

# 論文 練上がり温度と脱型時期の違いがフライアッシュコンクリートの品質に及ぼす影響

黒田泰弘\*1・片山行雄\*1・西田 朗\*1・桧垣 誠\*2

**要旨:** フライアッシュコンクリートを断面の薄い部材に打設することを想定し、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートと、管理材齢における調合強度をそれと同等としたフライアッシュコンクリート（フライアッシュを普通ポルトランドセメントに30%内割置換）を練り混ぜ、フレッシュ性状・強度発現特性・乾燥収縮および中性化抵抗性について比較検討した。その結果、練上がり温度や脱型時期の違いがフライアッシュコンクリートの品質に及ぼす影響について把握することができた。

**キーワード:** フライアッシュ, 練上がり温度, 脱型時期, 圧縮強度, 乾燥収縮, 中性化

## 1. はじめに

産業廃棄物の有効利用および地球環境保全の観点から、フライアッシュのさらなる有効利用が重要な課題となっている。フライアッシュは、コンクリート用混和材として、流動性の向上や水和発熱の低減、硬化体組織の緻密化等、優れた性質を持つことがよく知られている<sup>1)</sup>。ただし、フライアッシュをセメントに対して内割で使用する場合には、置換率の増大とともに、単位セメント量が減少するため、普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べ、初期強度や中性化に対する抵抗性が低下する。このため、例えば2007年に改定された日本建築学会の「フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」では、フライアッシュの置換率の最大値はC種に相当する30%までと規定されている。

ところで、フライアッシュセメントB種相当までフライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性についての検討はこれまでに多く行われているが、フライアッシュセメントC種相当までフライアッシュを混入したコンクリートに関する検討は比較的少なく、マスコンを対象とした検討に限られている<sup>(例えば2),3)</sup>。しかしながら、工事の都合で、マスコン部材と同時に断面の薄い一般の部材を打設したい局面も多く、そうした場合を想定した検討が不足しているものと考えられる。

そこで、本研究では、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートと、管理材齢における調合強度をそれと同等としたフライアッシュコンクリート（フライアッシュを普通ポルトランドセメントに30%内割置換）を練り混ぜ、練上がり温度や脱型時期の違いがフライアッシュコンクリートの品質に及ぼす影響について比較検討することにした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および調合

#### (1) 使用材料

使用材料の一覧を表-1に示す。混和剤は結合材の種類によらず、いずれも同じものを使用した。

フライアッシュはJIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）のフライアッシュII種に適合する分級細粉を用いた。フライアッシュの品質を表-2に示す。

表-1 使用材料

種類	材料名	産地 銘柄(※)
セメント	普通ポルトランドセメント	T社製 密度3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積3,310g/cm <sup>2</sup>
混和材	フライアッシュ	R発電研製 密度2.33g/cm <sup>3</sup> (表-2 参照)
細骨材	砂(細砂)	福岡県玄海産 表準密度2.58g/cm <sup>3</sup> FM2.55
粗骨材	碎石2005(安山岩)	山口県下関産 表準密度2.68g/cm <sup>3</sup> 実積率62.7%
混和剤	AE減水剤	高機能タイプ
	AE剤	空気量調整剤(フライアッシュ用を50%混合)

表-2 フライアッシュの品質

種類	試験結果	JIS A 6201による規定値	
二酸化珪素(%)	57.0	45.0以上	
水分(%)	0.1	1.0以下	
強熱減量	1.3	5.0以下	
密度	2.34	1.95以上	
粉末度	45μmふるい残分(%)	5	
	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	3,930	2500以上
フロー値比(%)	107	95以上	
活性度指数(%)	材齢28日	85	80以上
	材齢91日	100	90以上

\*1 清水建設(株)技術研究所(正会員)

\*2 (株)フローリック技術部(正会員)

表-3 調合

調合	W/B (%)	FA/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	FA	S	G
N	49.3	0	178	361	0	784	962
FC	45.7	30	157	241	103	759	1,029



写真-1 脱型前の封かん養生の状況

## (2) 調合

コンクリート調合は、普通ポルトランドセメントを単独で使用した調合 N と、フライアッシュを30%普通ポルトランドセメントに置換して使用した調合 FC の2つとした。調合を表-3に示す。

調合 N は一般建築の上部躯体に使用するスラブ 18.0cm、空気量4.5%のコンクリート、調合 FC はマスコンに使用するスラブ 15.0cm、空気量4.5%のコンクリートであり、事前に実施した試験練りの結果をもとに、いずれも調合強度 36.0 N/mm<sup>2</sup> (調合管理強度 30N/mm<sup>2</sup>) が得られるように選定した。なお、結合材の特性を踏まえ、調合 N に関しては管理材齢を28日とし、調合 FC に関しては管理材齢を56日とした。

## 2.2 試験方法

### (1) 練混ぜ

練り混ぜには容量50Lの強制2軸練りミキサーを用い、注水後90秒練り混ぜた。練上がり温度を10℃、20℃および30℃とし、単位水量をはじめ、調合は練上がり温度に関わらず同一とし、目標のスラブおよび空気量が得られるように、混和剤の添加率を調整した。

### (2) 試験方法

フレッシュ性状に関する試験項目は、スラブ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1128) およびコンクリート温度 (JIS A 1156) とし、60分後までの経時変化試験を、練り置きした試料を用いて行った。

硬化性状に関しては、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、長さ変化試験 (JIS A 1129-2) および促進中性化試験 (JIS A 1153) を実施した。

圧縮強度試験は、標準養生供試体と気中養生供試体について実施した。標準養生の供試体については、採取か

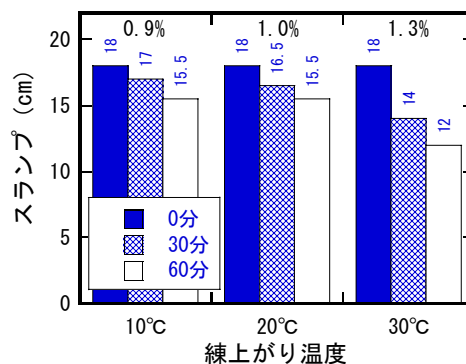


図-1 スラブ試験結果 (調合 N)

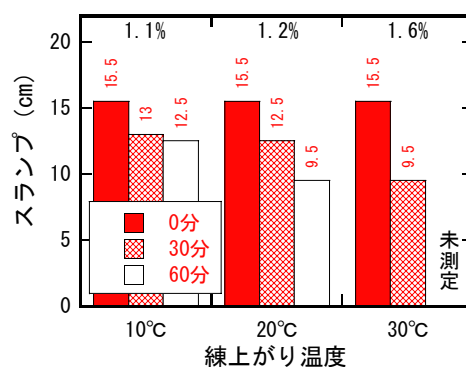


図-2 スラブ試験結果 (調合 FC)

ら約6時間後までそれぞれの温度条件に湿潤状態で保管した後、20℃の恒温室 (相対湿度の平均値65%) に移し、約24時間後に脱型した後、所定の材齢まで20℃水中養生した (10℃の調合 FC は約40時間後に脱型)。また、気中養生の供試体は、採取後すぐにそれぞれの温度条件にて写真-1に示すように封かん養生し、採取から3日後あるいは7日後に脱型した後、すぐに側面のみをラップし、横積みにして所定の材齢まで恒温室内で養生した。

長さ変化試験は、採取から3日後あるいは7日後まで練上がり温度と同一温度条件で養生した試験体を用い、脱型した時点を基長とし、水中養生はせず、そのまま乾燥条件 (温度20℃、相対湿度60%) とし、1, 4, 8, 13, 26週に測定を行った。

促進中性化試験は、採取から3日後あるいは7日後まで練上がり温度と同一温度条件で封かん養生した試験体を用い、脱型時に側面以外をアルミ箔テープでシールして材齢2ヶ月まで20℃の恒温室で保管した後、促進中性化槽 (温度20℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5%) に入れ、コンクリートの中性化深さの測定方法 (JIS A 1152) に準じて中性化深さの測定を行った。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 フレッシュコンクリートに関する試験結果

スラブの経時変化試験結果を図-1と図-2に、空

気量の経時変化試験結果を図-3と図-4に示す。なお、図-1, 2中の百分率は練上がり温度別のAE減水剤の添加率であり、図-3, 4中の百分率は練上がり温度別のAE剤の添加率である。

混和剤添加率を調整することによって目標とするスランプ、空気量を満足するコンクリートを得ることができた。AE減水剤の添加率については、練上がり温度が20℃の場合の添加率に対して、10℃の場合には0.1%減らし、30℃の場合には0.3~0.4%増やす必要があった。また、AE剤の添加率も温度が低い場合には減らすなどの調整が必要であった。なお、温度が高いほど、スランプロスは大きくなる傾向が認められた。一方、空気量についても幾分低下する傾向は認められたが、練上がり温度との関係は明確でなかった。

### 3.2 圧縮強度

#### (1) 標準養生強度

標準養生した供試体の圧縮強度試験結果を図-5に示す。調合Nの材齢28日強度は42.1~45.8N/mm<sup>2</sup>、調合FCの材齢56日強度は42.5~46.3N/mm<sup>2</sup>と、いずれもばらつきはあるものの、管理材齢における圧縮強度はほぼ同等と考えられる結果となった。また、材齢91日には調合や練上がり温度による強度差がほとんどなくなり、45.7~52.9N/mm<sup>2</sup>の範囲に収まった。なお、今回のケースでは、練上がり温度が20℃の強度がいずれの調合にお

いても低く、一般的にいわれているような練上がり温度が高いほど、長期強度が低下するといった傾向は認められなかった。練上がりから6時間のうちに、供試体は全て20℃の恒温室に移して養生しているため、標準養生供試体については、凝結硬化の過程で、練上がり温度の影響が徐々に解消されたのではないかと考えられる。

#### (2) 初期強度

各温度で脱型まで養生した供試体の積算温度と脱型時の圧縮強度(初期強度)との関係を図-6に示す。練上がり温度が10℃の材齢3日のデータを除けば、積算温度と初期強度との関係は概ね線形であり、調合Nと調合FCにおける直線の傾きはほぼ平行であり、7~8N/mm<sup>2</sup>程度の差であった。

なお、10℃の材齢3日の強度がいずれも直線上に乗らず、低くなった原因は、練上がり温度および養生温度が低く、他の条件よりも凝結硬化時間が遅延した影響が、若材齢のため、顕著に表れたものと考えられる。

#### (3) 気中養生強度

気中養生した供試体の圧縮強度試験結果を図-7と図-8に示す。練上がり温度が20℃以上の場合、3日脱型と7日脱型の気中養生強度の差はほとんど認められず、強度発現の傾向にもほとんど差はなかった。

一方、練上がり温度が10℃の場合に関しては、7日脱型の気中養生強度は、他の温度条件の場合より、明らか

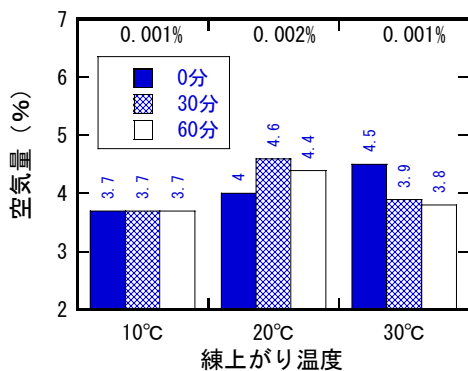


図-3 空気量試験結果 (調合 N)

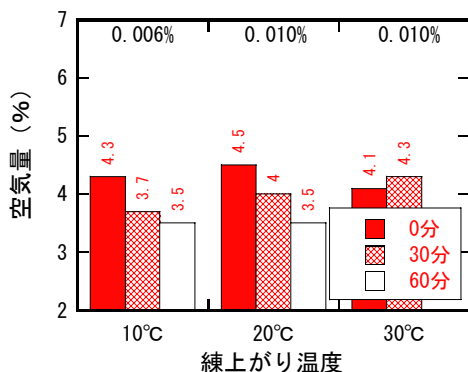


図-4 空気量試験結果 (調合 FC)

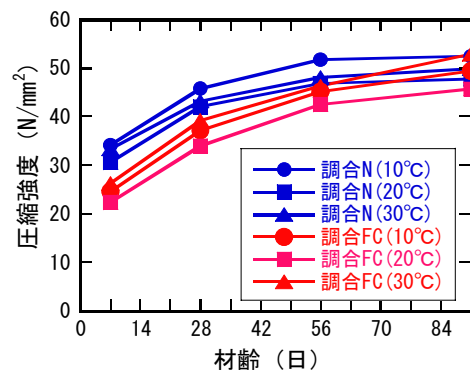


図-5 圧縮強度試験結果 (標準養生)

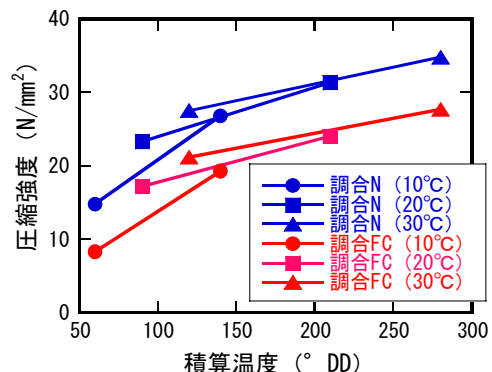


図-6 積算温度と脱型時強度との関係

に強度の伸びが大きい傾向にあり、調合 N では材齢 28 日以降の強度が、調合 FC では材齢 56 日以降の強度が、他の練上がり温度の場合より大きくなった。特にフライアッシュを用いていない調合 N の強度発現が大きかった。

湿潤養生期間の影響についてみると、3 日脱型の強度に比べ、7 日脱型の強度が幾分大きい傾向は認められるものの、いずれの調合においても大きな差ではなかった。なお、10℃の温度条件では 3 日脱型後の気中養生強度供試体を取らなかったため、脱型後の強度発現に関しては不明であるが、フライアッシュを用いた調合 FC では、脱型時強度が 10N/mm<sup>2</sup>にも満たず、他の温度条件よりも初期乾燥の影響を強く受けていると考えられるため、強度差を生じている可能性もあると思われる。

先に示した標準養生強度と気中養生強度とを比較すると、調合 FC で気中養生強度が標準養生強度より幾分低くなる傾向が認められるが、調合 N では特に差は認められなかった。フライアッシュを用いた調合の方が、初期強度が低だけでなく、強度発現にも時間を要するため、乾燥の影響を受けやすく、このような差を生じたものと考えられる。

### 3.3 耐久性

#### (1) 乾燥収縮

長さ変化試験の結果を図-9 と図-10 に示す。調合

N と調合 FC の乾燥期間 6 カ月後の長さ変化率を比較すると、前者で 656~777 μ，後者で 576~682 μであった。フライアッシュを使用した調合 FC の方が単位水量は小さいこともあり、乾燥収縮は全体的に小さかった。

また、練上がり温度と脱型時期の影響で比較すると、いずれの調合の場合も、30℃・3 日脱型の長さ変化率が最も大きく、10℃・7 日脱型の長さ変化率が最も小さくなった。

図-11 は質量減少率と長さ変化率との関係であるが、いずれの調合の場合も、30℃・3 日脱型の質量減少率が最も大きく、10℃・7 日脱型の質量減少率が最も小

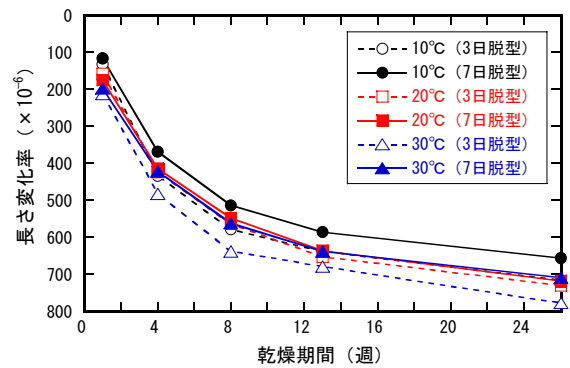


図-9 養生が長さ変化率に及ぼす影響 (調合 N)

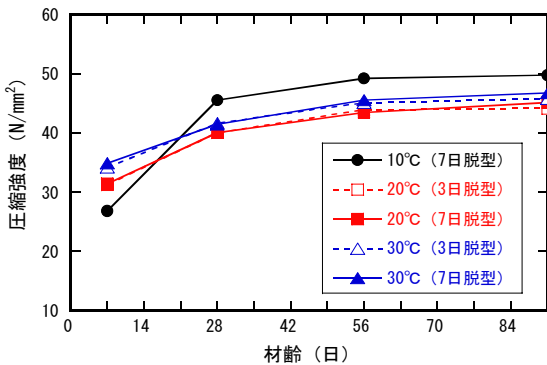


図-7 養生が強度発現に及ぼす影響 (調合 N)

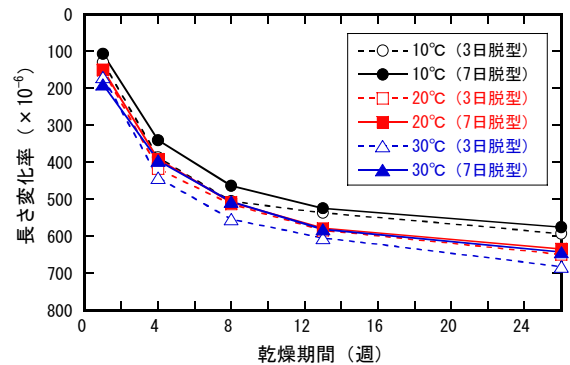


図-10 養生が長さ変化率に及ぼす影響 (調合 FC)

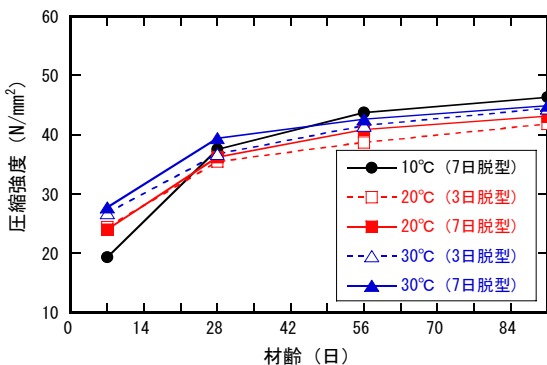


図-8 養生が強度発現に及ぼす影響 (調合 FC)

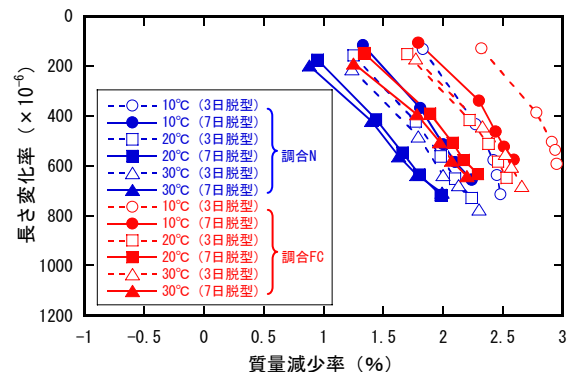


図-11 質量減少率と長さ変化率との関係

さく、調合別にみると長さ変化率の関係と一致していた。ただし、調合 N と調合 FC の質量減少率を比べると、全体的にフライアッシュを用いた調合 FC の方が大きいため、調合 FC の方が調合 N よりも長さ変化率が小さい理由は水分の逸散量だけでは説明できない。セメント水和物の組織の違いが影響しているものと考えられる。

## (2) 中性化抵抗性

促進中性化試験結果を図-12 と図-13 に示す。

調合 N と調合 FC の促進中性化試験結果を比較すると、調合 FC の方が中性化の進行が明らかに大きく、傾きも大きかった。フライアッシュを用いた調合 FC では、調合 N と比べて単位セメント量が少なく、生成する水酸化カルシウム量も少ないため、その影響によるものと考えられる。

練上がり温度と脱型時期の影響で比較すると、いずれの調合の場合も、10℃・3日脱型の中性化深さが最も大きく、30℃・7日脱型の中性化深さが最も小さくなった。なお、いずれの調合についても、10℃・3日脱型の中性化深さには顕著な差が認められるが、その他の条件での差は小さかった。

一般にはコンクリートの中性化深さは $\sqrt{t}$  則で評価されるが、今回の試験ではいずれのケースに関しても水中養生を行っておらず、促進中性化の試験開始までの比較

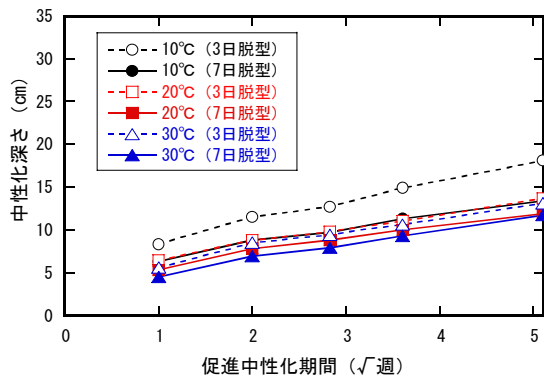


図-12 養生が中性化に及ぼす影響 (調合 N)

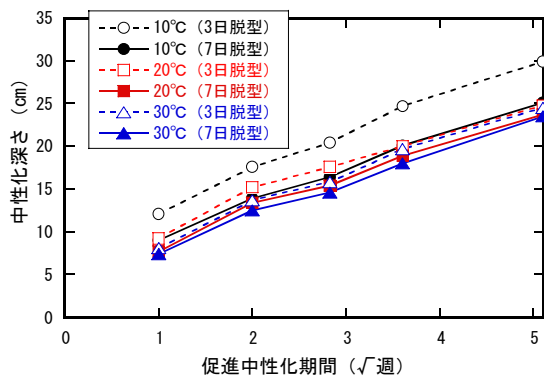


図-13 養生が中性化に及ぼす影響 (調合 FC)

的若材齢の期間に乾燥の影響を受けており、促進中性化試験開始時点で、ある程度中性化していると考えてもおかしくないことから、下記の一次式で回帰分析することにした。

$$C = A \times \sqrt{t} + C_0$$

ここで、C：中性化深さ (mm)

A：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{t}$ 週)

t：促進中性化期間 (週)

C<sub>0</sub>：見掛けの初期中性化深さ (mm)

既往の研究<sup>(例えば4), 5)</sup>において、脱型までの期間が短いコンクリートでは、セメント水和物の組織の緻密化が阻害され、かぶり部分の品質が低下することが知られている。したがって、C<sub>0</sub>は乾燥の影響を受け、中性化抑制に寄与していないかぶり部分を表し、耐久設計の際のかぶり厚さの設定にも利用可能と考えられる。つまり、表面仕上げ材の中性化抑制効果を評価する場合に等価かぶり厚さという考え方<sup>6)</sup>があるが、C<sub>0</sub>は乾燥などによるダメージを評価する際には、逆に割り引く必要があるかぶり厚さとして適用できると思われる。回帰分析の結果を表-4に、脱型時強度とC<sub>0</sub>との関係を図-14に示す。

中性化速度係数 A に関しては、いずれの調合についても、10℃・3日脱型の条件を除き、練上がり温度や脱型

表-4 回帰分析の結果

条件		調合 N		調合 FC	
		C <sub>0</sub>	A	C <sub>0</sub>	A
10℃	3日脱型	6.29	2.34	8.37	4.32
	7日脱型	4.98	1.69	5.57	3.90
20℃	3日脱型	4.94	1.72	6.74	3.65
	7日脱型	4.23	1.56	4.76	3.81
30℃	3日脱型	4.37	1.74	4.92	3.93
	7日脱型	3.09	1.71	4.02	3.84

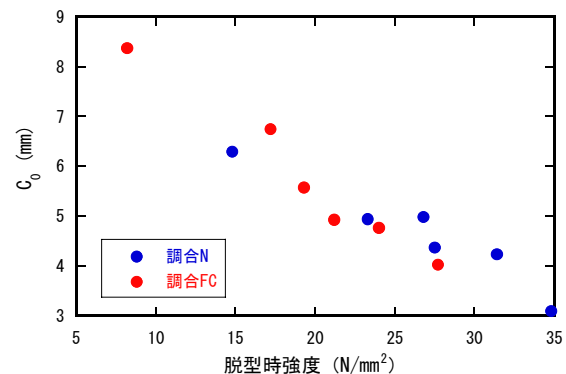


図-14 脱型時強度とC<sub>0</sub>との関係

時期の違いによる差は小さく、調合 N で 1.56~1.74, 調合 FC で 3.65~3.93 となった。したがって、10℃・3 日脱型の条件を除き、初期乾燥が内部のコンクリートの品質に及ぼす影響は小さく、表層部分のダメージに留まっているものと推測される。逆に、10℃・3 日脱型の条件においては、フライアッシュの有無によらず、中性化速度係数 A はその他の条件と比べて明らかに大きく、初期乾燥の影響がコンクリートの内部にまで及び、組織の緻密化が阻害されていると推察される。

一方、見掛けの初期中性化深さ  $C_0$  に関しては、3.1~8.4mm の範囲にあり、脱型時強度と  $C_0$  との間には、調合によらず一定の関係があることがわかった。脱型時強度が小さいほど、 $C_0$  は大きくなった。促進試験では、コンクリートは常に乾燥条件にあるため、初期の乾燥が表層部のコンクリートに与えた影響は材齢経過後も解消されず、 $C_0$  の範囲にダメージとして残ったものと考えられる。また、 $C_0$  と脱型時強度との関係が調合によらなかったのは、中性化速度係数 A と異なり、コンクリート中の水酸化カルシウム量に直接依存しないためではないかと考えられる。このことから、脱型時強度から初期乾燥の影響範囲を推定できる可能性が示唆される。

#### 4. まとめ

断面の薄い部材に打設した場合を想定し、普通コンクリートと、管理材齢における調合強度をそれと同等としたフライアッシュコンクリート（フライアッシュを普通ポルトランドセメントに 30% 内割置換）を練り混ぜ、練上がり温度や脱型時期の違いがフライアッシュコンクリートの品質に及ぼす影響について比較検討した。

今回の実験の範囲で得られた主な試験結果は以下のとおりである。

- (1) 練上がり温度が変わった場合でも、普通コンクリートと同様に、混和剤添加率を調整することによって目標とするスランプ、空気量を満足するフライアッシュコンクリートを得ることができた。
- (2) フライアッシュの有無によらず、練上がり温度が 20℃ 以上の場合、3 日脱型と 7 日脱型の気中養生強度の差はほとんど認められず、強度発現の傾向にもほとんど差はなかった。一方、練上がり温度が 10℃、7 日脱型の気中養生供試体における長期強度の伸びは、他の温度条件の場合より、明らかに大きい傾向

にあったが、フライアッシュコンクリートの場合、他の練上がり温度条件との差は小さかった。

- (3) 乾燥収縮は、フライアッシュコンクリートの方が、普通コンクリートよりも幾分小さかった。また、フライアッシュの有無によらず、30℃・3 日脱型で最も大きくなり、10℃・7 日脱型で最も小さくなった。
- (4) 中性化深さは、フライアッシュコンクリートの方が、普通コンクリートよりも大きかった。また、フライアッシュの有無によらず、30℃・7 日脱型で最も大きくなり、10℃・3 日脱型で最も小さくなった。
- (5) 乾燥がコンクリートの中性化に及ぼす影響については中性化速度係数 A と見掛けの初期中性化深さ  $C_0$  で評価できる可能性があり、後者は脱型時強度と密接な関係にあることがわかった。

謝辞：本研究で用いたフライアッシュに関しては、九州電力㈱よりご提供頂きました。末筆ながら感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 大賀宏之：フライアッシュや石炭灰を使用したコンクリート，コンクリート工学 Vol.34, No.6, pp.69-74, 1996
- 2) 船本憲治・寶口繁紀・笹原厚：フライアッシュを使用したマスコンクリートの発熱及び強度発現特性，日本建築学会構造系論文集 第 540 号, pp.1-6, 2001
- 3) 池内俊之ほか：フライアッシュを使用したマスコンクリートの強度発現性と調合強度の補正，日本建築学会構造系論文集 第 560 号, pp.9-15, 2002
- 4) 桜本文敏ほか：せき板の存置期間および初期養生がコンクリートの品質に及ぼす影響（その 1~3），日本建築学会学術講演梗概集 A, pp.117-122, 1987
- 5) 佐藤幸恵・丸山一平：脱型時期がかぶりコンクリートの品質に及ぼす影響に関する実験的検討，Cement Science and Concrete Technology, No.61, pp.282-288, 2007
- 6) 梶田佳寛ほか：RC 造建築物における鉄筋腐食速度に及ぼすコンクリート中の塩化物の影響，日本建築学会構造系論文報告集, No.383, pp.8-16, 1988