

論文 絶縁仕様で施工されたウレタン系塗膜防水層下にあるコンクリートの中性化

塚越 雅幸*1・湊 聖徳*2・上田 隆雄*3・古澤 洋祐*4

要旨: 絶縁仕様で施工されたウレタン系塗膜防水層下の脱気筒近傍のコンクリートの中性化状況について検討を行った。試験には 100×100×400 mm の角柱モルタルを用い、これに透気性の異なる 3 種類の通気緩衝シートを張り付け、それぞれウレタン系防水材を 2.0 mm 厚さで施工した。5%の炭酸ガス濃度の環境下に 8 週暴露した結果、最大で奥行き方向に 70 mm、深さ方向で 15.5 mm 中性化した。また、通気緩衝シートの透気性能を考慮した中性化予測シミュレーション結果と比較すると、実験結果は端部の中性化の進行が大きいことから、内部の含水状態の不均一性が中性化の進行に影響しているものと思われる、今後検討が必要である。

キーワード: 防水層, 絶縁仕様, 炭酸ガス, コンクリート, 中性化

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を評価する上で、コンクリートの中性化は重要な検討項目の1つである。コンクリートは供用期間中、大気中に存在する炭酸ガスと反応し中性化反応が進行する。中性化によりコンクリートの pH が一定値以下まで低下した場合、鉄筋は不動態被膜を失い腐食を開始する¹⁾。

そこで、コンクリートの中性化の進行を抑制するために、コンクリート表面に防水層等の仕上げ材料を施すことが有効であるとされている。防水層により大気とコンクリートが接触することを防ぎ、炭酸ガス等の劣化因子の浸透を抑制するからである。そのため、外部からの劣化因子の浸透が原因であるコンクリートの中性化や塩害等の劣化に対する抑制効果に関して、これまで多くの研究^{2,3)}や、実構造物への適用事例が報告されている。

一方で、防水層を下地コンクリートに直接、塗布する密着仕様を採用した際に問題となるのが、防水層のふくれである。ふくれはコンクリート中の水分が熱の作用を受け、防水層と下地コンクリート間で、水蒸気圧を生じることにより発生する。ふくれの発生は、美観性を損なうだけでなく、防水層の剥離・破断、耐久性の低下等を招くこともある。

このような不具合を未然に防ぐために、防水層を直接下地コンクリートに施工する密着仕様に対して、**図-1**に示すような絶縁仕様が施工される。絶縁仕様は防水層と下地コンクリート間に通気緩衝シートと呼ばれる、ある程度の気体の移動を許容するシート材料を**図-2**に示すように挿入し、通気緩衝シートを介して下地から発生した水蒸気圧等を、脱気筒などから排気する仕組みである。

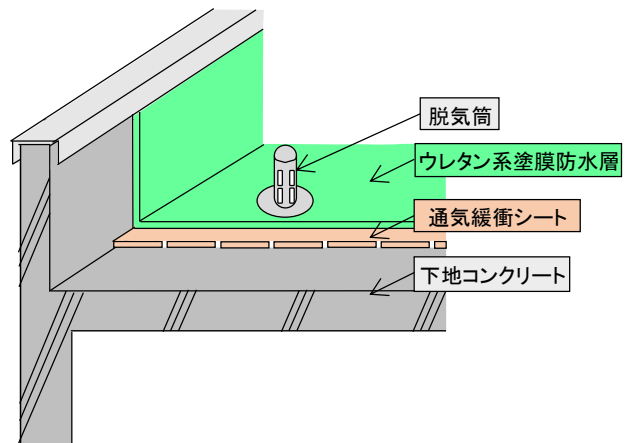


図-1 ウレタン系塗膜防水層が絶縁仕様で施工された屋根スラブの概要

絶縁仕様を採用することで、下地から発生する水蒸気圧を逃がし、防水層のふくれの発生を低減させることに成功している⁴⁾。

ただし、絶縁仕様により施工された防水層は前述した通り、コンクリート中の水蒸気圧等を、脱気筒などから排気する仕組みであるため、局所的ではあるが下地と外気との接触箇所が生じる。脱気筒には大気の逆流弁などが設置される場合もあるが、外部からの炭酸ガス等の気体状の劣化因子の進入が懸念される。進入した炭酸ガスは、通気緩衝シート内を拡散し、通気緩衝シート下のコンクリートまで到達する危険性が考えられる。そこで本研究では、絶縁仕様でかつ、脱気筒を模して一部開放箇所を持って施工されたウレタン系塗膜防水層下にあるコンクリートの中性化の進行について検討を行った。

*1 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 助教 博士(工学) (正会員)

*2 徳島大学 工学部建設工学科 学部4年 (非会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 教授 博士(工学) (正会員)

*4 AGC ポリマー建材 技術研究所 修士(工学) (非会員)

2. 促進中性化試験

2.1 試験体の作製と試験概要

(1) 試験に使用する材料

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現象であり、表面から逐次内部へ及んでいくが、その進行は特に粗骨材の表面に達すると、炭酸ガスの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し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=55% 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た後、1ヶ月水中養生し、JASS8 防水工事の仕様に基づき、20℃の実験室内で平均含水率 8%以下になるまで1ヶ月乾燥させた。

使用した通気緩衝シートを写真-1に示す。通気緩衝シートは市販の通気性能が大きいものから小さいものまでの3種類を用い、各製品の仕様書に準拠し施工した。ここで、防水層に用いたウレタン系接着剤としてモルタル表面に0.1 mmの厚さになるように塗布し、不織布タイプの通気緩衝シートを貼り付けた。メッシュタイプと溝付きタイプの通気緩衝シートはそれぞれ裏面にシールの付いた自着タイプとなっている。既往研究⁶⁾によれば、不織布タイプの通気緩衝シートが最も透気性能が高く、次いで、メッシュタイプ、溝付きタイプの順で透気性能が小さくなる。なお、その後の中性化深さ測定のため割裂位置となるモルタルの長手方向中心に、全ての通気緩衝シートの通気経路がくるように貼り付けた。

防水層には通常の防水工事に用いられる市販のウレタンを用いた。本材料の基本的物性として、引張応力と伸び率の関係を JIS K 6251 の試験方法に従って測定した。試験体は、膜厚 2.0 mm のウレタン系塗膜防水シートからダンベル状1号形になるよう切り出して作製した。測定結果を表-2に示す。

(2) 通気緩衝シートと防水層の施工

以上のような通気緩衝シート、ウレタン系防水層を用い、図-3の手順で試験体を作製した。炭酸ガスが脱気筒より進入すると仮定し、試験体の端部を脱気筒に見立てた解放部分を作製するために、モルタルに通気緩衝シートを張り付けた後、端部10 mm程度をマスキングし防水層を施工した。防水層の硬化後にマスキング部分の防水層を切り取ることで、通気緩衝シートを露出させ、脱気筒による外気との接触箇所を再現した。作製した試験体の一例として防水層を施工した面を写真-2に示す。防水層は仕様を参考に、室温環境下で塗膜した後、20℃、60%R.H.実験室内で2週間養生した。防水層はモルタル打設時の型枠側面部に施工した。養生終了後、防水層施

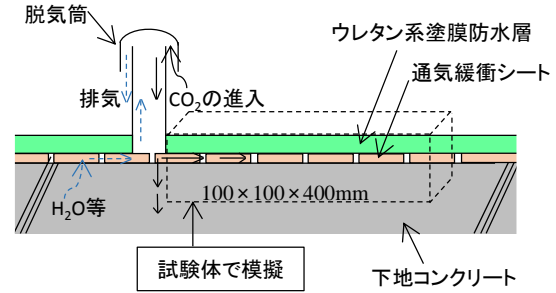


図-2 絶縁仕様で施工されたウレタン系塗膜防水層を試験体で模擬した範囲

表-1 下地モルタルの調合表

W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m ³)			圧縮強度 ⁴⁾ (N/mm ²)
		水 ¹⁾	セメント ²⁾	細骨材 ³⁾	
55	300	270	492	1475	48.4

*1:水道水, *2:普通ポルトランドセメント(3.16g/cm³)

*3:細骨材:阿波市市場町産砕砂(2.57g/cm³), *4:28日強度

表-2 ウレタン系塗膜防水材の引張の物性値

	100%モジュラス ^{※1)} (N/mm ²)	破断時強度 (N/mm ²)	破断時伸び率 (%)
ウレタン系塗膜防水材	1.02	1.85	467

*1:引張り試験時の伸長率100%時の引張応力

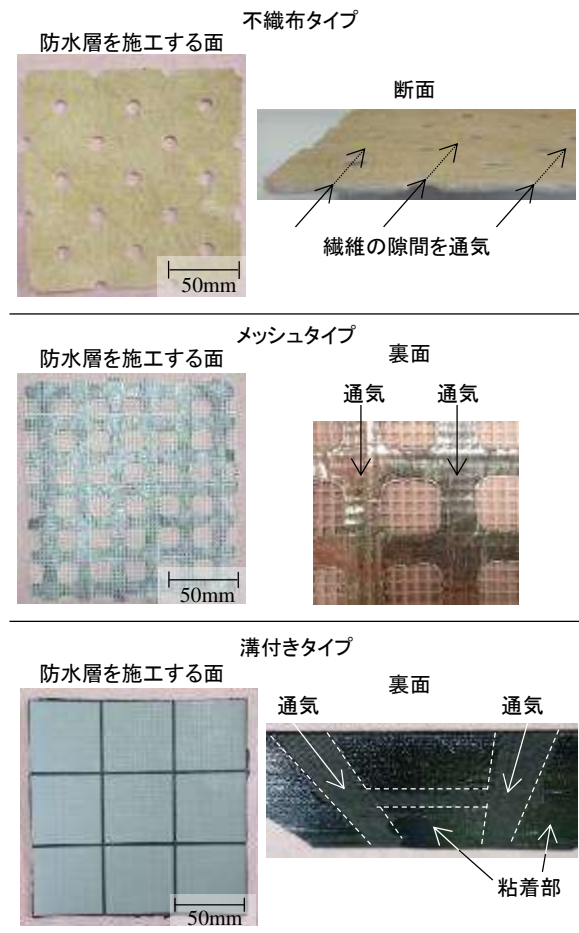


写真-1 試験体に用いた通気緩衝シート

工面以外の面をエポキシ樹脂でシールした。また、本研究では3種類の通気緩衝シートを用いて作製した試験体に加え、比較のために防水層を下地に直接施工する密着仕様の試験体と、防水層を施工しない試験体の計5種類の試験体を作製し試験を行った。作製した5種類の試験体を写真-3に示す。なお、通常の防水工事では防水層と下地コンクリートとをなじみよく密着させる目的で、プライマーが最初に下地面に塗布されるが、本実験ではプライマーのガス遮断性能の影響を考慮して塗布していない。ただし、本試験期間中には大きな温度変化等が生じないために、防水層の剥離やふくれ等の不具合は生じていない。また、端部での通気緩衝シートの剥離や、エポキシ樹脂のうき・はがれ等も生じていない。

(3) 促進中性化試験と中性化領域の測定

エポキシ樹脂硬化後、写真-4に示すように、試験体をJIS A 1153に準拠して促進中性化試験装置内(炭酸ガス濃度 $5\pm 0.2\%$ 温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 湿度 $60\pm 5\%\text{R.H.}$)に暴露した。暴露期間は4週、8週とした。所定の期間が経過した後、モルタルの中性化範囲を測定するため、写真-5に示すように試験体の長手方向中心部を割裂し、割裂面に付着するモルタル粉をはけで除去した後、直ち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、中性化の状況を調べた。

2.2 試験結果と考察

促進期間8週における試験体の中性化進行状況の一例として、防水層がない場合と密着仕様で施工を行った場合、溝付きタイプの通気緩衝シートを絶縁仕様で施工したものを写真-6に示す。

防水層が施工されていない試験体では、全体が一様に表面より深さ方向に中性化が進行しているが、絶縁仕様で防水層が施工された試験体においては、解放部分となる端部での中性化が大きい。そこで、全促進期間における試験体端部を拡大し写真-7に示す。絶縁仕様で施工した試験体については中性化深さを試験体端部から5mm間隔で測定した。また防水層を施工しない試験体、密着仕様で施工した試験体に関しては、20mm間隔で20カ所、モルタル表面からの中性化深さを測定し、平均中性化深さを算出した。このように測定した結果を図-4に、また端部からの距離と中性化深さについてまとめた結果を図-5に示す。なお、試験体数はそれぞれ2体ずつであり、中性化深さはその平均の値を用いた。

防水層なしの場合、モルタル表面からの平均の中性化深さは、促進期間4週で5.1mmであった。密着仕様で施工を行った場合、促進期間4週では中性化の進行は見られなかった。また絶縁仕様においては、どの試験体も通気緩衝シートを露出させた端部では、防水層なしと同程度の中性化が進行していた。この中性化深さは、試験

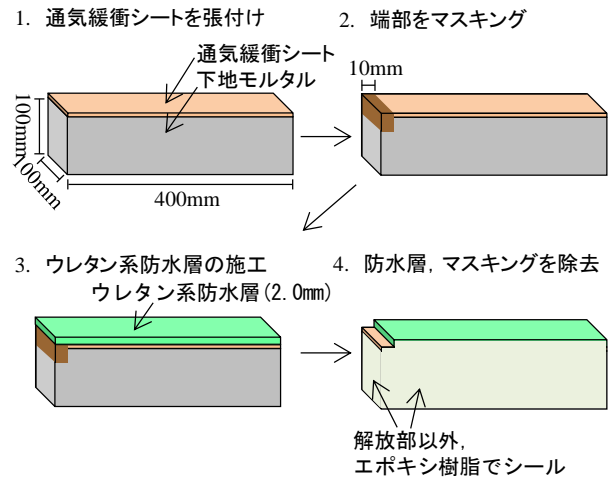


図-3 通気緩衝シートおよび防水層の施工手順

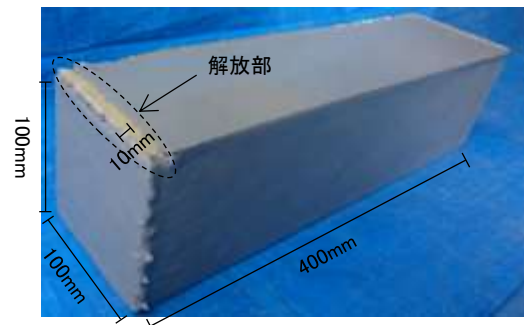


写真-2 作製した試験体の概要

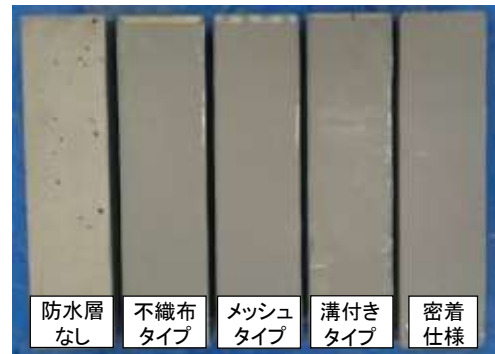


写真-3 作製した全試験体の表面の状況

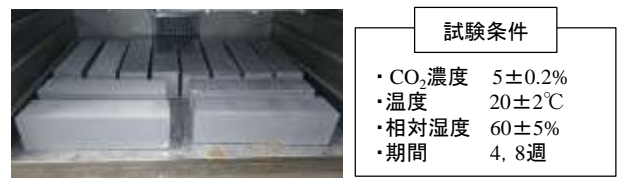


写真-4 促進中性化試験の状況と試験条件

体端部で最大値となり、奥行き方向へ行くにつれて徐々に小さくなる傾向が見られており、透気性の高いシート程奥行き方向遠くまで中性化が進行していた。

促進期間8週においては、防水層がない場合、コンクリート表面からの平均の中性化深さは7.7mmであった。一方で、密着仕様で施工を行った場合、中性化は見られ

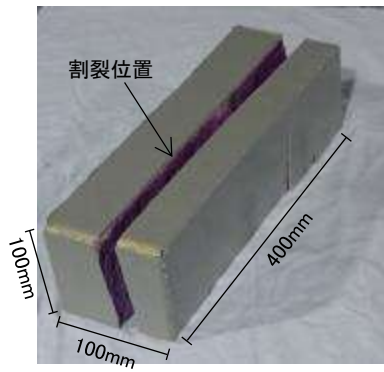


写真-5 試験体の割裂位置

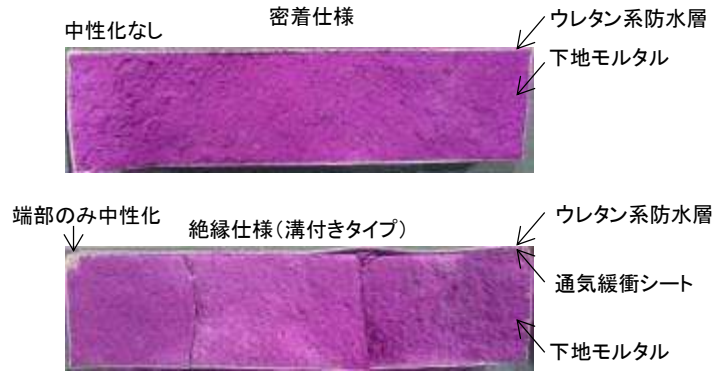


写真-6 中性化状況の一例(促進期間8週)

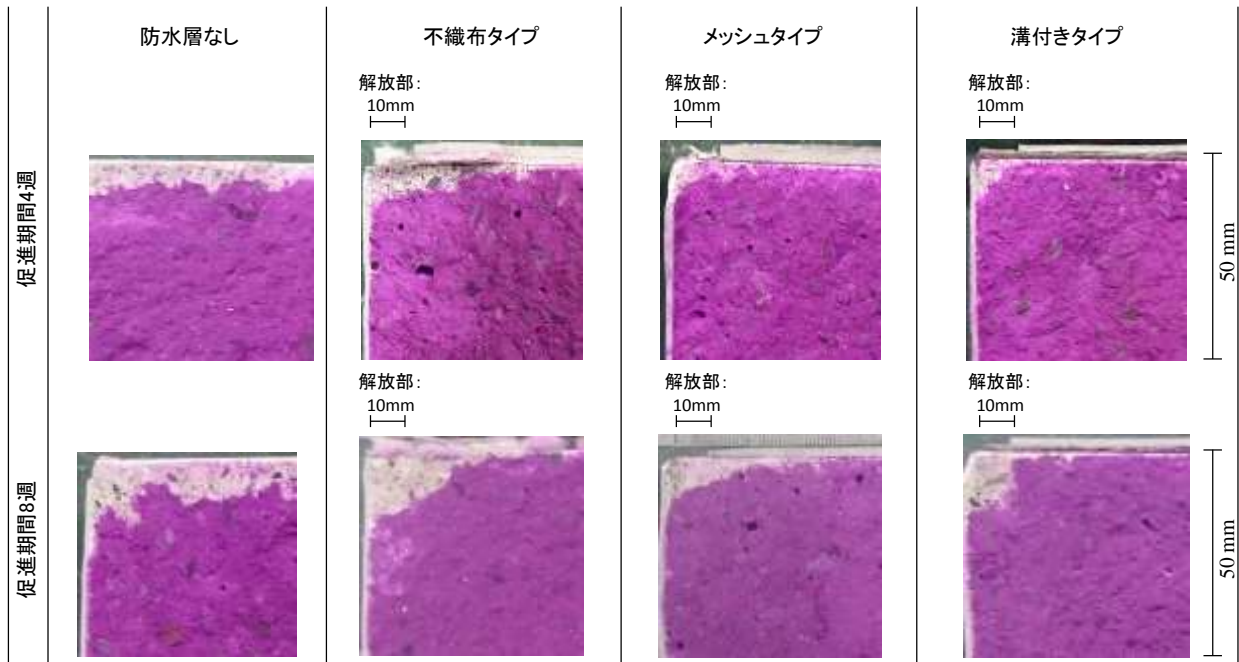


写真-7 絶縁仕様で施工された各試験体の中性化の進行状況(促進期間4,8週)

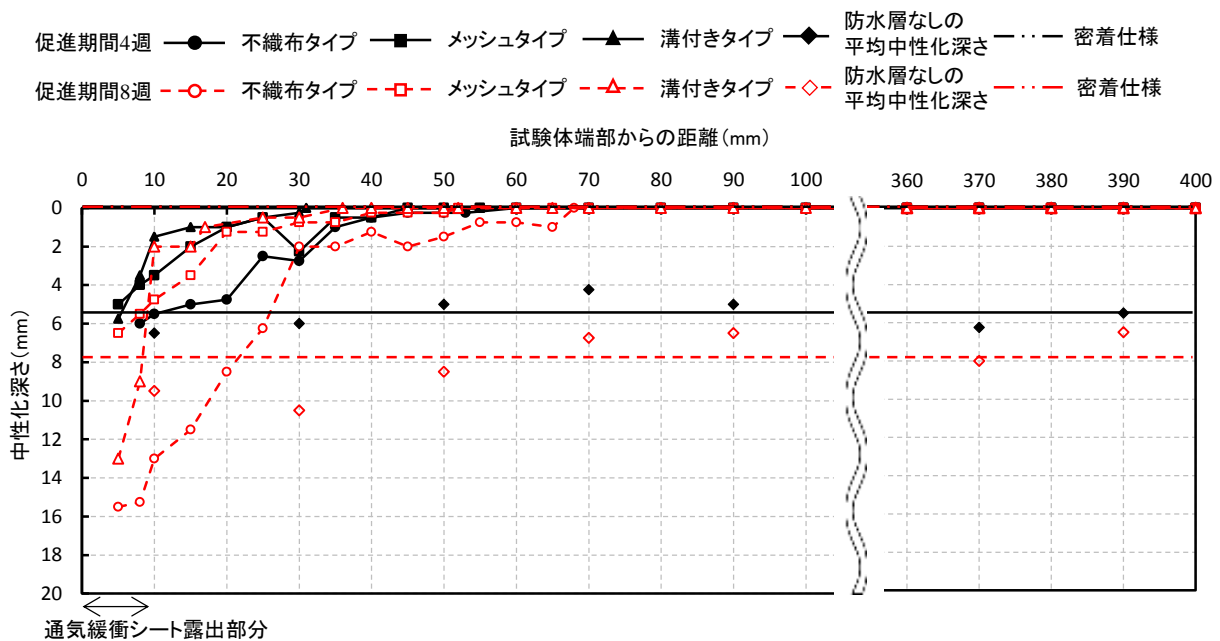


図-4 促進中性化試験の結果(促進期間4, 8週)

ず、既往の研究が示す通り、防水層による高い炭酸ガスの浸入抑制効果が認められた。絶縁仕様で施工を行った各試験体は、防水層なし試験体の平均中性化深さ以上に、端部では中性化が進行しているものもあった。特に、不織布タイプの試験体の場合、促進期間8週において、深さ方向に最大で15.5mm、奥行方向で約70mm程度まで中性化が進行しており、他のシートに比べ中性化進行具合が顕著であった。しかし、端部からの距離が30mm以降からは中性化の進行深さが小さくなっていった。

3. 絶縁工法により施工された防水層下での中性化進行予測

3.1 予測式とモデル化

(1) 中性化進行予測式

コンクリートの中性化の予測式は数多くあるが、ここでは、コンクリートの中性化は、大気中の炭酸ガスがコンクリート内部へ拡散し、内部の水酸化カルシウムと反応し炭酸カルシウムとなるとした、梶田等⁷⁾の提案する、コンクリート中の炭酸ガスの拡散と、その炭酸ガスと水酸化カルシウムとの反応により中性化を判定する式を用いた。なお、今回は通気緩衝シートの解放部からの距離と深さ方向への中性化を計算するために、式を二次元断面方向の式へと拡張した以下のような式(1)を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k \cdot C \cdot Ca \quad \dots \text{式 (1)}$$

ここで、 C : CO₂濃度 (mm³/mm³), t : 単位時間 (year)

D : モルタル中の炭酸ガスの拡散係数 (mm²/year)

x, y : 原点からの距離 (mm), k : 反応速度係数 (/year)

Ca : Ca(OH)₂量(mm³/mm³)

本予測式を差分法によって解くことで、炭酸ガス濃度と、コンクリート中の水酸化カルシウムの分布を予測し中性化領域の判定を行った。

(2) 中性化予測モデル

本シミュレーションでは、先の促進中性化試験の条件を再現することを目的に、予測モデルでは試験体の断面を再現するように、幅400mm、深さ100mmを予測範囲とした。また既往の研究等により、炭酸ガスのウレタン系塗膜防水層を介して侵入する割合は、通気緩衝シートを通しての流入量よりも小さいものと判断し⁸⁾無視する事にした。そこで境界条件としては、防水層施工面の端部10mmの通気緩衝シート部分が外気に露出されたとし、この部分からのみ炭酸ガスが侵入し、その他の面からのガスの浸入はないものとした。なお、下地モルタル部分は縦横1×1mmメッシュに分割し、時間間隔は1分

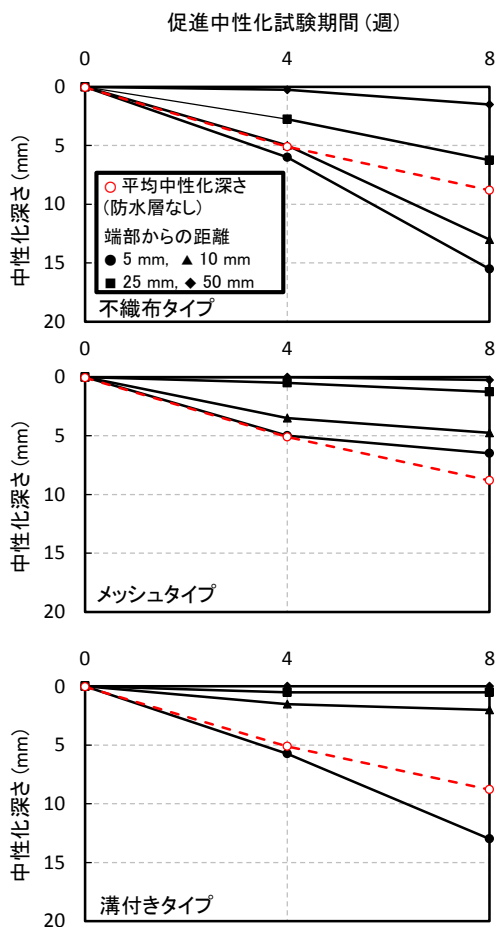


図-5 端部からの距離と中性化深さの関係

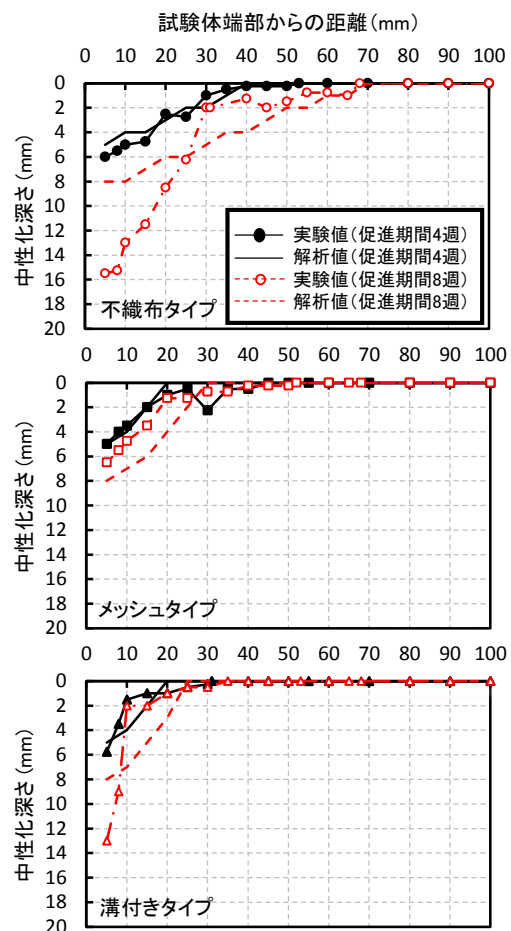


図-6 シミュレーション結果

で計算した。また、調合条件より、水酸化カルシウム量 $Ca=1.59 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 、炭酸ガスの拡散係数および反応速度係数については、同時に行ったモルタル単体の試験結果と既往研究を参考に、それぞれ $D=4.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{sec}$ 、 $k=1,000,000/\text{day}$ とした。

通気緩衝シート部分も $1 \times 1 \text{ mm}$ メッシュで分割し、露出した通気緩衝シート部分を模擬し端部の 10 mm の範囲に 5.0% の炭酸ガス濃度を与えた。炭酸ガスはシート内を Fick の拡散第 2 法則に従って拡散するものとし、拡散したシート内の各位置での炭酸ガス濃度が、コンクリート上面の境界の値となり、式(1)に従ってコンクリート内に炭酸ガスが拡散する。通気緩衝シートの種類によっては、下地モルタルに接着しており絶縁箇所となる部分もあるが本予測ではこの影響も含めた、全体のみかけの拡散係数として取り扱うこととした。なお、通気緩衝シート内の炭酸ガスのみかけの拡散係数は促進中性化 1 ヶ月の試験結果より逆解析的に求め、不織布タイプ、メッシュタイプ、溝付きタイプ、それぞれ、 $2.1 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{sec}$ 、 $3.0 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{sec}$ 、 $1.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{sec}$ とした。

3.2 中性化予測結果と考察

予測結果を図-6 に示す。暴露 4 週の結果を基に、逆解析的に各種係数を求めているので、4 週の予測結果は、試験結果を上手く再現している。しかし、8 週の予測結果を見てみると、メッシュタイプ、溝付きタイプの予測結果については比較的同様の傾向を示しているものの、不織布タイプの試験結果は、端部より 30 mm までは、予測結果より中性化深さが大きく、それよりも深い位置では小さな値となっている。

中性化速度は、コンクリートの含水率に依存する。脱気筒を模擬して通気緩衝シートを露出した端部から水蒸気が蒸発し、試験体内の含水率が不均一となっていた可能性が考えられる。本試験の範囲では試験体の端部の中性化速度が最大となるような含水状態が保たれていたためではないかと推測される⁹⁾。

また、割裂後の目視検査では確認は出来なかったが、 30 mm の位置では内部から水分が表層部に移動し、高い含水状態もしくは通気緩衝シート内で結露が生じて、炭酸ガスの移動が阻害されていた可能性が考えられる。内部と表層部等位置による含水率の影響が大きいものと推測され、今後さらなる検討が必要であると考えている。

4. 結論

絶縁仕様により施工された防水層下のコンクリートの中性化の進行について、促進中性化試験および数値シミュレーションを用いて検討した結果は以下の通りである。

(1) 促進中性化試験結果

促進期間 8 週までの範囲においては、密着仕様で施工

を行った場合、防水層による炭酸ガスの浸入抑制効果により中性化は見られなかった。

絶縁仕様で施工を行った各試験体の一部では、脱気筒を模した解放部直下の中性化深さが、防水層なし試験体の平均中性化深さ以上に進行しているものもあった。一方で、端部から一定の距離以降からは中性化の進行深さが急に小さくなるケースも見られた。

(2) 中性化予測結果

不織布タイプの通気緩衝シートの場合、8 週の試験結果の方が、端部付近では予測結果より中性化深さは大きく、 30 mm より深い位置では小さな値となっている。これは、解放部となる端部よりモルタル中の水蒸気が蒸発し、中性化速度が防水層なしのモルタルよりも早い速度になるような含水状態に保たれていたためではないかと推測される。また、 30 mm 位置ではコンクリート内部の水分が表層部に移動したために通気緩衝シート内で結露が生じ、外部からの炭酸ガスの移動が阻害されていた可能性が考えられる。今後、内部と表層部の含水率の分布の影響など、さらなる検討が必要であると考えている。

【参考文献】

- 1) 岸谷考一：鉄筋コンクリート構造物における鉄筋の腐食について、コンクリートジャーナル、Vol.12, No.2, pp.1-16, 1974.2
- 2) 親本俊憲、板谷俊郎、大岡督尚、長瀬公一：躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.30, No.1, pp.651-656, 2008.7
- 3) 齋藤正司、渡辺二夫、青山實伸、武内道雄：塩害環境下のコンクリート橋に適用した各種表面被覆の 20 年目の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.30, No.1, pp.771-776, 2008.7
- 4) 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
- 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) 古澤洋祐、島村浩行、古市光男、長谷川清勝、中沢裕二、小関晋平、鈴木博、上ノ山悦治：絶縁工法における脱気性能 その 1 通気係数による影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol.76, No.666, pp.1401-1406, 2011.8
- 7) 榊田佳寛、棚野博之：コンクリートの中性化進行予測モデル、コンクリート工学論文集、Vol.2, No.1, pp.125-134, 1991.1
- 8) 塚越雅幸、宮内博之、田中享二：塗膜防水層下のコンクリートひび割れ部の炭酸化、日本建築学会構造系論文集 第 606 号、pp.43-50, 2006.8
- 9) 阿部道彦、榊田佳寛、田中斉、柳啓、和泉意登志、友沢史紀州：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.409 pp.1-10 1990.3