

論文

[1023] 分離低減剤を用いた高流動・高強度コンクリートに関する基礎的研究

山川 勉 *¹・早川 和良 *²・小山 明男 *³・菊池 雅史 *⁴

1. はじめに

現場作業の省力化、施工の信頼性、工期短縮などの観点から流動性と分離抵抗性を兼ね備えた高流動コンクリートの研究が活発に行なわれ、実用化されつつある。この高流動コンクリートは岡村ら [1] によって提案され、現在、種々のタイプが検討されている。

筆者らは、高流動コンクリートの1つのタイプとして、結合材量の比較的少ない領域で、高い流動性と材料分離抵抗性をバランス良く備えたコンクリートについて検討し、分離抵抗性を確保できる混和剤（分離低減剤（セルロース系）、以下 LAC と略す）を開発した。[2] [3]

また、高い流動性と高強度を組み合わせた、高流動・高強度コンクリートについても盛んに研究が行なわれている。[4] [5]

LAC 添加による耐久性への影響は重要なポイントであり、本研究では、高強度領域を含めた各種、水結合材比のコンクリートについて、その影響を検討すると共に、高流動・高強度コンクリートにおいて、材料分離せず、より高い流動性を得ることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 実験計画

実験の因子と水準を表-1 に示す。実験は、一般的な強度範囲のコンクリート (W/B=40~60%) と高強度コンクリート (W/B=30%) からなり、前者では LAC 添加の耐久性への影響、後者では、これ以外に、スランプフロー 70 cm 以上の、より高い流動性を得るための配合について検討した。

LAC は、骨材などの材料分離を抑制する目的で 0~600 g/m³ の範囲で添加した。

2. 1 使用材料

実験に使用した材料を表-2 に示す。高炉スラグ微粉末については、一般的な強度範囲のコンクリートでは 4,000 ブレーンを、高強度コンクリートでは 6,000 ブレーンを使用した。

表-1 実験の因子と水準

因子	水準
LAC 添加量	0~600 g/m ³
水結合材比	30~60 %
結合材の種類	NP、BF、FA

表-2 使用材料の種類と物性

セメント	普通ポルトランドセメント、比重 3.16 (NP と略す)
混和材	高炉スラグ微粉末、比重 2.92、比表面積 4,560 cm ² /g (BF と略す)
	高炉スラグ微粉末、比重 2.91、比表面積 6,420 cm ² /g (BF と略す)
	フライアッシュ、比重 2.26、比表面積 3,100 cm ² /g (FA と略す)
細骨材	大井川産川砂、比重 2.60、吸水率 1.22 %、FM 2.73
粗骨材	硬質砂岩砕石、比重 2.62、吸水率 1.06 %、FM 6.75、Gmax 20 mm
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物
AE 剤	天然樹脂酸塩
分離低減剤	低界面活性の非イオン性セルロースエーテル (LAC と略す) 粘度 (2 % 濃度) 10,400 cP、重量平均分子量 約 500,000
高性能減水剤	高縮合トリアジン系化合物

* 1 信越化学工業 (株) 合成技術研究所第一部 主任研究員 (正会員)

* 2 信越化学工業 (株) 有機合成事業部事業部長室 主席技術員、理修 (正会員)

* 3 明治大学理工学部大学院、建築材料研究室 (正会員)

* 4 明治大学理工学部専任講師、建築材料研究室、工博 (正会員)

2. 2 配合条件

コンクリート配合を表-3 に示す。

一般的な強度範囲のコンクリート (W/B=40~60 %) では、単位水量を 180 kg/m³ とし、結合材は、NP 単味 (以下、NP のみで BF、FA 無添加のものを NP 単味と略す) および 2 成分系として、スラグ系 2 成分 (NP+BF (45 %))、フライアッシュ系 2 成分 (NP+FA (20 %)) の 3 種類を検討した。(LAC 無添加のコンクリートについては骨材分離のない範囲のスランプとした。)

高強度コンクリート (W/B=30 %) では、単位水量を 170 kg/m³ とし、結合材は、NP 単味およびスラグ系 2 成分 (NP+BF (30~70 %)) の 2 種類を検討した。また、より高い流動性を備えた配合としてスランプフローが 75±5 cm のものについても検討した。

表-3 配合条件

種別	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m ³)		
					W	C	LAC
一般的強度のコンクリート	65±5	4±1.5	60.0	50.0	180	300	0~0.60
	65±5	4±1.5	50.0	50.0	180	360	0~0.60
	65±5	4±1.5	40.0	50.0	180	450	0~0.60
高流動コンクリート	65±5	4±1.5	30.0	45.0	170	567	0~0.35
	75±5	4±1.5	30.0	45.0	170	567	0~0.35

2. 3 練り混ぜ

練り混ぜは、容量 50 l のパン式強制練りミキサーを用い、1 バッチ 50 l で行った。練り混ぜ時間は、結合材、細骨材および LAC を投入して空練り 30 秒間、水と減水剤および AE 剤を加え、30 秒、さらに粗骨材を投入して 2 分、合計、注水後 2 分 30 秒間練った。

2. 4 試験項目と試験方法

試験項目と試験方法を表-4 に示す。

鉄筋通過試験については、材料分離の定量化方法の 1 つとして、コンクリートを容器に入れ、一定時間静置後、排出し、評価する方法についても検討した。

硬化物性測定用の供試体については、LAC 無添加の場合は、通常の方法 (締固めあり) で作製したのに対し、LAC 添加の場合は、実施工を考慮し、締固めなし (分割添加のみ) で作製した。

また、耐久性として、長さ変化、中性化、塩分遮蔽性、凍結融解抵抗性について検討した。

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	供試体形状 (cm) および分割回数	試験方法
スランプフロー		土木学会規準
空気量		JIS A 1128
鉄筋通過試験		鉄筋メッシュ (D-16、空き間隔 50 mm、メッシュ数 4×4) にコンクリート 30 l を通過させ、通過前後の重量比を表示。文献 [1]
圧縮強度	10φ×20 [3 層]	JIS A 1108
引張り強度	10φ×20 [3 層]	JIS A 1113
曲げ強度	10×10×40 [2 層]	JIS A 1106
長さ変化	10×10×40 [2 層]	JIS A 1129
中性化	10×10×19 [2 層]	30 °C、RH 60 %、CO ₂ 濃度 5 %、促進 1 ヶ月 材齢 2 週まで水中養生後、2 週気中養生後、促進試験
塩分遮蔽性	10×10×19 [2 層]	NaCl 3 % 溶液中に 12 時間浸漬後、30 °C 気中で 12 時間を 1 サイクルとし、40 サイクル経過後測定
凍結融解抵抗性	10×10×40 [2 層]	ASTM C 666 A (水中凍結・水中融解) 材令 2 週まで標準水中養生後、試験

3. 実験結果および考察

3. 1 一般的な強度範囲のコンクリート (W/B=40~60%)

(1) 圧縮強度への影響

図-1 に LAC 添加量と圧縮強度 (NP 単味、材齢 28 日) の関係を示す。

図より、LAC の添加は、いずれの水結合材比においても圧縮強度に悪影響を与えないことが分かる。このことから、締固めなしでも十分な強度が得られていると考えられる。

(2) 乾燥収縮への影響

図-2 に LAC 添加量と収縮率 (NP 単味、乾燥期間 1 年) の関係を示す。

水結合材比 40~60% の範囲では、収縮率に大きな違いはなく、また、LAC 添加、無添加による違いも少なく、同等で、すべて 8×10^{-4} 以下である。

(3) 中性化への影響

図-3 に LAC 添加量と中性化深さ (NP 単味、促進 1 ヶ月後) の関係を示す。

中性化深さは水結合材比が低くなるに従い、小さくなる傾向を示した。また、LAC 添加コンクリートは締固めを行なわなかったが、無添加のものと大きな違いは認められなかった。

(4) 塩分遮蔽性への影響

図-4 に LAC 添加量と塩分浸透深さ (NP 単味、40 サイクル後) の関係を示す。

塩分浸透深さは中性化深さと同様、水結合材比が低くなるに従い、小さくなる傾向を示した。また、中性化と同様、LAC 添加コンクリートは締固めを行なわなかったが、無添加のものと大きな違いは認められなかった。

記号	LAC 添加量
■	0 g/m ³
□	350 g/m ³
▨	500 g/m ³
▩	650 g/m ³

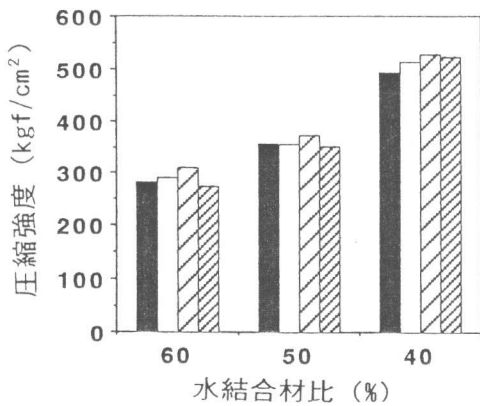


図-1 LAC 添加量と圧縮強度の関係

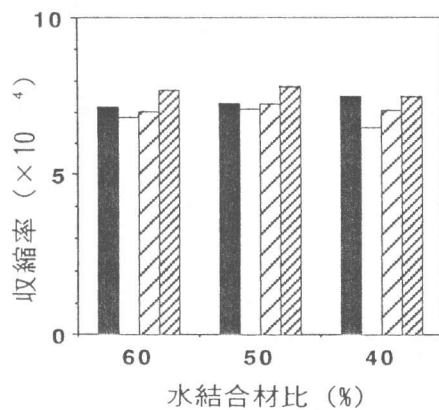


図-2 LAC 添加量と収縮率の関係

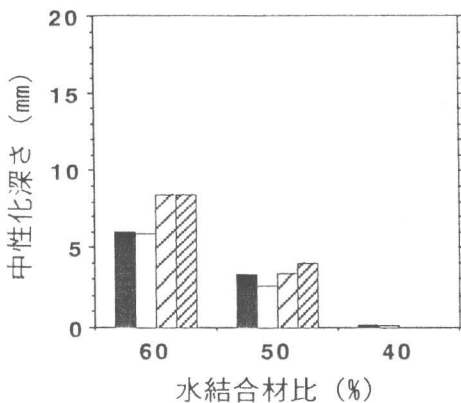


図-3 LAC 添加量と中性化深さの関係

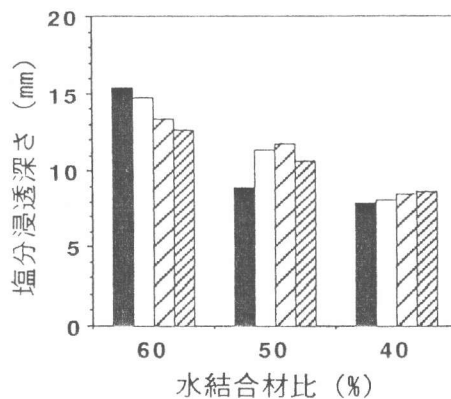


図-4 LAC 添加量と塩分浸透深さの関係

(5) 凍結融解抵抗性への影響

図-5 に各種結合材による空気量と耐久性指数の関係を示す。(W/B=50%)

LAC 添加コンクリートは締固めを行なわなかったが、いずれの配合でも空気量 4% 以上で、耐久性指数 85 以上と高い凍結融解抵抗性を示した。

結合材による違いについては、NP 単味よりも (NP+BF) 系はやや優れ、(NP+FA) 系はやや劣るという結果が得られた。(NP+BF) 系の結果は、従来の知見 [3] を肯定するものであり、コンクリート組織の緻密化が原因と思われる。

以上のように、LAC 添加コンクリートでは締固めを行わずに供試体を作製したが、通常の締固めを行なった LAC 無添加コンクリートと比較して、圧縮強度および各種耐久性(長さ変化、中性化、塩分遮蔽性、凍結融解抵抗性)の点で、同等の結果が得られた。これは、LAC 添加により、モルタルのレオロジー特性が変化し、骨材分離がなく、締固めなしでも水密性が確保されたためと考えられる。

3. 2 高強度コンクリート (W/B=30%)

(1) フレッシュ物性(骨材分離抵抗性)

骨材分離抵抗性の評価方法の 1 つとして鉄筋通過試験があり、図-6 に測定結果を示す。

通常、この測定は静置時間なしで実施するが、静置時間を変えると図のように、骨材分離状態のもの(目視による評価)は通過率が低下する。このように、静置時間を 5 分間とし、通過率を測定すると分離状態が把握できる。

図-7 に 2 成分系 (BF 置換率 50%)、スランブフロー 65±5 cm、75±5 cm の高流動コンクリートにこの測定を適用した結果について示す。

明らかに、LAC 無添加のコンクリートではスランブフロー 70 cm 程度以上となると骨材分離ぎみとなる。これに対して、LAC を 200 g/m³ 添加したものではスランブフローが 70 cm を越えた状態でも骨材分離は見られない。

これは、LAC 無添加コンクリートでは骨材を保持できるだけのレオロジー特性をもたないことが原因であると考えられ、次に、コンクリート配合から粗骨材を除いたモルタル配合のレオロジー特性を測定した。

記号	LAC 添加量	結合材
○	0 g/m ³	NP 単味
△	350 g/m ³	NP 単味
●	500 g/m ³	NP 単味
▲	500 g/m ³	NP+BF
■	500 g/m ³	NP+FA
□	650 g/m ³	NP 単味

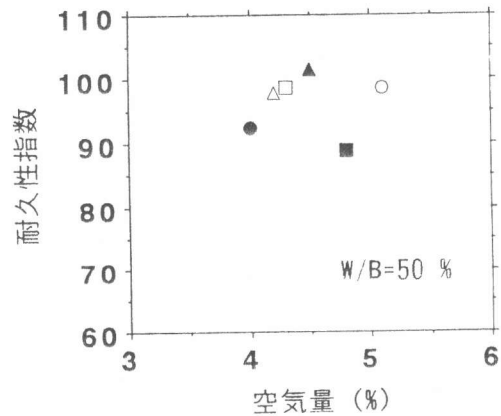


図-5 各種コンクリートの凍結融解抵抗性

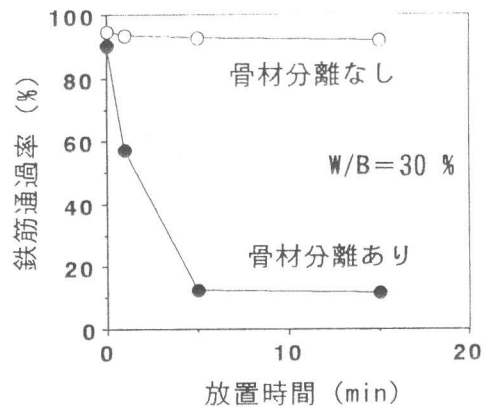


図-6 放置時間と鉄筋通過率の関係

記号	LAC 添加量
●	0 g/m ³
○	200 g/m ³

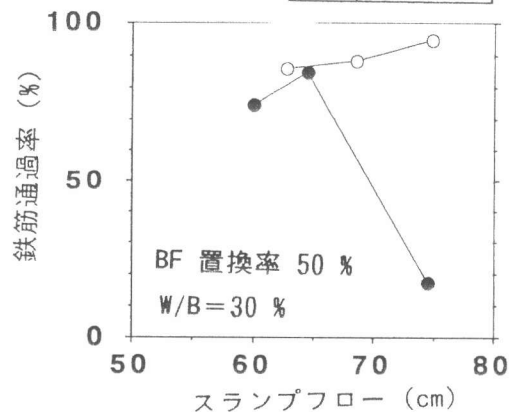


図-7 スランブフローと鉄筋通過率の関係

測定に用いた配合は表-5 のコンクリート配合から粗骨材を除いたものである。

モルタルの塑性粘度および降伏値の変化を内筒回転型粘度計（ローター直径 21.1, 14.6 mm）を用いて測定した。回転速度は、2, 4, 10, 20 rpm とし、速度勾配とせん断応力の関係から降伏値、塑性粘度を求めた。

図-8 に LAC 添加量とモルタルの塑性粘度および降伏値の関係を示す。

LAC の増大に伴って、塑性粘度、降伏値共に大きくなる。

増粘剤添加により、モルタルの降伏値を大きくすると粗骨材に拘束されるモルタル量が多くなり、骨材分離を抑制できると言われている。[6]

今回の実験では、降伏値約 110 dyn/cm² 以上かつ、塑性粘度約 110 dyn・s/cm² 以上であれば骨材の分離は抑制できると考えられる。

降伏値、塑性粘度が増大すると流動性は妨げられ、スランプフローは低下する傾向にある。[6] このことから、骨材分離を起こさず、高い流動性を有するためには、これらの最適範囲があるものと考えられる。

(2) 硬化物性（圧縮強度および耐久性）

a. 圧縮強度への影響

図-9 に LAC 添加量と圧縮強度（材齢 28 日）の関係を示す。

LAC 添加、無添加で圧縮強度に大きな違いはない。

b. 乾燥収縮への影響

図-10 に LAC 添加量と収縮率（乾燥期間 13 週、BF 置換率 50 %）の関係を示す。

LAC 添加、無添加で収縮率に大きな違いはなく、いずれも 8×10^{-4} 以下である。

表-5 コンクリート配合

W/B (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
		W	NP	BF	LAC
30.0	45.0	170	284	284	0~0.4

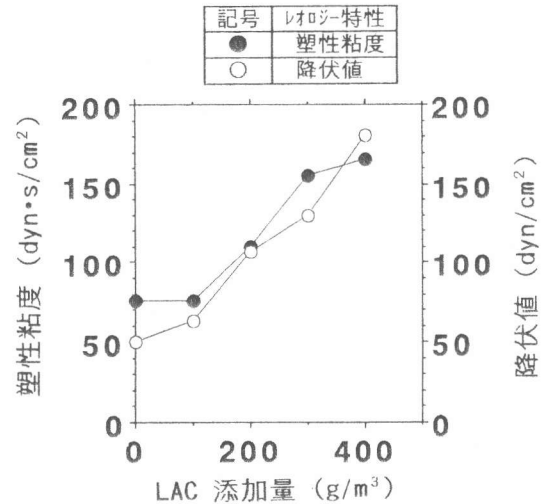


図-8 モルタルの塑性粘度および降伏値と LAC 添加量の関係

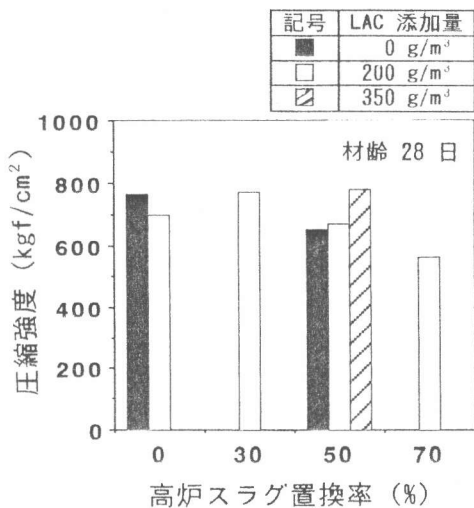


図-9 LAC 添加量と圧縮強度の関係

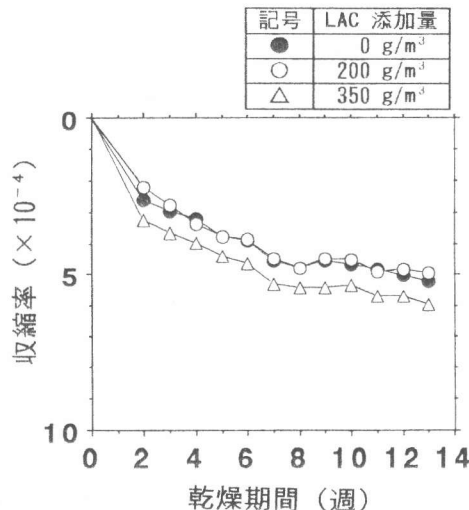


図-10 LAC 添加量と収縮率の関係

c. 中性化および塩分遮蔽性への影響

表-6 に LAC 添加量と中性化深さおよび塩分浸透深さ (BF 置換率 50 %) の関係を示す。

中性化深さ、塩分浸透深さ共に、LAC 添加による悪影響はなく、LAC 添加コンクリートにおいて、これらの抑制効果は十分に確保されていると考える。

e. 凍結融解抵抗性への影響

図-11 に凍結融解抵抗性試験の結果を示す。

LAC 添加、無添加にかかわらず、凍結融解回数 300 回後の相対動弾性係数は 100 % 以上であり、凍結融解抵抗性に優れる。

記号	LAC 添加量	結合材	空気量
●	0 g/m ³	NP 単味	3.9 %
○	200 g/m ³	NP 単味	3.9 %
△	200 g/m ³	NP+BF	3.2 %

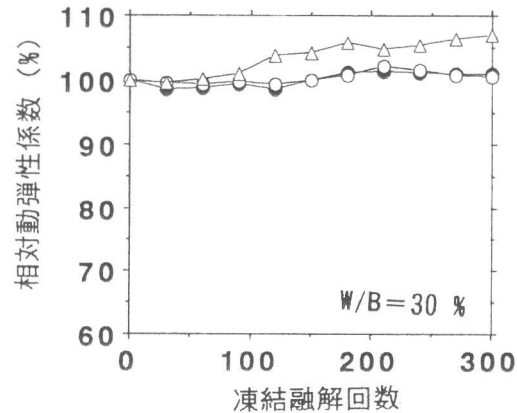


表-6 LAC 添加量と中性化深および塩分浸透深さの関係

LAC 添加量	中性化深さ	塩分浸透深さ
0 g/m ³	0.75 mm	2.93 mm
200 g/m ³	0.34 mm	3.07 mm
350 g/m ³	0.52 mm	3.00 mm

図-11 各種コンクリートの凍結融解抵抗性

4. 結論

本研究の範囲内で明らかになったことをまとめると以下のようなになる。

- (1) 水結合材比 30~60 % のコンクリートに、LAC を添加し、硬化体への影響について検討した結果、圧縮強度、耐久性 (長さ変化、中性化、塩分遮蔽性、凍結融解抵抗性) において、無添加の同じ水結合材比のコンクリートと同等であることを確認した。
- (2) 高流動・高強度コンクリートにおいて、骨材分離せず、より高い流動性 (スランプフロー 70 cm 程度以上) を求めるためには、LAC を添加し、モルタルのレオロジー特性を変化させることが有効である。今後、さらに、LAC を添加したモルタルのレオロジー特性とコンクリート物性の関係について検討する予定である。

【参考文献】

- 1) 小沢一雄・前川宏一・岡村甫：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11, No. 1, pp 699-pp 704, 1989. 6.
- 2) 山川勉・早川和良：高流動コンクリート用増粘剤の基礎的性状について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp 325-330, 1992. 6.
- 3) 山川勉・捧剛明・早川和良・鮎田耕一：分離低減剤を用いた高流動コンクリートの耐凍害性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp 155-160, 1993. 6.
- 4) 友澤史紀・野口貴文・小野山貫造・陳庭：高強度・高流動コンクリート用バインダーの開発に関する研究、1992 年度日本建築学会大会学術講演梗概集、pp 523-528, 1992. 8.
- 5) 名和豊春・深谷泰文・鈴木清孝・柳田克巳：高ビーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 1, pp 143-pp 148, 1993. 6.
- 6) 藤原浩巳・下山善秀・富田六郎・久保田裕康：高流動コンクリートの充填性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp 27-pp 32, 1992. 6.