

論文 表面被覆材の塗布部位が異なる矩形モルタル梁の塩化物イオン浸透性状に関する検討

櫻庭 浩樹^{*1}・熊谷 慎祐^{*2}・佐々木 巖^{*3}・西崎 到^{*4}

要旨: 本研究では、表面被覆材の塗布部位が含水状態および塩化物イオンの分布に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、表面被覆材の塗布部位が異なる矩形モルタル梁の塩水浸透実験を行った。実験では、表面被覆材を塗布しない供試体および塗布部位を変化させた供試体を用意し、それらの上面に水槽を設置して塩水を浸透させ、所定の期間経過後に、モルタルに含まれる全塩化物イオン濃度を測定した。その結果、表面被覆材を塗布して乾燥による水分蒸発を妨げた場合、表面に近い位置の部位では、水分蒸発による塩分濃縮が生じず、塩分濃縮による全塩化物イオン濃度の増加が抑制される。

キーワード: 表面被覆材, 塗布部位, 塩化物イオン, 乾燥, 水分蒸発, 塩分濃縮

1. はじめに

コンクリート橋梁の補修工法として、表面被覆工が広く用いられている^{1),2)}。表面被覆工は、コンクリート表面に遮蔽層を形成することで、塩化物イオンや水等の劣化因子の侵入を抑制する効果がある。一方、コンクリート橋梁の桁の側面と下面に表面被覆が施された場合、桁下面に水分が滞留する傾向があることが報告されている³⁾。表面被覆は、外部からの水分の浸入を防ぐ効果があるが、塗布していない部位から水分が浸入した場合、水分の排出を妨げ、コンクリートの含水状態を変化させると考えられる。

また、積雪寒冷地に建設された橋梁では、凍結防止剤による塩害が報告されている^{4),5)}。凍結防止剤が、降雪・降雨等によって、伸縮装置部等から橋梁の桁へ浸透する場合もある⁶⁾。一方、コンクリートの含水状態が塩分浸透に影響を及ぼすことが報告されている⁷⁾。表面被覆工を適用した橋梁が、凍結防止剤による塩分浸透を受け、コンクリートの含水状態によっては、塩分の桁への浸透性状は、表面被覆が無い場合と異なると思われる。

本研究では、表面被覆材の塗布部位が含水状態および塩化物イオンの分布に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、表面被覆材の塗布部位を変化させた矩形モルタル梁について、梁の上面から塩水を浸透させる塩水浸透実験を行い、モルタルに含まれる全塩化物イオン濃度を測定して、表面被覆材の塗布部位が塩化物イオンの浸透性状に及ぼす影響について検討している。また、全塩化物イオン濃度の測定値と塩化物イオンの拡散解析による回帰分析から得られる算定値を比較して、塩化物イオンの移動機構について検討している。

2. 塩水浸透実験

2.1 供試体の作製

表-1 には、モルタルの配合を示す。表-1 に示す配合で、寸法 10×10×40cm の矩形モルタル梁を成形し、20℃60%RH の室内で、2 日気中+5 日水中+21 日気中養生を行い、供試体を作製した。細骨材は、けい砂 4 号・5 号・6 号を質量比で 1:1:1 に混合したものを用いた。

図-1 には、供試体の種類を示す。供試体は、表面被

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)		
		水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)
60	3.0	290	484	1452

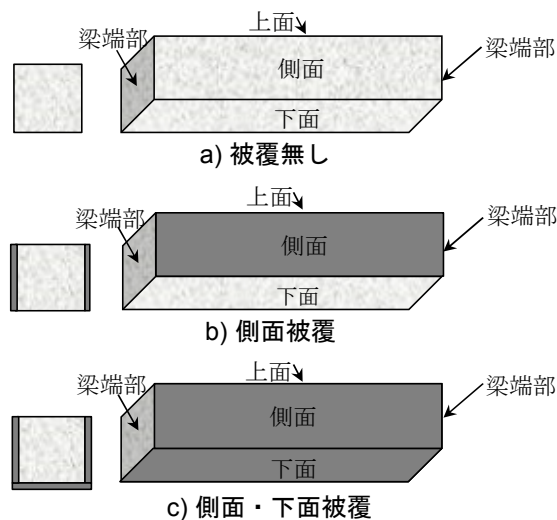


図-1 矩形モルタル梁の種類

*1 土木研究所 材料資源研究グループ 新材料チーム 専門研究員 博 (工) (正会員)
 *2 土木研究所 材料資源研究グループ 新材料チーム 交流研究員 博 (工) (正会員)
 *3 土木研究所 材料資源研究グループ 新材料チーム 主任研究員 博 (工) (正会員)
 *4 土木研究所 材料資源研究グループ 新材料チーム 上席研究員 博 (工)

覆材が塗布された梁の上面から塩水が浸透することを想定して作製した。供試体の種類は、被覆無し、側面被覆、側面・下面被覆、の3つとした。被覆無しは、供試体に表面被覆材を塗布していない。側面被覆は、供試体の側面に表面被覆材を塗布し、側面・下面被覆は、供試体の側面および下面に表面被覆材を塗布した。両梁端部は、乾燥面となるように、表面被覆材を塗布せず、開放面とした。供試体の上面については、次節で述べる。

表-2には、表面被覆材の仕様を示す。図-1に示す部位に、エポキシ樹脂系のプライマー、パテ、中塗りおよびアクリルウレタン樹脂系の上塗りをメーカーの仕様に従って塗布した。各塗布間隔は1日とし、表面被覆材の養生は、上塗りの塗布後、20°C60%RHの室内で7日とした。

2.2 塩水の浸透方法

図-2に塩水の浸透状況を示す。供試体は、塩水を浸透させる前に、72時間水中浸漬させた。塩水は、供試体の上面にアクリル製の水槽を設置し、20°C60%RH下で14日浸透させた。

塩水は、10%NaCl水溶液とし、塩水浸透開始時の10%NaCl水溶液の量は2000mlとした。水槽と供試体の隙間は、シリコン樹脂系シーリング材を用いて埋め、止水した。なお、塩水浸透終了後に塩水の密度を測定し、塩水浸透前の密度とほぼ同じであることを確認した。

また、塩水浸透終了後、水槽に残った塩水の容量を測定し、塩水浸透開始時からの減少分から、塩水浸透量を算出した。

2.3 試料の採取方法

図-3には、全塩化物イオン濃度の測定用試料の採取方法を示す。試料の採取位置は、両梁端部（以下、梁端部1,2と称す）と梁中央部の3箇所とした。塩水浸透終了後、各採取位置の試料を、供試体表面に析出した塩分および塗布された表面被覆材をグラインダーを用いて取り除いた後、乾式ブレードを用いて厚さ約3cmとなるように切り出した。

次に、切り出された各試料の断面を、乾式ブレードを用い、分割寸法が約3×3cmとなるように9分割した。断面分割後の試料には、圧搾空気を吹き付け、分割時に付着した試料の粉を取り除いた。

分割された試料は、ステンレス乳鉢により粉砕した。試料の混同による測定誤差を防ぐため、圧搾空気とウェスによる乳鉢清浄を各試料の粉砕作業を行う前に毎回行った。

2.4 全塩化物イオン濃度の測定方法

全塩化物イオン濃度を、粉砕後の試料を用い、JCI-SC4（硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法）に従って、電位差滴定により測定した。

表-2 表面被覆材の仕様

プライマー	エポキシ樹脂系プライマー、 標準塗布量 0.10kg/m ² 、1層塗り
パテ	エポキシ樹脂系パテ、 標準塗布量 0.50kg/m ² 、1層塗り
中塗り	エポキシ樹脂系中塗り、 標準塗布量 0.20kg/m ² 、1層塗り
上塗り	アクリルウレタン樹脂系上塗り、 標準塗布量 0.12kg/m ² 、1層塗り

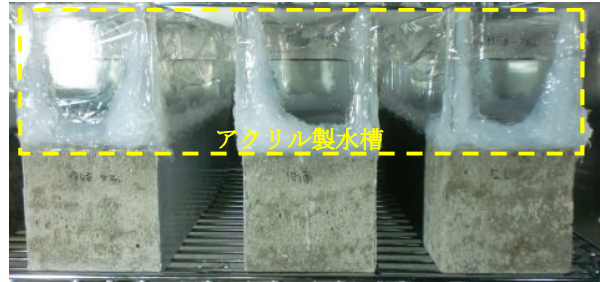


図-2 塩水の浸透状況

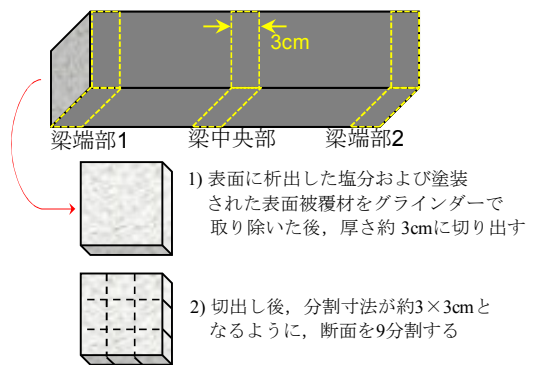


図-3 試料の採取方法

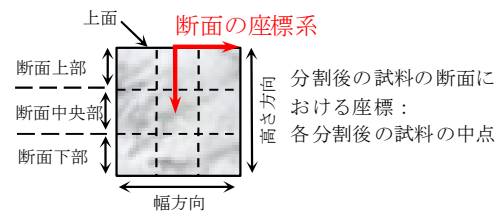


図-4 断面の座標系

図-4には、断面の座標系を示す。断面の座標系の原点は、上面の中央とし、分割後の試料の断面における座標は、それぞれの分割後の試料の中心とした。また、測定結果を、断面上部・断面中央部・断面下部の3つに分け、断面の幅方向の全塩化物イオン濃度の分布を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 塩水浸透量の推定

表-3には、各供試体の塩水浸透量を示す。塩水浸透量は、被覆無し、側面被覆および側面・下面被覆でそれ

ぞれ、174ml、75ml および 79ml である。被覆無しの場合よりも、側面被覆および側面・下面被覆の場合の方が塩水浸透量は小さい値を示している。側面被覆と側面・下面被覆の塩水浸透量を比較すると、ほぼ同程度の値となっている。

3.2 全塩化物イオン濃度の分布性状

(1) 梁中央部

図-5 には、梁中央部の全塩化物イオン濃度の分布を示す。

被覆無しとした場合の断面上部における±3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、0cm 位置よりも高い値となっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.12 から 0.67kg/m³ の範囲の値を示している。

側面被覆とした場合の断面上部における±3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、被覆無しの場合と同傾向が異なり、0cm 位置の値と同程度の値になっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.12 から 0.16 kg/m³ の範囲の値である。

側面・下面被覆とした場合の断面上部における±3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、概ね側面被覆とした場合と同じ傾向であり、0cm 位置の値と同程度の値になっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.11 から 0.16kg/m³ の範囲の値である。

(2) 梁端部 1

図-6 には、梁端部 1 の全塩化物イオン濃度の分布を示す。

被覆無しとした場合の断面上部における±3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、0cm 位置の値よりも高くなっている。断面中央部および断面下部の全塩化物イオン濃度は、それぞれ、0.66 から 1.86kg/m³ の範囲および 0.25 から 0.59 kg/m³ の範囲である。

側面被覆とした場合の断面上部における±3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、0cm 位置の値よりも低い値になっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.15 から 0.52kg/m³ の範囲の値である。

側面・下面被覆とした場合の断面上部における-3.3cm および+3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、0cm 位置の値と比較して、同程度以上の値になっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.12 から 0.16kg/m³ の範囲の値である。

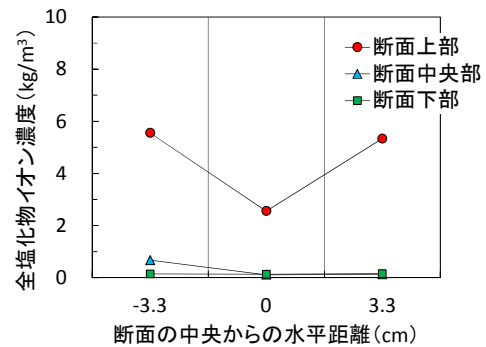
(3) 梁端部 2

図-7 には、梁端部 2 の全塩化物イオン濃度の分布を示す。

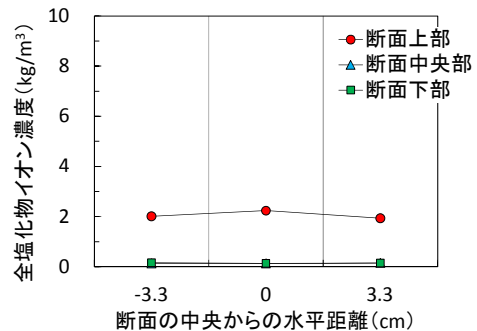
被覆無しとした場合の断面上部における-3.3cm および +3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、0cm 位置の値よりも、高いか、同程度の値になっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.14 から 0.45kg/m³ の

表-3 塩水浸透量

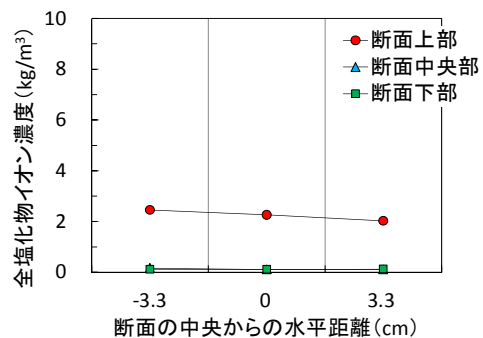
供試体の種類	塩水浸透量 (ml)
被覆無し	174
側面被覆	75
側面・下面被覆	79



a) 被覆無し



b) 側面被覆



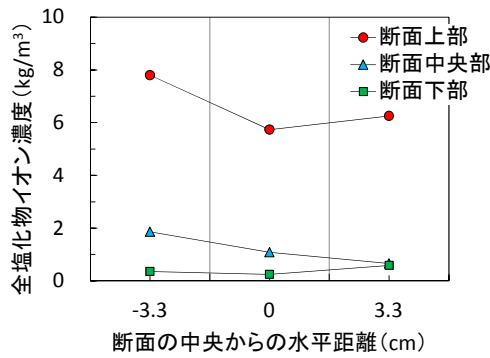
c) 側面・下面被覆

図-5 梁中央部の全塩化物イオン濃度分布

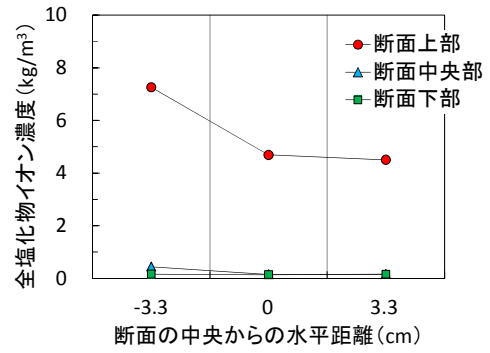
範囲の値を示している。

側面被覆とした場合の断面上部における±3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、0cm 位置の値と同程度の値になっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.13 から 0.16kg/m³ の範囲の値である。

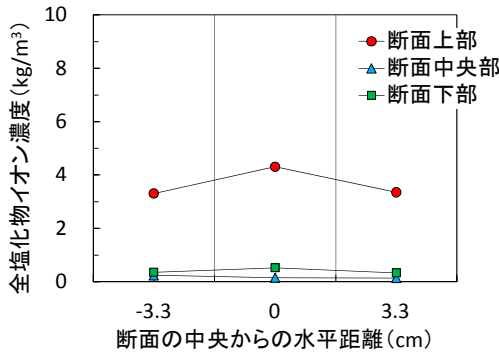
側面・下面被覆とした場合の断面上部における±3.3cm 位置の全塩化物イオン濃度は、0cm 位置の値と比較して低い値になっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.12 から 0.34kg/m³ の範囲の値である。



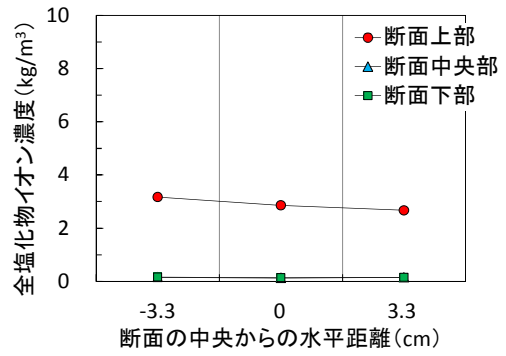
a) 被覆無し



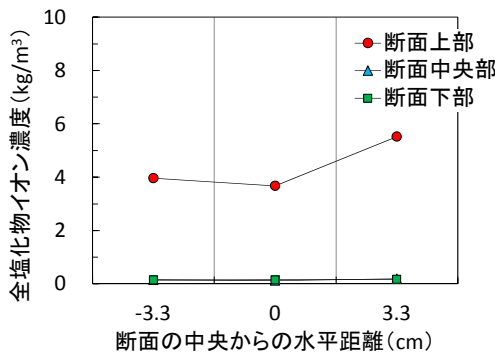
a) 被覆無し



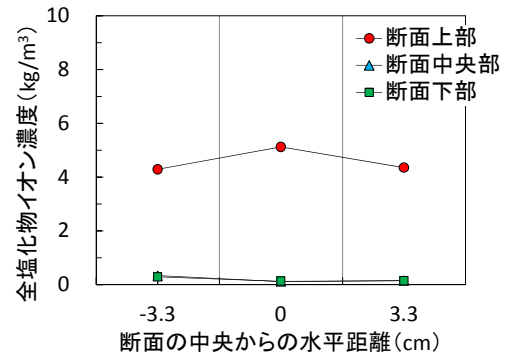
b) 側面被覆



b) 側面被覆



c) 側面・下面被覆



c) 側面・下面被覆

図-6 梁端部1の全塩化物イオン濃度分布

図-7 梁端部2の全塩化物イオン濃度分布

3.3 表面被覆が全塩化物イオン濃度に及ぼす影響に関する考察

図-8には、梁中央部の断面上部における全塩化物イオン濃度の比較を示す。図では、表面に近い位置の平均の全塩化物イオン濃度を把握するため、±3.3cm位置の平均値を示している。被覆無しの場合は±3.3cm位置の平均値が0cm位置の値よりも高く、側面被覆および側面・下面被覆の場合は±3.3cm位置の平均値と0cm位置の値は同程度の値である。

図-9には、梁端部の断面上部における全塩化物イオン濃度の比較を示す。なお、梁端部の平均的な全塩化物イオン濃度を把握するため、梁端部1と2の平均値を用いている。結果として、梁端部の場合も梁中央部と同様の傾向が見られ、被覆無しの場合は±3.3cm位置の平均値が0cm位置の値よりも高く、側面被覆および側面・下

面被覆の場合は、±3.3cm位置の平均値と0cm位置の値は同程度である。

以上のことから、被覆無しの場合の断面上部では表面に近い位置の方が断面の中央位置よりも全塩化物イオン濃度は高いこと、側面被覆および側面・下面被覆の断面上部では表面に近い位置と断面の中央位置の全塩化物イオン濃度は同程度となる傾向があることが示された。なお、側面被覆と側面・下面被覆の全塩化物イオン濃度の差は明確でなく、塗布部位の違いが全塩化物イオン濃度に及ぼす影響について、さらに検討が必要であると思われる。

図-10には、表面被覆が全塩化物イオン濃度に及ぼす影響の概念図を示す。被覆無しの場合の断面上部では、表面に近い位置の方が、断面の中央位置よりも全塩化物イオン濃度は高いことが確認された。これは、図-10 a)に示す

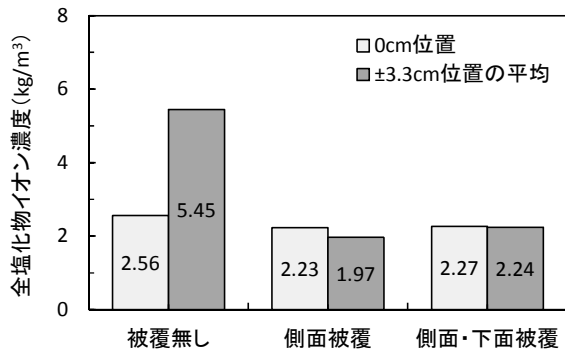


図-8 梁中央部の断面上部における全塩化物イオン濃度の比較

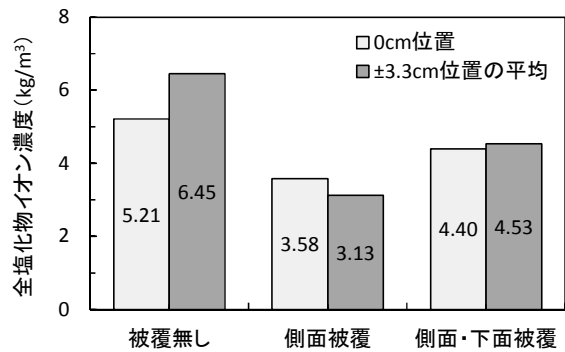
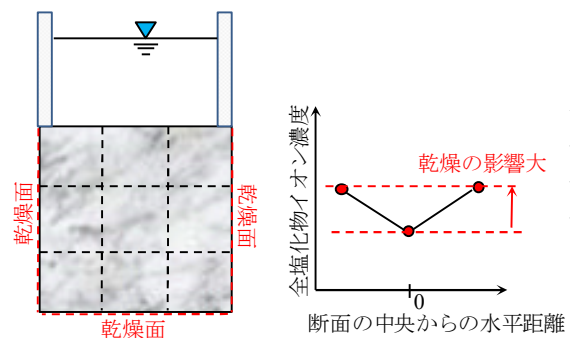
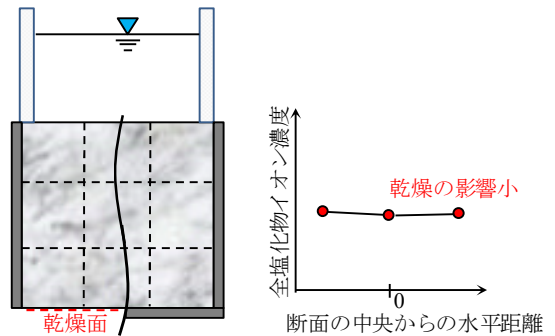


図-9 梁端部の断面上部における全塩化物イオン濃度の比較



a) 被覆無し



b) 側面被覆もしくは側面・下面被覆

図-10 表面被覆が全塩化物イオン濃度に及ぼす影響の概念図

ように、表面に近い位置では、乾燥により水分が蒸発し、塩分濃縮が生じるためと推察される。

側面被覆および側面・下面被覆の断面上部では、表面に近い位置の全塩化物イオン濃度は、断面の中央位置の値と同程度となる傾向があり、被覆無しの場合と比較して異なることが確認された。これは、図-10 b)に示すように、表面に近い位置においても、表面被覆が施されたために乾燥による水分の蒸発が抑制され、塩分濃縮が生じなかったためと考えられる。

以上のことから、表面被覆材を塗布して表面からの水分蒸発を妨げた場合、表面に近い部位では、水分蒸発による塩分濃縮が生じず、塩分濃縮による全塩化物イオン濃度の増加が抑制されるものと思われる。

4. 塩化物イオンの拡散解析による検討

ここでは、全塩化物イオン濃度の測定値と拡散方程式の解を用いた回帰分析から得られる算定値を比較し、本実験における塩化物イオンの移動機構について考察する。

4.1 検討方法

式(1)に示すFickの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用い、回帰分析を行った。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$: 全塩化物イオン濃度、 C_0 : 表面塩化物イ

表-4 見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度

見掛けの拡散係数	表面塩化物イオン濃度
0.0307 cm ² /日	30.0 kg/m ³

オン濃度、 x : 断面の原点からの鉛直距離、 D : 見掛けの拡散係数、 t : 経過時間

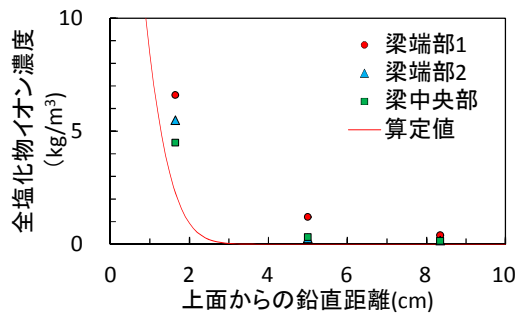
見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度は、本実験の中で、塩水浸漬試験から得られる見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度に最も近い値であると考えられる側面・下面被覆における梁中央部の全塩化物イオン濃度の測定結果を回帰分析することにより算出した。回帰分析に用いた全塩化物イオン濃度は、断面中央からの水平距離±3.3cmと0cm位置における値の平均とした。表-4には、見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度の算出結果を示す。

4.2 算定結果および考察

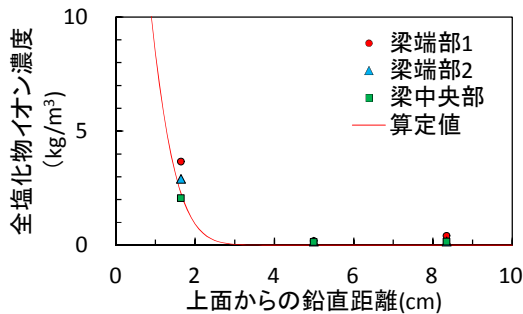
図-11には、算定結果と実験結果の比較を示す。図の横軸は、上面(浸透面)からの距離である。実験値は、断面中央からの水平距離±3.3cmと0cm位置における値の平均としている。

被覆無しの場合、実験値は、算定値よりも高いことが確認される。また、上面からの距離1.65cm位置では、梁中央部よりも梁端部1,2の方が、高い値を示している。

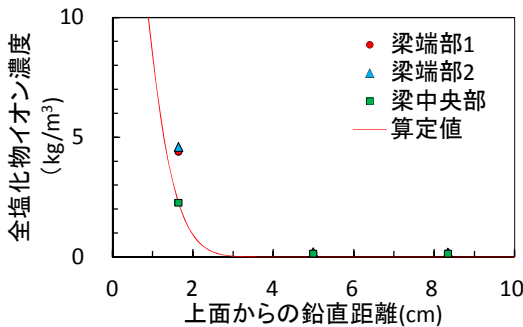
側面被覆の場合、梁中央部の実験値は、算定値と同程



a) 被覆無し



b) 側面被覆



c) 側面・下面被覆

図-11 回帰分析による算定結果と実験結果の比較

度である。また、上面からの距離 1.65cm 位置において、梁端部 1,2 の実験値は、梁中央部の実験値および算定値よりも高い値であることが確認される。

側面・下面被覆の場合、梁中央部の実験値は、梁中央部の実験値を回帰分析して得られた見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度を用いているため、算定値と同じである。また、上面からの距離 1.65cm 位置において、梁端部 1,2 の実験値は、梁中央部の実験値および算定値よりも高い値であることが確認される。

以上のことから、本実験で測定された全塩化物イオン濃度は、梁端部の方が算定値よりも高い値であり、特に被覆無しの場合でその傾向が確認される。梁端部の方が

算定値よりも大きい理由としては、水の蒸発による塩分濃縮および移流による塩化物イオンの移動が考えられる。すなわち、水の蒸発を加味することが、実験結果を再現するために、必要であることを示唆している。

5. まとめ

本研究では、表面被覆材の塗布部位が異なる矩形モルタル梁の塩水浸透実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 表面被覆材の塗布の有無が、モルタルへの塩化物イオンの浸透性状に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。
- 2) 側面被覆および側面・下面被覆とした供試体では、被覆無しの供試体と比較して、表面に近い位置の全塩化物イオン濃度は低くなることを示した。
- 3) 側面・下面被覆とした供試体の梁中央部の実験値を回帰分析して得られた算定値と各供試体の実験値を比較し、梁中央部よりも梁端部における実験値の方が、算定値と比較して高くなることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会編：表面保護工法 設計施工指針（案），コンクリートライブラリーNo.119，pp.135-179，2005.4
- 2) 櫻庭浩樹，熊谷慎祐，宮田敦士，佐々木徹，西崎到：水の挙動に着目した表面被覆材の変状に関する一考察，第 31 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，5-106，pp.350-353，2013.11
- 3) 上田洋，松田芳範，栗林健一，水野清，上原元樹，飯島亭：断面修復および表面被覆がコンクリート構造物の水分分布に与える影響，土木学会第 65 回年次学術講演会，pp.611-612，V-306，2010.9
- 4) 青山實伸，松田哲夫：凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.807-812，2004.7
- 5) 渡辺暁央，小保田剛規，河野成弘：凍結防止剤による下部工の塩化物イオンの浸透性に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.741-746，2008.7
- 6) 田中良樹，村越潤：道路橋桁端部における腐食環境の評価と改善方法に関する検討，土木技術資料，Vol.50，pp.16-19，2008.11
- 7) 佐伯竜彦，二木央：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.963-968，1996.7