

LPC-FA 併用系コンクリートを用いた 塩害とスケーリングの複合劣化低減対策の開発

DEVELOPMENT OF SALT DAMAGE AND SCALING RESISTANCE
BY ADOPTING LPC-FA CONCRETE

八戸工業高等専門学校建設環境工学科 ○学生員 川守田祥吾 (Shogo Kawamorita)
八戸工業高等専門学校 正員 庭瀬一仁 (Kazuhiro Niwase)

1. はじめに

北海道や東北地方などの寒冷地では、冬季の凍結融解作用によりスケーリングやポップアウトなどの表層部の劣化が散見されている。これらの凍害は、融雪剤等に含まれる塩化物イオンの侵入による塩害及び中性化との複合劣化となり、さらに深刻な問題となっている¹⁾。

コンクリートの表層部は、内部へ侵入する外的劣化因子を防ぐ保護層としての役割を持つ。複合劣化は表面から進行するため、表層部を緻密化することで強度特性や物質移行抵抗性を高める必要がある。

コンクリートを緻密化する方法の一例としては、高ビーライト系セメントである低熱ポルトランドセメントやフライアッシュ及び高炉スラグなどの混和材を使用し、適切な期間と方法で養生することが挙げられる。これらのコンクリートは、一定の材齢を経ることで極めて劣化抵抗性が高くなることが知られている²⁾。特にフライアッシュを用いると、数年にもわたりポゾラン反応が継続することから、直径50nm以上の粗大な空隙となる遷移体の減少³⁾などの効果が期待できる。しかし、耐凍害性については、膨張圧や浸透圧の観点からみると低下する可能性もある⁴⁾。

本研究では、強度や空隙状態が材齢とともに顕著に変化する配合により、スケーリング試験等各種試験を実施する。その結果をもとに、複合劣化抵抗性の変化を評価し、劣化低減対策を開発する。

2. 研究方法

2.1 使用材料と配合

(1) 設定方針

本研究では、材齢による強度や空隙状態の変化が大きいセメントマトリックスとして、低熱ポルトランドセメントとフライアッシュを用いたコンクリート(LPC-FA併用系コンクリート)を取り上げ、空隙変化以外の影響が極力小さくなるように、強度発現性、物理・化学的性能、ひび割れの抑制および施工性を考慮して、使用材料と配合を設定した。

(2) 使用材料

使用材料は、近隣で入手可能な市販の材料とした。結合材は、低熱ポルトランドセメントとフライアッシュとして、打込み時の要因による供試体品質の差が生じないように自己充てん性を考慮し、高性能AE減水剤と石灰石微粉末を添加した。また、骨材に起因する影響を極力

排除するために、結合材以外の材料(石灰石微粉末、石灰砕砂、石灰砕石)は、化学的に安定した石灰岩をもとにした材料で統一した。使用材料の概要を表-1に示す。

(3) 配合

配合は、既往の研究で施工性試験の実績があるW/B45%のLPC-FA併用系コンクリートの配合を基本とし⁵⁾、W/Bは、細孔構造に明らかな差をつくるために60%、75%とした。また、水、粉体、骨材の単位量は、フレッシュ性状が有害な材料分離を生じず、スランプフローが基準を満たす範囲で、極力同じ割合になるように配合を調整した。供試体の配合を表-2に示す。

表-1 使用材料

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント 密度=3.24 g/cm ³ , 比表面積=3.730cm ² /g
細骨材	S	石灰砕砂, 八戸松館産 表乾密度=2.66g/cm ³ , FM=2.79
粗骨材	G	石灰砕石, 八戸松館産 最大骨材寸法=20mm 表乾密度=2.69g/cm ³ , FM=6.63
石灰石微粉末	LS	密度=2.70g/cm ³ , 比表面積=5.250cm ² /g
フライアッシュ	FA	JISⅡ種 密度=2.17g/cm ³ , 比表面積=3.610cm ² /g
混和剤	SP	高性能AE減水剤 カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	As	空気量調整剤 ポリリアルキレングリコール誘導体

表-2 示方配合表

W/B (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)								
		W	粉体 P		S	G	SP	AS		
			結合材 B							
45	2.5	160	249	107	178	883	780	0.95	0.060	
	5.0									0.150
	7.5									
60	2.5	156	186	80	265	886	780	0.95	0.005 [*]	
	5.0									0.060
	7.5									
75	2.5	155	148	64	318	887	780	0.95	0.015	
	5.0									0.090
	7.5									

LPC: 低熱ポルトランドセメント, FA: フライアッシュ

LS: 石灰石微粉末, SP: 高性能AE減水剤

AS: 空気量調整剤 ※消泡剤

B: 結合材 (LPC+FA), P: 粉体 (B+LS)

2.2 試験方法

(1) 供試体

コンクリートは、二軸強制練りミキサーにより、1バッチの練混ぜ量を40L程度で作製し、各配合条件をそれぞれ2バッチで、100×100×400mm、100×500×400mmおよびφ100×200mmの型枠に打込みを行った。

空気量は、空気量調整剤の添加量により、概ね2.5%、5.0%、7.5%となるように調整し、スランプフローは、65±5.0cmを確認した。作製した供試体は、材齢1日で脱型し、恒温養生槽(20℃)にそれぞれ28日、91日、365日間、水中養生し、各種試験に供した。

気泡測定用の供試体は、100×100×400mmを使用し、スケーリング試験と表層強度は、100×500×400mmの供試体の500×400mmの面の片側で表層強度を測定し、その裏面を50×150×150mmにカッティングして供した。また、実効拡散係数は、φ100×200mmを厚さ50mmにカッティングして供した。

(2) 試験項目と試験方法

試験は、塩害との複合劣化を踏まえたスケーリング試験を実施し、空隙状態の指標を得るために気泡測定などを、各種基準等に準拠し実施した。試験項目と試験方法は、以下のとおりである。

- スケーリング：スケーリング試験(RILEM CDF法、毛管浸透法)
- 表層強度：プルアウト(Pull-out)法⁶⁾
- 硬化後の空気量および気泡間隔係数：リニアトラバース法(ASTM C 457)
- 実効拡散係数：電気泳動試験(JSCE-G571)

3. 試験結果・考察

3.1 スケーリング試験

50サイクル終了時でのスケーリング量のうち、28日材齢を図-1、91日材齢を図-2、365日材齢を図-3に示す。

50サイクル終了時点でのスケーリング量を比較する。図-1の28日材齢において、W/B45%では、空気量2.5%で0.63g/cm²、空気量7.5%で0.31g/cm²となった。

W/B75%では、空気量2.5%で2.33g/cm²、空気量7.5%で2.12g/cm²となった。空気量が多いほどスケーリング抵抗性が高く、W/Bが大きいと空気量に関係なく著しく抵抗性が低いことが確認された。

図-2の91日材齢において、W/B45%では、空気量2.5%で0.26g/cm²、空気量7.5%で0.25g/cm²となり、どちらも同等の値が得られた。W/B60%では、空気量2.5%で0.39g/cm²、空気量7.5%で0.18g/cm²となった。ある程度材齢が経過すると、W/B60%において28日材齢のW/B45%と似た傾向が見られた。

図-3の365日材齢において、W/B45%では、空気量2.5%で0.07g/cm²、空気量7.5%で0.12g/cm²となった。W/B60%では、空気量2.5%で0.11g/cm²、空気量7.5%で0.10g/cm²となった。W/B75%では、空気量2.5%で0.22g/cm²、空気量7.5%で0.20g/cm²となった。全ての配合で大幅なスケーリング抵抗性の向上が確認できた。それに対して、空気量による相関は見られなくなった。

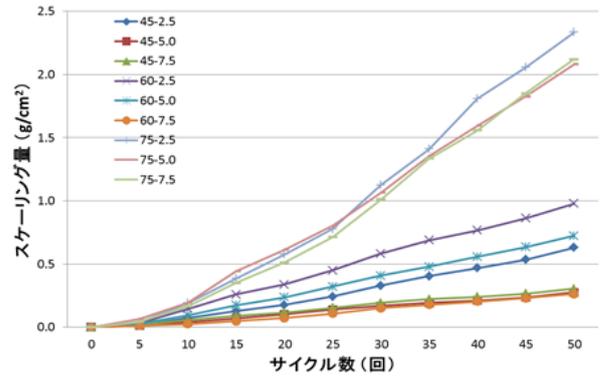


図-1 スケーリング量 (28日材齢)

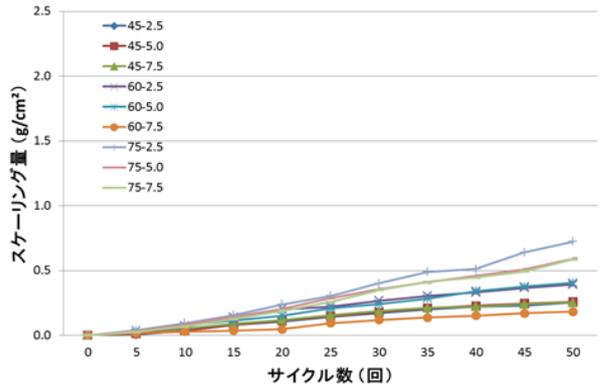


図-2 スケーリング量 (91日材齢)

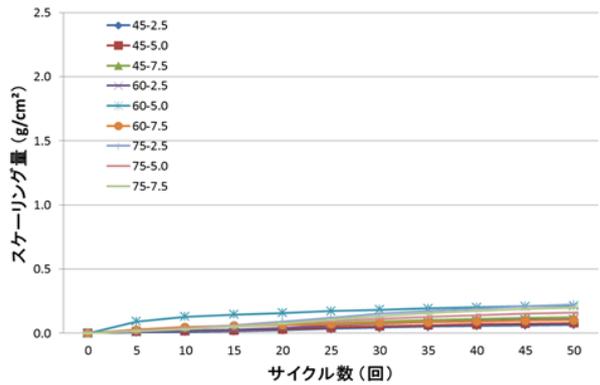


図-3 スケーリング量 (365日材齢)

これらの結果から、フライアッシュのポズラン反応による組織の緻密化により、長期の強度発現及び複合劣化抵抗性が向上したと考えられる。また、内部組織の空隙が減少及び小さくなったとすると、膨張圧の観点から、複合劣化抵抗性は低下することが予想される。しかし、365日材齢では、空気量による相関がなくスケーリング抵抗性が向上していることから、内部における膨張圧の影響は小さいことが予想される。

3.2 表層強度

図-4、図-5に養生期間28日および91日の引抜き試験による表層強度の測定結果を示す。

28日養生した供試体の表層強度は、W/B45%、空気量2.5%が6.2kN/mm²で最大となった。表層強度は、空気量が多い供試体ほど小さくなっており、一般的な傾向が見受けられた。また、W/C41%のOPCコンクリート

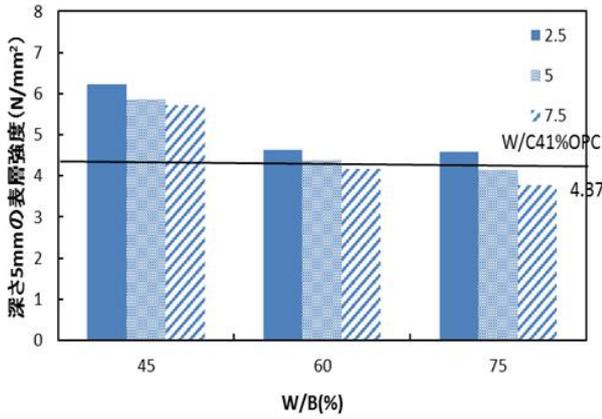


図-4 表層強度 (28日材齢)

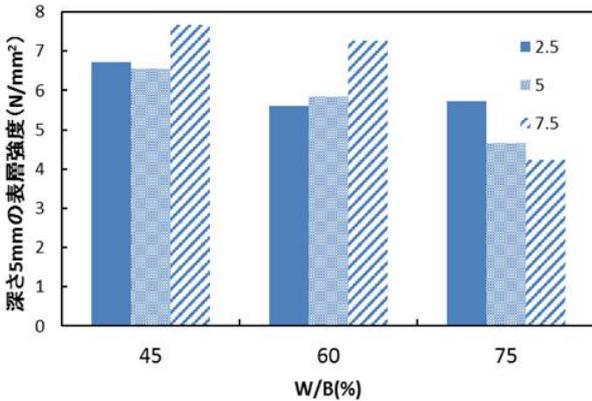


図-5 表層強度 (91日材齢)

の強度 γ と比較してみると、LPC-FA 併用系コンクリートの W/B45%は、OPC コンクリートの約 1.4 倍の表層強度が確認され、91 日養生になると W/B60%、75%の供試体も、OPC コンクリートの W/C41%と同等以上の表層強度となることが確認できた。

一方、W/B との相関性は、全体的に W/B が小さいほど大きくなる傾向が確認できるが、91 養生の W/B60%と 75%の表層強度では同程度であった。91 日養生した供試体の表層強度は、さらに増進し、W/B45%と 60%では、約 1.25 倍となった。

養生期間 28 日では、空気量が大きい供試体ほど表層強度は小さくなる傾向が認められたが、養生期間 91 日では、空気量と表層強度の相関性は認められなかった。

3.3 空気量及び気泡間隔係数

リニアトラバース法を用いて測定した各配合条件の空気量を図-6 に示す。空気量は、フレッシュ時の空気量の 2/3 程度の値となった。また、養生期間に依らず、配合条件ごとに概ね同程度の値となった。これは、リニアトラバース法による空気量の測定が、気泡径 10 μ m 程度以下の細孔容積が測定できていないことから、緻密化による影響が反映されないことによるものと考えられる。

次に、各配合条件の気泡間隔係数を図-7 に示す。気泡間隔係数は、全体的に一般的な傾向と同様で、空気量が大きいものほど気泡間隔係数は小さくなっており、材齢 91 日までは材齢に依らず同様の値である。しかし、材齢 365 日になると 9 ケース中 5 ケースの供試体が、

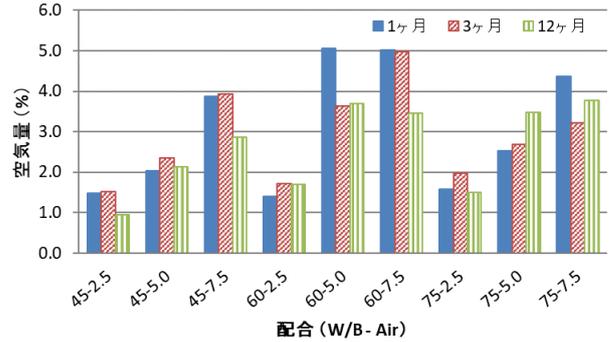


図-6 空気量

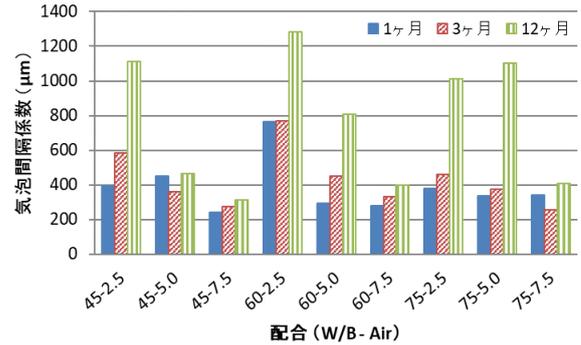


図-7 気泡間隔係数

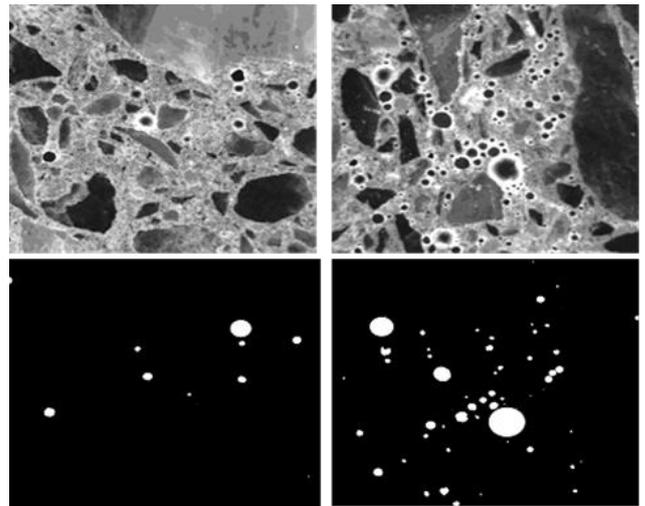


図-8 空気量 2.5%と 7.5%の典型的な気泡状態

2 倍程度に大きくなっている。

空気量には、材齢による差がほとんどなかったが、気泡間隔係数には明確な差が確認された。気泡間隔係数が倍増した供試体は、いずれも空気量が小さく、かつ空気量調整剤の添加量が小さい供試体であったことから、エントレインドエア (30~250 μ m 程度) の導入量が少なく、図-8 に示す空気量 2.5%と 7.5%の典型的な気泡状態の気泡の分布に見られるように、小さい気泡が極めて少なく、一つの気泡がなくなると気泡感覚係数への影響が大きい。そのため、365 日の養生期間で微小な気泡径の空隙がポズラン反応の進行により気泡測定できる気泡径未満になり、空気量に影響が微小な範囲で著しく気泡間隔係数が大きくなったものと考えられる。

3.4 実効拡散係数

電気泳動試験により測定した各条件の実効拡散係数を図-9に示す。材齢28日までは、どの配合も 10^{-12} m²/sオーダーであったが、91日では、W/B75%の空気量7.5%以外 10^{-13} m²/sオーダーとなり、365日ではすべての配合が 10^{-13} m²/sオーダーの比較的小さい値となった。複合劣化で重要となる物質透過抵抗性は、LPC-FA併用系コンクリートを用い、良好な養生条件を満たしていれば、配合条件に依らず十分小さくなることが確認できた。

4. まとめ

本研究では、LPC-FA併用系コンクリートの耐凍害性を各種試験により評価した。材齢に応じて耐凍害性が変化する供試体において、以下のような知見が得られた。

- ▶ スケーリング試験より、材齢365日において著しい劣化抵抗性の向上を確認した。
- ▶ 気泡間隔係数については、材齢91日から材齢365日で倍増するケースも散見された。
- ▶ 実効拡散係数より、外部からの劣化因子の侵入は、材齢が365日経過した時点で、配合条件にほぼ関係なく十分に小さくなった。

気泡測定では、フレッシュ時の空気量が硬化後に2/3程度に減少し、その後材齢365日までは変化がなかった。しかし、気泡間隔係数においては、倍増するケースも散見された。そのため、十分なエントレインドエアの導入量が確保されない場合、内部の膨張圧による抵抗性低下が懸念される。これについては、今後より長期の材齢を踏まえて検討を加える必要がある。

一方で、スケーリングについては、気泡間隔係数が小さくなるにも関わらず、著しい劣化抵抗性の向上が確認された。また、外部からの劣化因子の侵入は、実効拡散係数の結果から、材齢1年経過した時点で条件にほとんど関係なく十分に小さくなった。そのため、複合劣化の低減対策には、表層部の緻密化が重要であることが考えられる。

以上から、W/Bが小さく、エントレインドエアを必要量付与し、3か月程度以上の適切な養生期間を経たコンクリートは、中性化や塩害に劣化抵抗性を有しつつ、耐凍害性も満足する可能性がある。

5. 今後の予定

今後は、1年材齢での表層強度及び実際の環境に近いブロック供試体の暴露試験の状態変化も踏まえて検討を継続する計画である。暴露供試体については、現在コアリングを行っており、終了次第スケーリング試験等各種試験に供する予定である。

これらの結果を踏まえて、現在「寒中コンクリートの品質確保に関する研究委員会」（コンクリート工学会東北支部）において進められている凍害環境種別のSク

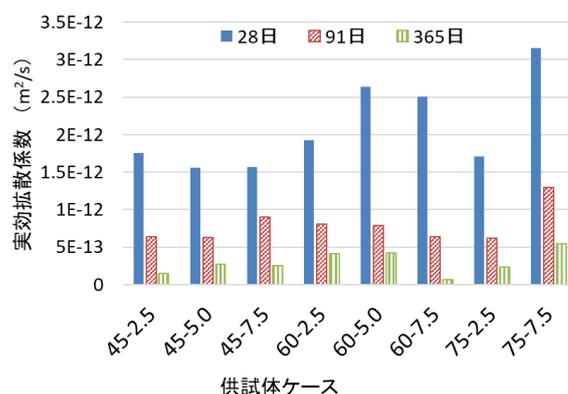


図-9 実効拡散係数

ラス（特に厳しい凍害環境でかつ凍結防止剤散布量20t/km以上）への適用性検討を経て、当該構造物の試験施工に情報提供等を行うことで、新たな課題を発見し、実用化に向けて改善していく。

謝辞：本研究の一部は、平成30年度社会資本の整備や維持管理に係る研究又は活動の助成事業助成金を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 庄谷征美, 月永洋一：東北地方のコンクリート構造物の凍害について, コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.3-8, 2004.12
- 2) 庭瀬一仁, 廣永道彦, 辻幸和：低レベル放射性廃棄物処分施設に用いるコンクリートの設計について, コンクリート工学, Vol.44, No.2, pp.3-8, 2006.2
- 3) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度の関係の検討, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993.7
- 4) Powers, T. C. : Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste, International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, pp.319-344, 1968
- 5) 庭瀬一仁, 杉橋直行, 辻幸和：低レベル放射性廃棄物処分施設の低拡散層に用いる高流動モルタルの室内配合選定, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.3, pp.43-51, 2010.9
- 6) 佐伯昇, 堀口敬, 菅原隆：表層部のコンクリート強度について, コンクリート工学, Vol. 33, No.10, pp.5-12, 1995.10
- 7) 庭瀬一仁, 菅原隆, 月永洋一, 武藤拓也：透水型枠工法による寒冷地コンクリートのスケーリング抵抗性について, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp384-389, 2017.3