

シリカフェームスラリーを後添加した3成分系コンクリートの耐久性評価

新潟大学 工学部 佐伯竜彦

株式会社福田組 井貝武史

1. 研究の背景と目的

新潟県を含む北陸地域の沿岸部は厳しい塩害環境地域であり、また、沿岸部以外でも積雪寒冷地であることから、融雪のための凍結防止剤により、橋梁などのコンクリート構造物は塩害劣化を受けている^{1) 2)}。

土木工事で一般に使用される高炉セメントB種に、産業副産物のひとつであるシリカフェームを混和した3成分系結合材（普通セメント-高炉スラグ微粉末-シリカフェーム）を用いることにより、コンクリートの塩分浸透抵抗性が大きく向上すること³⁾が報告されており、塩害劣化の激しい地域ではその普及が望まれている。しかしながら、昨今の経済状況からレディーミクストコンクリート工場に新たにシリカフェーム添加設備を増設することは困難であり、また、人力による投入も少子高齢化による人口減少の中で作業員を確保することが年々困難となってきた。普及に向けた大きな課題となっている。

そこで筆者らは、昨年度および一昨年度の『北陸地域づくり協会「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業』の支援を受け、スラリー化したシリカフェームをトラックアジテータにて後添加する方法によるコンクリート製造手法の基礎的な検討^{4) 5)}を行ってきた。その結果、基本的に提案した手法で3成分系コンクリートを問題なく製造できることが確認できた。

昨年度までの検討は、スラリー後添加による基礎的な性状把握を目的としたものであったため、コンクリートの基本的な性質であるフレッシュ性状および圧縮強度についての検討にとどまっていた。そこで、本年度はコンクリートの耐久性評価を目的に各種試験を行った。耐久性の評価指標として、コンクリートの主な劣化要因である中性化、塩害および凍害の3項目に対して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験概要

コンクリートの劣化は、長い時間を掛け進行する現象である。そこで本年度は、昨年度および一昨年度作製し長期暴露を行っている供試体を用いて各種耐久性の評価を行った。

グループAでは、一昨年度作製し屋外暴露を行っている大型供試体（幅 600×奥行 200×高さ 1,200mm）を用いて、中性化に対する検討（中性化深さ試験）を行った。

グループBでは、昨年度作製し、塩水浸漬を行っている円柱供試体（φ100×200mm）を用いて、塩害に対する検討（塩化物イオン拡散係数）および同時に作製した円柱供試体を用いて凍害に対する検討（気泡間隔係数）を行った。

表-1 使用材料

材料名	記号	適用
水	W	上水道水
セメント	C	高炉セメントB種 (密度: 3.04g/cm ³)
混和材	SFS	シリカフェュームスラリー (水粉体重量比 1:1, 比重: 1.4)
細骨材	S	阿賀野川水系産砂 (表乾密度: 2.58g/cm ³ , 吸水率: 1.85%, 粗粒率: 2.60)
粗骨材	G	阿賀野川水系産砂利 (表乾密度: 2.61g/cm ³ , 吸水率: 1.56%, 実積率: 66.0, 最大寸法: 25mm)
混和剤	Ad	高機能 AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテル)

表-2 コンクリート配合表 (グループA)

項目		呼び 強度	W/B (%)	SL (cm)	AC (%)	s/a (%)	プラント練混ぜ: 単位量 (kg/m ³)					後添加	
シリーズ	ケース						W	C	SFS (W:SF)	S	G	Ad	SFS (W:SF)
24-8	①	24	53.5	8.0	4.5	41.0	130	250	16 (8:8)	774	1125	2.838	-
	②-⑤					41.0	130	250	-	774	1125	2.838	16 (8:8)
30-18	①	30	46.0	18.0	4.5	41.8	149	336	20 (10:10)	735	1036	3.460	-
	②-⑤					41.8	149	336	-	735	1036	3.460	20 (10:10)

表-3 コンクリート配合表 (グループB)

水準	SL (cm)	AC (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スラリー (kg/m ³) SFS(W:SF)	添加後 W/B (%)
					W	C	S	G	Ad		
24-8-25BB	8	4.5	53.5	41.0	142	265	771	1,117	2.096	16(8:8)	54.9
30-18-25BB	18	4.5	46.0	41.8	163	354	730	1,026	2.832	21(10.5:10.5)	47.6

どちらのグループも、シリカフェュームスラリーの後添加には小型トラックアジテータ (最大混合容量 1.5m³, ドラム高速回転速度 10rpm) を使用した。実験は、レディーミクストコンクリート工場にて 1.0m³ のコンクリートを練混ぜ、トラックアジテータへ積込み、その後実験現場へ運搬した。運搬時間を統一するため、練混ぜ完了から 30 分後を現場到着時間とした。その後、シリカフェュームスラリーを投入し、2 分間ドラムの高速回転により攪拌を行った後、大型供試体 (幅 600×奥行 200×高さ 1,200mm) または円柱供試体 (φ 100×200mm) の作製を行った。

2.2 使用材料・配合

表-1 に使用材料を、表-2、表-3 にコンクリートの配合を示す。配合は、グループ A ではプラントの標準配合を参考に、セメントの 3% をシリカフェュームに置換えた配合とし、シリカフェュームスラリーに含まれる水量を単位水量から除いたものとした。また、グループ A では表-4 に示すように、シリカフェュームスラリーの添加時に流動化剤や AE 剤により、フレッシュ性

状の調整を試みた。グループBでは、プラントの標準配合に、セメントの3%となるシリカフュームを後添加した。なお、どちらのグループもシリカフュームを水粉体比1:1のシリカフュームスラリーとして添加するため、シリカフュームスラリーとしてはセメントの6%（重量比）となる。

表-4 検討ケース（グループA）

検討ケース	概要
ケース①	基準：スラリー一括練混ぜ
ケース②	スラリーのみ後添加
ケース③	スラリー添加（攪拌2分） ⇒流動化剤添加
ケース④	スラリー+流動化剤添加
ケース⑤	スラリー+AE剤 添加

3. 実験方法および結果

3.1 中性化深さ試験（グループA）

大型供試体（幅600×奥行200×高さ1,200mm）暴露後1年8か月が経過したのち、大型供試体の底面より200mm, 600mm, 1,000mmの高さにおいて、各高さ1箇所ずつ合計3箇所のコア抜き（φ100mm）を実施した。採取したコアを割裂し、その割裂面（両面）にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し呈色させ、中性化深さを測定した。なお、大型供試体は安全のため、写真-1に示すように横に倒した状態で暴露を実施しており、その上面よりコアを採取した。



写真-1 大型供試体暴露状況

図-1に中性化深さの測定結果を示す。測定結果より、配合（シリーズ）の違いによる差異はみられるが、コア採取位置（高さ方向）に明確な差異は見られなかった。これまでの測定結果と同様に、スラリーを後添加した場合においても一括練混ぜと大きな差異は見られず、同程度であることが確認できた。ただし、ケース⑤に関しては、他のケースと比較し多少中性化深さが大きい結果となった。これは、AE剤を後添加したことにより空気量が増加したためと考えられる。

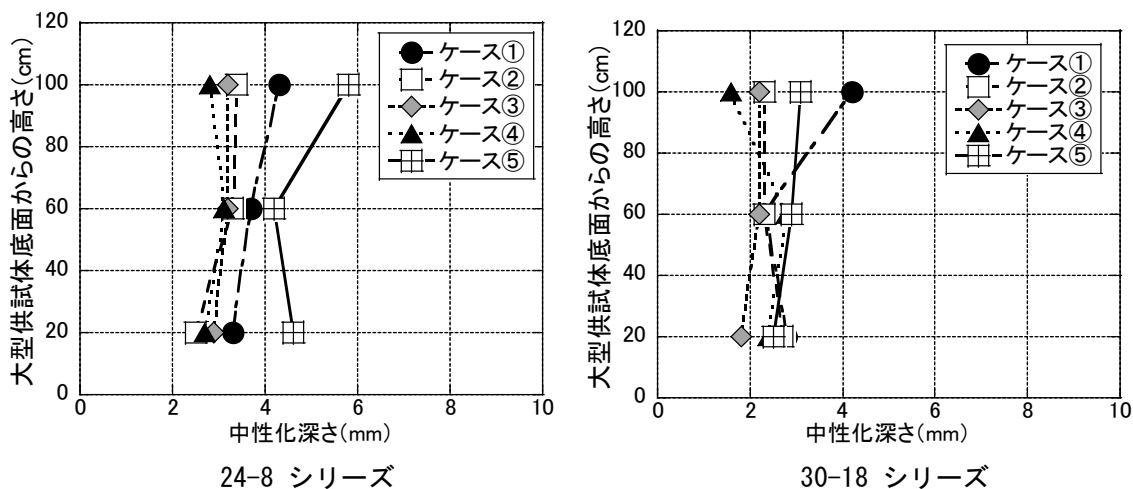


図-1 中性化深さ試験結果

3.2 塩化物イオン拡散係数試験（グループB）

JSCE-G572 を参考に、浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験のため、濃度 3.5%の塩化ナトリウム水溶液中へ浸せきを行った。測定は浸せき材齢 1 年にて実施した。塩化物イオンの測定は、コンクリート表面より 5mm ごとに試料を採取し、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置を用いて行った。

図-2 に浸漬材齢 1 年における塩化物イオンの浸透分布図を示す。合わせて、式 [1] に示すフィックの第 2 法則に基づいた拡散方程式の解を用いて、供試体ごとに各深さ位置で測定された全塩化物イオン量の値を回帰分析し、コンクリート表面の全塩化物イオン(C_0)ならびに塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D_a)を算出した。測定は、各配合 2 つ行い、その平均値とした。算出した塩化物イオン見掛けの拡散係数を表-5 に示す。

試験結果より、シリカフュームスラリーを後添加した場合において拡散係数の低減が確認できる。拡散係数はその値が小さいほど塩化物イオンが拡散（浸透）し難いことを表しており、シリカフュームスラリーを後添加することにより塩分浸透抵抗性が向上したと考えられる。

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

ここに、

$C(x, t)$: 位置 x (cm), 期間 t (年)の全塩化物イオン量(kg/m^3)

C_0 : 見掛けの表面の全塩化物イオン量(kg/m^3)

D_a : 塩化物イオン見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

erf : 誤差関数

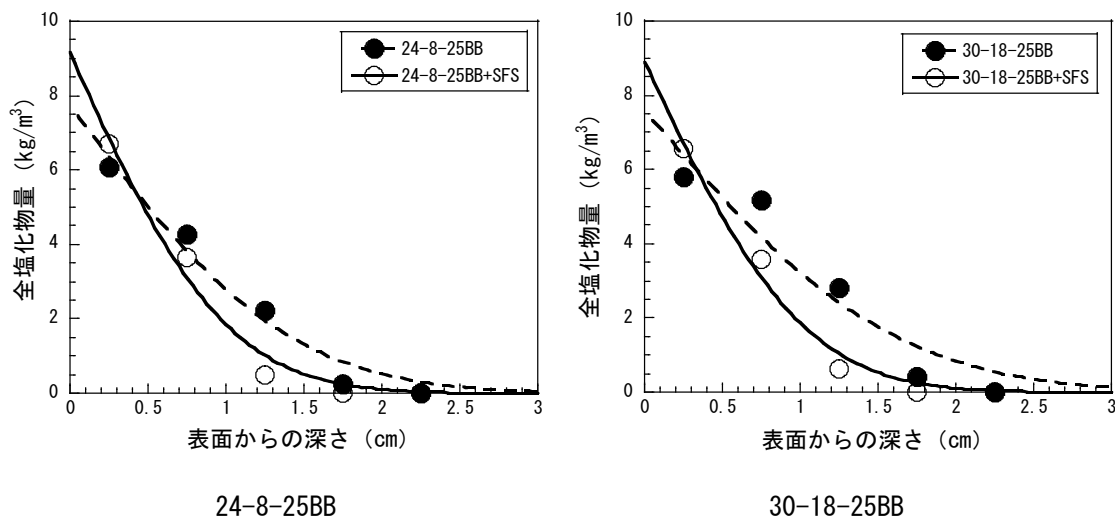


図-2 塩化物イオンの浸透分布図

表-5 塩化物イオン見掛けの拡散係数

配合	拡散係数 D_a (cm ² /年)	
	SFS 添加前	SFS 添加後
24-8-25BB	0.600	0.308
30-18-25BB	0.784	0.318

3.3 気泡間隔係数測定 (グループB)

凍害に対する検討として、ASTM C457 のリニアトラバース法による硬化後の空気量および気泡間隔係数の測定を行った。測定は24-8-25BB配合を対象に、シリカフェームスラリーの添加前後で比較を行った。

図-3 に気泡径分布図を、表-6 に気泡間隔係数を示す。気泡間隔係数の測定結果は、添加前では195 μm であるのに対し、シリカフェームスラリー添加後では207 μm となった。一般に耐凍害性が高いとされる気泡間隔係数は250 μm 程度以下⁶⁾とされている。今回の試験結果では、この値を満足しており、耐凍害性が高いことが確認された。

また、トラックアジテータによる練混ぜでは、レディーミクストコンクリート工場でのミキサによる練混ぜとは異なり、ドラム的高速回転によって、シリカフェームスラリーを混練するため、コンクリートの品質の低下に影響を及ぼす気泡径の大きいエントラップドエアが混入する可能性もあると考えられたが、気泡径分布図より、トラックアジテータによる練混ぜにおいてもエントラップドエアの混入は確認されなかった。

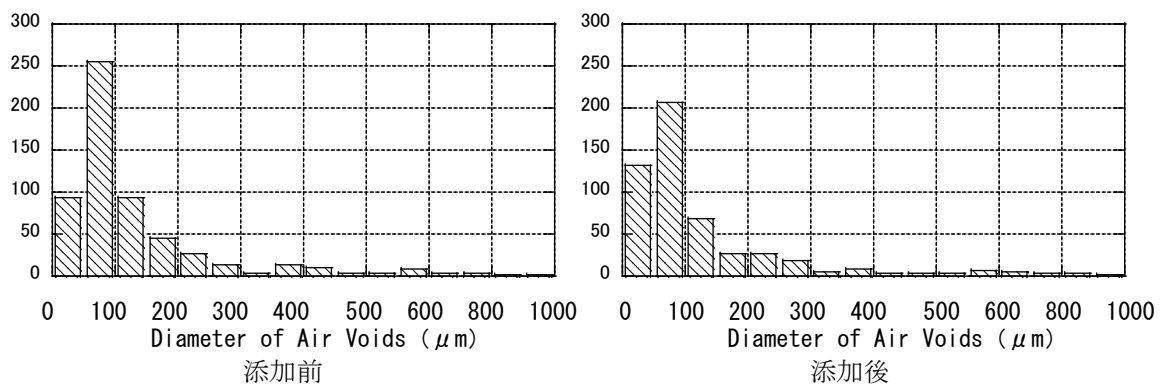


図-3 気泡径分布図 (24-8-25BB)

表-6 気泡間隔係数 (24-8-25BB)

配合	項目	気泡間隔係数 (μm)	硬化空気量 (%)	気泡総数 (個)
24-8-25BB	SFS 添加前	195	3.3	583
	SFS 添加後	207	2.9	528

4. まとめと今後の展望

本研究の範囲では、基本的に提案した手法により 3 成分系高耐久コンクリートを問題なく製造できることが確認できた。また、製造されたコンクリートが高い塩分浸透抵抗性を有することを確認できた。

今回は基礎的な検討であったため、1 工場のみであったが、今後は各レディーミクストコンクリート工場の標準配合を用いた試験を行うことで、地域や工場によらない方法とし、北陸地域全体での普及を目指したい。

謝辞：

本研究は、3 か年にわたり、『北陸地域づくり協会「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業』（第 23 回～第 25 回）として行ったものであり、ここに厚く御礼申し上げます。また、実験の実施にあたり、新潟県生コンクリート工業組合、エルケムジャパン株式会社、デンカ株式会社よりご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 佐藤國雄ほか：移流沈降領域における飛来塩分量と風速の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.851-856，2003
- 2) 石川裕夏ほか：凍結防止剤がコンクリート構造物に及ぼす影響に関する実態調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.766-771，2012
- 3) 佐伯竜彦ほか：各種シリカフュームを用いたセメント系硬化体の塩分浸透抵抗性，セメント・コンクリート論文集，No.68，pp.352-359，2014
- 4) 井貝武史ほか：トラックアジテータにおけるシリカフュームスラリー添加方法に関する基礎的検討，セメント・コンクリート論文集，No.73，pp.459-464，2020
- 5) 佐伯竜彦ほか：アジテータ車へのスラリー添加によるコンクリートの製造方法に関する研究，「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業論文集，第 24 回，pp.81-86，2021
- 6) 長谷川寿夫ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ・凍害，技報堂出版（1988）