

フライアッシュコンクリートの早期強度推定について

川口 隆

愛媛大学工学部等技術部

1. はじめに

フライアッシュ(以下、FA と称す)は、混和材としてコンクリートの長期強度増進、密実性など総合的な耐久性向上に寄与し、有用な資源である。しかし、普及状況を鑑みると初期強度不足および精度の高い早期材齢の強度推定方法が確立されていないことから、その利用が進んでいない。既往の研究で、マチュリティーに基づく等価材齢とゴール曲線を用いた強度成長曲線を組み合わせることにより、一般的な建設工事の温度環境下のコンクリートの早期強度の推定式を提案している¹⁾。本研究では、この推定式の適用性を把握するため、異なる養生温度の早期強度の評価および早期強度推定に用いる材齢 28 日強度について検討した。さらに、早強セメントおよび混和材による早期強度改善についても検討した結果を報告する。

2. 実験概要および早期強度の推定法

2.1 配合とコンクリート強度の成長曲線について

表 1 に配合の一例を示すが、普通セメントおよび早強セメントの種類ごとに水粉体比 $W/(C+F)$ は 40, 50, 65% の 3 段階とした。普通セメントは各粉体比に対して内割りで FA を 0, 10, 20, 30% に変化させ、早強セメントは FA を一律 20% の混入とした。型枠を封かん処理した供試体を、水温 10°C および 30°C に設定した水槽内に静置し、材齢 2, 4, 7, 14, 21, 28 日において、供試体 3 本で圧縮強度試験を実施した。

表 1 実験に用いた配合の一例

セメント	水粉体比 $W/(C+F)$ (%)	混入率 $F/(C+F)$ (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					粉体量に対する割合(%)		スランブ (cm)	空気量 (%)
				W	C	FA	S	G	AE 減水剤*	AE 助剤**		
普通	50	20	47	172	272	68	809	932	0.35	0.45	9.0	4.4
	65	0	50	170	262	0	896	907	0.35	0.00	6.0	4.0
		20	50	170	210	52	887	897	0.35	0.25	12.0	4.2
早強	40	20	47	175	350	88	784	870	1.20	0.70	4.5	4.5
	50	20	47	172	275	69	797	910	0.35	0.70	9.4	4.7
	65	20	47	175	215	54	818	951	1.00	0.70	9.0	4.9

*AE 減水剤；原液，**AE 助剤(FA 用 AE 剤)；10%溶液

各配合および養生温度の違いによる早期強度の成長曲線には以下のゴール曲線によるものを用いた¹⁾。

$$f_c = \frac{a_g f_{28} t_e}{t_e + b_g} \quad (2.1)$$

ここで、 f_c ：コンクリート強度、 t_e ：積算温度による等価材齢、 f_{28} ：材齢 28 日でのコンクリート強度、 a_g 、 b_g ：定数である。

等価材齢 t_e は次式で求めることができる。

$$t_e = \frac{\int_0^{t_e} (T - T_0) dt}{T_s - T_0} = \sum \frac{T - T_0}{T_s - T_0} \Delta t \quad (2.2)$$

ここで、 T ：コンクリート温度、 T_s ：基準温度 ($T_s = 20^\circ\text{C}$)、 T_0 ：強度増進がないと考える温度 ($T_0 = -10^\circ\text{C}$)、 Δt ：温度 T での期間である。

また、定数 a_g 、 b_g はセメントの種類および水セメント比 W/C に関係するもので、普通ポルトランドセメントでは次式で与えられる。

$$a_g = (b_g + 28) / 28 \quad (2.3) \quad b_g = 7.55(W/C) - 0.10 \quad (2.4)$$

なお、これまでの実験結果から、定数 b_g は水粉体比の値ではなく、単位セメント量と単位水量による実質水セメント比の値を用いる。

2.2 養生温度の異なる早期強度

実験結果の一例として、養生温度 30°C の FA コンクリートにおける強度の経時変化を図 1 に示す。推定値は養生温度 20°C の材齢 28 日での圧縮強度の実測値を式(2.1)に代入して求めた。この結果より、比較的良い精度で推定できていることが伺える。

2.3 早強セメントを用いた早期強度

図 2 は早強セメントを用いた水粉体比 65% の FA コンクリートの強度の経時変化と推定値を示す。なお、推定値は式(2.1)を用いたが、定数 a_g 、 b_g は次式で表される早強セメントに関する値を用いた。

$$a_g = (b_g + 28) / 28 \quad (2.5) \quad b_g = 5.19(W/C) - 0.74 \quad (2.6)$$

早強セメントを使用することで FA を無混入で普通セメントを用いたものと強度発現が同程度で改善をおこなえた。しかしながら、早強セメントの使用により FA コンクリートの利点である水和熱の低減効果が薄れていた。図 3 に早強セメントを用いた FA の実測値と推定値の比較を示す。図中の RMS は平均自乗平方誤差で、 SD は実測値に対する推定値と実測値との差の割合による標準偏差である。この比較結果から、早強セメントを用いたいずれの粉体比においても良好な精度で推定できていたことがわかる。

2.4 各種混和材を用いた早期強度改善について

FA コンクリートの早期強度には、ポゾラン反応がほとんど貢献していないと考えられるので^{2), 3)}、混和材自身の反応が強度発現に寄与する、FA のポゾラン反応を促進する、およびセメントの強度発現を促進する、の大きく 3 つの観点から混和材を選んで使用し、早期強度の改善について検討した。選定混和材は、高炉スラグ微粉末、シリカヒューム、水酸化ナトリウム、生石灰、炭酸カルシウム、炭酸リチウム、無水石膏、二水石膏、硫酸ナトリウムと生石灰、マグネシウムの合計 10 種類である。これらの混和材を用いてモルタル供試体を作製し、材齢 3 日、7 日で強度発現の性状を確認したが、いずれの場合においても比較のため用いた FA 無混入のモルタルよりも約 1/3 以下の強度発現しかなかった。

3. おわりに

今回の検討結果から、FA コンクリートの早期強度の改善方法として、現段階では早強セメントの使用が実用的であり、品質および工程管理に関わる早期強度の推定も可能であった。しかし、FA の普及率向上のためには、今後も FA コンクリートの長所や利点を活用できる早期強度の改善策を検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 氏家勲, 大野浩二: 各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討, 土木学会論文集 No.798/VI-68, pp.51-61, 2005.9
- 2) 宮原茂禎, 他 3 名: フライアッシュセメント系の水和反応, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.50-55, 2001.2
- 3) 山本武志, 金津努: フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.52-65, 2007.1

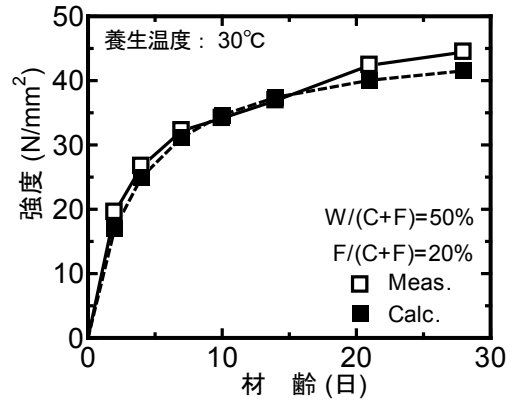


図 1 養生温度の異なる強度の経時評価

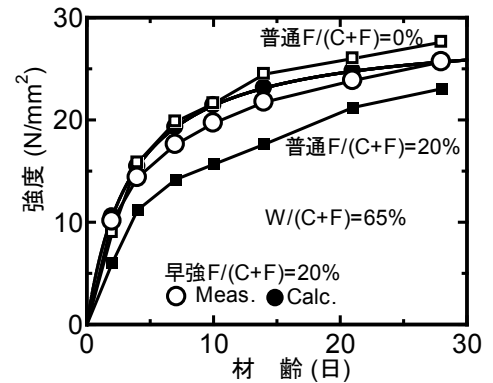


図 2 早強セメントを用いた強度の経時変

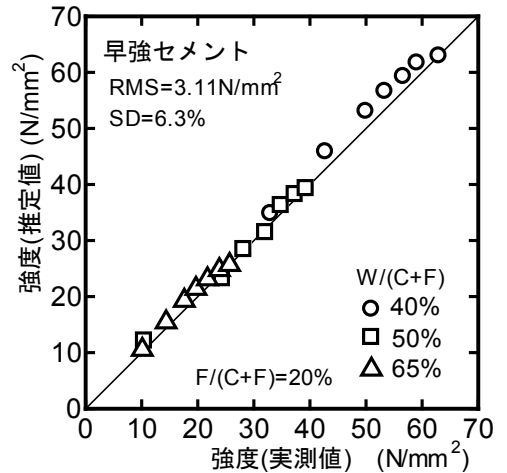


図 3 早強セメントを用いた強度の実測値と推定値の比較