

論文 床版補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性に関する評価

杉野雄亮^{*1}・佐竹紳也^{*2}・大垣賀津雄^{*3}・小出宜央^{*4}

要旨：床版補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性を収縮によるひび割れ抵抗性および環境劣化因子に対する抵抗性により評価した。その結果、床版補修用ポリマーセメントモルタルの収縮ひずみは非常に小さく、ひび割れ抵抗性が高いことが認められた。また、凍結融解抵抗性、中性化速度および塩化物イオン浸透深さに関する評価試験の結果、いずれの環境劣化因子に対しても十分な抵抗性を有していた。本論文は、これらの結果をまとめ、道路床版の上面増厚材および床版損傷部の補修材としての材料特性を評価したものである。

キーワード：ポリマーセメントモルタル、ひび割れ抵抗性、凍結融解、中性化速度、塩化物イオン浸透深さ

1. はじめに

わが国では高度成長期に建造された道路橋構造物が多く、供用期間が50年を超える構造物が増加している。また、車両の大型化や積載量の増加による重交通化により、道路床版の疲労損傷劣化が今後急速に進行することが懸念されている。道路橋構造物の使用性や安全性に支障が生じると社会的な損失が非常に大きくなるため、長寿命化対策へのニーズは一層高まりつつある¹⁾。

道路橋構造物の耐久性を向上させる方法は劣化要因や施工条件により様々であるが、道路床版の疲労耐久性を向上させる方法として、コンクリート系材料を床版上面部分に一体化する上面増厚工法がある。増厚用材料として、速硬鋼繊維補強コンクリート²⁾（以下、SFRC）や床版補修用ポリマーセメントモルタル³⁾（以下、ゴムラテックスモルタル）が用いられている。また、SFRCやゴムラテックスモルタルは、ポットホールや床版ジョイント部およびコンクリートの打ち継ぎ部に生じる損傷等、道路床版の部分的な損傷部への補修材として用いられることも多い。

上面増厚工法や床版の補修に使用する材料は体積表面積比が非常に小さくなるため、乾燥収縮の影響が大きく、床版による拘束を受ける面積が広いため、ひび割れの生じやすい施工条件となる。供用後初期にひび割れが生じた場合、環境劣化因子の外部からの侵入やひび割れ箇所とのすり合わせによる損傷等により、早期に劣化する可能性が高い。一方、上面増厚工法や床版の部分的な補修に使用する材料は、材料の施工厚が40mm程度と薄いため、供用後中長期的なスパンでは、環境劣化因子が上面増厚材内部に浸透し、劣化損傷が生じる可能性が高い。さらに、環境劣化因子が既設床版にまで到達した場合、より深刻な劣化損傷を引き起こす可能性も考えられる。

ポリマーセメントモルタルは古くから利用されている

材料であり、防水材、接着剤、補修材をはじめとして幅広い用途に用いられている。しかしながら、道路床版に用いる上面増厚材および床版損傷部の補修材としてのひび割れ抵抗性および環境劣化因子に対する抵抗性を評価した研究事例は少ないのが現状である。そこで本論文では、ゴムラテックスモルタルのひび割れ抵抗性および環境劣化因子に対する抵抗性を評価した結果を報告する。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 にゴムラテックスモルタルの配合を、表-2 にSFRCの配合を示す。ゴムラテックスモルタルの構成材料は、スチレンブタジエンゴムを主成分としたポリマーに水および混和剤を添加した混和液とパウダー（速硬セメント、硅砂、混和材等）である。一方SFRCは、水、速硬セメント、細骨材（表乾密度2.60g/cm³）、粗骨材（砕石1305、表乾密度2.64g/cm³）、鋼繊維（長さ30mm、密度7.85g/cm³）、混和剤からなるコンクリートである。

表-1 ゴムラテックスモルタルの配合

W/C (%)	S/C	P/C (%)	単位量(kg/m ³)	
			混和液	パウダー
27.0	3.05	18.0	213	1920

水 (W)、セメント (C)、硅砂 (S)、ポリマー (P)

表-2 SFRCの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	SF
40.5	55.0	175	432	913	761	100

水 (W)、セメント (C)、細骨材 (S)、粗骨材 (G)、鋼繊維 (SF)

*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 工修 (正会員)

*2 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 グループリーダー 工修 (正会員)

*3 川崎重工業株式会社 営業推進本部市場開発部 部長 工博 (非会員)

*4 川崎重工業株式会社 営業推進本部市場開発部 基幹職 工修 (非会員)

2.2 試験項目

(1) 材料強度試験

材料強度は、圧縮強度、引張強度、曲げ強度および付着強度を測定した。材料強度試験は、すべて温度 20℃、相対湿度 60%の環境下で行い、JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準じ、供試体を養生した。各強度の試験方法を以下に示す。

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、材齢 28 日まで測定した。供試体は、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱である。加えて材齢 7 日では、引張強度、曲げ強度および付着強度の測定を行った。引張強度試験は、JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に従い、強度を測定した。供試体は、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱である。また、曲げ強度試験は、

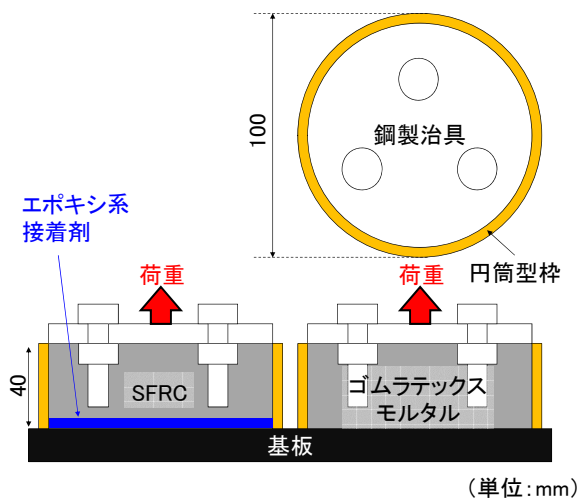


図-1 付着強度試験



写真-1 鋼製治具

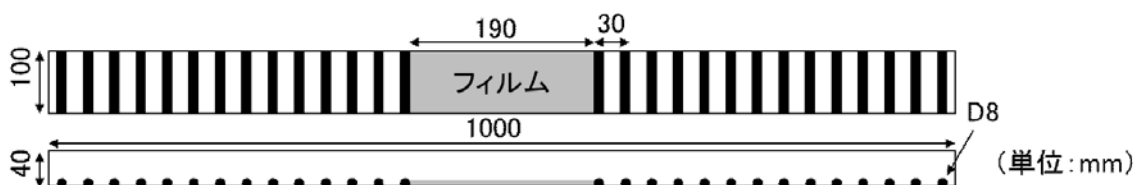


図-2 収縮ひび割れ試験体

JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じて行い、強度を測定した。供試体は、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱である。付着強度試験方法を図-1 に、鋼製治具を写真-1 に示す。基板は鋼材およびコンクリートとの付着強度を測定するため、SS400 厚さ 10 mmの鋼板および JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品」に準じた普通コンクリート平板の表面をブラスト処理して用いた。鋼製治具は、 $\phi 100\text{mm}$ 円盤に M16mm の定着用ボルトを中心から等距離かつ各ボルトの距離が同じ距離となる位置に 3 本固定したものである。SFRC は基板にエポキシ系接着剤を塗布し、接着剤が硬化する前に円筒型枠に打設し、対してゴムラテックスモルタルは直に円筒型枠に打設し、直ちに鋼製治具を埋め込み、定着用ボルトが円筒型枠上面から深さ 30mm となるように固定した。その後、円筒型枠を脱型し所定の材齢時に鉛直方向に治具を引張り、強度を測定した。

(2) 収縮試験

収縮試験は、自己収縮および乾燥収縮の測定を温度 20℃、相対湿度 60%の環境下で行った。

自己収縮は、「(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」を参考とし⁴⁾、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱供試体中央部に埋め込み式ひずみゲージを埋設した。また、供試体はモルタルおよびコンクリートが硬化後、直ちに全面をシールし、乾燥による収縮が生じないようにした。その後、材齢 7 日まで埋め込み式ゲージのひずみを測定した。乾燥収縮は、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に従い、ホイットモア式ひずみ計によって測定した。

(3) ひび割れ抵抗性試験

ひび割れ抵抗性試験は、図-2 に示すように、鋼板に拘束体として D8 を溶接した型枠を用いた。さらに中央部にフィルムシートを設置し、部分的に無拘束とすることにより引張応力が生じやすいようにした。ゴムラテックスモルタルおよび SFRC を打設後、温度 20℃、相対湿度 30%の条件下で養生し、硬化後 1 時間以内に試験体中央部表面にひずみゲージを貼り付けた⁵⁾。材齢 14 日までひずみゲージによる測定を行った後、目視による試験体

表面の観察を材齢 28 日まで続けた。

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に定める A 法（水中凍結融解試験）を参考とし、材齢 28 日まで JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準じて養生した後、凍結融解を 300 サイクル行ない、36 サイクルを越えない間隔で供試体外観の観察、たわみ震動の一次共鳴振動数および供試体質量を測定した。また、300 サイクル終了後の供試体は、曲げ載荷試験を行った。供試体は、100mm×100mm×400mm の角柱である。

(5) 中性化試験

中性化試験は、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」および JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」を参考とした。100mm×100mm×400mm の角柱供試体を材齢 28 日まで JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準じて養生した後、向かい合う 2 側面を除いて 4 面をシールし、常に側面からの炭酸ガスの浸透となるようにした。その後、供試体を温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%の促進環境下に設置し、促進開始から 26 週まで中性化深さを測定した。中性化深さの測定は、所定の材齢に達した供試体を割裂してフェノールフタレイン法により行い、測定後は割裂面に再びシールを施し、最終材齢まで促進曝露を継続した。

(6) 塩化物イオン浸透深さ試験

塩化物イオン浸透深さ試験は、JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」を参考とし、100mm×100mm×400mm の角柱供試体を材齢 28 日まで養生した後、向かい合う 2 側面を除いて 4 面を密封し、側面から塩化物イオンが浸透するようにした。その後、角柱供試体を JIS A 6205「鉄筋コンクリート用防せい剤」

に規定する温度 20℃の塩分溶液に常時浸漬する場合と乾燥浸漬を繰り返す場合（温度 20℃、相対湿度 60%環境にて 3 日間乾燥し 4 日間浸漬する）の 2 条件にて、浸漬開始後 182 日まで測定した。塩化物イオンの浸透深さは、所定の材齢にて 0.1%フルオレセインナトリウム水溶液および 0.1N 硝酸銀溶液を供試体割裂面に噴霧し、蛍光を発する部分を塩化物イオン浸透域として測定した。また、浸漬開始後 182 日の供試体については、内部の塩化物イオンの分布状態を確認するため、電子線マイクロアナライザ（以下、EPMA）による面分析を行った。

3. 試験結果

3.1 材料強度

材料強度試験の結果を表-3 に示す。ゴムラテックスモルタルおよび SFRC の材齢 1 日の圧縮強度は、24N/mm² 以上あり、いずれも初期材齢において十分な強度発現性を有している。材齢 7 日の圧縮強度は同等であるが、ゴムラテックスモルタルの曲げ強度は SFRC より約 1.4 倍高い。また、ゴムラテックスモルタルと鋼材およびコンクリートとの付着強度は、共に 1.0N/mm² 以上である。竹本らは、1 N/mm² 程度の付着強度が確保できれば、輪荷重の作用時に既設床版と SFRC の一体性が損なわれないとの試験結果を報告しており⁶⁾、ゴムラテックスモルタルは、鋼材およびコンクリート双方と高い付着性を有していると考えられる。さらに、材齢 28 日の圧縮強度は、RC 床版コンクリートの設計基準強度が 24N/mm²であることを考慮すると、ゴムラテックスモルタルを増厚材や補修材として使用する場合、既設床版の材料強度との乖離が小さく、一体化するために適していると考えられる。

3.2 収縮ひずみ

自己収縮の測定結果を図-3 に示す。同図より、ゴムラテックスモルタルの自己収縮ひずみは、0.05 日経過後に 167×10⁻⁶ まで膨張した後、若干収縮し、最終的に

表-3 材料強度

配合	材齢 (日)	強度 (N/mm ²)				
		圧縮	引張	曲げ	付着	
					鋼材	コンクリート
ゴムラテックス モルタル	1	41.1	—	—	—	—
	7	45.3	3.5	9.8	2.0	3.6
	28	47.4	—	—	—	—
SFRC	1	37.4	—	—	—	—
	7	47.6	5.7	7.2	1.0	6.6
	28	62.5	—	—	—	—

117×10^{-6} の膨張ひずみが発生している。一方、SFRC の自己収縮ひずみは、最終的に 118×10^{-6} の収縮ひずみが発生している。

乾燥収縮の測定結果を図-4 に示す。同図より、ゴムラテックスモルタルは、ほとんど収縮しないことがわかる。質量変化率も非常に小さく、ゴムラテックスモルタルに混和したポリマーのフィルム効果により、供試体内部の水分の蒸発が極めて少ないと考えられる。SFRC は、材齢 28 日の時点で 397×10^{-6} の収縮ひずみが発生している。

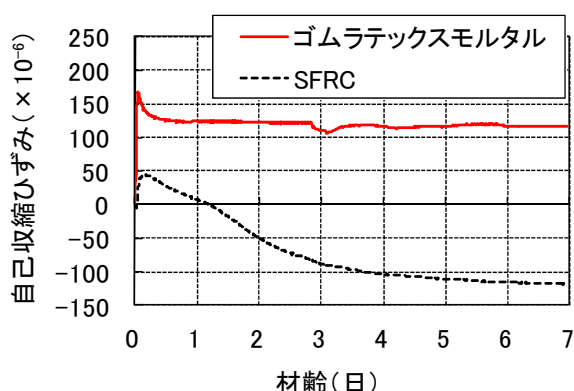


図-3 自己収縮測定結果

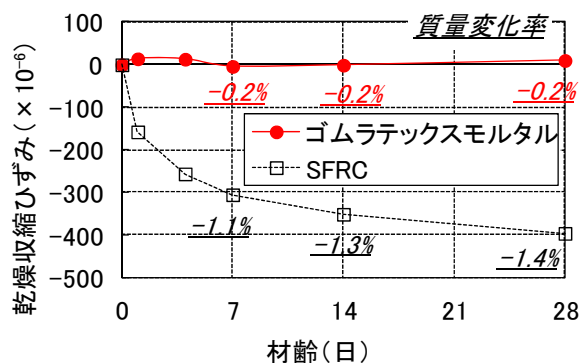


図-4 乾燥収縮測定結果

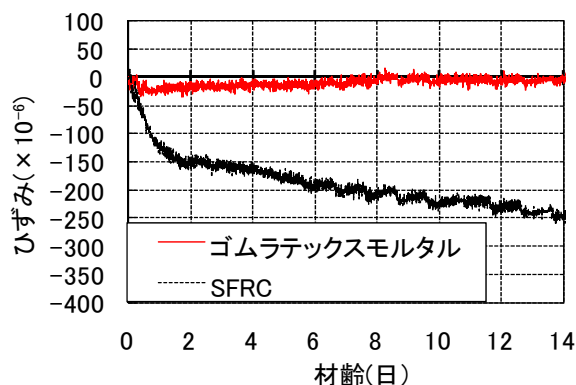


図-5 収縮ひび割れ試験体中央部のひずみ

3.3 ひび割れ抵抗性の評価

収縮ひび割れ試験体中央部のひずみの測定結果を図-5 に示す。同図より、ひずみ測定値に急激な変化点は無く、ひび割れの発生は認められない。SFRC は乾燥収縮の進行により、ひび割れが発生する可能性も懸念されるが、ゴムラテックスモルタルはほとんど収縮せず、拘束により生じる応力が非常に小さいため、ひびわれ抵抗性が高いと考えられる。なお、材齢 28 日まで目視により試験体表面を観察したが、ゴムラテックスモルタルおよび SFRC のいずれの試験体においてもひび割れの発生は認められなかった。

3.4 環境劣化因子に対する抵抗性の評価

(1) 凍結融解抵抗性

図-6 に凍結融解試験により測定した相対動弾性係数を示す。図より、凍結融解 300 サイクルのとき、SFRC の相対動弾性係数は 101.3% であるのに対し、ゴムラテックスモルタルの相対動弾性係数は 97.4% であり、凍結融解繰り返し数が 300 回経過した後も、共に相対動弾性係数は変化しないことが分かる。また、図-7 に凍結融解試験により測定した質量変化率を示す。図より、凍結融解 300 サイクルにおける質量変化率は、SFRC が -0.7% であるのに対し、ゴムラテックスモルタルは、+0.4% である。

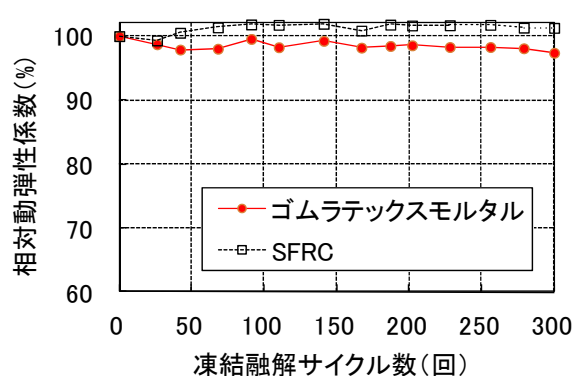


図-6 凍結融解試験（相対動弾性係数）

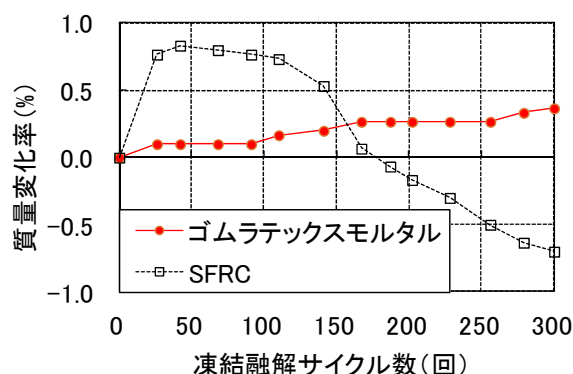


図-7 凍結融解試験（質量変化率）

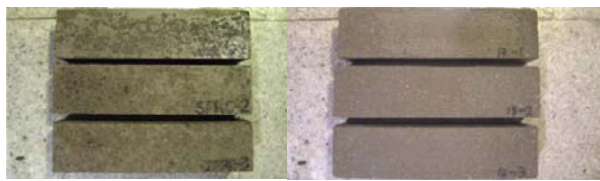


写真-2 凍結融解供試体の外観 (300 サイクル)

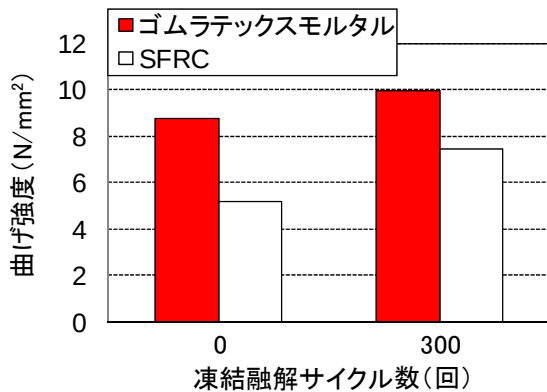


図-8 凍結融解供試体の曲げ強度

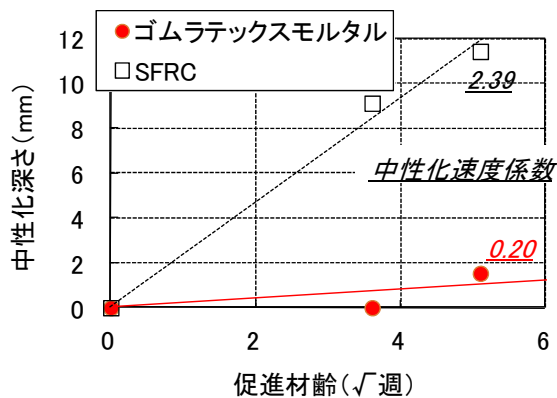


図-9 中性化試験

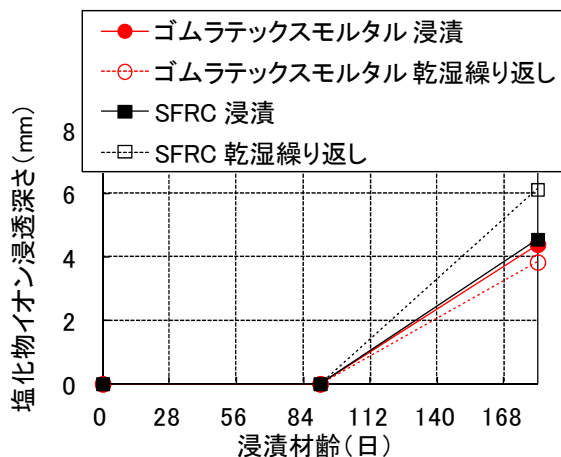


図-10 塩化物イオン浸透深さ試験

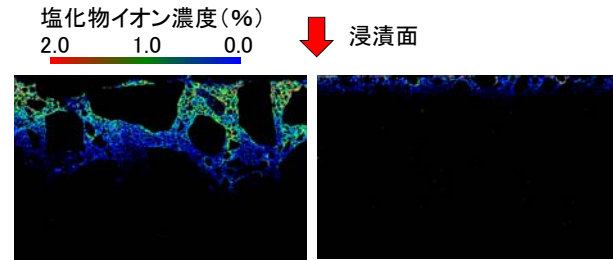


図-11 塩化物イオンの分布
(浸漬開始後 182 日、常時浸漬)

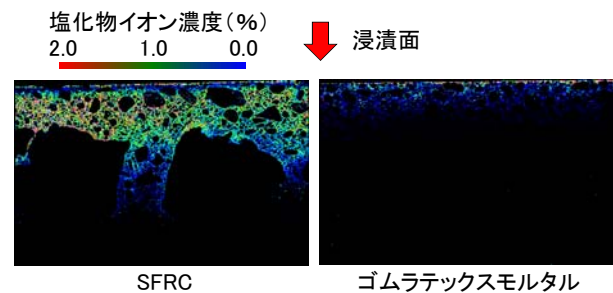


図-12 塩化物イオンの分布
(浸漬開始後 182 日、乾燥浸漬繰り返し)

り、いずれの材料も質量変化率に大きな変動は生じないが、SFRC では凍結融解サイクル数が 100 回を超えると若干質量が減少する傾向が認められる。凍結融解試験の相対動弾性係数と質量変化率および曲げ載荷試験の結果から、ゴムラテックスモルタルおよび SFRC は十分な凍結融解抵抗性を有すると考えられる。なお、写真-2 に示すように、ゴムラテックスモルタルの供試体外観は凍結融解 300 サイクル終了後も表面にポップアウトやスケーリングによる劣化は見られない。また、図-8 に示すように、凍結融解 300 サイクル終了後の供試体の曲げ強度は凍結融解 0 サイクル時の曲げ強度に比べて増加しており、スケーリング劣化による表層モルタルの浮きや剥離が若干認められるものの、ゴムラテックスモルタルおよび SFRC のいずれの供試体も健全な状態であると考えられる。

(2) 中性化速度

図-9 に中性化試験の結果を示す。中性化深さは、供試体を促進環境条件下に設置後、促進材齢 26 週まで測定しており、図中の促進材齢の表記は、促進材齢の 2 乗根の値としている。図より、促進材齢が 26 週の場合は、SFRC の中性化深さが 11.4mm に対して、ゴムラテックスモルタルでは 1.5mm であり、ゴムラテックスモルタルの中性化深さは SFRC に比べて小さい。また、近似直線の傾きから算出した中性化速度係数は、SFRC が 2.39 であ

るのに対し、ゴムラテックスモルタルは 0.20 である。したがって、ゴムラテックスモルタルの中性化速度係数は非常に小さく、透気性が低いと考えられる。

(3) 塩化物イオン浸透深さ

図-10 に塩化物イオン浸透深さ試験の結果を示す。図より、浸漬開始から 91 日経過後では、塩化物イオンの浸透深さは、いずれの材料も 0.0mm であった。浸漬開始から 182 日後では塩化物イオン浸透域が視認され、供試体を常時浸漬した場合の塩化物イオン浸透深さは、SFRC が 4.6mm であるのに対し、ゴムラテックスモルタルは 4.5mm であり、塩化物イオンの浸透深さに差異は認められない。一方、乾燥浸漬を繰り返した場合の塩化物イオン浸透深さは、SFRC が 6.1mm であるのに対し、ゴムラテックスモルタルは 3.8mm であり、ゴムラテックスモルタルの方が塩化物イオンの浸透深さが小さいことが分かる。

また、浸漬開始から 182 日後の供試体は、浸漬面から深さ方向に約 20mm の範囲の面分析を行った。図-11 に常時浸漬した場合の塩化物イオン濃度の分布を示す。塩化物イオンが検出された領域の浸漬面からの深さを測定した結果、SFRC は 11.5mm、ゴムラテックスモルタルは 2.1mm であり、SFRC では塩化物イオン濃度が 1.0% 以上ある領域が広い。フルオレセインナトリウム水溶液および硝酸銀溶液の噴霧による塩化物イオン浸透深さ試験では差異を判断できなかったが、EPMA による面分析の結果から、ゴムラテックスモルタルは SFRC に比べ、塩化物イオンが浸透し難いと考えられる。

図-12 に乾燥浸漬を繰り返した場合の塩化物イオンの分布を示す。図より、塩化物イオンが検出された範囲の浸漬面からの深さを測定すると、SFRC が 13.5mm、ゴムラテックスモルタルが 5.0mm である。また、SFRC では塩化物イオン濃度が 1.0% 以上ある領域が常時浸漬した場合より広がっており、乾燥浸漬を繰り返すことにより表面に近い部分の塩化物イオンが濃縮したと考えられる。一方、ゴムラテックスモルタルでは塩化物イオンが 1.0% 以上ある領域が乾燥浸漬を繰り返した後も少なく、塩化物イオンが濃縮する現象は起こり難いと考えられる。

4. まとめ

本論文では、ゴムラテックスモルタルの耐久性をひび割れ抵抗性および環境劣化因子に対する抵抗性により評価した。本論文で得られた知見を以下に示す。

- (1) ゴムラテックスモルタルの曲げ強度は SFRC より約 1.4 倍高く、鋼材およびコンクリートとの付着強度が 1.0N/mm^2 以上であり、増厚材や補修材として用いた場合、既設床版との一体性に優れると考えられる。
- (2) ゴムラテックスモルタルは自己収縮と乾燥収縮を合わせた収縮ひずみが 100×10^{-6} 程度であり、拘束による引張応力がほとんど生じず、ひび割れ抵抗性が高い。
- (3) ゴムラテックスモルタルは凍結融解抵抗性を有しており、中性化速度係数および塩化物イオンの浸透深さは SFRC に比べて小さく、これらの環境劣化因子に対して十分な抵抗性があると考えられる。

参考文献

- 1) 高木千太郎：橋梁の管理に関する中長期計画の算定と公表ならびに長寿寿命化工事に関する今後の課題、橋梁と基礎、2010.5
- 2) 小林一輔：繊維補強コンクリートー特性と応用ー、オーム社、pp.169-177、1981.6
- 3) 大垣賀津雄、杉浦江、大久保藤和、若林伸介：ゴムラテックスモルタルの既設鋼床版への適用法に関する研究、第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム、pp.53-1-53-8、2007.11
- 4) 社団法人 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ）、pp.209-210、1994.5
- 5) 杉野雄亮、佐竹紳也、大久保藤和、大垣賀津雄、小出宜央：ゴムラテックスモルタルの収縮特性およびひび割れ抵抗性の評価、第 66 回年次学術講演会、pp.51-52、2011.8
- 6) 竹本明朗、岡田収：鋼繊維コンクリートを用いた打重ね床版補強一般国道 43 号辰巳橋、橋梁と基礎、Vol.14, No.11, pp.25-32、1980.11
- 7) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編、pp.214、2001.3