

論文 低分子量水溶性セルロースエーテルによるコンクリートの初期表面ひび割れ低減に関する基礎的研究

星 健太*1・小西 秀和*2・小山 明男*3・坂本 遼*4

要旨: コンクリートの耐久性の確保には、ひび割れ抑制が重要な課題である。本報では、各種ひび割れの中でも、未だ解決策が示されていないと考えられる、打込み後、一週間以内に発生する初期表面ひび割れに着目して検討した。初期表面ひび割れの抑制対策は、コンクリートの増粘と自由水の表面張力低減にあると推定し、両方に効果のある混和剤として、低分子量水溶性セルロースエーテルを選択し、その効果をモルタルおよびコンクリートにより確認した。その結果、低分子量水溶性セルロースエーテルは、初期表面ひび割れ低減に効果があることがわかり、また、そのメカニズムおよび低減に関する実験式を提案した。

キーワード: 初期表面ひび割れ, セルロースエーテル, 増粘, 表面張力, ブリーディング, 材料設計

1. はじめに

鉄筋コンクリートの耐久性は、そのかぶり厚さにより担保されるが、ひび割れが発生することによって鉄筋の腐食は計画よりも進行し、耐久性に大きな影響を与えるとされている。ひび割れの原因としては、セメントの水和反応、水和熱による温度応力、骨材などの沈降、硬化体の温度変化、硬化体中の水分の移動、水和物の炭酸化などが挙げられ、それらによる体積変化によって生じるとされている。コンクリートの施工性能を確保するには単位水量がある程度必要であり、骨材などの沈降、水和反応による温度上昇および自己収縮など、避けられない理由も多い。各種のひび割れの中でも、コンクリートの打込みから一週間以内のごく初期の打込み面に生じるひび割れは、未だ的確な解決方法が確立されていないのが現状である。この打込み面に生じる初期表面ひび割れ(以下、EAC と略す)の主な原因として、材料の沈降と表面の乾燥による収縮が挙げられる。解決策として、沈降の抑制には、コンクリートの粘性を上げることが、また、収縮の抑制には、コンクリート中の自由水の表面張力低減が有効と考えられる。筆者らは、この両特性を兼ね備える混和剤として低分子量水溶性セルロースエーテル(以下、LCE と略す)に着目した。

水溶性高分子を添加したセメント系マトリクスに関して、Bentz らは、低分子量の各種水溶性高分子をコンクリートに添加することで、コンクリート中での物質の拡散係数を減少できることを報告している¹⁾。また、Lin らは、低分子量のヒドロキシプロピルメチルセルロースをモルタルに添加することにより、EAC を低減できることを報告している²⁾。筆者らは、LCE を添加したモルタルおよび

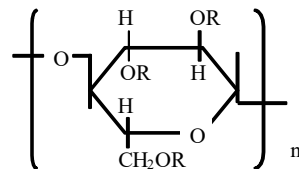
コンクリートのフレッシュ性状や硬化性状に関する各種実験を継続的に実施している³⁾。

本報では、EAC 低減について、化学構造の異なる各種の LCE の添加効果を検討するとともに、モルタルだけでなくコンクリートにおいてもその効果を確認した。また、実施工を考慮し、風速、配筋条件および水セメント比の影響についても検討し、LCE によるコンクリートの EAC 低減のメカニズムの解明と、これに関する実験式の提案を実施した。

2. セルロースエーテルの特性

セルロースエーテル(以下、CE と略す)は、天然パルプから合成される水溶性高分子の一種であり、CE に導入された置換基の種類と量および分子量の調整により多様な CE が得られ、使用条件や用途に合わせて使い分けられている。その化学構造を図-1 に示す。

CE の特性と各種セメント系マトリクスの特性値の関係については、CE の分子量 (M) とセメント系マトリクスへの添加量 (C) が、左官モルタル、水中不分離性コンクリートおよび高流動コンクリートなどのフレッシュ物性と高い相関性が示され、これに関する実験式(1)



R: - H, - CH₃, - CH₂CH(OH)CH₃, - CH₂CH₂OH
 図-1 セルロースエーテルの化学構造

*1 明治大学大学院 理工学研究科建築・都市学専攻 (学生会員)

*2 信越化学工業(株) 合成技術研究所 工修 (正会員)

*3 明治大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

*4 三井住友建設(株) 技術研究所 工修

表-1 実験概要

シリーズ	評価対象	W/C(%)	CE	検討項目	測定項目
1	モルタル	50	MC HEC HPMC	・LCEによるEAC低減効果の確認とその基礎的なメカニズムの検討	・フリーディング量 ・初期質量変化量 ・モルタル粘度 ・ひび割れ幅および長さ ・圧縮強度(材齢1週, 4週, 8週, 13週)
2	コンクリート	30 60	HPMC	・配筋条件および水セメント比がコンクリートのEAC低減効果に与える影響	・フリーディング量 ・ひび割れ幅および長さ ・圧縮強度(材齢1週, 4週)
3	モルタル	30 60	HPMC	・LCEによるコンクリートのEAC低減のメカニズムおよび実験式	・シリーズ2で用いたコンクリート中のモルタル相の粘度

MC:メチルセルロース, HEC:ヒドロキシエチルセルロース, HPMC:ヒドロキシプロピルメチルセルロース

が提案されている^{4),5)}。つまり, CEは求められる特性に対して, 材料設計できる物質であるといえる。

$$K \propto (M^{0.67} \times C^{1.0}) \quad (1)$$

ここに, K:各フレッシュ性状の特性値によって決定される実験定数

本報では, 低分子量のCEを取り上げたが, CEの分子量と粘度は相関があり, 低分子量から中分子量の領域では, 水溶液粘度に対する分子量依存性が異なり, 臨界分子量(8×10⁴g/mol)以上では分子同士の絡み合いが起り, 著しく水溶液粘度は高くなる⁶⁾。さらに, 高分子量領域のCEを含む場合は, 重量平均分子量は水溶液粘度の対数で表されると報告されている⁷⁾。

建築・土木分野および他の用途でも, 比較的粘度の高い中・高分子量のCEが使用されている。低分子量のCE, つまりLCEは, 医薬用途のフィルムコーティング剤やカプセル基剤などにのみ用いられている。

コンクリートにCEを添加した場合, 水中不分離性コンクリートなどにみられるように, その増粘性により, 単位水量増加, 減水剤添加量増加などが必要となり, 本報で対象とする普通コンクリートなどでは問題があると筆者らは考えた。そこで, CEの中で, 表面張力低減効果と適度な増粘効果を併せもつ, LCEを選択してコンクリートのEAC低減を検討するに至った。

3. 実験概要

3.1 実験計画

表-1に実験概要を示す。はじめに, LCEによるEAC低減の基本的なメカニズムを解明するモルタル実験(シリーズ1)を行い, コンクリートに評価対象を拡げ, 風速, 配筋条件および水セメント比がEAC低減効果に与える影響を検討する実験(シリーズ2)を実施した。次に, シリーズ1およびシリーズ2で用いたマトリックスのモルタル相を対象とし, LCEによるコンクリートのEAC低減メカニズムの解明と, これに関する実験式を導出する実験(シリーズ3)を行った。

3.2 使用材料

使用材料を表-2および表-3に, 各種LCEの物性を表-4に示す。シリーズ2およびシリーズ3では, LCEにHP6のみを用いた。

表-2 使用材料(シリーズ1)

種類	物性
結合材	C 普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm ³
細骨材	S 珪砂5号 表乾密度: 2.63g/cm ³ , 吸水率: 0.23% 珪砂6号 表乾密度: 2.62g/cm ³ , 吸水率: 0.36%
練混ぜ水	W 20±3°Cに調整した水道水
AE剤	主成分: 変性アルキルカルボン酸系化合物

表-3 使用材料(シリーズ2およびシリーズ3)

種類	物性
結合材	C 普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm ³
細骨材	S1 陸砂 表乾密度: 2.61g/cm ³ , 吸水率: 1.64% S2 陸砂 表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 1.26%
粗骨材	G1 硬質砂岩碎石 表乾密度: 2.63g/cm ³ , 吸水率: 1.05% G2 硬質砂岩碎石 表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 0.98%
練混ぜ水	W 20±3°Cに調整した水道水
AE減水剤	主成分: リグニンスルホン酸系化合物
高性能AE減水剤	主成分: ポリカルボン酸系化合物
消泡剤	主成分: ポリエーテル系

表-4 LCEの物性

セルロースエーテル		分子量 ×10 ⁴ (g/mol)	水溶液粘度 【2.0%, 20°C】 (mPa·s)
種類	表記記号		
MC	MC	2.3	4.0
HEC	HEC	8.1	14.9
HPMC	HP6	4.0	6.04
	HP50	17.9	46.7

表-5 モルタル調合概略(シリーズ1)

供試体記号	W/C (%)	C/S (重量比)	LCE (C×%)	単位量(kg/m ³)		
				W	C	S
50-Plain	50	0.70	0.00	369	738	1054
50-LCE-0.5			0.50			
50-LCE-1.0			1.00			

※ 珪砂5号および6号を1:1で混合した

3.3 供試体の作製

(1) モルタルによる検討(シリーズ1)

モルタルの調合概略を表-5に, 用いた型枠および試験条件を表-6に示す。モルタルの打込み直後に均し作業を行い, 試験環境に型枠を静置した。なお, 供試体個数は, 1水準につき3個とした。

(2) コンクリートによる検討(シリーズ2)

コンクリートの調合概略を表-7に, 用いた型枠および試験条件を表-8に示す。均し作業および試験環境はシリーズ1と同じとし, 有風条件では送風機と風洞を用いた。供試体個数は, 1水準につき2個とした。

(3) EAC低減の実験式の導出(シリーズ3)

モルタル供試体を, 表-7のコンクリート調合から粗骨材を除き, 体積比を変えずに, 体積の合計が1,000Lと

なるように計算したモルタル調合をもとに製造した。

3.4 測定項目および測定方法

(1) EAC 幅および長さ

モルタル供試体は、打込み 24 時間後に脱型し、顕微鏡により材齢 1 日、3 日、7 日のひび割れ幅および長さを測定した。コンクリート供試体は、材齢 3 日で脱型し、ひび割れ幅の測定にはクラックスケールを用い、ひび割れ長さは、発生したひび割れに糸を添わせ、ひび割れの始点と終点を記録することで測定した。なお、ひび割れ総面積を式(2)によって算出した。

$$\text{ひび割れ総面積 } A_c = \Sigma (\text{平均幅} \times \text{長さ}) \quad (2)$$

(2) ブリーディング

JIS A 1123 に準拠して、モルタルおよびコンクリートのブリーディング量を測定した。

(3) 初期質量変化量

4×4×16cm の角柱供試体を作製し、打込み後 24 時間までの質量変化をモルタルの初期質量変化量とした。

(4) 圧縮強度

JIS R 5201 および JIS A 1108 に準じて、モルタル供試体およびコンクリート供試体の圧縮強度を測定した。

(5) モルタル粘度

B-H 型回転粘度計を用い、モルタルのみかけ粘度を測定した。ローターは、H2 (1.6mm×47.2mm) および H3 (1.6mm×34.7mm) を用い、回転速度を 20rpm、ずり速度は 5.94s⁻¹ および 5.54s⁻¹、回転時間は 2 分間とした。

4. 実験結果および考察

4.1 モルタルによる検討 (シリーズ 1)

(1) モルタルにおける EAC

図-2 に、モルタル供試体のひび割れ総面積および平均幅を示す。LCE の添加により、ひび割れ総面積および平均幅は低減され、MC ≤ HEC < HPMC の順に低減効果が大きくなった。LCE は化学構造の違いにより表面張力低減効果が異なるが、図-3 に示すように、LCE 水溶液の表面張力とひび割れ総面積は高い相関を示している。よって、LCE により自由水の表面張力が低下し、表面収縮が低減されたことが推察される。

(2) ブリーディングおよびモルタル粘度の影響

図-4 に、モルタルにおける初期質量変化量、ブリーディング量およびモルタル粘度を示す。ここでは、初期質量変化量 = ブリーディング量 + 水分蒸発量とした。LCE の増粘効果および保水性により、モルタル粘度は上昇し、ブリーディングおよび初期質量変化は抑制された。ベースモルタルはブリーディングが多く、それに伴う沈降が鉄筋などに拘束されることでひび割れを生じたと考えられる。LCE を添加した場合、モルタル粘度は高く、ブリーディングは低減されたため、沈降によるひび割れ

表-6 型枠および試験条件 (シリーズ 1)

均し作業 試験環境	打込み直後 20°C・60%RH
型枠 平面図 および 立面図	<p>2本の通し鉄筋は、脱型後も拘束力を持たせるために配筋した</p>

表-7 コンクリート調合概略 (シリーズ)

供試体記号	W/C (%)	LCE (C×%)	2 ^{s/a} (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
60-Plain	60	0.00	40	185	308	702 (S1)	1061 (G1)
60-LCE-0.25		0.25					
60-LCE-0.5		0.50					
60-LCE-1.0		1.00					
60-LCE-2.0		2.00					
30-Plain	30	0.00	44	160	533	727 (S2)	926 (G2)
30-LCE-0.25		0.25					
30-LCE-0.5		0.50					
30-LCE-1.0		1.00					

表-8 型枠および試験条件 (シリーズ 2)

検討項目	配筋条件の影響		水セメント比の影響
鉄筋比(%)	0.52	0.26	0.26
かぶり厚さ(mm)	25	25, 40	25
水セメント比(%)	60		60, 30
風速(m/s)	0		0, 4.0±0.5

型枠 平面図 鉄筋比 : 0.52%	
型枠 平面図 鉄筋比 : 0.26%	
型枠 立面図 鉄筋比 : 0.26% の場合	

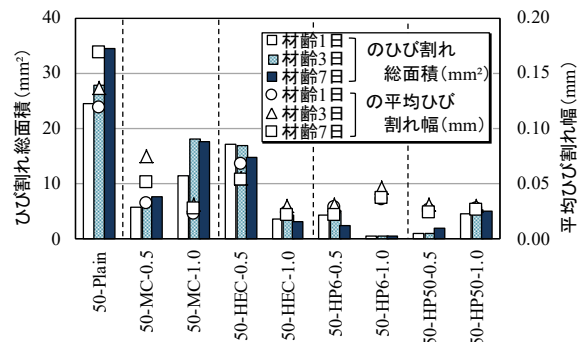


図-2 ひび割れ総面積および平均幅 (シリーズ 1)

が抑制されたと推察される。また、ブリーディングが抑制されることで、水分蒸発量は無添加ものよりも大きくなるが、EAC は低減された。これより、LCE による表面張力低減がモルタル表面収縮の抑制に寄与していると推察される。

(3) LCE の EAC 低減メカニズムおよびひび割れ誘発係数

上記のようにモルタルの EAC は、材料沈降、水分逸散および表面収縮などのメカニズムが複合的に作用しており、これらに LCE の増粘効果、保水性および表面張力低減効果が機能しているものと考えられる。ここで、材料沈降の影響要因としてモルタル粘度を、水分逸散および表面収縮の影響要因として初期質量変化量を取り上げ、材齢 1 週の圧縮強度を考慮し、以下の式(3)により、ひび割れ誘発係数を算出した。

表面張力低減効果については、LCE 水溶液濃度 0.2% 以上で表面張力はほぼ一定となることと⁸⁾、表-5 および表-7 に示す配合上では LCE の添加量によらずマトリックスの水溶液濃度は 2.0% 以上となることから、化学構造に影響されるといえるが、その差は小さいため、表面収縮の影響要因として考慮していない。

$$\text{ひび割れ誘発係数 } CF = \frac{a}{b\sqrt{Fc}} \quad (3)$$

ここに、a:初期質量変化量 (g/mm²)

b:モルタル粘度 (Pa·s)

Fc:材齢 1 週の圧縮強度 (N/mm²)

図-5 に示すように、ひび割れ誘発係数とひび割れ総面積には高い相関性が認められた。したがって、EAC 低減に、LCE によるマトリックスの材料分離抵抗性の向上および蒸発とブリーディングによる水分逸散量の低減が作用していることが推察できる。

(4) 圧縮強度

表-9 にモルタル供試体の圧縮強度を示す。LCE の添加により強度がやや低下する傾向がみられた。この原因として、ベースモルタルは AE 剤を添加し、微細な気泡により空気量を確保したのに対して、LCE を添加したものは粘性増加によるエンラップトエアを、所定の空気量を満足するために消泡剤により調整したため気泡の粗大化が起こったこと、ならびに、LCE の添加による初期材齢での水和反応の遅延が考えられる。

4.2 コンクリートによる検討 (シリーズ 2)

(1) 配筋条件の影響

図-6 に、配筋条件が異なる場合のひび割れ総面積および最大幅を示す。LCE による EAC 低減効果は配り厚さが小さい、すなわち、ひび割れが最も発生しやすい条件で、その効果は顕著にあらわれた。

(2) 水セメント比および風速の影響

図-7 および図-8 に、水セメント比 60% および 30% におけるひび割れ総面積および最大幅を示す (鉄筋比: 0.26%, かぶり厚さ: 25mm)。水セメント比によらず、LCE によりコンクリートの EAC が低減され、無風条件では、添加率の増大に伴い低減効果は大きくなった。一方、有風条件では、LCE の添加率がある一定以上になる

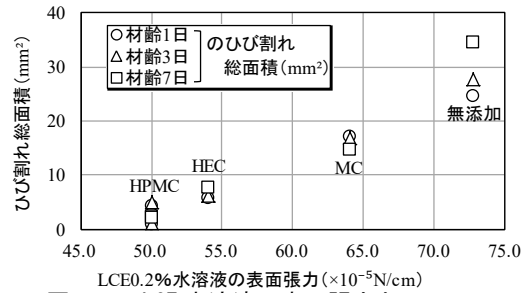


図-3 LCE 水溶液の表面張力とひび割れ総面積の関係 (シリーズ 1)

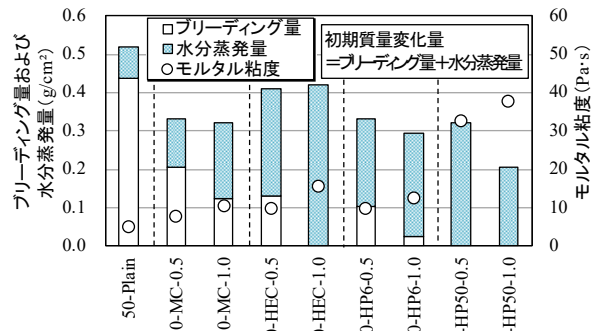


図-4 ブリーディング量およびモルタル粘度 (シリーズ 1)

表-9 圧縮強度 (シリーズ 1)

供試体記号	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)			
		1週	4週	8週	13週
50-Plain	4.3	49.3	53.0	57.4	75.5
50-MC-0.5	2.9	42.1			
50-MC-1.0	3.2	44.4			
50-HEC-0.5	3.2	39.7			
50-HEC-1.0	3.9				
50-HP6-0.5	4.2	42.5	50.8	49.6	63.1
50-HP6-1.0	4.0	40.6	56.2	57.7	62.1
50-HP50-0.5	5.4	39.6	52.3	51.9	58.8
50-HP50-1.0	5.9	33.0	46.8	46.2	54.7

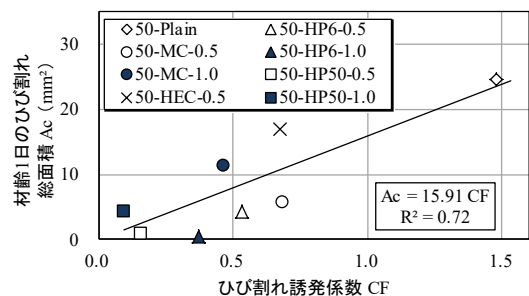


図-5 ひび割れ誘発係数とひび割れ総面積の関係 (シリーズ 1)

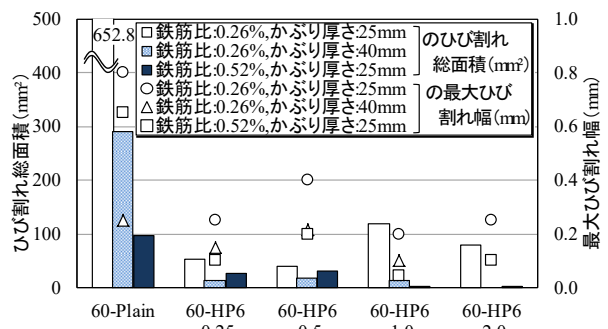


図-6 無風条件における EAC に及ぼす配筋条件の影響 (シリーズ 2)

と、EACが増大する傾向が認められた。

(3) ブリーディングの影響

表-10に、水セメント比60%および30%のコンクリートにおけるブリーディング率を示す。LCEの添加率に応じて、ブリーディングが低減され、添加率が一定より大きくなるとブリーディングは発生しなかった。コンクリート表面がブリーディングによる水膜に覆われている限り、メニスカスは形成されないため毛細管張力は生じないが、この水膜は時間経過とともに消失し、メニスカスが形成され表面収縮が始まるとされている⁹⁾。したがって、ブリーディングのない水準は、打込み後の早い段階から表面収縮が進行していると考えられ、これが、図-7および図-8における有風条件でのEAC増大の原因であると推察される。

(4) 圧縮強度

表-10にコンクリート供試体の圧縮強度を示す。W/C=60%においては、LCEの添加により強度低下の傾向が確認された。モルタル実験(シリーズ1)と同様に、気泡組織の粗大化が主たる原因と考えられる。

4.3 EAC低減の実験式の導出(シリーズ3)

構造物の耐久性を確保するためのEAC低減について考えると、構造物の劣化とひび割れ幅が密接に関係することは古くから指摘されており、EACのひび割れ幅を抑制することが重要と考えられる。そこで、以降は、LCEの添加とモルタルおよびコンクリートにおけるEACのひび割れ幅の関係を検討する。

(1) ひび割れ幅とモルタル粘度の関係

モルタル実験(シリーズ1)およびコンクリート実験(シリーズ2)から、EACには材料沈降の程度、ブリーディングの有無やこれによる表面乾燥および表面収縮などのメカニズムが作用しているものと推察された。LCEの添加効果としては、表面張力低減による表面収縮の抑制と増粘効果および保水性による材料沈降および水分逸散の抑制があげられる。

ここで、材料沈降、ブリーディングおよび表面乾燥の影響要因としてモルタル粘度に着目すると、図-9に示すように、モルタル実験でのひび割れ幅との相関性が認められた。つまり、表面張力の低減はひび割れ抑制に機能するものの、ひび割れ幅には表面張力よりもモルタル粘度の影響が大きいと考えられる。次に、図-10にコンクリートにおけるひび割れ幅とモルタル粘度の関係を示す。両者間の下に凸の近似曲線は、LCEの添加により材料沈降が抑制されるが、過剰な添加は表面収縮が進行し、EACを助長することを示している。学協会の仕様書¹⁰⁾では屋外で劣化抵抗性を確保する許容ひび割れ幅は0.3mmであり、本研究でのEAC低減に関する最適モルタル粘度は約3~11Pa・sとなる。

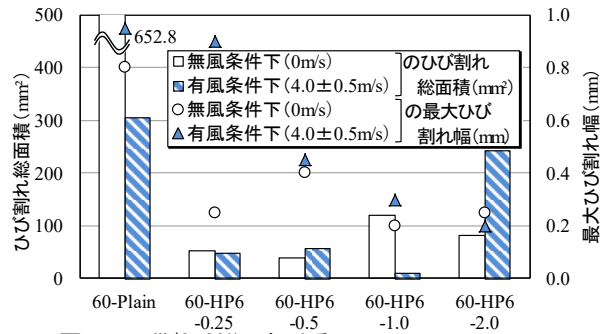


図-7 W/C=60%におけるEACに及ぼす風速の影響(シリーズ2)

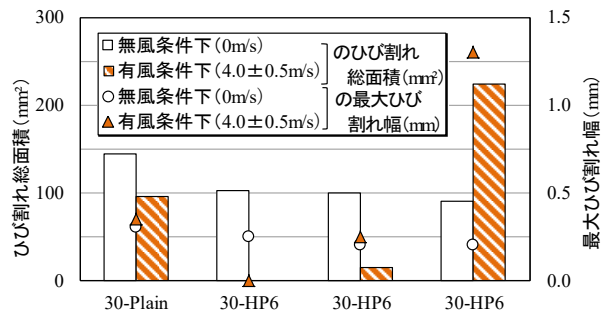


図-8 W/C=30%におけるEACに及ぼす風速の影響(シリーズ2)

表-10 ブリーディング率、モルタル粘度および圧縮強度(シリーズ2)

供試体記号	ブリーディング率(%)	モルタル粘度(Pa・s)	1週圧縮強度(N/mm ²)	4週圧縮強度(N/mm ²)
60-Plain	0.74	1.32	32.8	42.5
60-LCE-0.25	0.42	1.39	28.6	36.8
60-LCE-0.5	0.35	1.81	25.1	37.2
60-LCE-1.0	0.11	2.21	31.1	42.0
60-LCE-2.0	0.00	4.55	30.3	39.0
30-Plain	0.66	1.99	66.5	89.0
30-LCE-0.25	0.01	6.85	71.2	87.1
30-LCE-0.5	0.00	11.58	71.4	84.4
30-LCE-1.0	0.00	13.85	65.2	80.6

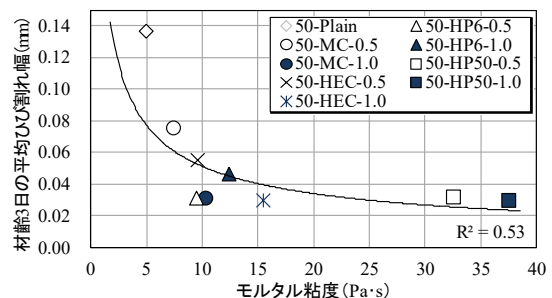


図-9 モルタル粘度とモルタル供試体の平均ひび割れ幅の関係(シリーズ3)

(2) LCEの最適添加率を求める実験式の提案

前記のEAC低減に関する最適モルタル粘度は、水セメント比や単位水量などの条件が異なる実験結果から得たものであるが、これを使用材料などの因子から表せられれば、調合設計において有用である。

そこで、シリーズ1およびシリーズ2におけるマトリクス中でのみかけのLCE水溶液粘度を式(4)により算出

し、それぞれのモルタル粘度との関係を検討した。

$$V = \frac{C \times W / X}{2.0} \times V_{CE} \quad (4)$$

ここで、V：みかけのLCE水溶液粘度(mPa・s)

C：単位セメント量(kg/m³)

X：LCE添加率(C×%)

W：単位水量(kg/m³)

V_{CE}：LCE2.0%水溶液粘度(mPa・s)

図-11に示のように、シリーズ1およびシリーズ2で用いたマトリクスのモルタル相の粘度と、式(4)より算出したマトリクス中でのみかけのLCE水溶液粘度には高い相関性が認められた。したがって、EAC低減に有効なモルタル相の粘度は、水セメント比や単位水量などに応じて、LCEの種類や添加率を設定することで得られると考えられるため、材料設計によりコンクリートのEAC低減は可能であるといえる。

5. まとめ

- 1) 本研究で用いたLCEの添加により、モルタルおよびコンクリートの表面に生じるEACが低減される。
- 2) EAC低減の基本的なメカニズムは、マトリクスの増粘効果および保水性による材料沈降と水分逸散の抑制、ならびに自由水の表面張力低減といえる。
- 3) 配筋条件や水セメント比によらずLCEはコンクリートのEAC低減に有効である。ただし、有風条件下では、LCEのEAC低減効果が低下することがある。
- 4) マトリクスのモルタル相の粘度とひび割れ幅の間には相関性があり、そのモルタル粘度を適正な範囲内に収めることで、EACを低減できる。
- 5) LCE添加モルタルの粘度とLCE水溶液粘度には相関性があることから、水セメント比や単位水量などに応じてLCEを選択し、添加率を調整することで、コンクリートのEAC低減が可能であるといえる。

謝辞

本研究の実施にあたり、快くサンプルを提供頂いたBASF ジャパン(株)、信越化学工業(株)合成技術研究所の方々、本研究室の学生および卒業生に多大なご協力を賜りました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Bentz, D. P. et al. : Viscosity Enhancer Reducing Diffusion in Concrete Technology, Concrete International, pp.31-36, Jan. 2009
- 2) Lin, S. T. Huang, R. and Chang, C. Y. : Effect of water soluble polymer on the early age shrinkage of cementitious composites by using ring test method,

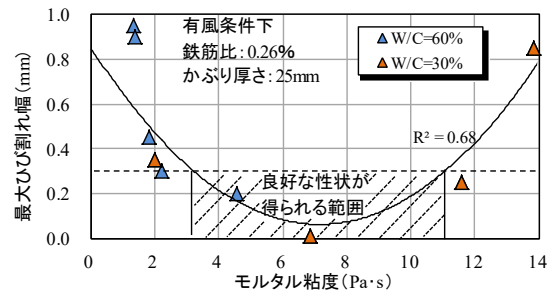


図-10 モルタル粘度とコンクリート供試体の最大ひび割れ幅の関係(シリーズ3)

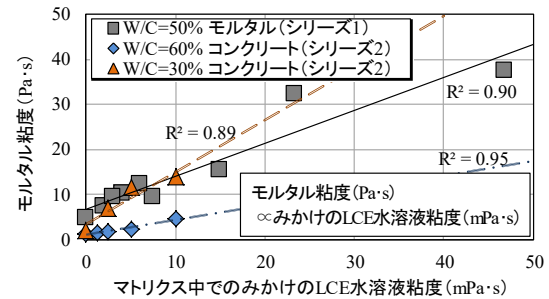


図-11 みかけのLCE水溶液粘度とモルタル粘度の関係(シリーズ3)

Materials Chemistry and Physics, No.121, pp.440-446, 2010

- 3) 柄澤達久ほか：低分子量セルロースエーテルのコンクリートへの適用性に関する基礎的研究～モルタルの初期ひび割れに関する検討～、日本建築学会学術講演梗概集2012(材料施工), pp.717-718, 2012
- 4) 山川勉, 菊池雅史：セルロースエーテルを用いたセメント系マトリクスのフレッシュ性状の材料設計法に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.515, pp.1-8, 1999
- 5) 山川勉, 菊池雅史：セルロースエーテルを添加したコンクリートの材料分離特性に関する材料設計法 日本建築学会構造系論文集, No.533, pp.1-6, 2000
- 6) 加藤忠哉, 徳谷直志, 高橋彰：錠剤コーティング用水溶性セルロース誘導体の分子量及び分子量分布測定, 高分子論文集, vol.39, No.4, pp.293-298, 1982
- 7) Obara, S. et al. : Estimating the molecular weight of hypromellose and methylcellulose based on the viscosity of their aqueous solutions, Tablets Capsules, pp.14-20, July. 2007
- 8) 信越化学工業株式会社：メトロゾール-水溶性セルロースエーテル-(カタログ), p.18
- 9) 高橋恵輔, Thomas, Bier：セメントモルタルの初期収縮挙動に及ぼす攪拌作用と混和剤の影響, Cement Science and Concrete Technology, Vol.70 No.1, pp.224-251, 2016
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, p.3, 2006