

# 高温のセメントを用いたコンクリートのフレッシュ性状に対する フライアッシュの効果<sup>†</sup>

弓 削 慎 一\* 杉 山 拓 也\*\*  
吉 岡 国 和\*\* 吉 武 勇\*\*\*

## Effect of Fly-Ash on Fresh Concrete Using Cement of High Temperature

by

Shinichi YUGE\*, Takuya SUGIYAMA\*\*, Kunikazu YOSHIOKA\*\* and Isamu YOSHITAKE\*\*\*

Ready mixed concrete plants near the cement factory often use cement of high temperature, because fresh cement is directly provided from the cement factory. According to a previous investigation, concrete with high temperature cement indicates significant slump-loss. The purpose of this study is to propose an effective mixture to reduce slump-loss of the concrete. The experimental study firstly investigates flowabilities of paste using alternative materials of cement, i.e. fly-ash and limestone powder. In addition, this paper reports slump tests of concrete using the powder materials. The experimental investigation indicates that concrete with 20% replacement of fly-ash can effectively reduce slump-loss.

**Key words :** Temperature of cement, Slump-loss, Fly-ash, Limestone powder

### 1 緒 言

日本全国において32のセメント工場(2009年4月時点)があり、それらのセメント工場が製造しているクリンカーは年間6344万トンに達する。<sup>1)</sup>Fig. 1に示すようにセメント工場を地域ごとに5つのブロックに区分すると、山口・九州ブロックではクリンカーの生産量が全生産量の約47%を占めている。その多くが、山口・北九州地区に集中しているが、これはセメントの主原料である石灰石の産出量が多いことによるものである。

ここで、多くの生コンクリート工場では、比較的長距

離・長時間の輸送・貯蔵過程で外気温程度まで低下したセメントを用いている。一方、セメント工場と生コンクリート工場が比較的近い場合、このような温度低下はほとんど望めない。これらの地域にある生コンクリート工場では、セメント工場から直接搬入されるため、年間を通して比較的高温のセメント(60~90℃程度)を入荷しているのが実状である。セメント工場に近い生コンクリート工場に入荷した普通ポルトランドセメントの温度計測例(2008年1月~2008年12月)をFig. 2に示す。<sup>2)</sup>このグラフに示すように、セメント入荷時の温度は概ね60℃を超え、最高温度は90℃程度にまで達している。また高温のセメントは、入荷から使用するまでに若干温度低下するものの、コンクリートの出荷量によっては高温の状態のまま使用されることもある。これは、コンクリートの主構成材料であるセメントが、全体容積に対して比較

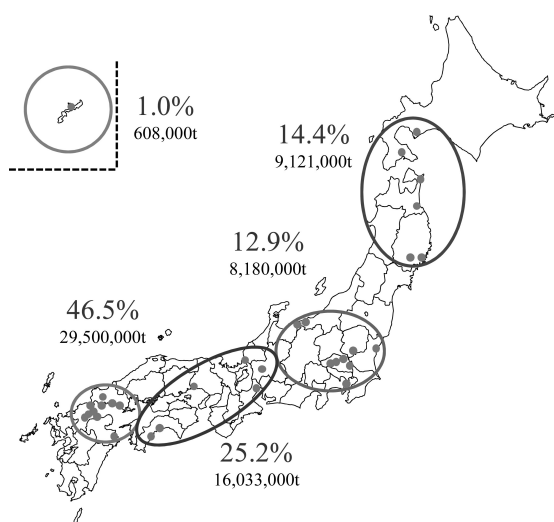


Fig. 1 Production capacity of clinker.

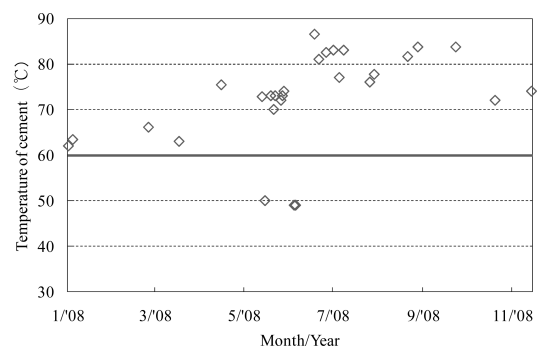


Fig. 2 Temperature of cement -OPC-.

<sup>†</sup> 原稿受理 平成 22 年 12 月 2 日 Received Dec. 2, 2010 ©2011 The Society of Materials Science, Japan

\* 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台, Grad. School of Sci. and Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

\*\* 萩森興産(株) 〒755-0001 山口県宇部市大字沖宇部字沖の山, Hagimori Industries, Ltd., Okiube, Ube, 755-0001

\*\*\* 正 会 員 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台, Grad. School of Sci. and Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

的使用量が少ないため、セメント温度はコンクリート温度にあまり影響しないと考えられてきた経緯もある。高温のセメントの使用については、生コン工場品質管理ガイドブック<sup>3)</sup>において“80℃を超える高温のセメントを用いないほうがよい”との記載がみられる程度であり、その影響は十分に明らかにされていない。

著者らはこれまでの研究<sup>2)</sup>において、高温のセメントを用いたコンクリートは、20℃程度の常温のセメントを用いたそれよりもスランプロスが大きくなることを報告している。なお、同研究において、セメント温度にかかわらず、練上がり直後のスランプ、空気量、圧縮強度に有意な差異がないことも報告している。すなわち、高温のセメントを用いるコンクリートの特異な問題は、スランプロスが大きいということである。このようなスランプロスの改善策として、コンクリートの各材料を練混ぜる際に、高温のセメントと水を混合するタイミングを変える実験も行っているが<sup>2)</sup>その効果は短時間に限られ、抜本的な解決には至っていない。

そこで、本研究では高温のセメントを用いたコンクリートのスランプロス低減を目的とし、セメントの一部を他の粉体材料に置換することを試みた。なお、本研究で対象とした粉体材料は、フライアッシュ（以下、FAと略記）と石灰石微粉末（以下、LPと略記）である。

本研究では、基礎実験としてペーストによるP漏斗流動性試験を行い、セメントに一部置換した粉体材料の効果を調べた。さらに、コンクリートの試験ではスランプおよび空気量の経時変化を測定するとともに、材齢1日～91日までの圧縮強度もあわせて調べた。

## 2 実験条件

### 2.1 使用材料

本研究では、いずれの実験においても普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm<sup>3</sup>、ブレン値 3270cm<sup>2</sup>/g）を使用した。比較に用いたFA（密度 2.16g/cm<sup>3</sup>、ブレン値 4260cm<sup>2</sup>/g）にはJIS A 6201のIV種規格を満足するもの、およびLP（密度 2.70g/cm<sup>3</sup>、ブレン値 4500cm<sup>2</sup>/g）を使用した。また、練混ぜ水には水道水、細骨材には北九州市小倉産の石灰石砕砂 S1（密度 2.69g/cm<sup>3</sup>、FM2.46）、北九州市門司産の硬質砂岩砕砂 S2（密度 2.58g/cm<sup>3</sup>、FM2.56）および山口県美祢市伊佐産の石灰石砕砂 S3（密度 2.60g/cm<sup>3</sup>、FM2.87）の3種類を混合したものを使用した。さらに粗骨材には北九州市門司産の2010砕石 G1（密度 2.73g/cm<sup>3</sup>、FM 6.98）と同1505砕石 G2（密度 2.73g/cm<sup>3</sup>、FM 6.35）を混合したものを使用した。なお、本研究で作製したコンクリートには、標準としてリグニン系のAE減水剤を用いた。さらに比較のため、一部ポリカルボン酸系のAE減水剤も使用した。

### 2.2 ペーストによるフレッシュ性状の実験方法

セメント温度の違いによるペーストの流動性を把握するため、「プレバクドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法（P漏斗による方法）、JSCE-F 521-1999<sup>4)</sup>に準じて試験（以下、流動性試験）を行った。さらにセメントに対して一部置換する粉体材料（FA、LP）の流動

性を求めるため、それぞれの単味によるペーストの同試験も実施した。なお、置換する粉体によるペーストの流動性試験には、それぞれ70℃程度の高温のもの、および20℃程度の常温のもの2種類を準備した。

各粉体材料（セメント C、FA、LP）を用いたペーストの配合および混練前の粉体の温度、水温、ペースト温度をTable 1（W/P = 50%）に示す。セメント温度が流動性におよぼす影響を調べるため、それぞれ約70、50、35、20℃の4水準のセメント温度に設定して、試験を実施した。なお、ここで用いたセメントは上記の温度になるように、同一ロットで製造された高温のセメントを除熱したものである。また、温度制御装置を用いて加温することで高温のFA・LPを準備し、各粉体において2水準の温度に設定した。なお、各温度測定には棒状デジタル温度計（熱電対Kタイプ）を用いた。各種のペーストを1分間ハンドミキサーで練混ぜ、練上がり直後と30分後に流動性試験を行った。さらに、セメントペーストの試験においては10分後・20分後においても流動性試験を行った。

FAをセメントに一部置換したペーストの配合および混練前の粉体の温度、水温、ペースト温度をTable 2に示す。Table 2で用いたセメントは生コンクリート工場が入荷した高温のセメントを温度制御装置（65℃程度）で24時間以上保温したものである。なおセメントの風化を防ぐため耐熱用のパックに密封した状態で保温した。粉体単味のペースト同様に練混ぜ、15分間隔で60分後までの流下時間を測定した。また、ペーストにおいてはセメント容積に対してFAを0%、10%にそれぞれ置換した。Table 2に示す配合記号のうち、P-Fに続く数字はセメント容積に対するFAの内割り置換率（%）を表している。

### 2.3 コンクリートの実験方法

上記のペーストの実験結果を踏まえて、FAもしくはLPを高温のセメントに一部置換することで、高温のセメントを用いたコンクリートのスランプの経時変化を調べた。

Table 1 Mixture proportions of cement paste, fly-ash paste and limestone powder paste.

I.D.	Temperature (°C)			Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	
	Powder	W	Paste	Powder	W
C	69.6	26.9	41.3	1225	613
	48.1	27.7	37.3		
	37.4	26.8	34.2		
	21.7	27.5	31.4		
FA	66.5	26.3	34.2	1038	519
	17.2	26.7	23.0		
LP	68.7	19.6	33.0	1149	574
	20.4	19.5	20.3		

Table 2 Mixture proportions of fly-ash paste.

I.D.	Temperature (°C)				Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )		
	C	FA	W	Paste	C	FA	W
P-F0	67.5	—	18.8	34.3	1225	—	613
P-F10	67.0	65.7	16.0	32.0	1102	84	

Table 3 Mixture proportions of concrete.

I.D.	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )									C× (%)	
	W	C	FA	LP	S1	S2	S3	G1	G2	Ad	Ad*
C-0	180	328	—	—	259	259	374	560	374	1.00	0.375
C-F10		295	33	—	251	251	335	568	378	1.11	1.00
C-F20		262	66	—	250	250	333	563	376	1.25	1.88
C-F20-P		262	66	—	250	250	333	563	376	1.13	2.25
C-F30		230	98	—	248	248	330	559	373	1.14	3.00
C-L10		295	—	33	253	253	337	570	380	0.78	0.83
C-L20		262	—	66	252	252	336	569	379	0.88	0.94
C-L30		230	—	98	251	251	335	567	378	0.93	1.07

\* Air entraining admixture

コンクリートの配合を Table 3 に示す。生コンクリート工場で使用されている配合 (W/P = 55%) C-0 を基準とし、すべてのコンクリートでスランプ 20 ± 1.0cm, 空気量 4.5 ± 1.0% となるようにした。本実験では強制二軸練りミキサ (最大容量: 50l) を用い、コンクリート (練混ぜ量: 45l, 練混ぜ時間: 2 分) を作製した。コンクリートについてもペーストと同様に、セメントと同等温度に加熱した FA もしくは LP を使用した。ここで、混練前のセメント、FA、LP、水の各材料温度、およびコンクリートの練上がり温度を Table 4 にまとめて示す。Table 3 に示した各配合のコンクリート (セメント質量に対して FA もしくは LP を 0, 10, 20, 30% にそれぞれ内割置換) についてスランプ、空気量および圧縮強度の測定を行った。Table 3 に示す配合記号のうち、C-F もしくは C-L に続く数字はセメント質量に対する各粉体 (FA, LP) の内割置換率 (%) を表している。

これらのコンクリートの試験では、練上がり直後から 90 分後まで 15 分間隔でスランプ試験 (JIS A 1101) および空気量試験 (JIS A 1118) を実施した。また各実験ケースにおいて、φ100 × h200mm の円柱供試体 (各 3 本) を用いて、材齢 1, 3, 7, 28, 91 日の圧縮強度 (JIS A 1108) を測定した。

3 実験結果と考察

3・1 流動性試験

セメント温度を 4 水準に設定したセメントペーストの流動性試験結果を Fig. 3 に示す。セメント温度が 69.6°C のペーストでは、練上がり直後の流下時間が他に比べ突出して長くなった。この結果は練上がり温度が大きく影

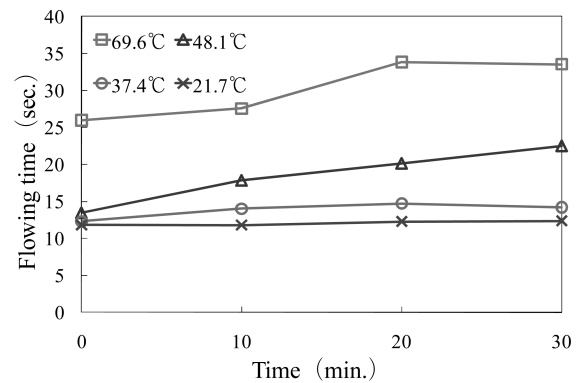


Fig. 3 Flowing time of cement paste.

響している。セメントが高温 (69.6°C, 48.1°C) のとき、その経時変化が 8 ~ 9 秒 (30% 増, 70% 増) と大きい。常温程度 (37.4°C, 21.7°C) の場合は 1 ~ 2 秒程度 (15% 増, 5% 増) とほとんど変化はみられなかったことから、セメント温度の影響が窺えた。

セメントペースト、FA ペーストおよび LP ペーストの練上がり直後と 30 分後の流動性試験結果を Fig. 4 に示す。異なる温度の FA (66.5°C, 17.2°C) によるペーストの流下時間に有意な差異はみられなかった。さらに異なる温度の LP (68.7°C, 20.4°C) を用いたペーストでは、30 分後の流下時間が練上がり直後と同等であり、その流下時間もセメントペーストや FA ペーストに比べて小さいものであった。これらの結果より、FA および LP は温度に

Table 4 Temperature of materials and concrete.

I.D.	C (°C)	FA (°C)	LP (°C)	W (°C)	Concrete (°C)
C-0	47.1	—	—	20.2	18.8
C-F10	47.7	61.4	—	22.7	20.5
C-F20	78.2	66.8	—	19.8	18.3
C-F20-P	76.8	68.1	—	20.0	27.0
C-F30	48.1	60.2	—	16.6	26.7
C-L10	64.0	—	62.6	19.2	25.6
C-L20	80.5	—	64.5	22.7	25.9
C-L30	61.0	—	66.0	20.8	25.0

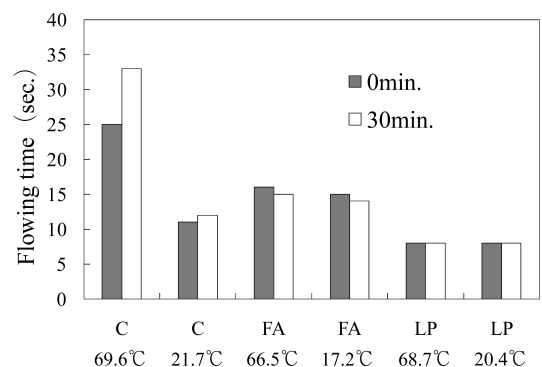


Fig. 4 Flowing time of paste using powder of high/normal temperature.

依存せず、時間が経過しても概ね同様の性状を維持するものといえよう。さらに Fig. 4 によると、他の粉体に比べ高温のセメント (69.6°C) を用いたペーストの 30 分後における流下時間が著しく大きくなっている (30% 増) ことがわかる。これは、高温のセメントを用いたコンクリートにおいて、スランプロスが大きくなることを裏付ける結果といえよう。

上記の結果を踏まえて、本研究ではペーストの流動性に温度の影響を受けにくい FA をセメントに対して 10% 容積置換したペーストの流動性試験を行った。各ペーストの流下時間の結果を Fig. 5 に示す。FA 無置換の P-F0 に比べ、FA を置換した P-F10 のペーストにおいて、流下時間の変化量がほぼ無視できるレベルであった。この結果より、少なくとも FA をセメントに対して 10Vol.% 以上、質量比で約 6% 以上置換することで、コンクリートのスランプロス低減の効果が期待される。

### 3・2 FA を置換したコンクリート

セメントに対し FA を質量置換したコンクリートの空気量、スランプ、圧縮強度試験結果をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 に示す。

Fig. 6 に示す空気量の変化に着目すると C-0 の空気量が最も高く、FA を置換したコンクリートでは、いずれも低い空気量を示したことから、空気量調整剤の添加率等を改善すべきであろう。ここで、リグニン系の AE 減水剤を使用した C-F20 では練上がり直後に空気量 5% を確保することが困難であったため、ポリカルボン酸系の AE

減水剤を用いた C-F20-P でも同様の実験を行った。その結果、少なくとも 45 ~ 75 分後までは、C-F20 より 1% ほど高い空気量を示したことを付記しておく。

Fig. 7 に示すスランプ試験によると、C-F10 では C-0 に比べ練上がり直後から 30 分後のスランプロスが 2cm 小さくなったが、90 分後では 10cm 程度とほぼ等しいものとなった。また、C-F30 でも C-0 とほぼ同じスランプロスを示した。一方、C-F20 では 90 分後のスランプロスが 7cm となり、他の配合のコンクリートに比べて良好なワーカビリティが見込まれる。さらに、ポリカルボン酸系の AE 減水剤を用いた C-F20-P では C-F20 よりも 1.5cm スランプロスが小さくなった。

ここでは、フライアッシュ有効活用小委員会<sup>5)</sup>が推奨しているように、FA コンクリートの発注指定条件にある材齢 28 日の圧縮強度 (以下、発注強度) を用いて主に検討することとする。

Fig. 8 に示すように、C-F10, C-F20 (C-F20-P), C-F30 と FA 置換率が大きくなるにしたがい、材齢 28 日の各圧縮強度が C-0 に対し 10 ~ 30% 程度小さくなった。ここで、設計基準強度 27N/mm<sup>2</sup> の FA コンクリートでは、発注強度 (材齢 28 日) が 24N/mm<sup>2</sup> となるが、C-F10・C-F20 (C-F20-P)・C-F30 においても十分に上回っている。そして材齢 91 日においては、C-0 に対して少なくとも 80 ~ 90% 程度の強度が得られている。これらの結果より、FA はスランプロスの低減に効果的だが、強度発現性を考慮した上で、FA 混和量を設定する必要がある。

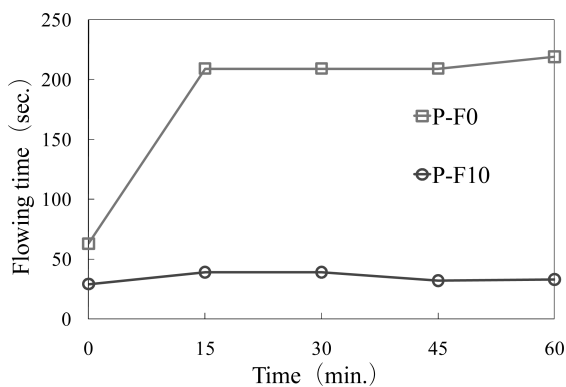


Fig. 5 Flowing time of FA paste.

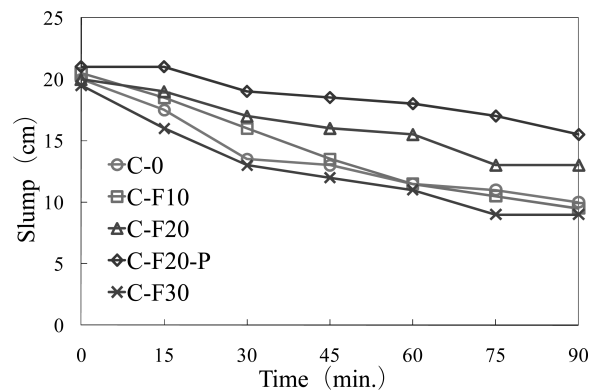


Fig. 7 Slump of FA concrete.

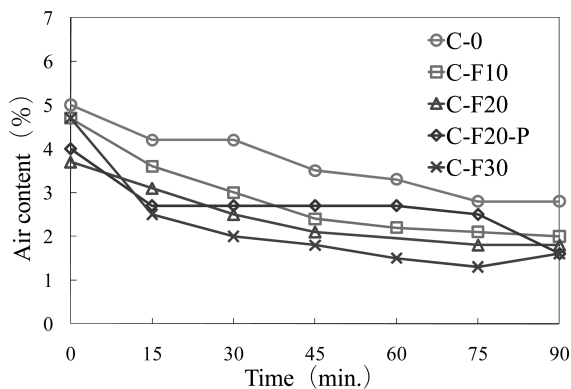


Fig. 6 Air content of FA concrete.

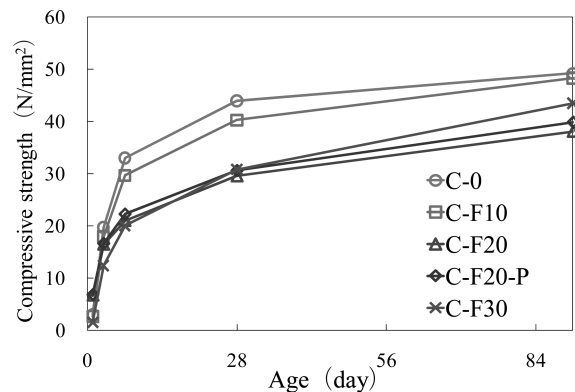


Fig. 8 Compressive strength of FA concrete.

3・3 LPを置換したコンクリート

セメントに対しLPを質量置換したコンクリートの空気量、スランプ、圧縮強度試験結果をそれぞれ Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に示す。

C-L10の空気量はC-0とほぼ等しい減少傾向を示したが、置換率が20%以上では、90分時においても、その変化が比較的小さいものであった。この結果は、FAよりもLPを用いたコンクリートの方が、空気量の安定的な確保が容易であることを示唆するものである。

FAを用いたコンクリートと同様に、LPの置換率の増加に応じて、スランプロスが小さくなる傾向が窺えた (Fig. 10 参照)。C-L10ではC-0に比べスランプロスが大

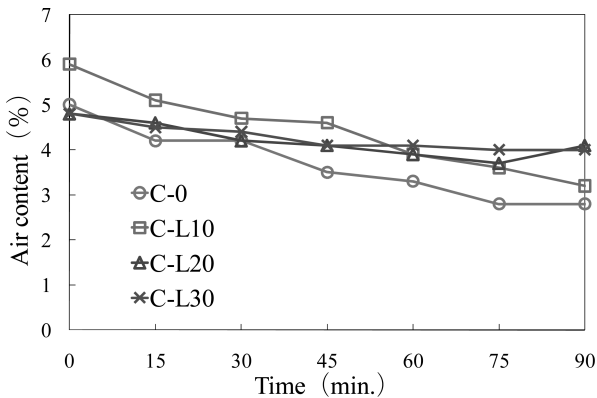


Fig. 9 Air content of LP concrete.

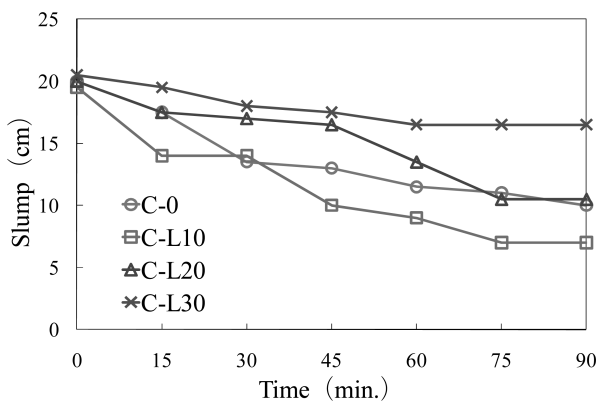


Fig. 10 Slump of LP concrete.

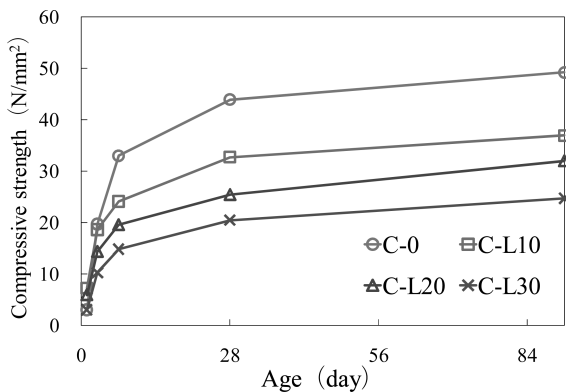


Fig. 11 Compressive strength of LP concrete.

きくなったが、C-L30では練上がり後60分以降のスランプロスが4cmと本試験で最も小さい結果であった。

しかしながら、Fig. 11に示すようにC-L20およびC-L30のコンクリートでは、材齢28日においてC-0に比べ圧縮強度がそれぞれ58%、47%と著しく小さい。そのため高温のセメントを用いるコンクリートのスランプロス低減策として、LPを10%以上置換する方法は、強度発現性に特に注意が必要である。

3・4 スランプロス

Fig. 12はFA (左) およびLP (右) で置換したコンクリートのスランプロス (45分後、90分後) をまとめたものである。LPコンクリートではセメント量をC-0に比べ20%以上減らす (LPを20%以上増やす) ことで、スランプロスが小さくなった。一方、FAコンクリートではセメント量を20%減らす (FAを20%増やす) ことでスランプロスを低減できたが、さらに30%まで減らした際には45分後、90分後ともにC-0と同等のスランプロスとなった。なおここに示す各粉体 (FA, LP) は、高温のセメントと同等まで加温して用いていることから、混練後のコンクリート温度の影響とは考えられない。

ここで試験期間中におけるコンクリートの温度変化を Fig. 13 に示す。コンクリートの作製時期が異なるため、練上がり温度が異なるが、いずれも20°C程度に温度管理された室内でコンクリートを保管したため、試験期間中の温度変化は1~3°C程度と比較的小さいものであった。そのため、本実験におけるコンクリートの温度変化は、

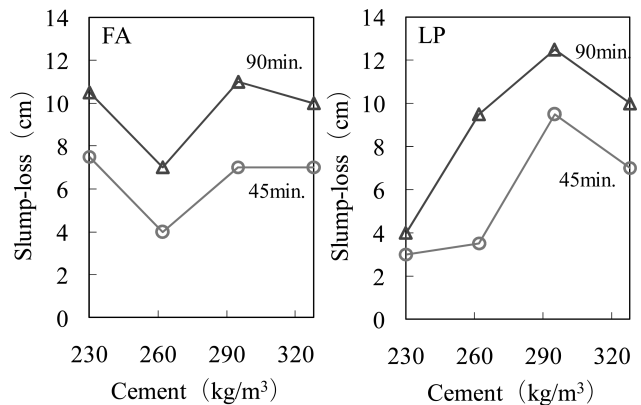


Fig. 12 Slump-loss of concrete.

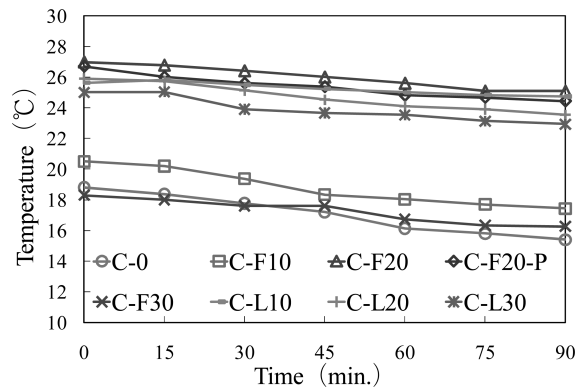


Fig. 13 Temperature of concrete.

各グラフ (Figs. 6, 7, 9, 10, 12) に示したスランブや空気量におよぼす影響は小さかったものと考えられる。

本研究で実施したスランブ試験や強度試験に基づけば、高温のセメントを用いるコンクリートの一改善策として、FA をセメントに対して 20% 程度質量置換することが推奨される。本研究では粉体温度の影響を低減するため、FA を加温して用いたが、実際の使用においては FA を加温する必要はなく、粉体温度も若干ながら低減できることから、いっそうのスランブロス低減効果が期待されよう。

#### 4 結 言

本研究では、スランブロスが大きくなる特性を有する高温のセメントを用いたコンクリートについて、セメントの一部代替材として FA や LP といった粉体材料の置換利用の効果について検討した。その結果、LP はスランブロス低減に有効であるが、強度低下が著しく注意が必要であること、IV 種の FA であっても、セメントに対して 20% 質量置換することで、スランブロスの低減効果が大きく、それ以上の代替置換では、逆にスランブロスを大きくする可能性があることを示した。本研究で示した

各種試験の結果より、高温のセメントを用いたコンクリートのスランブロス低減には、セメントに対して FA を 20% 程度質量置換することが推奨される。

#### 参 考 文 献

- 1) Japan Cement Association <http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jc.html>
- 2) T. Sugiyama, S. Yuge, K. Yoshioka and I. Yoshitake, "Fundamental experiment on fresh properties of concrete using high temperature cement", *Cement Science and Concrete Technology*, No.63, pp.281-286 (2009).
- 3) Namakonkoujyou hinshitukanri guidebook, "National federation of ready mixed concrete industrial associations", p.66 (2008).
- 4) Japan Society of Civil Engineers, "Standard specifications for concrete structures", p.207 (2007).
- 5) Japan Society of Civil Engineers, "New utilization technologies of fly ash concrete suitable for recycle oriented society", p.87 (2009).