高温のセメントを用いたコンクリートの初期性状に関する基礎実験

杉山拓也^{*1} 弓削慎一^{*2} 吉岡国和^{*1} 吉武勇^{*2}

^{*1} 萩森興産株式会社(〒755-0001 山口県宇部市大字沖宇部字沖の山 525-6)

^{*2} 山口大学 大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

要旨: 多くの生コンクリート工場では、しばしば高温のセメントを使用する状況にある。それにも拘わらず高温のセメントを用いたフレッシュコンクリートの性状について、これまでほとんど検討が行われてこなかった。本研究の目的は、高温のセメントを用いたフレッシュコンクリートの性状を実験的に評価することにある。特に本研究では、高温のセメントの影響を求めるため、スランプ性状や断熱温度上昇特性について調査した。その結果より、高温のセメントを用いたコンクリートのスランプロスは、常温のものに比べて大きくなることがわかった。さらに、高温のセメントによるコンクリートの断熱温度上昇は、常温のコンクリートに比べ速くなることを示した。

キーワード: セメント温度、スランプロス、断熱温度上昇

1. はじめに

従来、多くの生コンクリート工場では暑中コンクリート対策として、コンクリート容積の約7割を占める骨材へ散水することで材料温度を下げ、コンクリートの練上がり温度を下げるよう努めてきた。一方、骨材以外のコンクリート構成材料については、コンクリート中に占める容積が小さいこともあり、その材料温度について、あまり注意が払われてこなかった。

コンクリートの主構成材料であるセメントは、焼成工程を経て製造されるため、製造直後のセメントは外気温に比べて極めて高温になる。この製造直後の高温のセメントを外気温レベルまで温度低下させるには、特別な設備と多大なエネルギーが必要となる。セメント工場から出荷される製造直後のセメントは、輸送過程を経て温度低下するが、セメント工場に比較的近い生コンクリート工場に入荷するセメントは、比較的高温(60~90℃程度)のままとなる場合が多い。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.1に示す。同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℃付近にまで達している。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まま使用することもある。これは、コンクリートの主構成材料のセメントが、全体容積に対して比較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等にあまり影響しないと考えられてきた経緯もある。

コンクリートの練上がり温度がコンクリートの諸物性に与える影響については、多くの研究者によって報告

Fig. 1 Temperature of cement -OPC-

されているが^{1,2)}、練混ぜ前のセメントの温度がコンクリートに与える影響は、ほとんど報告されていない。僅かに生コン工場品質管理ガイドブック³⁾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る。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基礎的物性を把握するため、特にスランプや断熱温度上昇量といったフレッシュコンクリートの基本性状を実験的に調べた。

2. 実験条件

2.1 使用材料

本研究における実験ケースの一覧をTable 1に示す。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/cm³)を使用した。ここで用いたセメントとは、生コンクリート工場がセメントを高温のまま入荷する場合を想定し、a) 近隣のセメント工場よ

Table 1 Concrete mix proportion and temperature of cement and concrete

Case	No.	Mt^{*4}	Sort of cement	Tce^{*5} (°C)	Tco^{*6} (°C)	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)									
							W	C	S_1	S_2	S_3	G_1	G_2	AE_1	AE_2	SP_1
I	1* ₁	30 min.	a)	70.5	19.5	63	166	264	276	276	368	493	493	2.11	—	—
			b)	16.3	16.7											
	2* ₂	30 min.	a)	70.5	20.4	54	183	339	258	258	344	468	468	2.74	—	—
			b)	16.3	16.3											
	3* ₃	10 min.	a)	52.7	22.1	34	175	515	254	296	296	409	409	—	—	5.92
			b)	17.8	18.5											
II	4	10 min.	a)	69.3	25.8	64	196	306	285	333	332	573	382	—	—	—
			c)	7.0	23.5											
	5	10 min.	a)	67.7	22.4	64	169	264	282	329	330	573	382	2.11	—	—
			c)	7.0	20.2											
III	6	15 min.	a)	81.6	29.4	55	180	328	263	307	308	560	374	2.62	—	—
			b)	23.3	25.7											
	7	15 min.	a)	83.7	29.7	55	180	328	263	307	308	560	374	—	3.28	—
			b)	23.8	24.6											
IV	8	15 min.	a)	83.7	28.0	55	180	328	263	307	308	560	374	2.62	—	—
	9		a)	83.2	28.1											
	10		a)	81.2	29.3											

^{*1}mixture for civil infrastructure, ^{*2}mixture for architecture, ^{*3}self-compactable high performance concrete,

^{*4} Mt : measurement interval, ^{*5} Tce : Temperature of cement, ^{*6} Tco : Temperature of concrete

り製造直後に入荷した高温のセメント、b) 前記 a) を常温程度まで自然冷却したセメント、c) 前記 a) を人為的に強制冷却したセメントの 3 水準である。Table 1 中の 2 列目に示す各実験 No. において、各々同一ロットで製造されたセメントを使用した。なお、セメント以外の材料温度はそれぞれ同一条件とした。

また、練混ぜ水には水道水、細骨材には岡山県倉敷市産の高炉スラグ細骨材 S_1 (密度 2.76g/cm³、FM2.10)、北九州市門司産の硬質砂岩砕砂 S_2 (密度 2.63g/cm³、FM2.60) および山口県美祢市伊佐産の石灰石砕砂 S_3 (密度 2.63g/cm³、FM2.90) 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 2015 砕石 G_1 (密度 2.73g/cm³、FM6.98) と同 1505 砕石 G_2 (密度 2.73g/cm³、FM6.35) を混合したものを使用した。普通コンクリートを対象とした実験 No.1, 2, 5, 6, 8, 9, 10 ではポリカルボン酸系の AE 減水剤 AE_1 、実験 No.7 では異なる銘柄のポリカルボン酸系 AE 減水剤 AE_2 、および高流動コンクリートを対象とした実験 No.3 ではカルボキシル基含有ポリエーテル系の高性能 AE 減水剤 SP を用いた。

2.2 実験ケース

本研究では、全ての実験において次章に詳述するようなスランプ(スランプフロー)試験を実施した。さらに Case I においては、既報^{4, 5, 6)}を参考に簡易断熱温度上昇試験も実施した。

本実験で作製したコンクリートおよびモルタルの配合を Table 1 に示す。Case I では土木・建築工事でそれぞれ使用実績の多い普通コンクリート (No.1、No.2)、および既報⁷⁾を参考に設定した高流動コンクリート (No.3) の 3 種類を対象とした。また Case II では、よ

り顕著な温度差異の影響を調べるため、上記 a), c) のセメントを用いた建築工事用の普通コンクリートを対象とした。さらにこの Case II では、混和剤を用いた同コンクリート (No.5) に加え、混和剤を使用しないコンクリート (No.4) の比較も行った。Case III では異なる銘柄の混和剤 (同一主成分) を使用しても同様の傾向が得られるかを確認するため、2 種類の AE 減水剤 (No.6, 7) を用いたコンクリートについて検討した。さらに Case IV では、練混ぜ順序を替えてコンクリートを作製した。

2.3 練混ぜ方法と練上がり温度

本実験では強制二軸練りミキサ (50 リットル) を用い、Case IV を除いて以下に示す手順でコンクリートを作製した。なお、練混ぜ順序の影響を検討した Case IV の打設方法は別途、第 4 章で詳述する。

- 細骨材とセメントを投入し、10 秒間空練り
- 水を投入し、20 秒間練混ぜ
- 粗骨材を投入し 90 秒間練混ぜ

本研究では、練混ぜ前および練混ぜ後のスランプ(スランプフロー)試験の直前に、棒状デジタル温度計(熱電対 K タイプ)を用いて温度計測を行った。Table 1 の 5 列目と 6 列目に、それぞれセメント温度 (Tce) およびコンクリートの練上がり温度 (Tco) を示す。同表によると、セメント温度 2 水準の温度差が 34~63 °C 程度に対して、セメントの容積比が比較的小さいためコンクリートの練上がり温度は 2.2~5.1 °C 程度の差異と小さいものであった。土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾によると、セメント温度 ± 8 °C に対して、コンクリートの練上がり温度は約 ± 1 °C 変化することが示されており、本研究の実測セメント温度の差異に換算すると 4~8 °C 程度の差異となる。前述の結果は、20 °C 環境にある試験練

Fig. 2 Slump of concrete (Case I)

Fig. 5 Slump loss of mortar and concrete (No. 6)

Fig. 3 Slump of concrete (Case II)

Fig. 6 Slump loss of mortar and concrete (No. 7)

Fig. 4 Slump of mortar and concrete (Case III)

りミキサ等の器具類の影響もあり、セメント温度の影響が相対的に小さくなったことも一因と考えられる。

3. スランプおよびスランプフロー

3.1 実験方法

本章では、高温のセメントがフレッシュコンクリートの性状、特にスランプ(スランプフロー)に与える影響について実験的検討を試みた。本研究で実施した Case I ~ Case III のコンクリートのスランプおよびスランプフロー試験は、各々 JIS A 1101、JIS A 1150 にしたがうものである。なお Case III では、コンクリートのスランプ試験に加え、これをウェットスクリーニングしたモ

ルタル(以下、「モルタル」と簡略表記)のスランプ試験も並行して行った。このモルタルのスランプ試験では、上端内径 50mm、下端内径 100mm、高さ 150mm とするスランプコーン(JIS A 1171)を用い、コンクリートのスランプ試験に準じて実施した。またスランプ(スランプフロー)の経時変化を調べるため、Table 1 の 3 列目に示す測定間隔 M_i で、普通コンクリート(No. 1, 2, 4, 5, 6, 7)では練上がり直後から 60 分後までスランプ試験を行い、高流動コンクリート(No. 3)では 90 分後までスランプフロー試験を実施した。

3.2 実験結果および考察

Case I におけるスランプおよびスランプフロー試験結果を Fig. 2 に示す。このグラフ中の凡例末尾のアルファベットは、それぞれ前述した温度種別のセメントを示している(以降のグラフでも同様)。Fig. 2 の普通コンクリート(No. 1、No. 2)の結果に示すように、練上がり直後のスランプは、セメントの温度に依らず同程度であった。しかし、それらのスランプの経時変化によると、高温のセメントを用いた方が速く低下しており、特に No. 1-a) のスランプロスが著しいものであった。また高流動コンクリート(No. 3)のスランプフローも同様に、練上がり直後はセメントの温度に依らず同程度であったが、そのスランプフローの低下量(ロス)では、No. 3-a) が No. 3-b) より 6.5cm 大きくなった。

Fig. 7 Method of mixing and temperature of cement and concrete (Case IV)

Case II におけるスランプ試験結果を Fig. 3 に示す。混和剤を使用していない No. 4 では、高温のセメント a) に対して低温のセメント c) を用いた方が、練上がり直後に大きいスランプを示し、60 分後まで両者間にスランプの差があったが、両者は漸近する傾向がみられた。

一方、No. 4 と同条件で、混和剤を使用した No. 5 では練上がりから 10 分後まで同程度のスランプを示したが、同 20 分以降から徐々に差異が生じ、60 分後においてスランプロスに 3.5cm の差異が生じるなど、高温のセメント a) を用いた No. 5 のスランプロスが大きくなる傾向がみられた。

Case III におけるスランプ試験結果を Fig. 4 に示す。Case I、Case II と同様に高温のセメントを使用したが、スランプ低下が大きく、特にコンクリートにおいて、その傾向が著しいものであった。Case III の No. 6、No. 7 におけるスランプロスを Fig. 5、Fig. 6 にそれぞれ示す。ここで練上がり 15 分後における No. 6-a) と No. 6-b) のコンクリートのスランプロスの差は 2.2cm であったのに対して、主成分が同じで銘柄の異なる混和剤を用いた No. 7-a) と No. 7-b) 間の差は 4.3cm と大きくなった。

また、モルタルのスランプロスは、用いたスランプコーンの大きさが、標準的なスランプコーン (JIS A 1101) に比べ各 1/2 スケールであり、スランプロスも小さくなるが、コンクリートの結果と概ね同様の傾向を示した。

これらの実験 Case を通じて、セメント温度がコンクリートの練上がり温度に与える影響は小さいものの、セメント温度が高い場合は、時間の経過とともにコンクリートのワーカビリティが著しく低下する可能性が示唆された。これは、混和剤を用いないコンクリートに比べて、混和剤を用いたコンクリートでその傾向が強く、また主成分が同じでも混和剤の銘柄によって異なる可能性を示した。

4. 練混ぜ方法の影響に関する基礎実験

4.1 実験目的

前章に示した結果は、いずれも 2.3 節に示した練混ぜ順序で作製したコンクリートにおけるものである。同節に示したようにコンクリート容積の多くを占める粗骨

Fig. 8 Slump of mortar and concrete (Case IV)

材を投入する前に、セメントと練混ぜ水を混練するため、セメント温度が高温の場合、その影響が著しくなることが予想された。換言すれば、高温のセメントに対して練混ぜ水を混練する順序を替えることで、その影響低減を図れるものと推察できる。そこで Case IV では、コンクリートの練混ぜ順序を替えて、高温のセメントを用いたコンクリートおよびモルタルのスランプ試験を実施した。本実験で採用した 3 種類の練混ぜ順序を Fig. 7 に示す。いずれの練混ぜ順序においても、セメントおよび細骨材を 10 秒間混練した上で、No. 8 では混和剤を含む練混ぜ水を混合し、No. 9 では粗骨材を先に投入した。さらに No. 10 では半量の練混ぜ水を 20 秒間混練した後、粗骨材を投入後 10 秒間混合し、さらに混和剤を含む練混ぜ水を混入攪拌した。

Fig. 7 には、練混ぜ直前のセメント温度および練上がり直後のコンクリート温度も併記しているが、コンクリートの練上がり温度差は最大でも 1.3 °C 程度と小さいものであった。このことより、以降に示すスランプ試験結果は、特に練混ぜ順序に起因した差異と評価できよう。

4.2 実験結果および考察

各練混ぜ順序におけるコンクリートおよびモルタルのスランプ試験結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 によると練上がり直後のコンクリートのスランプは No. 10 が最も大きく、次いで No. 9、No. 8 の順に大きい結果となった。

Fig. 9 Temperature histories (Case I)

Fig. 10 Adiabatic temperature rises (Case I)

練混ぜ方法によってスランプの初期値に差異がみられるものの経過時間 60 分後のスランプは練混ぜ順序に依らず、同程度となった。モルタルのスランプ試験では、コンクリートの結果とは異なり、練混ぜ順序を替えても練上がり直後のスランプおよびその後の経時変化に明確な差異はみられなかった。

このことより、練混ぜ順序を替えることで、高温のセメント使用によるスランプロスを抑制できる効果は、練混ぜ直後から短時間までであり、長時間におよぶ場合には、このような方法では抜本的な解決策とはならないことがわかった。

5. 断熱温度上昇量

5.1 断熱温度上昇量の推定方法

本実験では、コンクリートの断熱温度上昇量を測定するため、Case I の配合を用いて既往の研究⁴⁾で提案されている簡易試験を行った。この簡易試験では、発泡スチロールで作製した断熱型枠(400×400×400mm)の中心に 200×200×200mm 状のコンクリートを打設し、そのコンクリート温度 T_c の経時変化を測定するとともに、この断熱型枠の放熱特性に応じた(推定)温度損失量 T_l をコンクリート温度 T_c に随時加算することで、断熱温度 T_{ad} を推定するものである。ここで、温度損失量 T_l は、予め求めた断熱型枠の温度降下勾配式(温度差との 1 次関数)に、コンクリートと基準温度間の温度

差を代入することで求めることができる。簡易試験の詳細については、既報^{4,5,6)}を参照されたい。

5.2 断熱温度上昇量の推定結果および考察

No.1~3 の各コンクリートの温度履歴を Fig. 9 に示す。ここに示すようにいずれのコンクリートにおいても、早期の材齢において高温のセメントを用いた方の内部温度が高くなっていることがわかる。また Fig. 10 に推定した断熱温度上昇量をまとめて示す。いずれのコンクリートにおいても、終局断熱温度上昇量は、セメント温度に拘わらず、ほぼ同等となった。No.1、No.2 の配合ではセメント温度の違いによる断熱温度上昇速度にほとんど差異はみられず、ほぼ同様の温度上昇傾向を示した。しかしながら、特に単位セメント量が多い高流動コンクリート (No.3) において、高温のセメント a) を用いた方が、終局断熱温度上昇量に達するまでの材齢がより早期になる傾向がみられた。同配合で終局断熱温度上昇量の 90 % (約 68 °C) に達するまでの材齢は、常温のセメント b) を用いた場合では約 2 日であったのに対し、高温のセメント a) を用いた場合では約 1.5 日であった。先述の Table 1 に示したように練上がり温度の差異は 3.6 °C と小さいものであったが、高温のセメント a) を用いた配合ではコンクリートの断熱温度上昇が速くなっている。これはセメントの温度が高いことで、早期材齢において水和反応が活性化したことによるものと思われる。このことから、特に高温のセメントを多量に用いる場合においてはコンクリート内部の温度上昇が著しくなる傾向があるため、温度ひび割れ等に対する配慮が必要となるであろう。

6. まとめ

本研究では、スランプや断熱温度上昇量といったフレッシュコンクリートの基本性状に対して、高温のセメント使用による影響を実験的に調べた。本研究で得られた主な知見を以下に列挙する。

- (1) 高温のセメントがコンクリートの練上がり温度に与える影響は小さく、練上がり直後のフレッシュコンクリートの性状にはほとんど影響しない。
- (2) 常温のセメントに比べ、高温のセメントを使用すると、時間の経過とともにコンクリートのワーカビリティが著しく低下し、その傾向は混和剤を用いたコンクリートにおいて、より顕著であった。
- (3) 高温のセメントと水の練混ぜ順序を替えてコンクリートを作製することで、一時的にスランプの増大を図れるものの、練混ぜ 60 分後のスランプは練混ぜ順序に依らず同程度であった。
- (4) 高温のセメントを用いると、終局断熱温度上昇量に達するまでの材齢がより早くなる傾向にある。

参考文献：

- 1) 本樫義人ほか：高性能 AE 減水剤を使用コンクリートに練上がり温度が与える影響、コンクリート工学

- 年次論文集、Vol. 23、No. 2、pp. 301-306 (2001)
- 2) 飯生昌之ほか：コンクリート温度と（AE）減水剤の種類が高流動コンクリートの諸性質に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 22、No. 2、pp. 841-846 (2000)
 - 3) 全生工組連：生コン工場、品質ガイドブック（第5次改定版）、p. 66 (2008)
 - 4) 吉武勇ほか：現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案、土木学会論文集、No. 606/V-41、pp. 103-110 (1998)
 - 5) 吉岡慧ほか：簡易試験による HVFA コンクリートの断熱温度上昇量の推定、材料、Vol. 57、No. 5、pp. 509-514 (2008)
 - 6) 高橋昭裕ほか：断熱温度上昇量と強度性状におよぼすフライアッシュの影響に関する基礎実験、セメント・コンクリート論文集、2008、No. 62、pp. 262-268 (2009)
 - 7) 土木学会：高流動コンクリート施工指針、pp. 39-52 (1998)
 - 8) 土木学会：コンクリート標準示方書、施工編、pp. 167-171 (2008)

FUNDAMENTAL EXPERIMENT ON FRESH PROPERTIES OF CONCRETE USING HIGH TEMPERATURE CEMENT

Takuya SUGIYAMA^{*1}, Shinichi YUGE^{*2}, Kunikazu YOSHIOKA^{*1} and Isamu YOSHITAKE^{*2}

^{*1} HAGIMORI INDUSTRIES (525-6, Okinoyama Okiube, Ube-shi, Yamaguchi 755-0001, Japan)

^{*2} YAMAGUCHI UNIVERSITY, Graduate School of Science and Engineering (2-16-1, Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611, Japan)

ABSTRACT : Many ready-mixed-concrete factories which are near to cement production factories are often employing cement of high temperature. Properties of fresh concrete with high temperature cement have not been investigated in spite of such situation. Because the volume of cement is extremely smaller than volume of other components of concrete, temperature of cement has been hardly considered into mix proportion of concrete.

The purpose of the present study is to evaluate experimentally properties of fresh concrete with high temperature cement. In this study, slump property and adiabatic temperature rise were especially investigated in order to obtain the influence of high temperature cement.

As the results, slump loss of concrete with high temperature cement was larger than that with normal temperature. But, the slump right after mixing was almost equal in concrete with high temperature cement and normal temperature cement. Slump loss of concrete with high temperature cement depended on the brand of admixture too. In case of use the high-temperature cement, slump-losses of concrete had tendency to be greater than that of mortar. Concrete with high temperature cement, which made by the double mixing, has higher slump than that of normal mixing, but its slump was almost equal to that of normal mixing after 30 minutes. The adiabatic temperature rises of concrete with high temperature cement were earlier than that of normal temperature.

KEY WORDS : Temperature of Cement, Slump Loss, Adiabatic Temperature Rise