

論文 超高強度コンクリートの塩化物イオン含有量と鉄筋腐食抵抗性に関する研究

石中 正人*1・佐藤 隆樹*2・中山 英明*3

要旨: シリカフュームを混和した水結合材比 25~15%の超高強度コンクリートの鉄筋腐食抵抗性を, 防錆剤を添加したコンクリートと比較し, 水結合材比と鉄筋腐食抵抗性の関係を検討した。その結果, 水結合材比が 20%以下程度であれば, 塩化物イオン含有量が 1.0kg/m³でも, 防錆剤を添加した水結合材比 60%の普通コンクリートまたは塩化物イオン含有量を 0.3kg/m³とした水結合材比 60%の普通コンクリートと同等以下の腐食速度および発錆面積率になった。水結合材比が 20%以下程度の超高強度コンクリートでは, 規定値 (0.3kg/m³) 以上の塩化物イオン含有量においても十分な鉄筋腐食抵抗性を有することが明らかになった。

キーワード: 超高強度コンクリート, 塩化物イオン, シリカフューム, 鉄筋腐食抵抗性, 防錆剤, ひび割れ

1. はじめに

現在, 大都市圏を中心に建設されている超高層 RC 建築物には, 設計基準強度が 150N/mm²クラスの超高強度コンクリートが使用されるに至っている¹⁾。超高強度コンクリートは, 水結合材比 (W/B) の低減により高強度化を図るため, 単位結合材量が増加し, コンクリート中の塩化物イオン量が多くなる。例えば, 低熱ポルトランドセメントに内割でシリカフュームを 10%添加した結合材を 1000 kg/m³使用した場合, JIS R 5210「ポルトランドセメント」および JIS A 6207「コンクリート用シリカフューム」に規定されるそれぞれの塩化物イオン量の上限値を用いてコンクリート中の塩化物イオン量を計算すると約 0.3kg/m³となる。そのため, さらなる超高強度化においてはコンクリートの塩化物イオン含有量が 0.3kg/m³を超える可能性がある。JASS 5 や建築基準法では, コンクリートの塩化物イオン含有量を 0.3 kg/m³から 0.6 kg/m³に緩和する要件として, 水セメント比の低減と共に防錆剤 (JIS A 6205「鉄筋コンクリート用防せい剤」) の使用等が規定されている^{2), 3)}。

筆者らは, W/B=12%の超高強度コンクリートは, 鉄筋腐食に関係する塩化物イオン, 水, 酸素などの物質透過性が極めて低く, また, 塩化物イオンの固定量も多いため, 規定値以上の塩化物イオン量が含まれていても鉄筋腐食抵抗性に優れることを明らかにしている⁴⁾。今回は, シリカフュームを混和した W/B=25~15%の超高強度コンクリートの鉄筋腐食抵抗性を, 防錆剤を使用したコンクリートと比較し, W/B と鉄筋腐食抵抗性の関係を検討した。また, 超高強度コンクリートでは, 一般に自己収縮が大きく, ひび割れの発生が想定される。そこで, ひび割れを模擬した試験体で超高強度コンクリートの鉄筋

腐食抵抗性を調査した。

2. 水結合材比が鉄筋腐食抵抗性に及ぼす影響

2.1 使用材料および調合

使用材料を表-1 に, 調合を表-2 に示す。セメントには低熱ポルトランドセメント (L) および普通ポルトランドセメント (N) を用い, Lには, シリカフューム (SF) を内割りで 17.5%混和した。Lに SF を混和した結合材 (LSF) は W/B が 25%以下のコンクリートに, N は, JIS A 6205 の附属書 2 (コンクリート中の鉄筋の促進腐食試験方法) での基準調合である W/B が 60%のコンクリートに用いた。

2.2 塩化物イオン量および防錆剤の添加

添加する塩化物溶液を表-3 に, 各調合の塩化物イオン量および防錆剤の有無の組合せを表-4 に示す。コンクリート中の塩化物イオン量は, 0.3, 1.0kg/m³の 2水準とし, 表-3 に示す塩化物溶液で調整した。なお, 1.0kg/m³の塩化物イオン量と塩化物溶液は, JIS A 6205 の附属書 2 に示される防錆剤の防錆効果を確認する試験条件である。防錆剤は, 標準添加量 (3.8kg/m³) を単位水量の内割りで添加した。

2.3 試験方法

鉄筋腐食試験は, JIS A 6205 の附属書 2 (規定)「コンクリート中の鉄筋の促進腐食試験方法」に準拠した。試験の詳細を以下に示す。

(1) 供試体

供試体の概略図を図-1 に示す。供試体は φ100×200mm とし, φ13mm のみがき棒鋼をかぶり厚さがそれぞれ 20mm になるよう円柱体の軸に 2本並行に埋め込んだ。

*1 三菱マテリアル (株) セメント研究所 副主任研究員 (正会員)

*2 三菱マテリアル (株) セメント研究所

*3 三菱マテリアル (株) セメント研究所 主任研究員 (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	記号		備考	
セメント	普通ポルトランドセメント	N	C	B	密度 3.16g/cm ³ , ブレーン比表面積 3500cm ² /g
	低熱ポルトランドセメント	L			密度 3.24g/cm ³ , ブレーン比表面積 3600cm ² /g
混和材	シリカフェューム	SF		密度 2.25g/cm ³ , BET 比表面積 19.3m ² /g	
細骨材	山砂	S		表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.38%	
粗骨材	硬質砂岩砕石 1505	G		表乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 2.74%	
混和剤	AE 減水剤	AD		リグニンスルホン酸系	
	高性能減水剤	SP1		ポリカルボン酸系	
	高性能 AE 減水剤	SP2		ポリカルボン酸系	
	防錆剤	CO		多価アルコールニトロエステル塩	

表-2 コンクリートの目標フレッシュ性状および調査

目標		結合材種類*	混和剤種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
スランプまたはスランプフロー (cm)	空気量 (%)					W	B		S	G
							C	SF		
70	2.0	LSF	SP1	15	34.4	155	852	181	435	860
70	2.0	LSF	SP1	17	39.5	155	752	160	540	860
60	2.0	LSF	SP1	20	44.4	155	639	136	660	860
60	2.0	LSF	SP2	25	46.6	165	554	116	729	865
12	4.5	N	AD	60	44.9	180	300	—	800	1020

* LSF : Lに SF を混和したもの

表-3 添加する塩化物溶液

薬品名	質量 (g/L)
塩化ナトリウム (NaCl)	24.5
塩化マグネシウム (MgCl ₂ · 6H ₂ O)	11.1
硫酸ナトリウム (Na ₂ SO ₄)	4.1
塩化カルシウム (CaCl ₂)	1.2
塩化カリウム (KCl)	0.7

表-4 防錆剤の使用と塩化物イオン量の組合せ

結合材種類	W/B (%)	防錆剤の使用	塩化物イオン含有量 (kg/m ³)	
			0.3	1.0
LSF	15	—	—	○
LSF	17	—	○	○
		○	—	○
LSF	20	—	—	○
LSF	25	—	—	○
N	60	—	○	○
		○	—	○

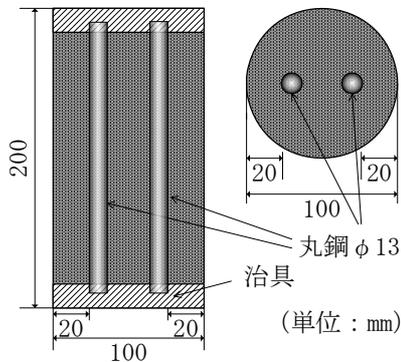


図-1 供試体の概略図

供試体は材齢 2 日で脱型し、治具を取り外した部分は、同一結合材および同一 W/B のセメントペーストでキャッピングした。また、キャッピング面はアルミテープでシ

ールし、キャッピング面からの水分や空気の浸透を防止した。促進養生を行うまでの供試体は、20℃封かん養生を材齢 7 日まで実施した。

(2) 促進養生

前養生が終了した供試体をオートクレーブ装置で、180℃、圧力 1 MPa で 5 時間保持の高温高圧養生した。その後、自然放冷し、オートクレーブ開始から 24 時間経過後に供試体を 20℃の水中に 24 時間浸漬した。さらに供試体を同一条件で繰返しオートクレーブ養生し、2 回目のオートクレーブ養生を開始してから 24 時間経過後に

供試体の鉄筋の腐食状況を評価した。

(3) 腐食速度

促進養生が終了した供試体中の鉄筋の分極抵抗を測定し、式(1)により腐食速度を算出した。分極抵抗は、高低2周波数(200Hz, 0.1Hz)の矩形波電流の重畳パルスを印加し、応答電流を測定する矩形波電流分極法⁶⁾により測定した。なお、照合電極には銀塩化銀電極を用いた。

$$I_{\text{corr}} = K \times (1/R_p) \quad (1)$$

ここで、 I_{corr} : 腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

K : 定数 (0.026V)

R_p : 分極抵抗 ($\text{k}\Omega\text{cm}^2$)

(4) 発錆面積率

促進養生が終了した供試体から取り出した鉄筋の長さ方向の中心から両端へ80mm、合計160mmの部分について発錆部分をスキャナで読み取り、画像解析処理で発錆面積を測定し、式(2)で発錆面積率を求めた。

$$\text{発錆面積率}(\%) = \text{発錆面積}/\text{測定面積} \times 100 \quad (2)$$

2.4 試験結果

(1) 腐食速度

塩化物イオン含有量が $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートに埋め込んだ鉄筋の分極抵抗から求めた腐食速度を図-2に、CEB(ヨーロッパコンクリート委員会)から提案された鉄筋の腐食速度の判定基準(案)を表-5⁶⁾に示す。LSFを用いたコンクリートの腐食速度は、W/Bが低くなるほど遅くなった。表-5に示した判定基準(案)では、W/B=20%以下で『腐食なし』、W/B=25%で『低～中程度の腐食速度』と評価され、W/Bの低下により鉄筋腐食抵抗性が向上する効果が認められた。Nを用いたW/B=60%のコンクリートでは、防錆剤を用いることで、腐食速度が遅くなり、防錆剤の効果が認められた。表-5に示した判定基準(案)では、Nを用いたW/B=60%のコンクリート(防錆剤の添加無し)で『激しい、高い腐食速度』、防錆剤を添加したもので『腐食なし』と判定できる。LSFを用いたコンクリートにおいてW/B=60%で防錆剤を用いたものと同等以下の腐食速度となるW/Bは20%以下であった。

W/B=17%, 60%で塩化物イオン含有量が $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ (現行の規定の上限値)のものやW/B=17%で防錆剤を添加したコンクリートに埋め込んだ鉄筋の分極抵抗から求めた腐食速度を図-3に示す。なお、図中には図-2に示した塩化物イオン含有量が $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ のLSFを用いたW/B=17%のコンクリートの結果も併記した。塩化物イオン含有量が $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ のLSFを用いたW/B=17%のコンクリートでは、

表-5 CEBによる腐食速度の判定基準(案)⁶⁾

I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度の判定
<0.2	不動態状態(腐食なし)
0.2-0.5	低～中程度の腐食速度
0.5-1	中～高程度の腐食速度
≥ 1	激しい、高い腐食速度

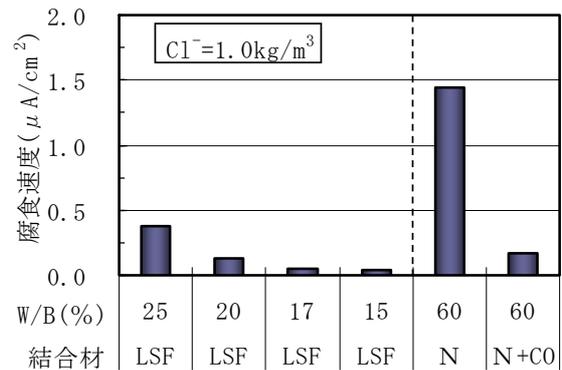


図-2 W/Bおよび防錆剤の有無と腐食速度

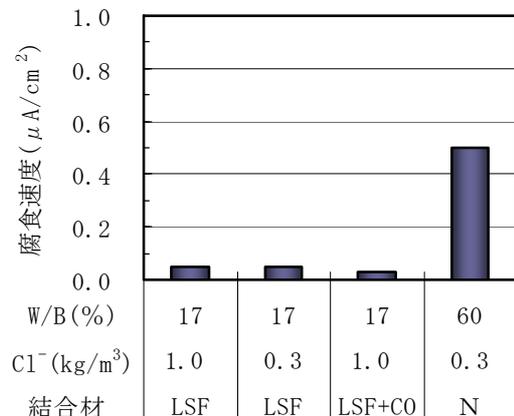


図-3 塩化物イオン量および防錆剤の有無と腐食速度

防錆剤の有無にかかわらず、現行の規定値の塩化物イオン含有量のものと同程度の腐食速度になることが明らかになった。W/B=17%のコンクリートでは、発錆がほとんど認められなかったことから、防錆剤の効果が明確ならなかったと考えられる。

(2) 発錆面積率

塩化物イオン含有量が $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートに埋め込んだ鉄筋の発錆面積率を図-4に示す。LSFを用いたコンクリートは、W/Bの低下とともに発錆面積率が減少し、W/B=15%では発錆が認められなかった。発錆面積率でもW/Bの低下により、腐食速度と同様に鉄筋腐食抵抗性の向上が認められた。Nを用いたW/B=60%のコンクリートでは、防錆剤を用いることで、発錆面積率が減少し、

防錆剤の効果が認められた。LSF を用いたコンクリートにおいて W/B=60%で防錆剤を用いたものと同等以下の発錆面積率となる W/B は 17%以下であった。ただし、LSF を用いた W/B=25%のコンクリートの発錆面積率は、防錆剤を用いていない W/B=60%のものより高かった。

W/B=17%, 60%で塩化物イオン含有量が 0.3kg/m³のものや W/B=17%で防錆剤を添加したコンクリートに埋め込んだ鉄筋の発錆面積率を図-5 に示す。なお、図中には図-4 に示した塩化物イオン含有量が 1.0kg/m³の LSF を用いた W/B=17%のコンクリートの結果も併記した。塩

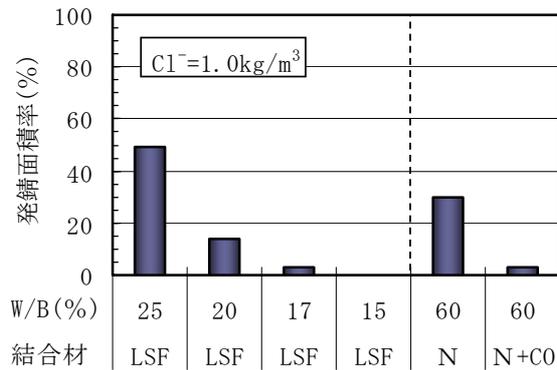


図-4 W/B および防錆剤の有無と発錆面積率

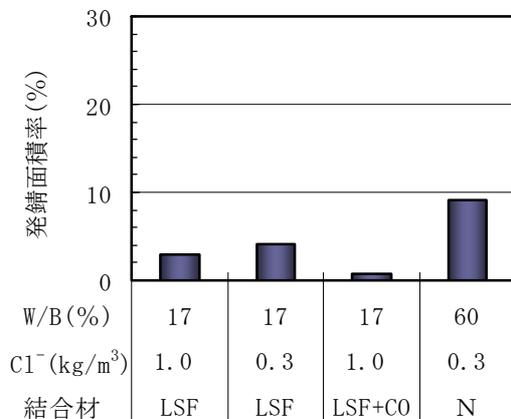
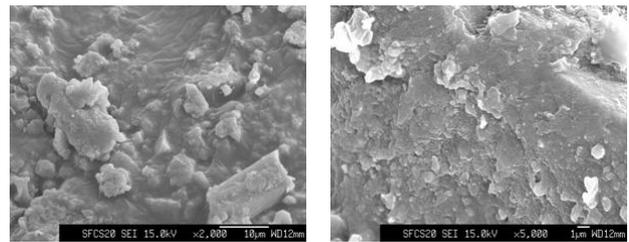


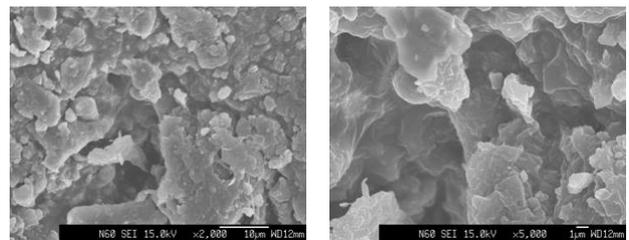
図-5 塩化物イオン量および防錆剤の有無と発錆面積率

化物イオン含有量が 1.0kg/m³の LSF を用いた W/B=17%のコンクリートは、防錆剤を添加すると発錆面積率がわずかに減少するものの、防錆剤を使用しなくても現行の規定値の塩化物イオン含有量のものと同様以下の発錆面積率になることが明らかになった。

鉄筋の発錆状況を写真-1 に、錆の電子顕微鏡写真を写真-2 に示す。LSF を用いたコンクリートの錆は黒色に近く、その組織が緻密であった。一方、Nを用いたものの錆は赤色に近く、その組織が粗であった。LSF を用いたコンクリートでは、SF のポゾラン反応で水酸化カルシウムを消費することにより、鉄筋表面の不動態被膜の形成を促す水酸イオン濃度が低下するため、鉄筋が発錆しやすい環境になると考えられる。ただし、コンクリート組織が緻密であるため、水分や酸素といった劣化因子が十分に供給されず、その結果、錆の形態は組織が緻密で腐食速度が遅い黒錆が形成されたと考えられる。シリカフェームを用いたコンクリートの発錆形態は、これまでの報告⁴⁾と同様の傾向を示しており、同コンクリートの鉄筋腐食抵抗性は、発錆面積率だけでは十分に評価でき



LSF, W/B=20%, Cl⁻=1.0kg/m³



N, W/B=60%, Cl⁻=1.0kg/m³

写真-2 錆の電子顕微鏡写真(左から 2000, 5000 倍)



LSF, W/B=15%, Cl⁻=1.0kg/m³



LSF, W/B=25%, Cl⁻=1.0kg/m³



N, W/B=60%, Cl⁻=1.0kg/m³



N+CO, W/B=60%, Cl⁻=1.0kg/m³

写真-1 鉄筋の発錆状況

ない可能性がある。そのため、今後、不動態被膜の形成状態だけでなく、腐食要因物質の拡散性をも含めて評価できる手法を検討する必要があると考える。

3. ひび割れを模擬した供試体の鉄筋腐食状況

3.1 使用材料および調合

結合材および混和剤は表-1 に示すものを、骨材は表-6 に示すものを用いた。コンクリートの調合を表-7 に示す。W/B は17%と55%の2水準とし、フレッシュ性状の目標は、W/B=17%ではスランプフロー70cm、空気量2.0%、W/B=55%ではスランプ12cm、空気量4.5%とした。

3.2 塩化物イオン量および防錆剤の添加

塩化物イオン量および防錆剤の有無の組合せを表-8 に示す。塩化物量は、NaCl で調整した。防錆剤は、標準添加量 (3.8kg/m³) を単位水量の内割りで添加した。

3.3 試験方法

鉄筋腐食促進試験は、JCI-SC2「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法—オートクレーブ法—」に準拠した。試験の詳細を以下に示す。

(1) 供試体

供試体の概略図を図-6 に示す。供試体の形状、寸法は、100×100×400mmとし、あらかじめφ13mmのみがき棒鋼を供試体の長手方向と平行になるように中心に配置

した。また、ステンレス板は、厚さが0.2mmのものを供試体側面に鉄筋に接するように100mm間隔であらかじめ3枚配置し、脱型時に取り外した。促進養生を行うまで、供試体は材齢1日で脱型し、ステンレス板を取り外した後、材齢7日まで20℃封かん養生した。

(2) 促進養生

前養生が終了した供試体をオートクレーブ装置に入れ、180℃、圧力1MPaで5時間保持した。その後、自然放冷し、鉄筋の腐食状況を評価した。

(3) 発錆面積率

2.3と同様に、鉄筋の長さ方向の中心から両端に150mm、合計300mmの部分について発錆面積率で評価した。

3.4 試験結果

鉄筋の発錆面積率を図-7 に、鉄筋の腐食状況を写真-3 に示す。塩化物イオン含有量が1.0kg/m³でNを用いたW/B=55%のコンクリートでは、発錆面積率が40%以上となり、広い範囲で鉄筋の腐食が認められた。一方、塩化物イオン含有量が1.0kg/m³でLSFを用いたW/B=17%では、発錆面積率が1%程度であり、ほとんど腐食が認められず、Nを用いたW/B=55%の防錆剤を添加したものや塩化物イオン含有量が0.3kg/m³のものとは比べても小さかった。よって、塩化物イオン含有量を1.0kg/m³としたW/B=17%の超高強度コンクリートにおいて、幅0.2mm相

表-6 使用材料

材料	種類	記号	備考
細骨材	安山岩砕砂	S1	表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率2.85%
	山砂	S2	表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率1.38%
粗骨材	安山岩砕石 2005	G	表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率2.74%

表-7 コンクリートの目標フレッシュ性状および調合

目標		結合材種類	混和剤種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
スランプまたはスランプフロー (cm)	空気量 (%)					W	B		S1	S2	G
		C	SF								
70	2.0	LSF*	SP1	17	39.2	155	752	160	535	—	827
12	4.5	N	AD	55	45.9	168	305	—	331	496	974

* LSF：LにSFを混和したもの

表-8 防錆剤の使用と塩化物イオン量の組合せ

結合材種類	W/B (%)	防錆剤の使用	塩化物イオン含有量 (kg/m ³)	
			0.3	1.0
LSF	17	—	—	○
N	55	—	○	○
		○	—	○

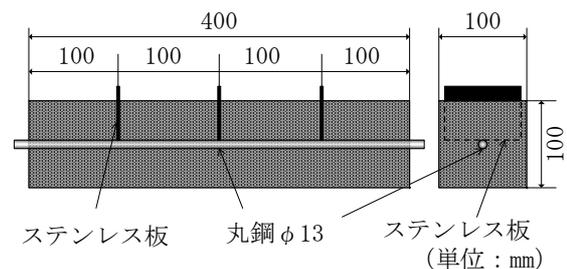
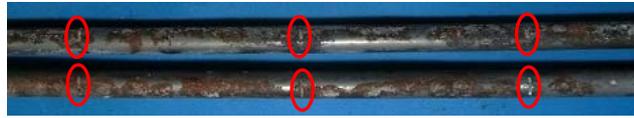


図-6 供試体の概略図



LSF, W/B=17%, Cl⁻=1.0kg/m³



N, W/B=55%, Cl⁻=1.0kg/m³



N+C0, W/B=55%, Cl⁻=1.0kg/m³

写真-3 ひび割れを模擬した供試体の腐食状況
(○で囲んだ箇所がステレス板との接触面)

当のひび割れを生じていても防錆剤を添加したものや塩化物イオン含有量が 0.3kg/m³のものとは比べ、腐食の進行は遅く、十分な鉄筋腐食抵抗性を有していることが明らかになった。なお、調合や供試体の形状寸法等が異なるが、塩化物イオン含有量が 1.0kg/m³でNを用いたものでは防錆剤の有無にかかわらず、2章のひび割れのない供試体での結果より発錆面積率が大きくなっており、ひび割れにより鉄筋の腐食促進効果が助長された。今後さらに、乾湿繰返し等の実際の環境に近い条件でも検証する予定である。

4. まとめ

シリカフェームを混和した W/B=25~15%の超高強度コンクリートの鉄筋腐食抵抗性を、防錆剤を使用したコンクリートと比較した。また、ひび割れを有する超高強度コンクリートの鉄筋腐食抵抗性も検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) W/B=20%以下程度であれば、塩化物イオン含有量が 1.0kg/m³でも、防錆剤を添加した W/B=60%の普通コンクリート、または塩化物イオン含有量が 0.3kg/m³の W/B=60%の普通コンクリートと同等以下の腐食速度および発錆面積率となった。

(2) 幅 0.2mm のひび割れを模擬した供試体において、塩化物イオン含有量を 1.0kg/m³とした W/B=17%の超高強度コンクリートは、防錆剤を添加した W/B=55%の普通コンクリート、または塩化物イオン含有量が 0.3kg/m³の W/B=55%の普通コンクリートより発錆面積が少なくなった。

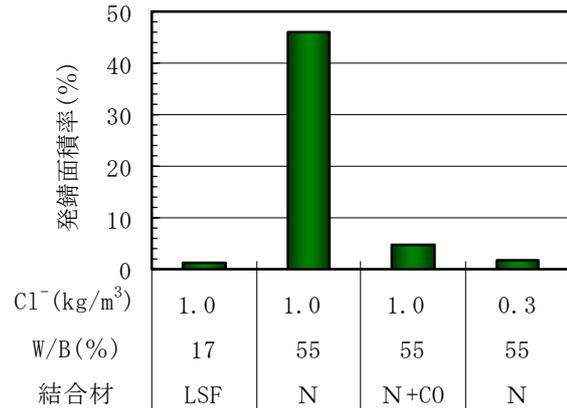


図-7 ひび割れを有する供試体の発錆面積率

(3) シリカフェームを混和したコンクリートの腐食促進試験では、腐食速度は遅いが、発錆面積率が大きくなるケースが認められた。シリカフェームのように水酸化カルシウムを消費し組織が緻密になる混和材料を用いたコンクリートの鉄筋腐食抵抗性を促進試験により評価する場合は、総合的に評価できる手法で行う必要がある。

以上の(1)、(2)より、W/B=20%以下程度の超高強度コンクリートでは、規定値以上の塩化物イオン含有量においても、十分な鉄筋腐食抵抗性を有していることが明らかになった。

参考文献

- 1) 青木義彦, 岩清水 隆, 山田佳博, 永野浩一: Fc=150N/mm²の超高強度コンクリート CFT 柱の施工—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」, コンクリート工学, Vol. 50, No. 8, pp. 683 - 688, 2012. 8
- 2) 建築基準法 施行令第 72 条, pp. 137 - 138, 2012
- 3) (社)日本建築学会:「建築工事標準仕様書・同解説 5 鉄筋コンクリート工事」, pp. 190 - 193, 2009
- 4) 石中正人, 木村祥平, 中山英明, 鳴瀬浩康: 内在塩化物による超高強度コンクリートの鉄筋腐食抵抗性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 65, pp. 435-441, 2011
- 5) 小林一輔, 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三: 鉄筋腐食の診断, 森北出版, pp. 9-10, 1993
- 6) (社)土木学会: コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)委員会報告書, 2009