

論文 フレッシュコンクリートの性能保持方法の比較と評価

平田 隆洋*1・桜井 邦昭*2

要旨：コンクリートは、練上がり直後から時間の経過に伴ってワーカビリティが低下する。ワーカビリティが低下すると、ポンプ圧送時の閉塞や充填不良が生じるリスクが高まるとともに、コンクリートの施工性能が低下する。このため、土木学会・コンクリート標準示方書は、練り混ぜてから打ち終わるまでの時間の限度を規定している。本報告は、この規定された可使時間内において、フレッシュコンクリートの性能を保持する方法について比較検討し、可使時間内の性能保持が可能であることを実験的に明らかにした。

キーワード：フレッシュコンクリート、混和剤、スランプ、ブリーディング、凝結時間、圧縮強度

1. はじめに

コンクリートは練上がり直後から、時間の経過に伴って、ワーカビリティが低下することを前提として使用する材料である。ワーカビリティは、運搬、打込み、締固め、仕上げ等の凝結に至るまでのフレッシュコンクリートの施工のしやすさに関する多くの項目を含んでいる。特に重要なワーカビリティとして充填性、圧送性、凝結特性がある¹⁾。ワーカビリティが低下すると、充填不良やポンプ圧送時の閉塞が生じるリスクが高まるとともに、コンクリートの施工性能が低下して構造物の品質にも影響を及ぼす場合が多い²⁾。このため、コンクリート標準示方書は構造物の品質を確保するために、コンクリートを練り混ぜてから打ち終わるまでの時間の限度を、日平均気温が25℃以下の場合は2.0時間以内、同気温が25℃を超える場合は1.5時間以内¹⁾を標準とし可使時間の限度を規定している。

また、コンクリートを2層以上に打ち重ねる施工は、コールドジョイントが生じるリスクが高まるため、先に打ち込んだコンクリートの硬化が始まらないうちに上層にコンクリートを打ち重ねる必要がある。このコールドジョイントは、水分や塩分等の劣化因子の浸入経路となるため、鉄筋コンクリート構造物の耐久性が低下する一因となる。そこで、コンクリート標準示方書は、日平均気温が25℃以下の場合は、許容打重ね時間間隔を2.5時間以内、同気温が25℃を超える場合は、2.0時間以内を標準として規定¹³⁾している。

一般に、これらのコンクリートのワーカビリティの低下に影響を及ぼす要因は、温度や湿度などの環境条件や使用材料、施工条件など様々な条件が複合することが知られている。また、ワーカビリティの代表的な評価指標として、スランプやスランプフローが用いられることが多い。

実施工におけるスランプ変化の概要を図-1に示す。レ

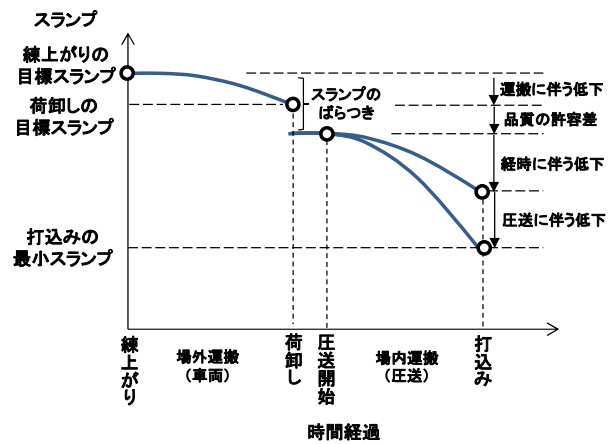


図-1 スランプ変化の概要

ディーミクストコンクリートを発注する場合、打込みの最小スランプを設定した後、荷卸し時のスランプを指定し、打込み前のコンクリートのワーカビリティを確保している。しかし、施工条件により想定した最小スランプを下回る場合もあり、ワーカビリティが低下して豆板やコールドジョイントが生じる可能性がある。

このような背景から、規定された可使時間の限度内において、フレッシュコンクリートの性能を保持することが可能となれば、施工性能が向上し、構造物の品質の確保に役立つ。

そこで、本論文は、レディーミクストコンクリート工場で製造したフレッシュコンクリートの性能を、可使時間内において保持することに着目し、標準材料も含めた4種類の方法について実験的に比較検討するとともに、保持性能を評価した結果について述べる。

2. フレッシュコンクリートの性能の保持方法

レディーミクストコンクリートのフレッシュコンクリートの性能を確保する対策には、下記の4種類がある。

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学)(正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学)(正会員)

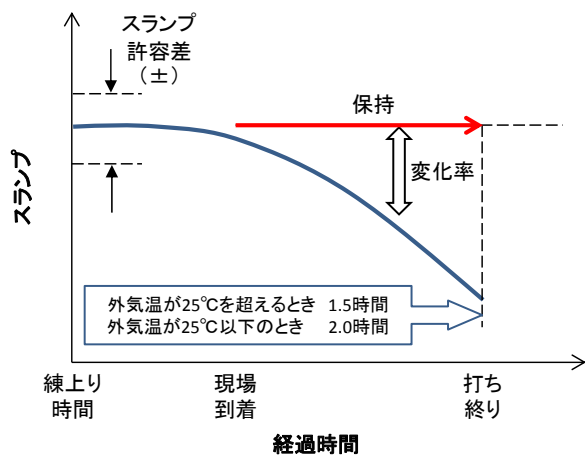


図-2 スランプの保持と変化率

2.1 従来の方法⁵⁾

- ワーカビリティの低下を見越し許容差内でスランプの大きいコンクリートを使用する。
- ワーカビリティが低下した場合に流動化剤を使用する。
- 超遅延剤を使用する。

2.2 特殊混和剤を使用する方法

ポリカルボン酸系化合物には、コンクリートに添加した直後にはセメント粒子に吸着せず、その後化合物が徐々にセメント粒子の表面に吸着して、セメント粒子同士の凝集を抑制する特殊な化学混和剤がある。この方法によると長時間の流動性の保持が可能となる。

3. 実験概要

3.1 保持性能の評価方法

実施工におけるスランプの変化は、図-1 に示すように場外か場内かなど評価の内容や項目が複雑になる。そこで、本実験は、材料性能のみに着目し、図-2 に示すようにフレッシュ性能の評価を単純化した。つまり、練上り直後のスランプに対して、時間経過に伴ってどの程度スランプが変化したのか、その変化率に着目した。

3.2 使用材料およびコンクリートの配合

実験に使用した材料を表-1 に示す。①標準のコンクリートには AE 減水剤を使用した。また、フレッシュ性能の保持方法として②特殊混和剤を使用する方法、③スランプが低下した後に流動化剤を使用する方法、④超遅延剤を使用する方法を比較検討した。各種混和剤の添加量を表-1 中に記載している。

コンクリートの標準配合を表-2 に示す。配合は、水セメント比を 55% とし、目標スランプを 18cm とした。

3.3 実験方法

コンクリートの試験方法を表-3 に示す。

コンクリートの練混ぜは、強制二軸練りミキサを使用

表-1 使用材料の種類および物性

分類	記号	種類および物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	陸砂、表乾密度 2.63 g/cm ³ 、F.M.2.77
粗骨材	G	碎石 2005、表乾密度 2.65 g/cm ³ 、実績率 58.9%
AE 減水剤	Ad.1	有機酸系誘導体及び芳香族高分子化合物 コンクリート製造時に C×0.2%添加
特殊混和剤	Ad.2	ポリカルボン酸系化合物(非発泡) 練上り 30 分後に C×0.5%添加
流動化剤	Ad.3	ポリカルボン酸コポリマー(非発泡) スランプが低下した後に C×0.3%添加
超遅延剤	Ad.4	ポリカルボン酸複合体(非発泡) 練上り 30 分後に C×0.3%添加

表-2 コンクリートの標準配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和材 (C×%)
		W	C	S	G	
55.0	44.0	175	318	786	1007	0.20

※目標スランプ 18±2.5%

※目標空気量 4.5±1.5%

表-3 試験方法

項目	準拠規準	方法・備考
スランプ	JIS A 1101	練上り後、30 分ごとに測定
空気量	JIS A 1128	練上り後、30 分ごとに測定
単位容積質量	JIS A 1116	空気量試験の質量法により測定
ブリーディング率	JIS A 1123	最初の 60 分間は 10 分ごとに、その後 30 分ごとに測定
許容打重ね時間 間隔	JIS A 1147	プロクター貫入試験で、抵抗値が 0.1N/mm ² に達する時間を測定 ⁴⁾
凝結時間	JIS A 1147	プロクター貫入試験で、抵抗値が 3.5 N/mm ² 、28.0 N/mm ² に達する時間を測定
圧縮強度	JIS A 1108	材齢 1 日、7 日、28 日

した。練混ぜ方法は、骨材、セメントを投入し、10 秒空練りした後、混和剤と練混ぜ水を投入して 60 秒間練混ぜた。特殊混和剤、流動化剤、超遅延剤は、標準コンクリートを練混ぜた後、それぞれ 30 分後、90 分後、30 分後に添加し、その後 30 秒間練り混ぜてフレッシュコンクリートの試験を行った。

また、各種コンクリートの経時変化の試験は、静置したコンクリートを試験の前に切り返して行った。

表-4 スランプの経時変化

条件	経過 時間 t (min)	スランプ [*] Sl (cm)	スランプ [*] 保持率 Sl _R (%)	スランプ [*] 保持値 t×Sl _R Sl _{in}
標準	5	18.0	100.0	500
	30	17.5	97.2	2916
	90	11.0	61.1	5499
	120	9.0	50.0	6000
	210	3.5	19.4	4074
特殊	5	18.0	100	500
	30	17.5	97	2910
	添加後	18.0	100	3000
	90	18.0	100	9000
	120	17.5	97	11640
	210	11.0	61	12810
流動化	5	18.0	100	500
	30	17.0	94	2820
	90	10.0	56	5040
	添加後	19.0	106	9540
	120	18.0	100	12000
	210	9.0	50	10500
超遅延	5	18.0	100	500
	30	17.0	94	2820
	添加後	19.5	108	3240
	90	17.5	94	8460
	120	17.0	94	11280
	210	15.0	83	17430

4. 実験結果および考察

4.1 スランプの経時変化

各種コンクリートのスランプの経時変化を表-4 に示す。練上り直後のスランプを 100%とし、経過時間毎のスランプ保持率 Sl_R を算定した。スランプ保持率を式(1)に示す。また、スランプ保持性能を定量化するため、経過時間 t にスランプ保持率 Sl_R を乗じた無次元数をスランプ保持値 Sl_{in} とした。スランプ保持値を式(2)に示す。仮に、120 分間保持率が 100%の場合は、12,000 ポイントとなる。

$$Sl_R = \frac{Sl_t}{Sl_0} \times 100 \quad (1)$$

$$Sl_{in} = t \times Sl_R \quad (2)$$

ここに、Sl_R：スランプ保持率(%), t：経過時間(min), Sl₀：練上がり時のスランプ(cm), Sl_t：時間 t 分経過後のスランプ(cm), Sl_{in}：スランプ保持値（無次元）

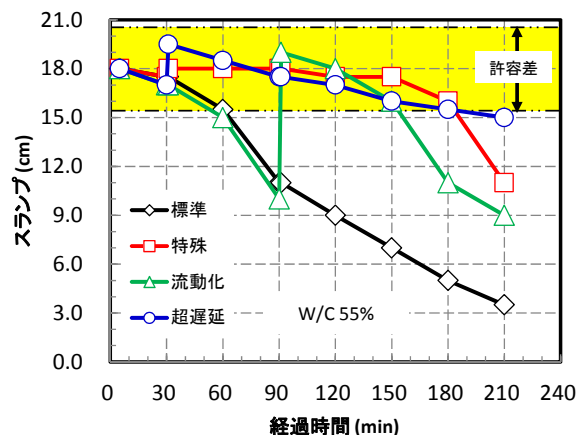


図-3 スランプの経時変化の比較

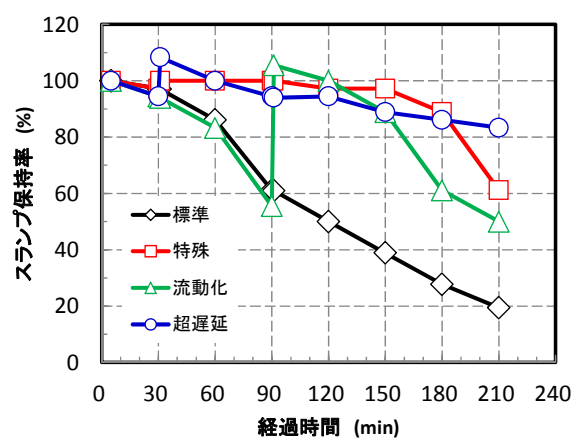


図-4 スランプ保持率の経時変化

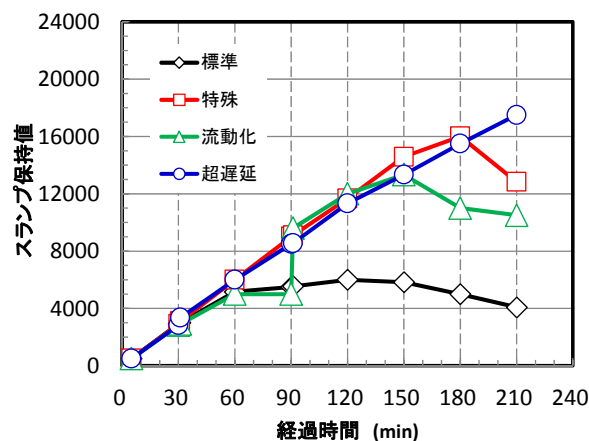


図-5 スランプ保持値の経時変化

スランプ、スランプ保持率、スランプ保持値の経時変化を、それぞれ図-3、図-4、図-5 に示す。

実験の結果、標準のコンクリートは 60 分後からスランプの低下が大きくなっている。スランプの保持能力は、超遅延>特殊>流動化>標準の順となり、目標スランプ 18cm に対して、許容差の±2.5cm 分を考慮したスランプ

表-5 空気量の経時変化

条件	経過 時間 t (min)	空気量 Air (%)	空気量 保持率* Air _R (%)	空気量 保持値 t×Air _R Air _m
標準	5	4.5	100	500
	30	4.0	89	2667
	90	3.5	78	7000
	120	3.7	82	9867
	210	2.7	60	12600
特殊	5	4.5	100	500
	30	4.2	93	2800
	添加後	4.2	93	2893
	90	4.4	98	8800
	120	4.4	98	11733
	210	3.9	87	18200
流動化	5	4.6	100	500
	30	4.5	98	2935
	90	4.0	87	7826
	添加後	4.7	102	9298
	120	4.5	98	11739
	210	4.3	93	19630
超遅延	5	4.3	100	500
	30	4.3	100	3000
	添加後	4.2	98	3028
	90	3.7	86	7744
	120	3.5	81	9767
	210	3.4	79	16605

保持率である 86%を保持できたのは、それぞれ 180 分、185 分、155 分、65 分の順であった。

スランプ保持値は、図-5 に示すように、スランプの保持能力の高さを示しており、最大のピーク値が現れていない超遅延剤の場合は、さらに保持できる性能があると判断できる。

4.2 空気量の経時変化

空気量もスランプと同様の計算式を用いて整理した。空気量の経時変化の測定値を表-5 に、空気量、空気量保持率、空気量保持値の経時変化を図-6、図-7、図-8 に示す。

空気量は、目標値 4.5%に比べて許容差が±1.5%と大きいと、各種コンクリートの空気量の保持性能はいずれも高い。流動化>特殊>超遅延>標準の順に保持性能は高かった。空気量保持値は、標準の最大値が 12,000 ポイント程度であったが、特殊、流動化、超遅延のいずれもほぼ対角線上にあり、最大のピークも現れていない

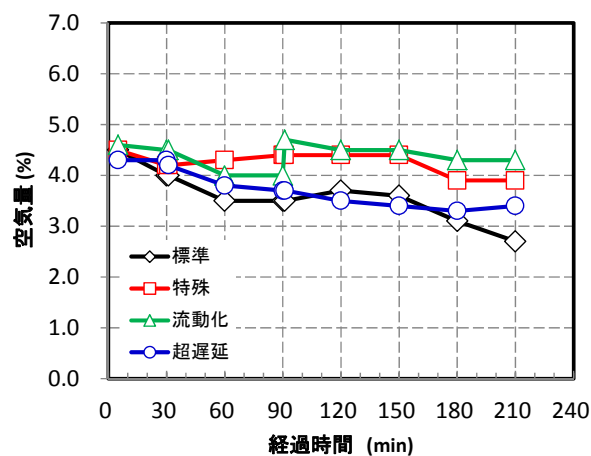


図-6 空気量の経時変化

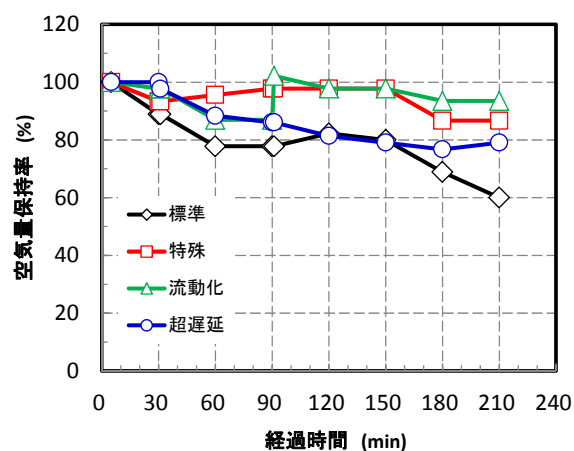


図-7 空気量保持率の経時変化

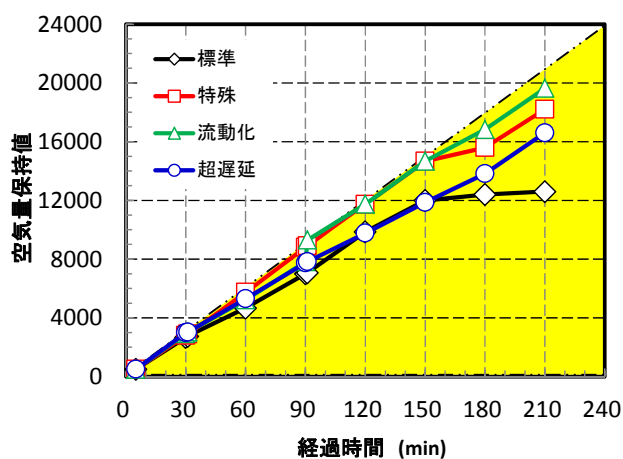


図-8 空気量保持値の経時変化

ため、さらに保持できる性能があると判断できる。

また、スランプと空気量の保持値を比較すると、図-9 に示すように標準、特殊、流動化のスランプの保持値に限度値なる最大値が確認できる。

4.3 ブリーディングと凝結試験結果

ブリーディングと凝結試験の結果を表-6、図-10、図-11 に示す。

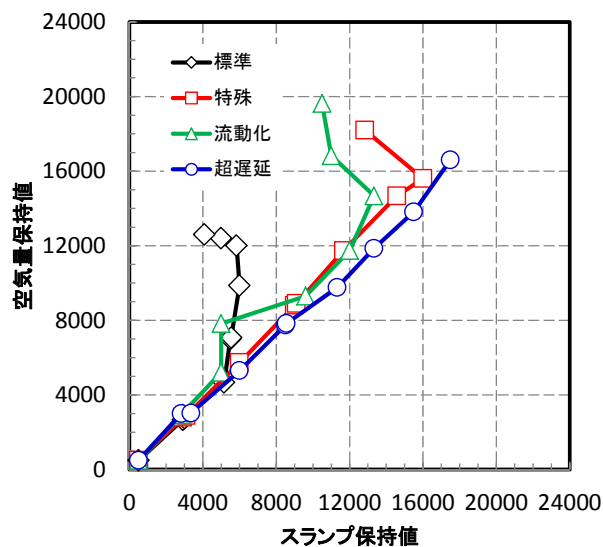


図-9 スランプと空気量の保持値

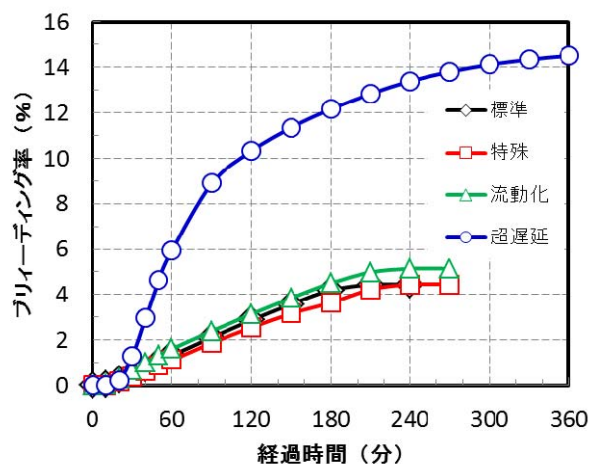


図-10 ブリーディング試験結果

ブリーディング率は、標準、特殊、流動化がほぼ同等の 4.4～5.1%であったのに対し、超遅延は約 3 倍の 14.6%となり施工性能が低下した。これは、超遅延剤の主成分であるポリヒドロキシカルボン酸複合体の吸着により、セメントの水和反応が一時的に停止し、練混ぜ水の分離が増加したことによると考える。また、超遅延の凝結時間は、表-6 に示すように標準、特殊、流動化に比べて、始発・終結とも約 10 時間遅れていることから裏付けられる。

一方、プロクター貫入試験による貫入抵抗値が 0.1N/mm^2 に達する時間から求めた許容打重ね時間間隔は、標準が 3 時間なのに対し、特殊は 5 時間で 2 時間延長できることが確認できた。しかし、特殊の凝結時間は、標準に比べて 40 分～50 分しか遅延していないため、経過時間 210 分以降の強度発現が優れていると判断できる。

4.4 圧縮強度の試験結果

圧縮強度の試験結果を表-7、図-12 に示す。

表-6 ブリーディング試験・凝結試験結果

条件	ブリーディング率/量	貫入抵抗 到達時間	凝結時間
		0.1N/mm ² , 1.0N/mm ² (h-m)	始発/終結 (h-m)
標準	4.4 % 0.20 cm ³ /cm ²	3-00	6-20
		5-00	8-30
特殊	4.5 % 0.20 cm ³ /cm ²	5-00	7-00
		6-30	9-20
流動化	5.1 % 0.23 cm ³ /cm ²	4-00	6-50
		5-30	9-20
超遅延	14.6 % 0.66 cm ³ /cm ²	12-00	16-00
		14-00	18-00

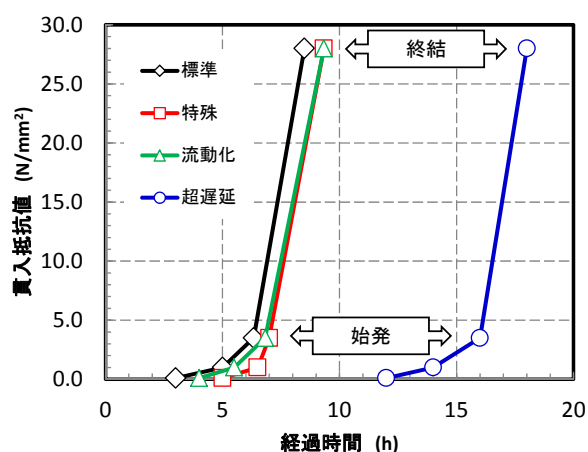


図-11 貫入試験結果

表-7 圧縮強度試験結果

条件	材齢 1 日		材齢 7 日		材齢 28 日	
標準	5.22		31.3		39.8	
	5.96	5.4	32.0	31.6	38.6	39.6
	5.38		31.7		40.5	
特殊	4.95		29.6		39.4	
	4.94	4.9	30.8	30.3	38.6	39.1
	4.93		30.6		39.2	
流動化	5.10		29.5		39.3	
	5.24	5.3	30.6	29.9	39.0	39.2
	5.44		29.5		39.3	
超遅延	0.73		32.8		43.0	
	0.89	0.9	32.8	33.1	44.6	43.5
	1.16		33.6		42.8	

※N=3 平均値

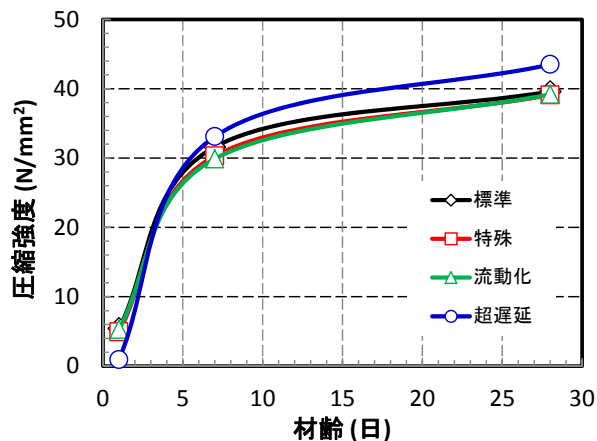


図-12 圧縮強度試験結果

標準、特殊、流動化の圧縮強度の発現は、大きな差がない。一方、超遅延は材齢1日の圧縮強度が0.9N/mm²と他と比べて小さいが、材齢28日では他と比べて4N/mm²大きい。これは、ブリーディングに伴う水セメント比の低下の影響や、超遅延剤の成分など複数の要因に起因していると考えられる。

5. まとめ

フレッシュコンクリートの性能を保持する方法を、標準を含めて4種類のコンクリートで比較実験を行った結果、本実験の範囲内において以下の知見が得られた。

- (1) 今回、フレッシュコンクリートの性能保持のために実施した特殊混和剤を使用する方法、流動化剤を使用する方法、超遅延剤を使用する方法のいずれの方法もスランプおよび空気量を保持する効果を有しており、レディーミクストコンクリートの可使用時間内の性能保持が可能なことを確認した。
- (2) 超遅延剤を使用する方法は、最もフレッシュコンクリートのスランプおよび空気量を保持する性能を有していた。しかしこの方法は、硬化の過程でブリーディング量が標準と比べて4倍に増大するとともに、初期の強度発現が遅れた。従って超遅延剤の使用は、沈みひび割れの発生や、脱型時期が遅延するなどのリスクを有しており施工性能に劣る。
- (3) 流動化剤を使用する方法は、適切に添加すればフレッシュ性能の保持に有効である。留意点として、流動化剤を添加すると、短時間の内に流動性が回復・増大するが、その後の流動性の低下も大きいため、

施工中のスランプの大きな変化に注意を払う必要がある。

- (4) 特殊混和剤を使用する方法は、混和剤を添加した後のスランプの増大が0.5cmと小さく、空気量の変化もなく添加に伴うフレッシュ性能の変化が小さい。また、この方法は、180分程度のフレッシュコンクリートの性能の保持効果があることを確認した。さらに、標準と比べて、許容打重ね時間間隔を2時間延長することができ、初期および長期の圧縮強度発現への影響が小さいため施工性能に優れる。
- (5) フレッシュコンクリートのスランプや空気量の変化率とそれぞれの保持値を比較することで、保持効果が高い方法を評価して選定できる。
- (6) 特殊混和剤を用いる方法の保持効果は、添加後180分程度継続するため、レディーミクストコンクリートの可使用時間を越えてワーカビリティを保持でき、構造物の品質向上に役立つと考える。

今後は、各種のフレッシュコンクリートの性能の保持方法を用いた場合の耐久性への影響や、低スランプコンクリートや高流動コンクリートなど、さまざまな種類のコンクリートへ適用した場合の効果を確認して行く予定である。

謝辞 本研究の推進にあたり竹本油脂(株)の各位にご協力いただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編], 2012年制定
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー126 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案), 2007
- 3) 小山智幸, 小山田英弘, 伊藤是清：暑中コンクリートの現状と対策, コンクリート工学, Vol.50, No.3, pp.239-244, 2012.3
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー103 コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策, pp.7-20, 2000
- 5) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'15, 2015