論文　外断熱コンクリートの屋内･外面の中性化速度に及ぼす夏季の外気温の影響

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部材の屋内・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外断熱の検討を行なった。試験は屋内・外面共に CO_2 濃度 5%の促進中性化試験環境とし，試験体の屋外を想定した面には夏季の日射を模擬し，ランプでコンクリート表面が 60℃となるように 6 時間照射し，その後 20℃自然冷却を繰り返し与え，屋内面は 20℃一定環境とした。3 か月の暴露試験の結果，外断熱を施した試験体については，屋外側のみならず屋内側の中性化深さも低減された。ただし，コンクリート中の含水率は高めに保持される可能性もあり，長期耐久性の観点から鉄筋腐食の影響も含めた検討が今後必要である。

キーワード：中性化速度，外断熱，屋内，屋外，温度，含水率

1. はじめに

RC 建築物の限界状態（≒寿命）については，これまで中性化による鉄筋腐食を指標としてきた。ところが，中性化と鉄筋腐食の進行が促進される環境は異なることが指摘されており，建築物の限界状態をどう考えるか再考する時期に来たのではないかと議論が活発化[1)]している。

実際の建築物の劣化を見ると，塩害や中性化が進行したコンクリート中の鉄筋腐食の問題は屋外側で多く報告されている。これは，屋内側は空調により温湿度がコントロールされているのに対して，屋外側は直接外部の温湿度環境や雨水の影響を受けているため，壁面の屋内外で劣化の状況が異なるためであると言われている[2)]。しかし，これまでのコンクリートの中性化や，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，RC 部材の片面を暴露面とした促進劣化試験が採用されてきた[3)]。また，屋外暴露試験が行われる事もあるが，試験体全体が屋外に曝されるために屋内外から作用される温湿度の違いまでは考慮できていない。このような手法では，部材の性能を相対的に比較評価するためには有効ではあるが，実際の劣化を正確に評価できていないケースも考えられる。また，屋内外で異なる仕上材が施工されることも少なくなく，建築部材の断面方向での温度と含水率分布は一様とは考えられない。特に，2020 年に施行される建築物の省エネ基準に対応するために断熱工法の採用が増える事が予想される。

様々な材料と工法が適用される建築物では，促進劣化試験による材料・工法の性能評価法が社会的にも求められている。一方で，建築物の所有者が信頼できるデータを示すことも必要である。そこで本研究では，より実使用状態に近い屋内外を想定した 2 面暴露の促進中性化試験を提案し，内外壁面での中性化の進行の挙動について，外断熱の影響から検討を行なった。

2. 試験体の作製と提案する 2 面暴露促進中性化試験法の概要

2.1 使用材料

(1) 下地モルタルの概要

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[4)]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くするために，100×100×400 mm 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，この調合を**表－1** に示す。試験体は打設翌日に型枠から取り外し，1 ヶ月水中養生した後，20℃の実験屋内で表面含水率が，8%以下になるまで 1 ヶ月乾燥させた。

表－1　下地モルタルの調合

W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m³)			28日 圧縮強度 (N/mm²)
		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 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) 外断熱材および防水材の概要

断熱材は，通常の建築用断熱材として使用されている市販のグラスウールボードと押出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 40 mm 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。

2.2 試験体の作製

(1) 透湿試験用試験体

透湿試験用試験体の形状と寸法を**図－1** に示す。直径 φ90 mm，厚さ 15 mm のガラス製シャーレ内に吸湿材としてシリカゲル 30 g を入れ，解放部に断熱材と防水材をそれぞれ設置した。断熱材は側面を，防水材はシャーレと接する部分をエポキシ樹脂でシールし，鉛直 1 次元方向のみに水蒸気の移動が生じるようにした。

(2) 促進中性化試験用試験体

試験体の形状と寸法を**図－2** 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)のうち屋外面を模擬した 1 面に，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，同時に断熱材を**写真－1** に示す様に固定した。

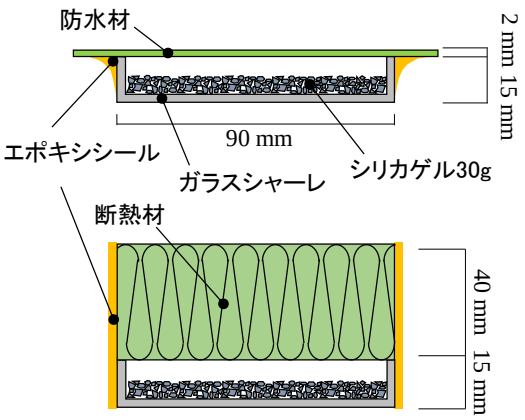
防水材も同様に屋外面に塗布した。塗膜厚さは硬化時の厚さで 2.0 mm となるように，塗布時の重量で管理した。施工は 20℃，60%R.H.の環境下で行い，同環境下にて 1 週間養生した。通常の防水工事ではコンクリート表面にプライマーが塗布されるが，プライマーのガスの遮断性能の影響を除外するために，今回の試験体では使用しなかった。ただし試験期間中防水材の剥離等の不具合は生じていない。比較のため屋外面に何も施工してない試験体も作製した。なお屋内側を想定した面には全ての試験体で何も施工していない。

2.3 透湿試験の概要

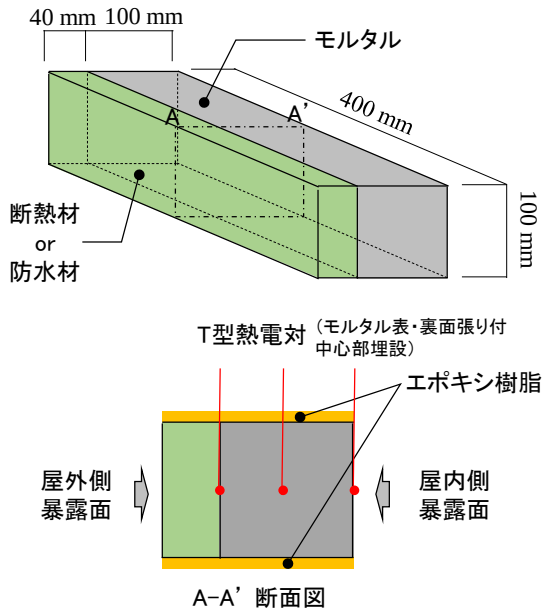
試験体を 20℃，95%R.H.の高湿環境に静置し，試験体全体の質量増加量を定期的に測定し透湿度を求めた。なお，断熱材･防水材それぞれの吸着量を別途求めており，この値を差し引いて透湿度を計算した。

2.4 2 面暴露促進中性化試験の概要

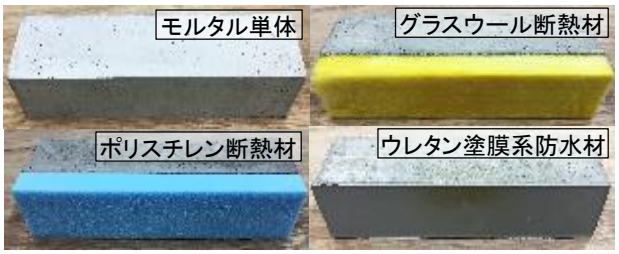
外断熱の通気工法の概念図を**図－3(a)** に示す。このような壁面を作製した試験体で模擬するため，各試験体を**図－3(b)** に示すように積み重ね壁状に配置した。ここでは，外断熱を想定しているため，試験体の断熱材面が屋外側の環境となるように設置している。なお，試験体側面はエポキシ樹脂でシールされているが，さらにその外側に断熱材を取り付けることで，熱と水蒸気の移動は内外壁面を想定した 1 次元方向のみに限定した。



図－1　透湿試験用試験体の形状と寸法

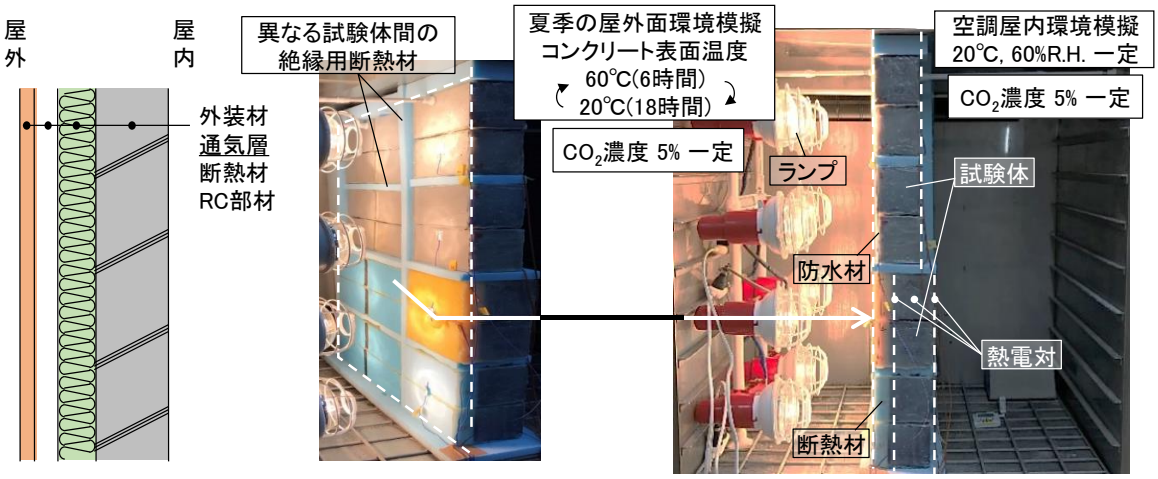


図－2　中性化試験用試験体の形状と寸法



写真－1　試験体の外観

試験体の暴露環境を**図－3(c)** に示す。まず温湿度環境については，屋外側を模擬した面に夏季の高温環境を再現するために，白熱灯（250W）でコンクリートの表面温度が最大で 60℃となるよう，試験体照射面より鉛直距離 200 mm 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℃，60%R.H.環境で自然冷却を 1 サイクルとした。また屋内面側については 20℃，60%R.H.一定の環境とした。また両面とも



(a) 通気工法での外断熱の断面図　(b) 試験体を積み重ねて壁面を構成　(c) 暴露試験装置の全景

図－3　試験体の暴露試験状況と暴露環境条件

に炭酸ガス濃度については 5±0.2%とした。比較のために，通常の促進中性化試験(JIS A 1153)と同様の環境下（炭酸ガス濃度 5±0.2%，温度 20±2℃，湿度 60±5%R.H.）での暴露試験もモルタル単体の試験体で行った。

暴露期間は最大 86 日とし，28 日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，そ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 面に貼り付けてあり，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。

試験体の含水率は，暴露開始前と暴露後 28 日間隔で測定した。測定箇所は，屋外面・中央部・屋内面の 3 か所となるように，モルタルを屋外面から 30，70 mm の位置で 3 分割した。分割後それぞれ重量を測定し，その後，105℃乾燥後の絶乾重量と水中浸漬後の飽水重量より，単位体積あたりの含水体積を体積含水率として求めた。

3. 試験結果

3.1 透湿試験結果

断熱材と防水材の透湿試験結果をその他の基礎物性とまとめて**表－2** に示す。両断熱材の熱伝導率はほぼ同程度であったが，グラスウール断熱材の透湿度は高く，ポリスチレン断熱材の 30 倍程度であった。また，ウレタンゴム系塗膜防水材は，ポリスチレン断熱材と同程度の透湿度であった。

表－2　断熱材と防水材の基礎物性

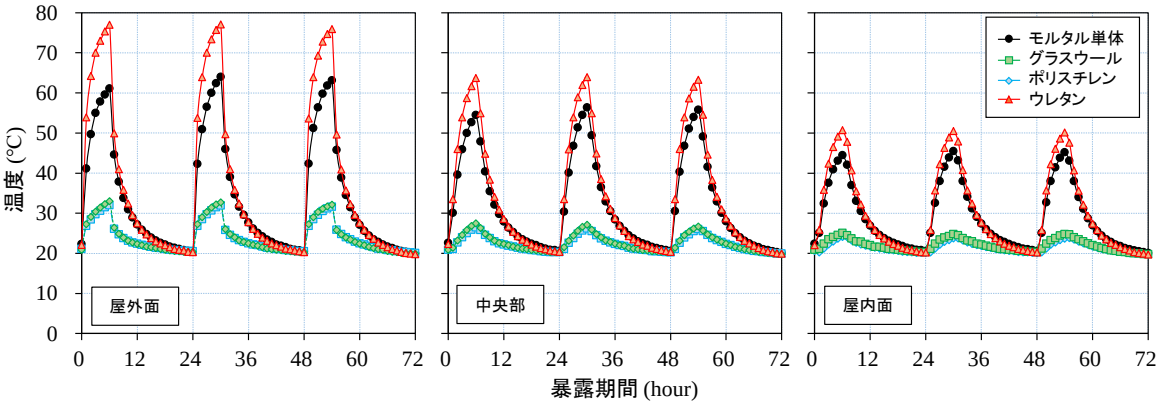
断熱材	熱伝導率 (W/m･K)	密度 (kg/m³)	透湿度 (g/m²･24h)
グラスウール 40 mm厚	0.036	32	118.38
ポリスチレン 40 mm厚	0.023	28	3.29
防水材	**伸び率 (%)**	**密度 (kg/m³)**	**透湿度 (g/m²･24h)**
ウレタン 2 mm厚	467	1300	13.98

3.2 モルタルの温度と含水率分布

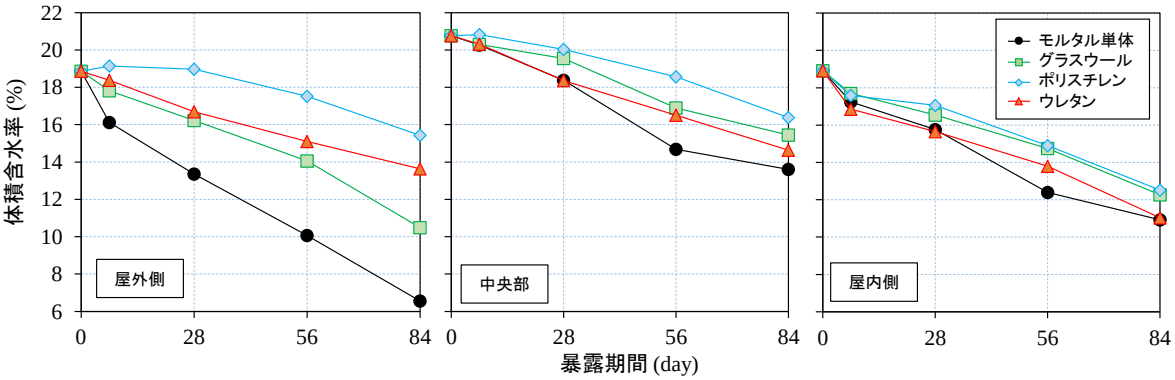
暴露試験中のモルタルの屋外面，内部，屋内面の温度履歴を**図－4** に示す。最大温度となる，ランプ照射 6 時間後の試験体の温度について，モルタル単体の試験体は，照射を行った屋外面は設定した通り 60℃まで上昇し，屋内面は約 45℃まで温度上昇した。屋外側に断熱材を施工した試験体は，両材種ともにモルタルの屋外面は約 30℃，屋内面は約 25℃となり，屋外面で 30℃，屋内面で 20℃程度温度の上昇を抑制した。一方，ウレタンゴム系塗膜防水材を施工した試験体は，モルタルの表面の温度が最大 75℃以上まで上昇しており，全ての試験体の中で最も高温となった。

暴露期間 28，56，84 日のモルタルの含水率分布を**図－5** に示す。なお，暴露開始前の初期含水率は，暴露側 2 面で 19%，中央部で 21%であり，暴露期間中も全ての試験体で中央部の含水率は両暴露面と比べ高い値を保持し，ランプ照射した屋外側の含水率の減少量が大きかった。

屋外面をみると，モルタル単体の試験体の含水率の低下がもっとも著しく，次いで透湿度の高いグラスウール，ウレタンゴム系塗膜防水材を施工した試験体となり，最



図－4　モルタルの屋外面・中央・屋内面の温度履歴例



図－5　モルタルの屋外面・中央・屋内面の含水率変化

も含水率の低下が少なかったのは，ポリスチレン断熱材を施工した試験体となった。ウレタンゴム系塗膜防水材の透湿度は低いが，ランプ照射時の上昇温度が高くモルタルからの水分の蒸発量が大きくなったものと思われる。

屋内側をみると，上昇温度が低かった断熱材を施工した 2 つの試験体の含水率の低下が少なくなった。

3.4 屋外面・屋内面の中性化深さ

暴露期間 28，56，84 日における促進中性化試験結果として，フェノールフタレイン溶液を噴霧した後のモルタル割裂面の状況を**表－3** に示す。中性化の進行は一般的に，暴露期間の平方根に比例するとされ，式(1)のような関係にある。そこで，中性化深さの測定結果を屋外側と屋内側とでまとめて**図－6** に示す。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。

$$C = \alpha\sqrt{t} \qquad \text{式(1)}$$

ここで，C ：中性化深さ (mm)

α ：中性化速度係数

t ：暴露期間 (day)

さらに中性化速度は，コンクリートの品質や，屋外の炭酸ガス濃度，温度，湿度に依存する。そこで**図－6** 中の暴露期間 0 日から 28，56，84 日における中性化深さの傾きを各時点での中性化速度係数と定義しこの値と，両暴露面と中央部の平均温度と含水率分布の経時変化をまとめて**図－7** に示す。

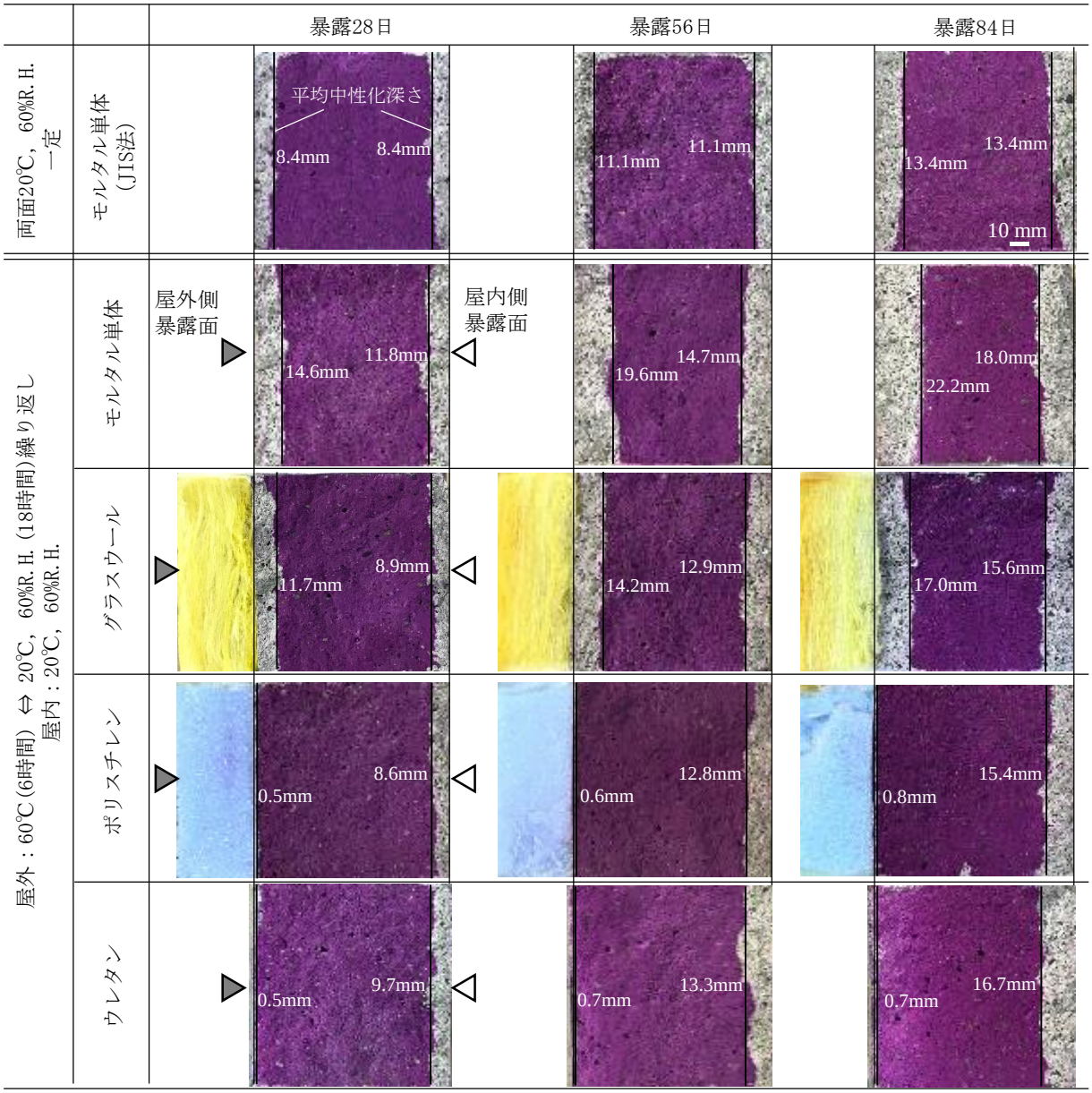
JIS に従った通常の暴露試験境下に暴露した試験体では，屋内外の環境条件の区別はないため，2 面の中性化はほぼ同等で平均すると 13.4 mm 進行している。一方，今回提案する内外壁面で異なる温度環境を与えた試験体の場合，促進期間 84 日で，モルタル単体の試験体の屋外側で 22.2 mm，屋内側で 18.0 mm 中性化が進行し，屋外側の方が屋内側に比べて 1.2 倍程度中性化が進行している。また，JIS 環境の試験体と比べると屋内・外面ともに中性化の進行深さは大きくなった。JIS に従った通常の暴露試験体と比べ，ランプ照射の影響を受けたモルタル単体の方が屋内・外面ともに中性化速度係数は高い。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 [5)]。

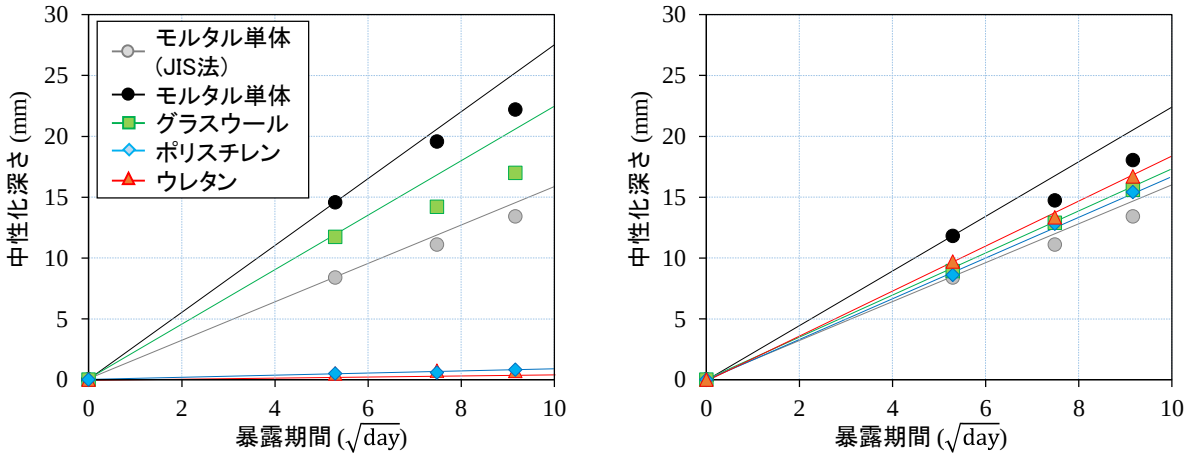
グラスウール断熱材を施工した試験体の屋外面の中性化深さは 17.0mm と，モルタル単体の物よりも 20%程度中性化の進行が抑制された。また，ポリスチレン断熱材を施工した試験体は，屋外側で 0.8 mm，ウレタンゴム系塗膜防水材を構成した試験体でも屋外側で 0.7 mm と大幅に中性化が抑制された。これは温度・湿度の影響から考えると，低温かつ高湿度であったことに加え，特にポリスチレン断熱材およびウレタンゴム系塗膜防水材の高いガス遮断効果が外部からの炭酸ガスの侵入を抑制に有効に作用したためである。

屋内側については，断熱材を施工した試験体はどちらもおよそ中性化深さは 15.6 mm となり，モルタル単体のものよりも中性化の進行が抑制されている。またウレタンゴム系塗膜防水材を施工した試験体でも 16.7 mm と若干ではあるが抑制されていた。屋内面に関しては，全ての試験体で何も施工されていないのにもかかわらず，屋外面に断熱材が施工された試験体の方が，モルタル単体の試験体と比べて中性化速度が小さくなった。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，比較的高含水率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速度が抑制された。これは，防水材が施工されたコンクリート部材が太陽光を受けて高温になった場合，コンクリート内に発生する水蒸気圧は 10kPa 程度まで達すると報告されている[6]。本実験で行ったランプ照射実験でも同様にモルタル内部で生じた水蒸気圧が，屋外面はガス遮断性の高い防水材でシールされているため，何も施工されていない屋内側の面から放出されたことにより，屋内側からの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。

また，暴露期間ごとの中性化速度係数をみると，JIS に従った通常の暴露試験体は，ほぼ暴露期間の平方根に比例するのに対し，２面暴露のモルタル単体の試験体は徐々に低下する傾向を示している。また，その他の断熱材や防水材を施工した試験体の中性化速度は暴露期間によらずほぼ一定であった。モルタル単体の試験体は，ランプ照射により，中性化反応位置の含水率が急激に減少し，中性化反応に必要なモルタル空隙中の自由水が不足したため，中性化速度が徐々に低下したと推察される。

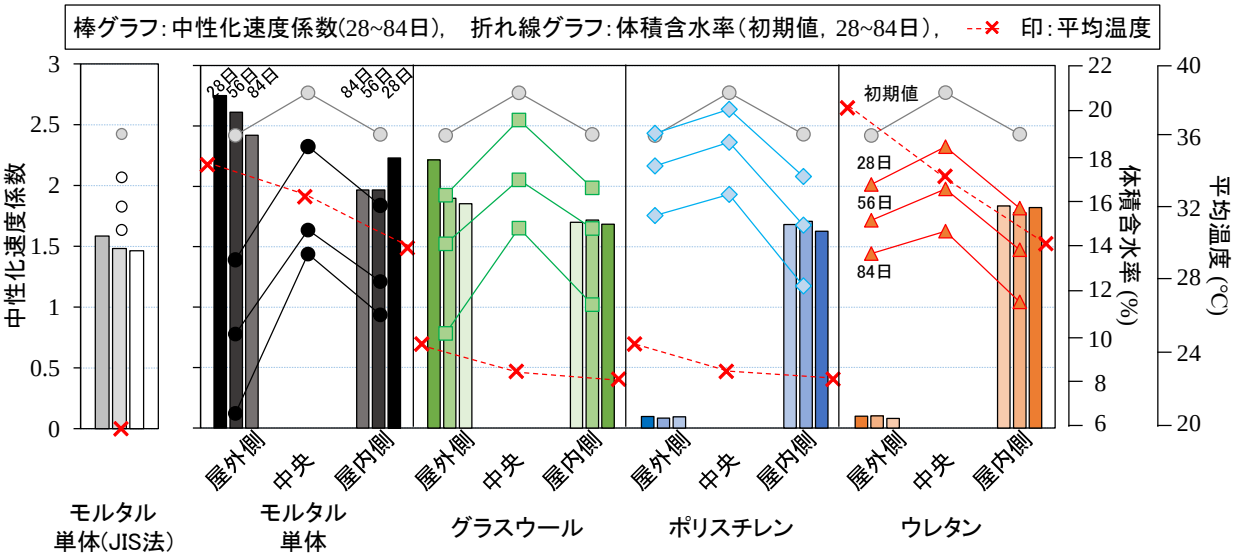
表－3 促進中性化試験結果例





(a) 屋外側の中性化深さ　　(b) 屋内側の中性化深さ

図－6　中性化深さ測定結果



図－7　中性化速度係数と温度・含水率

4. 結論

建築物壁面を想定し，屋外面には夏季の外気温を模擬した高温履歴を，屋内面は 20℃一定と異なる温度環境を作用させた状況下で 2 面暴露促進中性化試験を行った結果を以下に示す。

1) 夏季の外気温の影響を考慮した場合，JIS 法に比べて屋内・外面ともに中性化速度は大きくなった。
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，これらが施工された面の中性化の進行は抑制された。
3) 外断熱を施工することで，モルタル試験体内部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，中性化の進行も抑制された。

参考文献

1) 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.1-32，2017.9
2) 伊代田岳史，本名英理香：コンクリート構造物の炭酸化進行における雨掛り等の環境条件の影響とその進行メカニズムの検討，コンクリート工学論文集，Vol.28，pp.113-122，2017
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，No.20，pp.59-62，2004.12
4) 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
5) 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
6) 古澤洋祐，橋田浩，塚越雅幸，渡辺光，田中享二：塗膜防水通気緩衝工法のふくれ圧力低減効果の評価方法の開発，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.666，pp.1401-1406，2011.8