と低温環境になるように調整し、この試験体全体を炭酸ガス濃度5%の促進中性化環境に暴露した。試験の結果、外断熱を施した試験体はモルタル単体の試験体と比べ、夏季では温度上昇が抑制され屋内・外共に中性化速度は低下した。冬季では中性化速度は全体的に低下するが、外断熱を施すことで試験体全体が屋内温度と同程度に保持されるために屋内側では乾燥速度も速く中性化速度が上昇した。

キーワード: 中性化速度, 外断熱, 屋外, 屋内, 温度, 含水率

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の限界状態(≒寿命)は中性化が鉄筋位置に到達した時点を指標としてきた。しかし、実建築物の寿命評価を単純な中性化深さのみで考える事は難しく、再考の時期に来たのではないかと議論が活発化^{1,2)}している。

また、これまでのコンクリートの中性化抵抗性や、仕上材等の保護性能を評価する試験としては、特定の劣化要因の強度を高め、試験体の片面を暴露面とした促進劣化試験や屋外暴露試験が行われているが³⁾、試験体全体がこれらの環境に曝されるために屋内外の温湿度の違いまでは考慮できていないケースも考えられる。さらに実建築物のRC壁面の場合、屋内外で異なる仕上材が施工されることも多く、コンクリート部材の断面方向での温度と含水率分布は一樣にはならず、かつ絶えず変化している非定常な状態にあると考えられる。従来手法では、部材の性能を相対的に比較するためには有効ではあるが、正しく耐久性を評価することは非常に難しい。

そこで著者等は前報⁴⁾までに、実際のコンクリート壁面を模擬して、屋外・屋内の2面から異なる温度環境を作用させた促進中性化試験方法について提案した。実験では夏季を想定した環境下にあるコンクリートの中性化と含水率変化について、屋外側面への断熱・防水材料の施工の影響について検討を行なった。試験の結果、外断熱・防水は屋外側のみならず室内側からの中性化の進行に対して抑制効果がある一方、含水率は高めに保たれる傾向にあることが分かった。本報では、冬季環境を想定した環境下での2面暴露促進中性化試験を行い、外断熱・防水がコンクリート部材の温度分布や、含水率変化、中性化速度に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 下地モルタル

中性化は大気中の炭酸ガスがコンクリート中の水酸化カルシウムと反応することで炭酸カルシウムとなり、コンクリートのpHが低下する現象である。コンクリート表面から徐々に内部へと拡散する炭酸ガスは、粗骨材の表面に達すると移動が妨げられる事や、骨材とセメントペーストの界面の脆弱部を優先的に進行するなど⁵⁾中性化深さが見かけ上不均一となる。そこで本研究では、中性化領域の観察をしやすいするために、100×100×400mmの無筋角柱モルタルを試験体に採用した。モルタルはW/C=60%とし、この調査を表-1に示す。試験体は打設翌日に型枠から取り外し、1ヶ月間水中養生した後、20°Cの実験屋内で表面含水率が、8%以下になるまで1ヶ月間乾燥させた。

(2) 断熱材および防水材

使用材料の種類と基礎物性値を表-2に示す。断熱材は、建築用断熱材として使用されている市販の繊維系グラスウールボードと発砲プラスチック押出法ポリスチレンフォームの2種類を用いた。なお部材厚さは40mmとした。また防水材も同様に、建築用防水層に用いられている市販のウレタンゴム系塗膜防水材を用いた。

表-1 下地モルタルの調査

W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m ³)			28日 圧縮強度 (N/mm ²)
		水*1	セメント*2	細骨材*3	
60	300	288	480	1440	42.9

*1: 上水道水, *2: 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)
*3: 細骨材: 阿波市市場町産砕砂(表乾密度2.57g/cm³)

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コース (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系助教 博士(工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系助教 (正会員)

2.2 試験体の作製

試験体の形状と寸法を図-1に示す。試験体はモルタルの乾燥終了後、2面(打設時の型枠側面)のうち屋外面を想定した1面には、断熱材と防水材を施工した。通常の断熱工事では、接着剤や設置用アンカーを用いてコンクリートに断熱材への取り付けを行うが、本実験ではこれらが熱や水分、気体等の移動に及ぼす影響を避けるため使用しなかった。そのため、試験体の暴露面以外の面をエポキシ樹脂で絶縁処理する際に、同時に断熱材を写真-1に示す様に、素材間に隙間が生じないように固定した。

防水材については、塗膜厚さが硬化時の厚さで2.0mmとなるように、塗布時の重量で管理した。施工は20°C、60%R.H.の環境下で行い、同環境下にて1週間養生した。通常の防水工事ではコンクリート表面にプライマーが塗布されるが、プライマーのガス遮断性能の影響を除外するために、今回の試験体では使用しなかった。ただし、試験期間中に防水材の剥離等の不具合は生じていない。比較のため屋外面に何も施工していない試験体も作製した。建築物の屋内側の壁面にも、実際は様々な表面仕上げが施工される場合があるが、本試験では特に屋外面への表面保護がRC部材中の温度・含水率に与える影響を評価する事を目的とするため、全ての試験体で何も施工しなかった。

2.3 2面暴露促進中性化試験の概要

(1) 試験条件

断熱材が通気工法を用いて施工されたRC壁面の概念図を図-2(a)に示す。実際の建築物ではこのような壁面に対し、屋内外面でそれぞれ異なる強度の温湿度に曝されることになる。また、促進中性化環境となるように高濃度の炭酸ガス環境を再現するために図-2(b)に示すような促進中性化チャンバー内に、壁面全体を設置した。なお、本研究で用いた試験体は100×100×400mmの小型の角柱の試験体である。これらを、外断熱壁面側の環境を模擬する断熱材が施工された面が1方向に向くように試験体を積み上げて配置して壁面を作製した。なお、試験体間での熱の移動を避けるために試験体間には厚さ20mmの断熱材で絶縁した。

夏季を想定した実験環境では、屋外の高湿環境を再現するため、図-3(a)に示すように白熱灯(250W)で試験体の表面温度が最大で60°Cとなるよう、試験体暴露面より鉛直距離で200mmの位置から照射した。照射時間は夏季の日照時間を想定して6時間とし、その後18時間の20°C、60%R.H.環境で自然冷却を1サイクルとした。

冬季を想定した実験環境では、低温履歴を再現するため、図-3(b)に示すように低温循環槽からの不凍液(約-10°C)を循環させた冷却用ホースを試験体暴露面に帯状に配置し、試験体の表面温度が5°C程度となるように不

表-2 断熱材と防水材の基礎物性

断熱材	熱伝導率 (W/m・K)	密度 (kg/m ³)	透湿度 (g/m ² ・24h)
グラスウール 40mm厚	0.036	32	118.38
ポリスチレン 40mm厚	0.023	28	3.29
防水材	伸び率 (%)	密度 (kg/m ³)	透湿度 (g/m ² ・24h)
ウレタン 2mm厚	467	1300	13.98

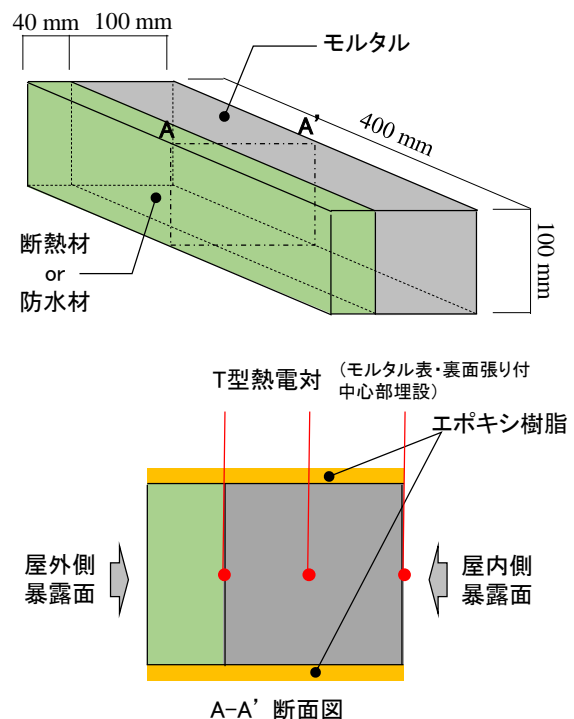


図-1 試験体の形状と寸法

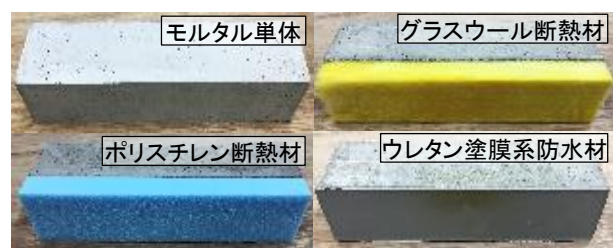


写真-1 試験体の外観

凍液を循環させた。なお、屋内側については夏季・冬季ともに20°C、60%R.H.一定の環境とした。また、促進環境の炭酸ガス濃度については夏季・冬季、屋内外ともに全て5±0.2%とした。さらに比較のために、通常の促進中性化試験(JIS A 1153)では、(炭酸ガス濃度5±0.2%、温度20±2°C、湿度60±5%R.H.)での促進試験が行われるが、本研究ではこれと同等となるよう、モルタル単体の試験体を屋内側を想定したチャンバー空間内に暴露した。

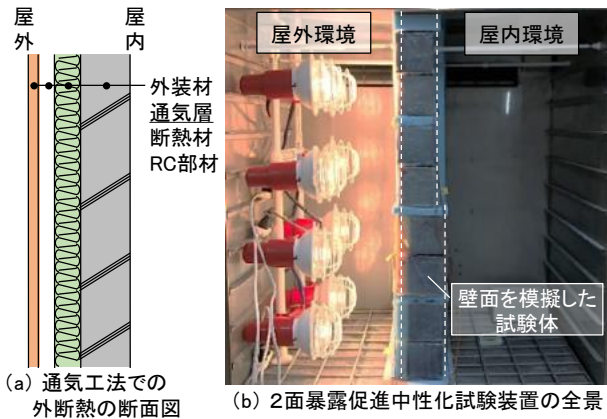


図-2 試験装置の概要

(2) 試験項目

暴露期間は最大 12 週間とし、4 週間ごとに中性化深さを測定した。中性化深さは、試験体を長さ方向と直角に端部から約 60 mm の位置で割裂し、割裂面に付着するモルタル粉をはけで除去した後、割裂面にフェノールフタレイン溶液（濃度 1%）を液が滴らない程度に噴霧した。一定期間静置し、暴露面の長さ方向を 10 等分した位置の発色していない深さをノギスで 0.1 mm の精度で測定し、試験体 2 体の平均値を中性化深さとした。

試験体の温度は熱電対をモルタルの暴露面となる表面と裏面の 2 面に張り付け、モルタル中央部には打設時にあらかじめ熱電対が埋設されており、暴露期間中継続的にそれぞれの位置の温度を測定した。また、暴露開始前と暴露後 4 週間隔でモルタルを屋外面から 30, 70 mm の位置で 3 分割し、分割後それぞれ重量を測定し、その後、105°C 乾燥後の絶乾重量と水中浸漬後の飽水重量より、体積含水率を測定した。

2.4 試験体断面方向の温度と含水率分布の予測計算

コンクリート部材の中性化速度は、温度と含水率に依存する事は知られている。そこで、本研究で行った 2 面暴露での試験方法が中性化速度に与える影響について詳細に検討するために、コンクリート中の温度と含水率の分布について数値シミュレーション予測を行った。

コンクリート中の熱と水分の同時移動予測についてはこれまでも多くの計算モデルが提案されている^{6,7)}。本研究ではそれらを参考に予測モデルを構築した。計算範囲は、本実験の試験体の断面を再現するように、幅 10 cm、深さ 10 cm の 2 次元断面とした。コンクリートや断熱材の要素は 1×1 cm 角でメッシュ切りし、実験と同様の温度履歴を暴露面に作用させた。なお暴露面以外では温度と水分の移動はしないものとした。

熱と水分の移動は、両者ともに Fick 拡散第 1 法則に従って拡散するとした。ここで、コンクリート中の水分の拡散については、液状水と水蒸気とで異なり、個別に計算されることもあるが本研究では簡便化のために同時に

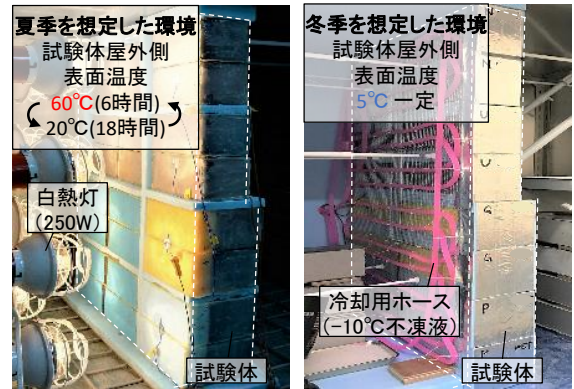


図-3 促進試験の屋外環境条件

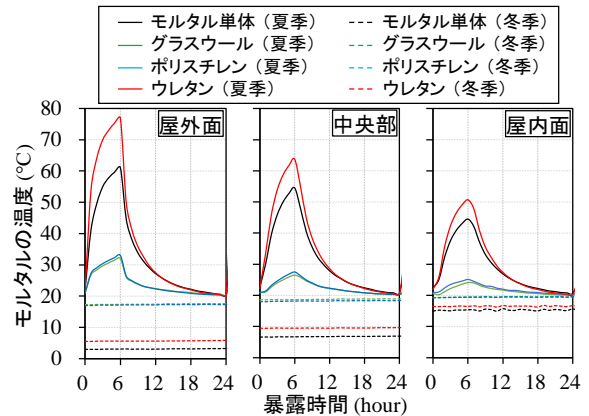
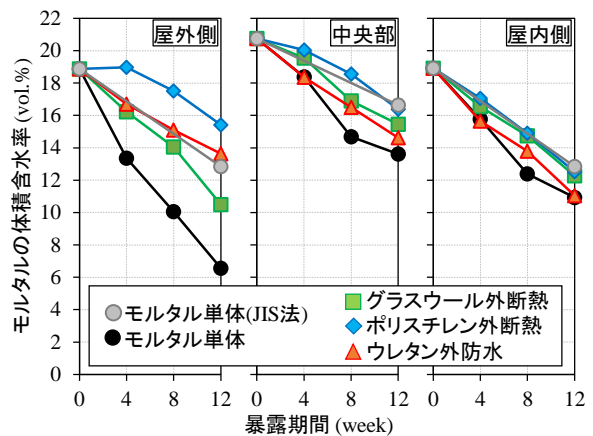
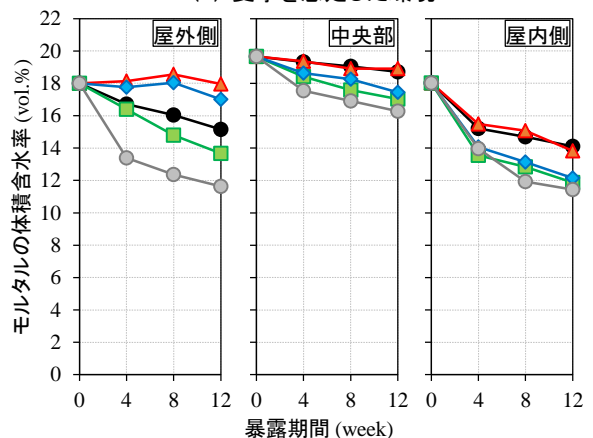


図-4 試験体の屋外面・中央部・屋内面の温度履歴例



(a) 夏季を想定した環境



(b) 冬季を想定した環境

図-5 試験体の屋外面・中央部・屋内面の含水率変化

取り扱うこととし、拡散速度は自身の含水率に依存する式(1)で求めた⁶⁾。

$$D/D_{100\%} = 1 / \left\{ 22 \left(1 - \frac{R}{100} \right) + 1 \right\}^{1.4} \quad (1)$$

ここで、 $D_{100\%}$ ：相対含水率 100%の時の水分拡散係数 (cm^2/sec)、 R ：相対含水率 (%)

さらに、水分の移動速度に与える温度の影響については式(2)で表せるとされている⁷⁾。

$$D = D_{20^\circ\text{C}} \cdot e^{\alpha \left(\frac{T-T_0}{T_0} \right)} \quad (2)$$

ここで、 $D_{20^\circ\text{C}}$ ：基準温度での拡散係数、 T ：コンクリート温度、 T_0 ：基準温度(20°C)、 α ：定数

同様に、熱の移動に影響する、コンクリート自体の温度や含水率の影響も考えられるが、水分の移動速度と比べ影響が小さいため今回は考慮していない。上記のような仮定の下、実験で測定したコンクリート単体の試験体の温度・含水率の変化の測定結果から逆解析的にコンクリートの熱と水分の拡散速度を求めた。

3. 2面暴露促進中性化試験の結果

3.1 試験体の温度と含水率分布

暴露試験中のモルタルの屋外面、中央部、屋内面の温度履歴例を図-4に示す。夏季を想定した環境下では、ランプ照射6時間で試験体の表面は最大温度を迎え、モルタル単体の試験体は、照射を行った屋外面では設定した通り 60°C まで上昇し、屋内面は約 45°C まで温度上昇した。屋外側に断熱材を施工した試験体は、両断熱材種ともにモルタルの屋外面は約 30°C 、屋内面は約 25°C となり、屋外面で 30°C 、屋内面で 20°C 程度温度の上昇を抑制した。また、冬季を想定した環境下では屋内外面は試験中一定のため、試験体内の温度分布は定常状態を保っていた。モルタル単体とウレタンゴム系塗膜防水材料を施工した試験体は、屋外面は約 5°C となり、屋内面は約 16°C となった。一方、屋外側に断熱材を施工した試験体は、両断熱材種ともにモルタルの屋外面は約 17°C 、屋内面は約 20°C となり、屋外面で 12°C 程度、屋内面で 3°C 程度温度の低下を抑制した。

暴露期間4, 8, 12週のモルタルの含水率を図-5に示す。夏季を想定した環境下では、屋外側はモルタル単体の試験体の含水率の低下が最も著しく、次いで透湿度の高いグラスウール断熱材となり、透湿度の低いポリスチレン断熱材を施工した試験体は含水率の低下が最小であった。屋内側は上昇温度に比例しており、温度の低かった各種断熱材を施工した試験体の含水率の低下が少なくなった。

冬季を想定した環境下では、屋外側に比べ温度低下が小さい屋内側で含水率の減少量が大きく、特にグラスウ

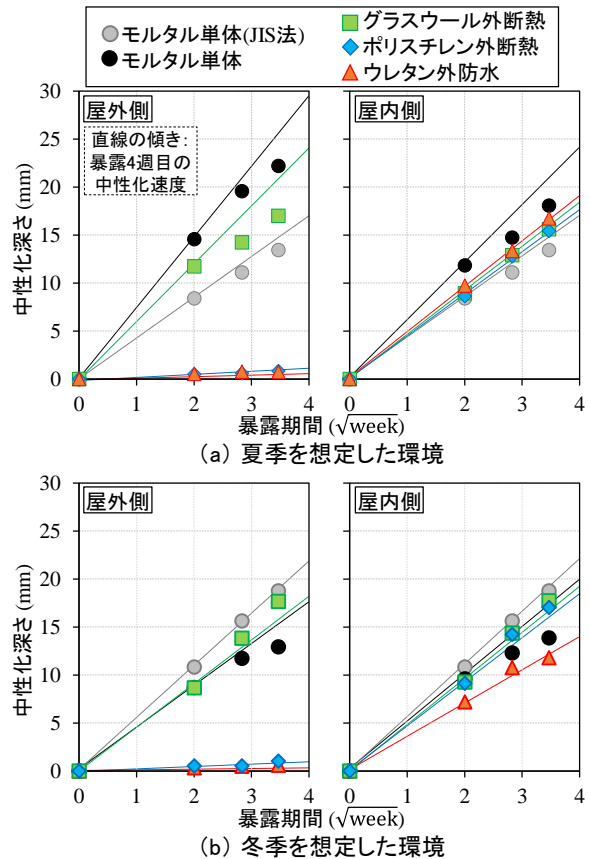


図-6 中性化深さの測定結果

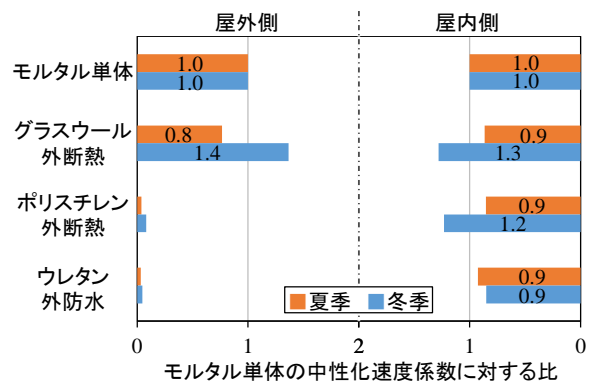


図-7 中性化速度係数の比率

ール断熱材とポリスチレン断熱材を施工した試験体は断熱効果により試験体全体が比較的高温で保持されたため含水率の大きくなった。

3.2 屋外側・屋内側の中性化深さ

暴露期間4, 8, 12週における2面暴露促進中性化試験結果として、夏季を想定した環境に暴露した試験体の中性化深さの測定結果を図-6(a)に、冬季モデル環境に暴露した試験体の中性化深さの測定結果を図-6(b)に、それぞれ屋外側と屋内側に分けて示す。また、図-6中の直線の傾きは暴露期間28日における、各試験体の中性化速度を示す。さらに、暴露12週における中性化速度係数について、モルタル単体の試験体の夏季・冬季それぞれの値を1.0として、その他の試験体の中性化速度係数の比率をまとめて図-7に示す。

(a) 夏季を想定した環境における中性化

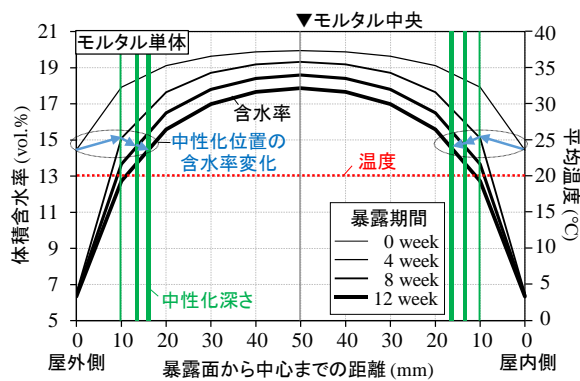
夏季を想定した環境にて、2面暴露促進中性化試験を行った試験体は、JIS法を想定した20°C、60%RHの環境下に暴露した試験体に比べ、屋内・外面ともに中性化速度が大きくなった。これは照射した試験体の方が高温でかつ低含水率となったため、従来から言われている通り、炭酸ガスのコンクリート内部での拡散と中性化反応が加速させられたためだと考えられる⁸⁾。

モルタル単体の試験体の場合、暴露期間12週において、屋外側の方が屋内側に比べて20%程度中性化が進行している。グラスウール断熱材を施工した試験体の屋外側はモルタル単体の物よりも20%程度中性化の進行が抑制された。また、ポリスチレン断熱材を施工した試験体は、屋外側で0.8mm、ウレタンゴム系塗膜防水材料を施工した試験体でも屋外側で0.7mmと大幅に中性化が抑制された。これは仕上材料の高いガス遮断性能により外部からの炭酸ガスの侵入が抑制されたためと考えられる。

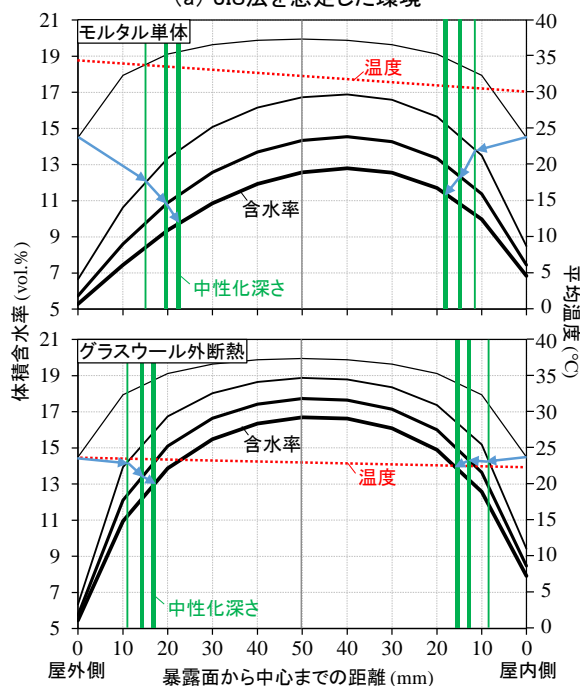
屋内面については、全ての試験体で何も施工されていないにもかかわらず、屋外面に断熱材が施工した試験体の方が、モルタル単体の試験体と比べて中性化が抑制された。これは、断熱材の影響でモルタル中が低温で推移していたことと、比較的高含水に保たれていたことが原因であると思われる。ただし、ウレタンゴム系塗膜防水材料が施工された試験体の屋内面は高温履歴を受けるにも関わらず、モルタル単体の試験体より中性化が抑制された。これは、ランプ照射で高温になったモルタル内部で生じた水蒸気圧が、ガス遮断性の高い防水材料が施工された屋外面からは放出されにくく、何も施工されていない屋内面から優先的に放出されたため、炭酸ガスの侵入が阻害されたのではないかと推察される。

(b) 冬季を想定した環境における中性化

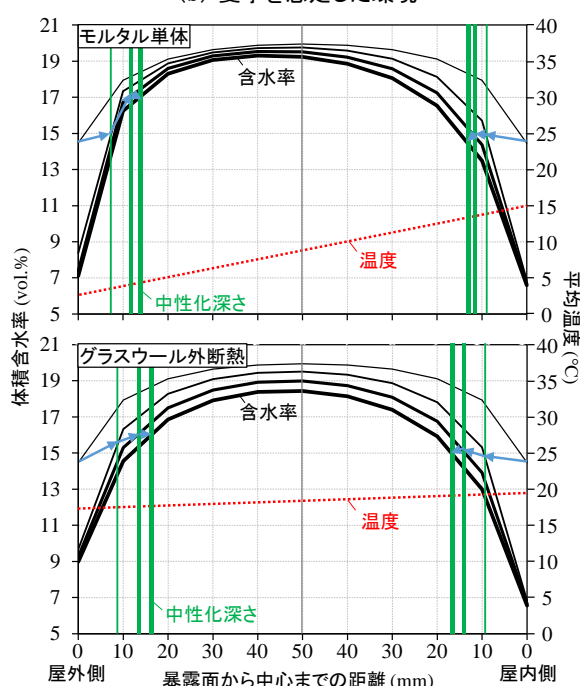
冬季を想定した環境にて、2面暴露促進中性化試験を行った試験体は、JIS法を想定した20°C、60%RHの暴露試験環境に暴露した試験体に比べ、屋内外面共に中性化の進行が抑制された。暴露期間12週における試験体の屋外側の中性化深さについては、グラスウール断熱材を施工した試験体をもっとも大きく、次いでモルタル単体の試験体となった。これは、冬季を想定した暴露環境において、モルタル単体の試験体はグラスウール断熱材を施工した試験体に比べ、低温でかつ比較的高含水となり、炭酸ガスのコンクリート内部での拡散と中性化反応が抑制されたためだと考えられる。また、ポリスチレン断熱材を施工した試験体は、屋外側で1.0mm、ウレタンゴム系塗膜防水材料を施工した試験体は、屋外側で0.6mmと冬季を想定した暴露環境においても夏季を想定した暴露環境と同様に、材料の高いガス遮断効果が外部からの炭酸ガスの侵入抑制に有効に作用したと考えられる。



(a) JIS法を想定した環境



(b) 夏季を想定した環境



(c) 冬季を想定した環境

図-8 モルタル断面方向の温度・含水率分布と中性化深さ

一方で、屋内側については、グラスウール断熱材を施工した試験体、ポリスチレン断熱材を施工した試験体ともに、モルタル単体の試験体に比べて中性化の進行を23～28%程度早めてしまう結果となった。これは、断熱材が施工された事によりモルタルの屋内側の温度は19.5℃程度と、断熱材が無い15℃と比較して高温で保持されていたことに加え、モルタル単体に比べ含水率の減少量が大きかったことが原因であると思われる。本結果では、外断熱を施工することで冬季の屋内側での中性化の進行を早める結果となった。日本国内だけでも、地域により年間を通しての温度と湿度は大きく異なる。今後、外断熱が施工されたコンクリートの中性化速度は年間を通して抑制傾向にあるか正しく判断する必要がある。

なお、比較用として JIS 法を想定した環境に暴露していたモルタル単体の試験体において、夏季と冬季環境下で中性化深さに違いが生じていた。両試験環境ともに、20℃と 60%RH の環境を保持していたが、冬季を想定した環境に暴露した試験体の方が含水率の低下速度が速かった。本来、促進中性化装置は一定環境での試験を行う装置であり、今回の様な2面の温度環境を同時に再現するために設計されたものではない。そのため、屋外側の負荷としてかけていた熱の影響でチャンバー内の風量に影響を及ぼしてしまったのではないかと考えており、試験装置の設計も含めて今後の検討課題としたい。

3.3 試験体の温度・含水率分布と中性化速度の関係

中性化の進行は、JIS 法では暴露期間の平方根にほぼ比例しているが、2面暴露試験結果では特に夏季を想定した環境で徐々に遅くなる傾向を示す試験体もあった。前述の通り、中性化速度はモルタルの品質や仕上の種類の他に、曝された温度環境や含水率に依存するとされている。そこで、屋外側と屋内側の中性化深さと、試験体断面方向の温度と含水率の値をまとめて図-8に示す。

JIS 法を想定した環境下では、試験体中の温度は20℃一定で、中性化が進行した位置の含水率も15 vol.%程度を推移している。夏季を想定した環境下のモルタル単体とグラスウール外断熱試験体の屋外側について見ると、表面より内部方向に向かって温度は低下し、暴露12週での中性化反応位置の体積含水率は10～13 vol.%程度であった。暴露期間の経過にともない空隙中の自由水の割合が非常に少ない乾燥状態となり、中性化速度が徐々に低下したと推察される。

冬季を想定した環境下のモルタル単体の屋外面については逆に、暴露12週での中性化が進行した位置が5℃程度で推移し、含水率は17 vol.%程度と比較的高含水状態となったため、モルタル細孔中の水分が中性化反応に必要な炭酸ガスの拡散を阻害し中性化速度が徐々に低下したのではないかと推察される。

4. 結論

建築物の RC 壁面を想定し、屋内外から異なる強度で作用する温度を同時に再現する2面暴露促進中性化試験を行った結果を以下に示す。

- 1) 夏季の屋外面温度上昇の影響を考慮した場合、JIS 法を想定した20℃、60%一定環境に暴露された結果と比べ、屋内・外面ともに中性化速度は速くなった。一方、冬季の屋外面温度低下の影響を考慮した場合、屋内・外面ともに中性化速度は低下した。
- 2) 気体の遮断性能が高い断熱材や防水材をモルタル表面に施工することで、施工面の中性化は抑制された。さらに、外断熱試験体はモルタル単体と比べて、夏季の温度上昇が抑制され、含水率も比較的高い値で保持されるため、屋内側の中性化速度も抑制された。しかし冬季では、試験体全体が高温で保持されるため、モルタル単体に比べて屋内外ともに含水率の低下速度が速く中性化速度も大きくなった。

参考文献

- 1) 酒井正樹, 神代泰道, 小林利充: 中性化後における鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食速度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.603-608, 2018
- 2) 日本建築学会材料施工委員会: 鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考—中性化は寿命か?—, 2017年度日本建築学会大会(中国)材料施工部門パネルディスカッション(1)資料, pp.1-33, 2017.9
- 3) 申雪寒, 長谷川寿夫: 外断熱建物躯体コンクリートの中性化に関する研究, 日本建築学会技術報告集, Vol.10, No.20, pp.59-62, 2004.12
- 4) 船坂健介, 塚越雅幸, 上田隆雄, 中山一秀: 外断熱コンクリート屋内・外面の中性化速度に及ぼす夏季の外気温の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.573-578, 2018
- 5) 左右田考男, 山崎寛司: コンクリートの中性化と鉄筋のさびについて(20年試験結果の報告), 材料試験, Vol.7, No.63, pp.680-690, 1958
- 6) 秋田宏, 藤原忠司, 小西俊之, 尾坂芳夫: コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.161-166, 1990
- 7) 長尾覚博, 中根淳: 高温加熱されたコンクリートの熱伝導率, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.395-400, 1990
- 8) 大岸佐吉, 楊静: 促進法によるコンクリートの長期中性化推定の試み, セメント・コンクリート, No.533, pp.41-48, 1991.7