

論文 ラテックスを微量添加したコンクリートのひび割れ部における腐食抑制効果の検証および劣化予測

片山 太貴*1・宮里 心一*2・東 洋輔*3

要旨: 本研究では、現場での経済性に配慮し、微量(セメントに対して0.5wt%)のSBRラテックスを添加したコンクリートを対象に、塩分を内在および曲げひび割れを先行導入した状態における塩害進展期での鉄筋腐食の抑制効果を検証した。その結果、ラテックスにより細孔構造が緻密化することで腐食要因物質の供給を抑制し、また電気抵抗を増加し、マクロセルを形成し難くすることによりひび割れ部での腐食の局所化を抑制することが確認できた。また、コンクリート長軸方向の腐食ひび割れ発生年数を予測した結果、SBRラテックスを微量添加したコンクリートは、無添加に比べてひび割れの発生は遅くなることが明らかになった。

キーワード: ラテックスコンクリート, 曲げひび割れ, 腐食電流密度, 腐食ひび割れ発生年数

1. はじめに

ポリマーセメントモルタルとして知られているラテックスセメントモルタル¹⁾²⁾³⁾の内部では、添加時に水溶液であったラテックスの水分がセメントの水和反応に利用される。また、これと同時に水溶液であったラテックスは水分が失われることによってゴムの膜(ゴムフィルム)を形成する¹⁾。これらの相互作用によりラテックスセメントモルタルは、無添加に比べて力学的に優位な諸性能を得る。しかしながら、その性能は添加するラテックスの種類によって異なる²⁾³⁾。

一般に、ポリマーとして添加されるラテックスは、天然ゴム(NR)ラテックスと合成ゴムラテックスに区別される。ここで、合成ゴムラテックスにはスチレン・ブタジエンゴム(SBR)やクロロプレンゴム(CR)、アクリロニトリル・ブタジエンゴム(NBR)などがある¹⁾。基本的にラテックスを添加した場合は種類に拘らず、曲げ強度や付着強度、乾燥収縮に関する性能が改善される。しかしながら、圧縮強度においては、ラテックスにより形成されたゴムフィルムが強度向上に寄与しない⁴⁾ことから、無添加に比べて低下または同程度になる報告がほとんどである²⁾³⁾。

このように、ラテックスセメントモルタルの種類により諸性能は異なるが、曲げ強度や付着強度、乾燥収縮などの性能が、無添加に比べて改善されることから、近年の土木構造物の長寿命化に適した材料として注目され、セメント質量に対する配合比や様々な使用材料(セメント種類)との組合せに関する検討が行われている。しかしながら、多くの研究において、ラテックスは高価であるため、経済性が課題とされている³⁾⁴⁾⁵⁾。これらの背景と現場コストを踏まえ、本研究では通常のラテックス添加

量(ポリマーセメント比:5~20%)に比べて微量である0.225%の添加に着目した。

また、ラテックスを添加したコンクリートでは、内部がゴムフィルムによって保護され緻密化することが確認されている⁴⁾⁵⁾。このため、腐食要因物質の供給が減少し、かつ腐食セル形成の阻害により、鉄筋腐食を抑制する効果が考えられる。しかしながら、ラテックスコンクリート中の鉄筋に対する腐食速度を評価した事例はない。

以上の背景から本研究では、SBRラテックスを微量添加したコンクリートに劣化要因物質である塩化物イオンを内在させ、曲げひび割れを先行導入した状態における腐食が進展する時期の腐食速度を測定した。また、これに対してマクロセル腐食および基礎的物性を踏まえて評価と考察を行い、ラテックスを微量添加したコンクリートにおける鉄筋の体積膨張による軸方向に生じる腐食ひび割れ発生年数を予測した。

2. 実験手順

2.1 コンクリートの使用材料

本実験での使用材料を表-1に示す。コンクリートに添加したラテックスは国内での出荷量が多く、近年の研究において最も使用されているセメント配合用ポリマーであることから、SBRラテックスを使用した⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

2.2 実験ケースおよびコンクリートの配合

実験ケース、コンクリートの配合およびフレッシュ性を表-2に示す。実験ケースであるラテックス量は、ポリマーセメント比が0.0%と0.225%にした。すなわち、固形分率45%の液体であるポリマーを用いたため、セメントに対するラテックス(ポリマーディスパーション)比(LX/C)は0.0%と0.5%になる。なお、ポリマー中に占め

*1 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻 (学生会員)

*2 金沢工業大学 工学部環境土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 オリエンタル白石(株) 技術研究所 主任研究員 (正会員)

表-1 使用材料

材料名	記号	物性値他
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3340cm ² /g
水	W	地下水
細骨材	S	桜川市岩瀬産砕砂, 表乾密度 2.63g/cm ³
粗骨材	G	桜川市岩瀬産碎石, 表乾密度 2.66g/cm ³ , G _{max} =20mm
ラテックス	LX	SBR ラテックス, ポリマー中に占める固形分率としてのラテックスは 45%
AE 減水剤	Ad	ポリカルボン酸エーテル系化合物
AE 剤	AE	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

ケース	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							フレッシュ性状	
			W	C	LX	S	G	Ad	AE	SL (cm)	Air (%)
LX-無	50.0	45.0	165	330	0.00	811	1003	3.30	0.02	12.5	3.5
LX-有					1.65				0.01	10.5	3.7

※全ケースに Cl⁻ = 15kg/m³ を混入

表-3 測定項目一覧

測定項目	測定方法・算定方法	材齢(日)	寸法(mm)	配合
マクロセル腐食電流密度	無抵抗電流計	28, 56	100×100×400	Cl ⁻ 内在
マイクロセル腐食電流密度	交流インピーダンス法	28, 56	100×100×400	Cl ⁻ 内在
総腐食電流密度	マクロセル(アノード)とマイクロセルの腐食電流密度の和	28, 56	100×100×400	Cl ⁻ 内在
電気抵抗	テスター	112	100×100×400	Cl ⁻ 内在
カソード分極曲線	ポテンシostatおよびガルバナスタット	112	100×100×400	Cl ⁻ 内在
塩化物イオンの実効拡散係数	電気泳動法(JSCE-G517)	28	φ 100×50	
細孔径分布	水銀圧入法	28	表面から深さ 10	

る 55%の水分は単位水量の一部として扱った。また、本研究では内在塩分による塩害促進を行うため、Cl⁻ = 15kg/m³となるように NaCl を混入した。フレッシュ性状は、スランピングが 12±2.5cm, 空気量が 4.5%±1.5%となるように調整した。

なお、ラテックスは、アジテーター車への後添加・練混ぜを想定したため、ベースコンクリートを練混ぜた直後にラテックスを混入し、30秒間に亘り混ぜることで完成とした。

2.3 供試体概要

本実験では、埋設された鉄筋の腐食速度を測定するため、図-1に示すような 100×100×400mmの角柱供試体を作製した。腐食のモデルは、既往の研究を参考として、単一鉄筋要素内で発生する腐食をマイクロセル腐食、および異なる鉄筋要素間で発生する腐食をマクロセル腐食と定義した⁷⁾。そのため、コンクリート内部には長さ 45mm に分割した 7本の鉄筋(D10, SD295)を要素とする分割鉄筋を芯かぶり 50mm となるように埋設した。要素

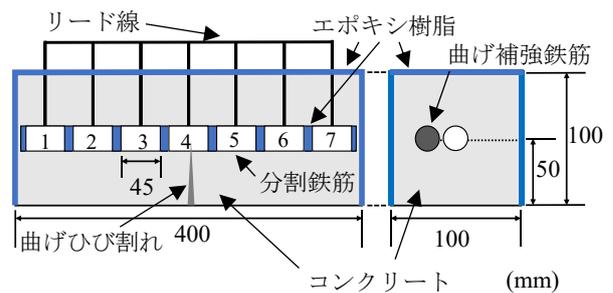


図-1 角柱供試体概要

とする鉄筋は、中央にリード線をはんだ付けし、鉄筋の両端をエポキシ樹脂で絶縁接続した。

また、コンクリート内部にエポキシ樹脂塗装を施した曲げ補強筋(D10, SD295)も分割鉄筋と並列に設置し、材齢 14 日目に曲げ荷重によるひび割れの導入を行った。また、ひび割れ導入後、ひび割れ面以外のコンクリート表面をエポキシ樹脂で被覆した。

なお、上記とは別に基礎的物性を評価するため塩分を

含まない円柱供試体($\phi 100 \times 200 \text{mm}$)を作製した。

2.4 暴露方法

供試体は、材齢3日後に脱型を行い、その後材齢28日まで乾燥気中(20°C , RH60%)で養生を行った。また、角柱供試体は、その後湿潤気中(40°C , RH90%)で暴露を行った。

2.5 試験方法

本研究で行った測定一覧および概要を表-3に示す。本研究では、鉄筋の腐食を評価するため、マクロセル腐食電流、ミクロセル腐食電流、電気抵抗、およびカソード分極曲線を測定した。また、コンクリートの基礎的物性を評価するため、塩化物イオンの実効拡散係数および細孔径分布を測定した。分割鉄筋のマクロセル腐食電流密度は、無抵抗電流計を用いて、各鉄筋要素に出入する電流を測定して算出した。また、ミクロセル腐食電流密度は、各鉄筋表面の分極抵抗を交流インピーダンス法により10kHz~1mHzの範囲において、50mVの電圧を与えて測定し、算出した。さらに、マクロセルアノード電流密度とミクロセル腐食電流密度を足し合わせ、総腐食電流密度を算出した⁸⁾。電気抵抗は、テスターを用いて、要素1とその他の要素(2,3,4,5,6,7)間の電気抵抗を測定した。カソード分極曲線はポテンショスタットとガルバノスタットを用いて測定した。使用した照合電極は飽和銀塩化銀電極(SSE)として、鉄筋要素の電位を1mV/sで強制的に卑へ変化させ、初期電位から電位差-590mVまでの電流密度を評価した⁷⁾。

また、基礎物性となる塩化物イオンの実効拡散係数は、 $\phi 100 \times 50 \text{mm}$ の円柱供試体にJSCE-G517を参考として電気泳動法を行い、算出した。細孔径分布は、水銀圧入法により表層部である表面から深さ10mm付近の試料を用いて細孔径分布を測定した。

3. 腐食に関する実験結果および考察

3.1 総腐食電流密度

図-2に材齢28日の総腐食電流密度の結果を示す。これによると、材齢28日におけるLX-有の総腐食電流密度は、LX-無とほぼ同等であることが確認できる。しかしながら、図-3に示す材齢56日の総腐食電流密度について、ひび割れ部におけるLX-有の総腐食電流密度は、LX-無より小さいことが確認できる。

3.2 電気抵抗

図-4に鉄筋要素間の電気抵抗を示す。これによると要素2~4間において、LX-有の電気抵抗はLX-無と比べて僅かに大きくなることが確認できる。一方、ひび割れ部を跨いだ要素5~7では、LX-有の電気抵抗がLX-無に比べて、明らかに大きくなることが確認できる。ここで、要素5~7における電気抵抗が要素2~4に比べ

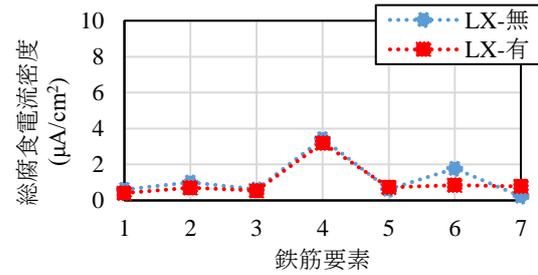


図-2 材齢28日の総腐食電流密度

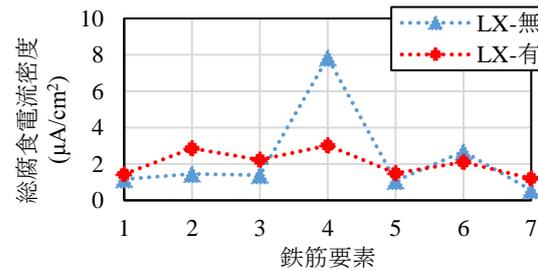


図-3 材齢56日の総腐食電流密度

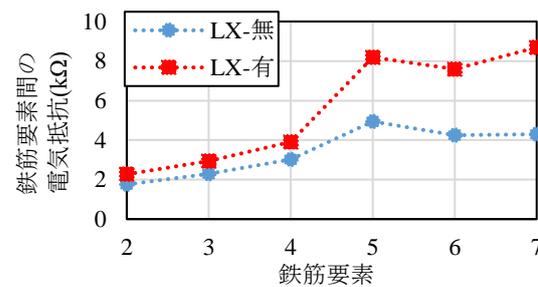


図-4 鉄筋要素間の電気抵抗

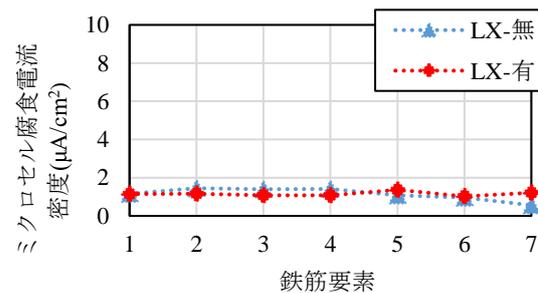


図-5 ミクロセル腐食電流密度(材齢56日)

て大きくなる理由は、ひび割れによって導電性が阻害されたためと考えられる。なお、要素6は後述のとおりアノードになっていたことから、他箇所のモルタルより要素6の周辺におけるモルタルの塩化物イオンが濃く、電気抵抗が若干小さくなっていた可能性はある。

3.3 鉄筋の腐食速度に関する考察

図-2および図-3の経時変化より、LX-有の総腐食電流密度は、LX-無に比べて増進しないことが確認できた。これについて、材齢56日のミクロセルおよびマクロセ

ル腐食電流密度の分布から考察する。図-5によると、ラテックスの有無がマイクロセル腐食電流密度に及ぼす影響はなかった。一方、図-6に示したマクロセル腐食電流密度では、LX-無の場合にアノード電流がひび割れ部に集中しているが、LX-有では回路全体でアノードとカソードが分散し、ひび割れ部における局所的なマクロセルアノード電流密度は低いことが確認できる。すなわち、LX-有では、腐食電流の一局化が緩和されていた。これは図-4に示すように、ラテックスを添加することで電気抵抗が増加し、マクロセル腐食の形成を妨げたためと考えられる。

また、図-7に示す非ひび割れ部(要素2)、およびひび割れ部(要素4)のカソード分極曲線より、LX-有ではLX-無より曲線は左にシフトしていることが確認された。特にこの傾向は、ひび割れ部において顕著であった。したがって、ラテックスによって腐食要因物質である酸素の供給が抑制され、腐食速度が低減したことも考えられる。

4. 基礎物性に関する実験結果および考察

4.1 塩化物イオン実効拡散係数

図-8に塩化物イオン実効拡散係数の結果を示す。これによると、LX-有の実効拡散係数はLX-無より低いことが確認できる。

4.2 細孔径分布

図-9に細孔径分布を示す。これによると、LX-有ではLX-無に比べて、細孔空隙径の最大ピーク付近(50nm~100nm)の細孔量が減少し、30nm以下の微細な空隙が増加し、300nm以上の粗大な空隙が減少していることを確認できる。

4.3 基礎物性に関する考察

図-8より、LX-有の塩化物イオンの拡散はLX-無に比べて抑制されることが確認できた。この理由として、ラテックスを添加することにより、ゴムフィルムが形成され、図-9に示すように粗大な毛細管空隙が減少または緻密化することで、塩化物イオンの拡散速度が低下もしくは拡散経路の迂回に寄与したと考えられる。また、前章で確認できた塩分を含むラテックスコンクリートの腐食抑制効果は、この緻密化が影響したと考えられる。

5. 腐食ひび割れ発生年数の予測

5.1 算定方法

これまでの結果よりラテックスを微量添加したコンクリートは、無添加に比べて鉄筋腐食を抑制することが確認できた。これは、ラテックスによって細孔が緻密になることで、様々な腐食要因物質の供給を抑制し、また電気抵抗も増加したためと考えられる。上記の結果を踏まえ、3章の内在塩分および先行曲げひび割れを有する

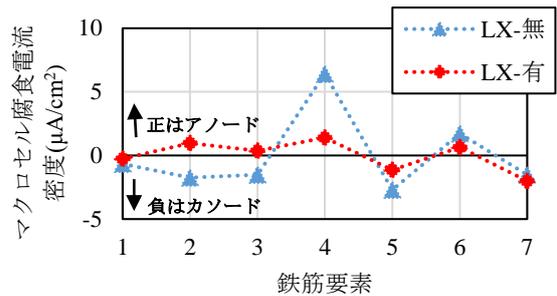


図-6 マクロセル腐食電流密度(材齢 56 日)

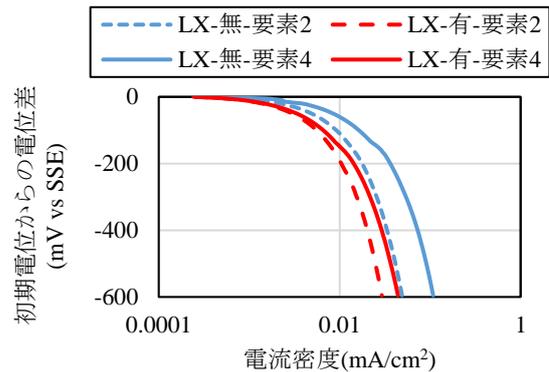


図-7 カソード分極曲線

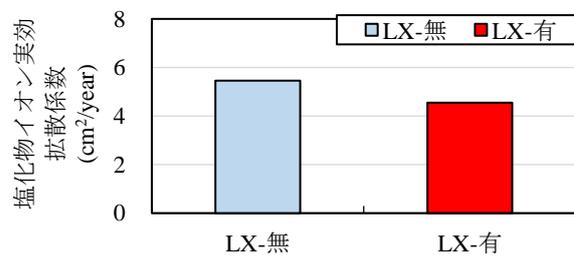


図-8 塩化物イオン実効拡散係数

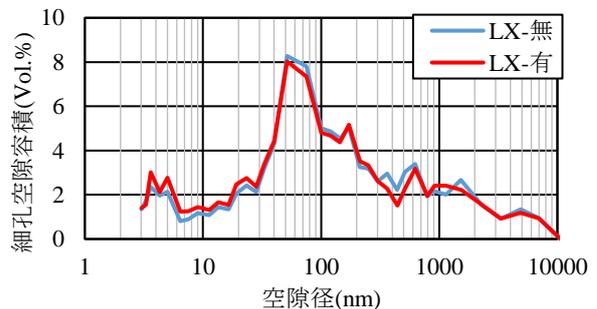


図-9 細孔空隙径分布

角柱供試体を対象に測定した総腐食電流密度から、コンクリート表面での鉄筋に沿った腐食ひび割れ発生年数を予測した。図-10に腐食ひび割れ発生年数の算定手順を示す。なお、ひび割れ発生腐食量について、中性化による場合に関して、2013年のコンクリート標準示方書[維持管理編]では10mg/cm²とされていたが、2018年

度のコンクリート標準示方書改訂資料—維持管理編・規
準編においては種々の条件により異なることが記述さ
れており¹⁰⁾、また近年の研究において 10mg/cm² 以上で
あることが報告されていて^{11),12)}、明確な数値の提示はな
くなくなった。そのため、本検討では文献 12)の予測式により
ひび割れ発生腐食量を算出した。また、本検討でのひび
割れ発生年数の算定は 20℃環境とした。文献 13)による
と、アレニウス則により 20℃の温度変化でモルタル中の
鉄筋の腐食電流密度は 4 倍となる。したがって、40℃の
環境下での 1 日は、20℃の環境下において 4 日に相当す
ると考えられる。そのため、材齢 28 日以後に昇温して 56
日まで促進暴露を行った時点での角柱供試体の期間は、
もし 20℃で継続していたならば 140 日(=28 日+28 日×
4)に相当する。

算定に用いた式を下記にそれぞれ示す。式(1)により実
験結果の総腐食電流密度を総腐食速度に変換し、次に式
(2)により 20℃環境下の相当期間における鉄筋腐食量を
算出した。また、式(3)¹²⁾に代入した圧縮強度は、材齢 28
日に JIS A 1108 に準拠して行った。各ケースの圧縮強度
を表-4 に示す。

$$V = \frac{m \cdot I_{corr}}{z \cdot F} \quad (1)$$

ここで、 I_{corr} : 総腐食電流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
 V : 鉄の腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$)
 m : 鉄の原子量(=55.8g)
 z : 鉄のイオン価数(=2 : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$)
 F : ファラデー定数(=96500A · s)

$$W = \sum V_i t_i \quad (2)$$

ここで、 W : 鉄筋腐食量(mg/cm^2)
 V_i : 暴露 i 年における腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$)
 t_i : 暴露期間 i 年(year)

$$W_u = -(0.19d + 0.06x + 2) \times \ln(f_c) + (0.1d + 47) \quad (3)$$

ここで、 W_u : ひび割れ発生時の鉄筋腐食量(mg/cm^2)
 d : 鉄筋径(mm)
 x : かぶり厚さ(mm)
 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

5.2 算定結果

図-11 に総腐食速度の経時変化を、図-12 に鉄筋腐食
量の経時変化を示す。なお、総腐食速度の算定はひび
割れ部(要素 4)の総腐食電流密度より算出した。これらの
結果から、LX-無の総腐食速度は増加傾向にあるが、LX-
有は総腐食速度が安定傾向にあり腐食進行は遅いこと
が確認できる。

また、図-12 の経時変化よりそれぞれ回帰式を算出し、
式(3)より求めたひび割れ発生腐食量(表-5)からコンク
リート表面における鉄筋に沿った腐食ひび割れ発生年

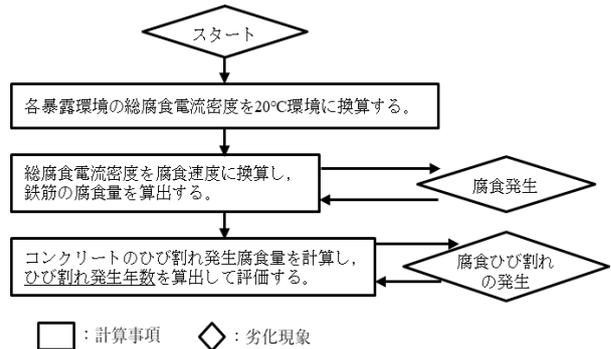


図-10 ひび割れ発生年数の算定手順

表-4 材齢 28 日の圧縮強度

ケース	圧縮強度(N/mm ²)
LX-無	37.3
LX-有	37.1

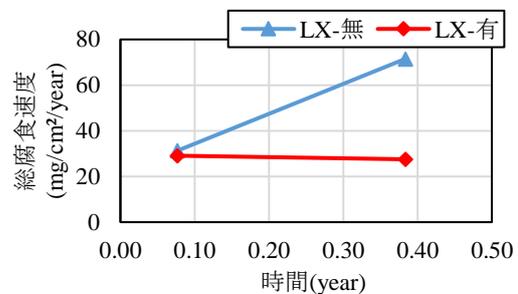


図-11 総腐食速度の経時変化

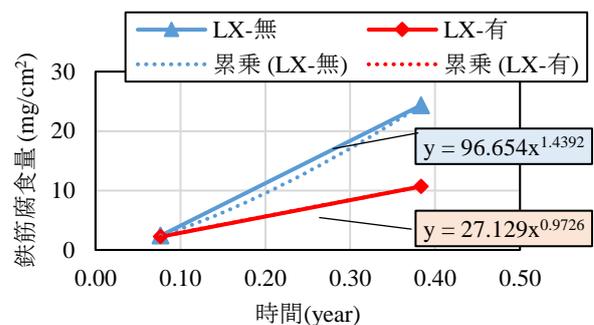


図-12 鉄筋腐食量の経時変化

表-5 各ケースのひび割れ発生腐食量

ケース	ひび割れ発生腐食量(mg/cm^2)
LX-無	24.11
LX-有	24.15

数(図-13)を求めた。これによれば、LX-有の腐食ひび割
れ発生年数は LX-無の 2 倍以上であることが確認できる。
したがって、曲げひび割れが先行導入されていたコンク
リートにおける、鉄筋軸方向に沿った腐食ひび割れの発

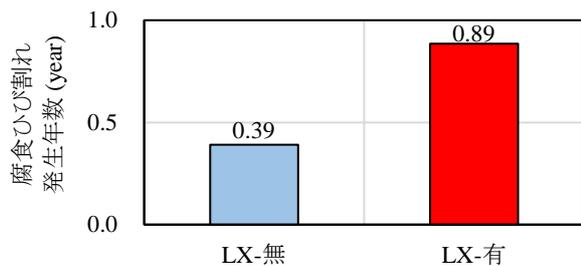


図-13 コンクリート表面の腐食ひび割れ発生年数

生は、ラテックスの微量添加により遅延することが期待できる。

また、SBR ラテックスの添加によって、圧縮強度が減少することが懸念されたが、表-4 の結果より強度を保持できていることが確認できた。このことから、ラテックスを微量添加したコンクリートの内部組織は、無添加と同程度の強度を有しつつ、ゴムフィルムによる腐食要因物質の供給抑制効果を持つことが確認できた。

6. まとめ

本研究では、現場適用を目指すべく経済性に配慮し、微量の SBR ラテックスを添加したコンクリートに塩化物イオンを内在させ、ひび割れ発生後(腐食が進展する時期)の腐食速度を測定した。また、基礎物性に関する評価や腐食ひび割れ発生時期の予測を行った。本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) SBR ラテックスを微量(ポリマーセメント比 0.225% , LX/C=0.5%)添加したコンクリートは、ひび割れ部における腐食の一局化を抑制する。
- (2) SBR ラテックスを微量添加したコンクリートは、外部からの酸素の供給に伴うカソード反応を抑制する。
- (3) SBR ラテックスを微量添加したコンクリート内部では、電気抵抗が増加する。
- (4) SBR ラテックスを微量添加したコンクリートは、無添加に比べて粗大な空隙が減少し、緻密化する。
- (5) SBR ラテックスを微量添加したコンクリートは、鉄筋に沿った腐食ひび割れ発生までの年数が無添加に比べて増加する可能性が予測された。
- (6) SBR ラテックスを微量添加したコンクリートは、無添加と同程度の圧縮強度を有する。

参考文献

- 1) 大浜嘉彦：ラテックスの土木・建築分野への利用，日本ゴム協会誌，Vol.47，No.9，pp.594-608，1974

- 2) 河野俊夫：ポリマーセメントモルタルおよびコンクリートの特性，コンクリートジャーナル，Vol.11，No.4，pp.18-26，1973
- 3) 河野俊夫：ラテックスセメントモルタルについて，日本ゴム協会誌，Vol.35，No.1，pp.52-58，1962
- 4) 藤原正佑，三坂岳広，井上善彦，熊野知司：SBR を添加したコンクリートの力学特性と耐久性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1291-1296，2013
- 5) 郭 度連，森山 守，菊池 徹，李 春鶴：ラテックス改質速硬コンクリートの基礎物性と耐久性能に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1939-1944，2015
- 6) 今井昭夫：工業化されたラテックス：昔と今，日本ゴム協会誌，Vol.88，No.9，pp.345-350，2015
- 7) 長谷川裕介，宮里心一，親本俊憲，横関康祐：ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食速度解析モデルの提案，コンクリート工学論文集，Vol.17，No.1，pp.31-40，2006
- 8) 宮里心一，大即信明，小長井彰祐：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.547-552，2001
- 9) 宮里心一，上田隆雄，野島昭二：補修費用のみならず点検費用も考慮した LCC の試算，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 12，pp.165-172，2012
- 10) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書改定資料 維持管理編・規準編，コンクリートライブラリーNo.131，p.31，2018
- 11) 松島 学，横田 優，関 博：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1669-1674，2004
- 12) 橘高義典，LE, P. N., 塚越雅幸，松沢晃一：鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1145-1150，2011
- 13) 三田村恒彦，宮里心一：気温変化を考慮したコンクリート中鉄筋の腐食速度推定手法の提案，材料，Vol.58，No.8，pp.666-671，2009