

クリンカー細骨材の使用が硬化モルタルの Ettringite 遅延生成に及ぼす影響

東北大学 学生会員 ○山崎 萌々子 川守田 祥吾
 東北大学 正会員 宮本 慎太郎 皆川 浩 久田 真
 太平洋セメント（株） 正会員 林 建佑

1. はじめに

セメント産業では廃棄物の受け入れ量を維持するための方策として、セメントの中間生成物であるセメントクリンカーを骨材として利用することを検討している。既報¹⁾では、普通セメントクリンカー細骨材 (CL) は硬化体の様々な性能を向上させることができることなどが報告されている。また、CL は初期強度の向上にも寄与するため、プレキャスト (PCa) 製品の早期脱型が期待できる。しかしながら、PCa 製品は高温蒸気養生を施すことが多く、DEF (Delayed Ettringite Formation) による膨張ひび割れを起こす可能性がある。DEF は硬化後に ettringite が二次鉱物として析出する現象であり、この現象に伴って膨張ひび割れが生じることがある。DEF による膨張ひび割れは硬化初期に高温履歴を受けたコンクリートでよく散見される。

Miyamoto ら²⁾は CL を用いたモルタルは高温蒸気養生を施した場合においても材齢 182 日時点で DEF による膨張が生じないことを報告している。ただし、更なる長期材齢で CL が DEF による膨張を抑制する効果があるのかについては現時点では明確になっていない。

以上の背景を踏まえて、本研究では CL を使用したモルタルの DEF による長期材齢における膨張抑制効果を把握する目的で、既往の研究よりも長期材齢における CL を使用したモルタルの経時的な長さ変化を観察した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料と水準及び配合

結合材として普通ポルトランドセメント (OPC) を、混和材としてフライアッシュ (FA) を使用した。また、細骨材として CL と標準砂 (SS)、石灰石砕砂 (LS) を使用した。本研究は既報²⁾の続報であるため、使用材料の化学組成については本稿では省略する。モルタルの水準および配合を表-1 に示す。名称については、結合材が OPC のみの供試体は「○○-OPC」と表記し、FA を置換した試料の水準名は「○○-FAXX」と表記する。このとき、○○は細骨材種類を、XX は FA の置換率を

表-1 モルタルの配合

水準	W/B	S/B	単位量 (kg/m ³)					
			W	B		S		
				C	FA	LS	CL	SS
SS-OPC	0.5	3	257	513	0	0	0	1533
SS-FA30			257	359	116	0	0	1533
LS-OPC		2.25	299	597	0	1320	0	0
LS-FA30			299	418	135	1320	0	0
CL-OPC			299	597	0	0	1392	0
CL-FA30			299	418	135	0	1392	0

示す。水結合材比 (W/B) は 0.5 とし、細骨材と結合材の比 (S/B) は SS で 3.0、LS と CL では 2.25 とした。

加えて、本研究では既報²⁾で示した通り DEF を促進する目的で、硫酸カリウム特級試薬 (関東化学製) を添加した。添加量は LS-OPC を基準として、LS-OPC のサンプルの単位セメント量に対して SO₃ 量が 3 mass% になるように設定した。したがって、すべての試料に単位量 33 kg/m³ の硫酸カリウム試薬を外割で添加した。

2. 2 試験方法

JIS A 1146 に準拠し練混ぜを行い、内寸法 40 × 40 × 160 mm の三連鋼製型枠に打ち込み、高温蒸気養生を施した。高温蒸気養生の手順は、まず型枠に打ち込んだモルタルを 20 ± 2 °C で 4 時間前養生を施し、次に 20 °C/h の昇温速度で 80 °C まで昇温させた。次に、この温度を 10 時間保持し、その後、自然冷却で常温まで降温し、打ち込みから約 24 時間後に脱型した。脱型後は 20 °C の恒温室内で水中養生を施し、マイクロメータを用いて定期的に長さ変化を測定し、外観を観察した。

3. 実験結果・考察

図-1 に膨張率の経時変化を、図-2 に SS-OPC と LS-OPC を除いた膨張率の小さかった試料の膨張率の経時変化をそれぞれ示す。また、図-3、図-4 に材齢 16 ヶ月時点での LS-OPC と CL-OPC の供試体の外観を示す。

図-1 に着目すると、SS-OPC と LS-OPC は 91 日目から膨張が始まり、182 日目の膨張率は約 0.9% になり、365 日目には SS-OPC、LS-OPC それぞれ約 1.8%、1.4% の膨張率に達したことが確認できた。一方で、CL を使

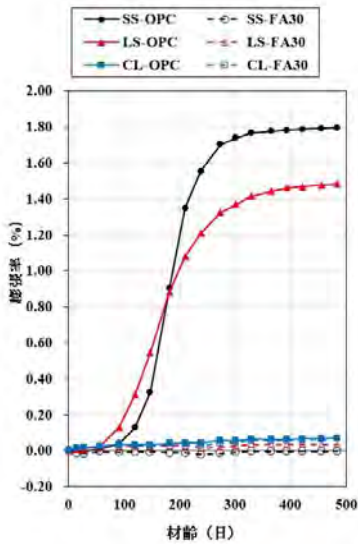


図-1 膨張率の経時変化

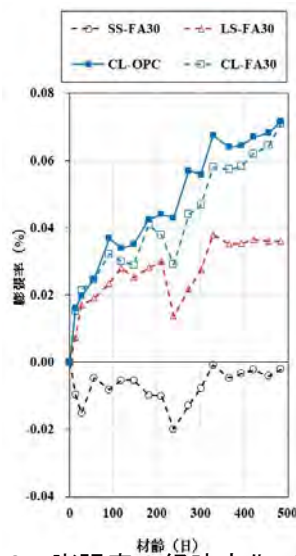


図-2 膨張率の経時変化（膨張率
0.1%以下）



図-3 LS-OPC（材齢 16 ヶ月）



図-4 CL-OPC（材齢 16 ヶ月）

用した供試体と FA をセメントに 30 %置換した全ての供試体においては材齢 484 日時点までで明確な膨張は生じていないことがわかった。また、材齢 484 日までで明確な膨張が認められなかった供試体に着目すると（図-2）、CL を使用した供試体は CL を使用していない供試体と比較して若干の膨張を示しているものの、そのごく僅かな膨張率に有意な差は認められなかった。したがって、この膨張の原因は DEF によるものではなく CL の反応に由来する膨張であると考えられた。

次に、供試体の外観に着目しても LS を使用した FA を置換していない供試体では明確なひび割れが確認できるが、CL を使用した FA を置換していない供試体ではひび割れは確認できなかった（図-3、図-4）。

FA が有する DEF による膨張の抑制効果は物質移動抵抗性の向上が理由という報告がある³⁾。既報においても CL の使用によりモルタル系内の物質移動抵抗性が向上することが報告されており、この効果が DEF による膨張を抑制した可能性が考えられた。加えて、DEF は系内の pH が低下すると生じやすいことが知られていることから、CL からのアルカリの供給⁴⁾により系内の pH が低下しにくくなったことで DEF が抑制されている可能性が考えられた。したがって、今後は圧搾抽出等により CL を使用したモルタル内部の液相の組成を観察するなど DEF 抑制メカニズムを解明することなどが必要と考えている。

4. 結論

本研究では、CL を用いることにより、FA を用いた場

合同様に、材齢 484 日時点まで DEF による膨張を抑制できることが明らかとなった。このメカニズムについては、CL の使用により、系内の物質移動抵抗性が向上したことに加え、CL からのアルカリの供給が関与していることが考えられた。ただし、本研究では材齢 484 日までの観察である。したがって、CL の PCa 製品への適用に向けてより長期材齢における DEF による膨張を抑制できるか観察するとともに CL が DEF による膨張を抑制するメカニズムを解明する予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費（JP19H02209、JP19H02208）の助成を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮本慎太郎ほか、細骨材として使用したセメントクリンカーがモルタルの物性に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.69 (1), pp.169-175, 2015
- 2) Miyamoto S. et al., Evaluating the strength development of mortar using clinker fine aggregate with a combination of fly ash and its inhibitory effects on alkali-silica reaction and delayed ettringite formation, J. Mater. Cycles Waste Manag. published online: 04 Dec., 2022
- 3) Kawabata Y. et al., The long-term suppression effects of fly ash and slag on the expansion of heat-cured mortar due to delayed ettringite formation, Constr Build Mater, 125235, 2021
- 4) Miyamoto S. et al., Verification of the mutually complementary effect of fly ash and clinker aggregate on the strength, heat of hydration and alkali silica reaction. J. Mater. Cycles Waste Manag. Vol.24, pp.1396-1406, 2022