

論文 等価材齢による高流動コンクリートの強度予測に関する 実験的研究

金圭庸*¹ 吉培秀*² 金武漢*³ 南宰鉉*⁴

要 旨：多様な結合材量を使用する粉体系の高流動コンクリートの強度発現特性はセメントと混和材の種類及び養生温度による影響が大きい。それで、合理的な強度管理のためには、積算温度による強度予測方法が必要とされている。本研究は、高流動コンクリートの強度発現特性を検討するため、一次関数としてNurse-Saul函数と指数函数としてF. Hansen, J. Pedersonの函数でセメントの種類及び温度の影響について検討したものである。結論としては、Arrhenius函数による等価材齢を利用したF. Hansen、J. Pedersonの函数は本実験の温度範囲の5～30℃では高流動コンクリートの強度に対する温度の影響をNurse-Saul函数より正確に説明しており、高流動コンクリートの強度を適切に推定できるものと思われる。

キーワード：養生温度、等価材齢、高流動コンクリート、強度予測

1. はじめに

最近、建設構造物の大型化、超高層化、高機能化の傾向に伴い高流動コンクリートが要求される場合が多くなっている。多量の粉体を使用する粉体系高流動コンクリートは結合材による影響が大きい。高流動性、強度発現特性などの品質管理についての研究も行われている。すなわち、高流動コンクリートの強度発現には多量の結合材を使用し、結合材の種類による影響が大きい。初期材齢における構造体コンクリートの強度管理のためには積算温度を利用した強度推定方法を利用することが望まれている。特に多様な外気環境条件における初期材齢で適切な強度管理を行うためには非破壊試験法より積算温度による推定方法が有効であると考えられる。

本研究は高流動コンクリートの強度管理における積算温度の適用に関する実験的研究として、結合材の種類と養生温度による高流動コンクリートの強度発現性状を検討したものであり、積算温度を利用して合理的なコンクリート強度管理および品質管理のシステム構

築をするための基礎資料を提示したものである。

2. 積算温度の基本の理論

コンクリートの強度発現における養生温度の影響についての研究の結果、養生温度と材齢を用いてコンクリート強度を予測するため函数が提案されている。この

[The measured Temperature History during curing]

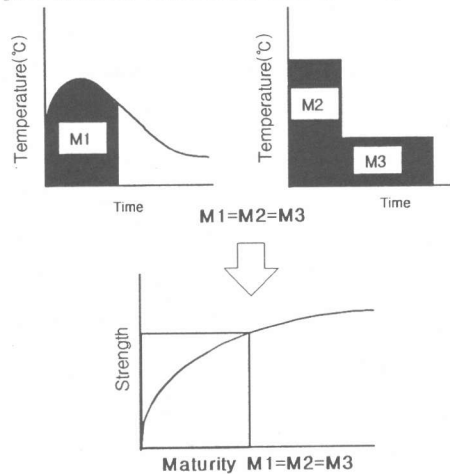


Fig. 1 Maturity Function

* 1 大韓民国 忠南大学校 産業技術研究所, 日本建設省建築研究所, 研究員・工博 (正会員)
 * 2 大韓民国 大田大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)
 * 3 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 教授・工博 (正会員)
 * 4 大韓民国 大田大学校 工科大学 建築工学科 教授・工博 (正会員)

関数は基準温度に従って時間と養生温度の積分値として現わされる。すなわち、時間と温度のある範囲までの面積が同じであれば同一な強度が得られるので、次の式(1)のように表わすことができる。

$$M = \sum \alpha \Delta t \quad (1)$$

α : 材齢換算の係数

t : 材齢または経過時間

2.1. Nurse-Saul函数を応用した材齢換算係数
温度と時間の関係を1次式で示すNurse-Saul函数の基本的式は次のようになる。^{4),5)}

$$M = \int_0^t (T - T_0) \cdot \Delta t \quad (2)$$

M : 積算温度(°C・h または°C・day)

T : Δt 其間のコンクリート養生温度(°C)

T_0 : 基準温度(一般に-10°C)

Δt : 時間間隔(時間または日)

これを利用しRastrupは材齢換算係数を次の式(3)のように示した。⁶⁾

$$\alpha = \frac{(T - T_0)}{(T_r - T_0)} \quad (3)$$

T_r : 等価材齢の基準になる温度(°C)

2.2. Arrhenius式を応用した材齢換算係数

コンクリートの硬化速度はコンクリートの温度に大きな影響をうけて養生温度が高ければ硬化が促進され、低温の場合には硬化速度が低下するという実験の結果がある。これに基づいて化学反応速度式であるArrhenius式を導入し、養生温度によるセメントの水和反応速度とコンクリートの強度発現との関係を20°Cでの反応速度を1に仮定する。

F. Hansenと J. Pedersonは、Arrhenius方程式(式4)が-10~80°Cの範囲でNurse-Saul函数比べ、コンクリート強度に対する温度の影響をよく説明しているという実験結果を発表した。⁷⁾

$$\alpha = \exp[E/R \cdot (1/T_s - 1/T_a)] \quad (4)$$

T_a : 養生温度(°K)

T_s : 273(°K)

E : 活性化エネルギー。化学反応エネルギーとしての水和熱で、セメント固有の値(実験値)

$$33.5 + 1.47(20 - T_a) \text{ KJ/mol} (T_a \leq 20^\circ\text{C})$$

$$33.5 \text{ KJ/mol} (T_a \geq 20^\circ\text{C})$$

R : 8.314J/mol(気体常数)

2.3. 材齢換算係数の比較

Table1.及びFig.2.は温度による材齢換算係数を式(3)と式(4)に基づき計算して比較したものである。Nurse-Saul函数を応用した材齢換算係数は温度によるコンクリートの反応速度を1次函数で表し、Arrhenius函数を応用した式(4)は指数函数の形態で表わされる。

3. 実験計画および方法

3.1. 実験計画及び使用材料

本研究の実験計画はTable2に示し、各種材料の物理的性質はTable3.4に表した。

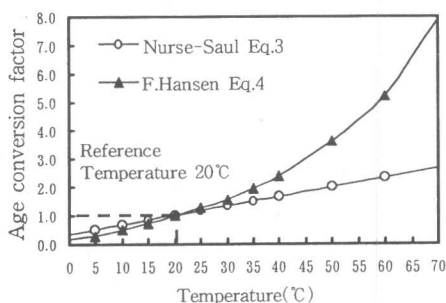


Fig. 2 Proposed functions to represent temperature dependence of age conversion factor used to compute equivalent age.

Table 1. Age conversion factor vs.curing temperature

Temp. (°C)	T+10	$\frac{T+10}{20+10}$	$\exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_a} \right) \right]$
0	10	0.333	0.151
5	15	0.500	0.292
10	20	0.667	0.497
15	25	0.833	0.747
20	30	1.000	1.000
25	35	1.167	1.260
30	40	1.333	1.574
35	45	1.500	1.954
40	50	1.667	2.408
50	60	2.000	3.587
60	70	2.333	5.217
70	80	2.667	7.242

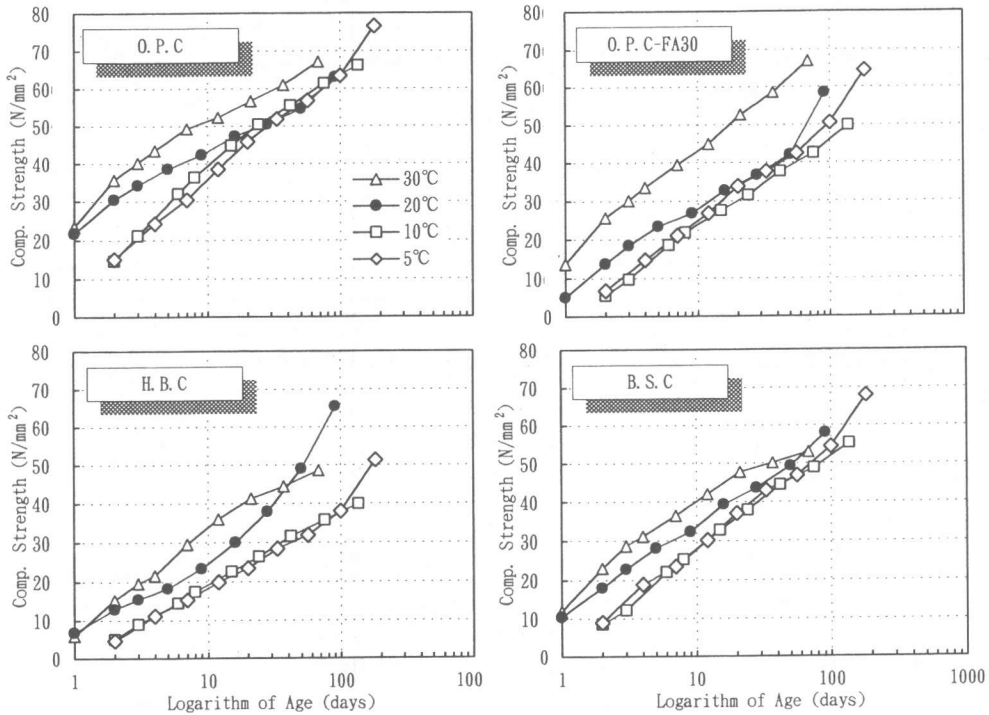


Fig 4. Development of compressive strength with age

Table 2 Experimental Plan

Experimental Item.			Analytical Item
Binder Type	Curing temp.(°C)	Item of test	Using functions
O.P.C	5	Compressive strength	· Nurse-Saul · Arrhenius
O.P.C-FA30	10		
R.B.C	20		
B.S.C	30		

※ O.P.C : Ordinary Portland Cement,
R.B.C : Rich Belite Cement,
B.S.C : Blast Furnace Slag Cement.

Table 3 Physical properties of cement

Cement Type	Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Setting time (h:m)		Chemical Compound		
			Initial	Final	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
OPC	3.15	3,200	4:50	7:05	64.8	24.2	3.1
RBC	3.20	4,130	6:00	9:40	63.2	25.3	2.7
BSC	2.98	4,000	3:40	7:05	52.4	26.1	9.0

Table 4 Properties of used materials

Admixture	Fly-ash	Specific gravity : 2.31, Fineness : 3,228(cm ² /g)
Super plasticizer	SP-8N	Polycarboxylic Ether, Specific gravity : 1.04~1.06
Aggregate	Fine aggregate	Gmax : 2.5mm S.G : 2.60
		F.M : 2.60 Absorption : 1.66
Aggregate	Coarse Aggregate	Gmax : 5mm S.G : 2.56
		F.M : 6.61 Absorption : 1.88

Table 5. Mix Proportion of high-fluidity concrete

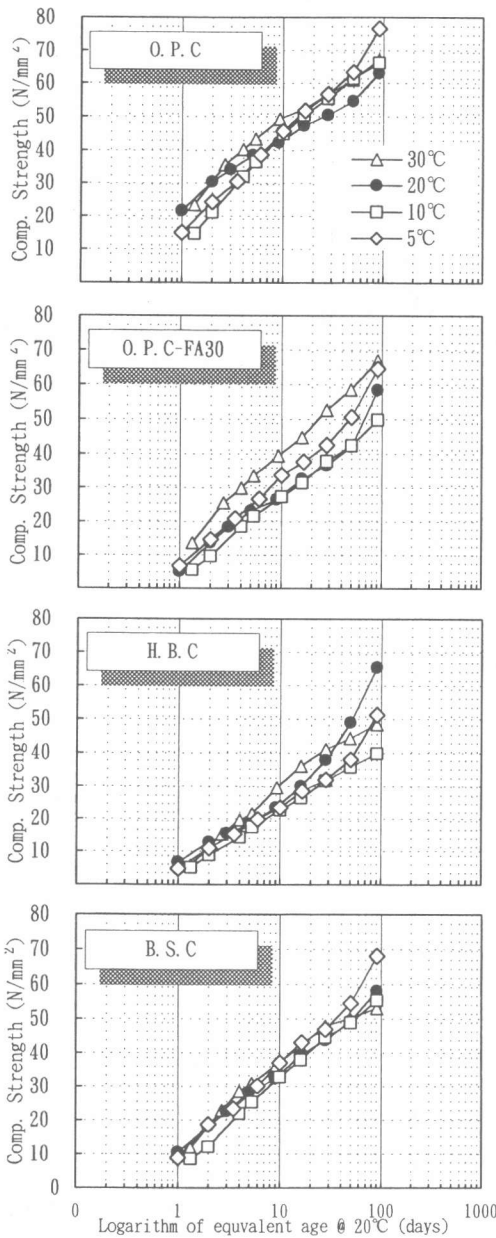
W/B (%)	Type of cement	SP agent (%)	Slump Flow (cm)	Air (%)	s/a (%v)	Fa/B (%wt)	Unit Water (kg/m ³)	Unit weight (kg/m ³)			
								C	FA	S	G
35	OPC	1.2	65±5	4.5±0.5	50	0	175	500	0	804	802
						30		350	150	776	773
	0					500		0	808	805	
	0					500		0	793	790	

3.2. 高流動コンクリートの配合

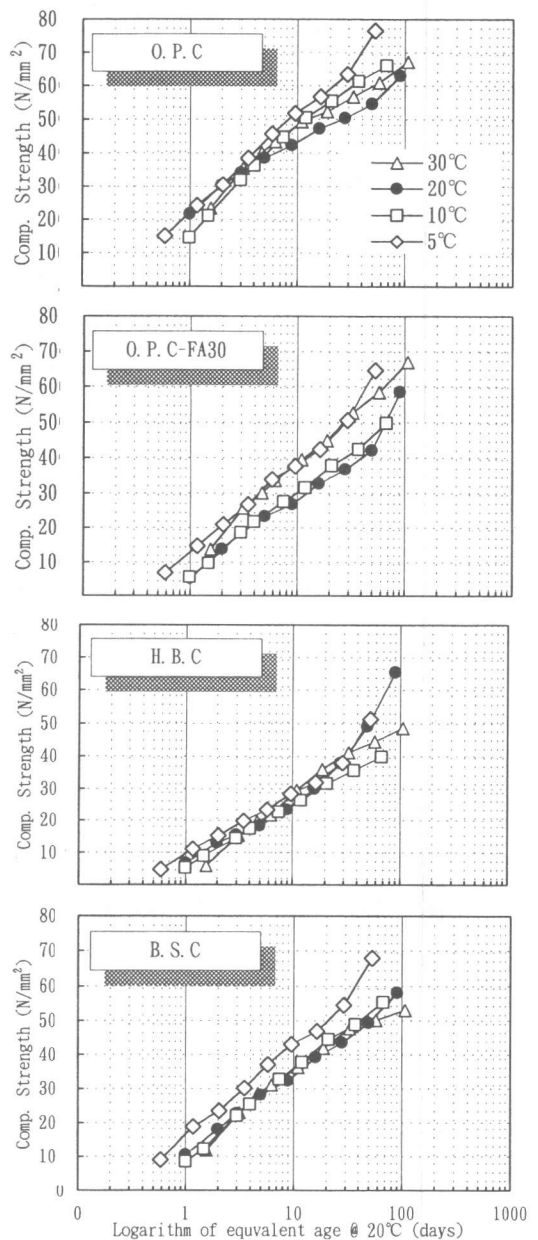
本実験に使用したコンクリートの配合は数回の試験混練を通じてTable5のようになった。混和剤添加量は高流動コンクリートのスランプ値と空気量を確保する同一水準で決めた。水結合材比35%、単位結合材量500kg/m³、細骨材率 50%に定めた。また、セメントの種類は普通ポルトランドセメント、ビーライトセメント、高炉スラグセメント、そして、フライアッシュを普通ポルトランドセメントに30%重量に代替した4水準に設定した。

3.3. コンクリートの混練方法及び試験方法

コンクリートの混練は100ℓ強制式ミキサを使用して高流動コンクリートを製造した。試験体の製作は10ℓ



(a) The traditional function



(b) The Function based upon the Arrhenius equation

Fig. 5 Compressive strength verse maturity

×20cmのモールドを使用して各材齢別3個ずつ製作した。コンクリートの混練及び打込み温度は使用材料を24~36時間前恒温室において各養生温度と合わせた。養生方法は材齢1日に各恒温室の気中養生して、その後では恒温室の水槽で各5、10、20、30℃の水中養生を行なった。測定材齢は同一積算温度で強度発現を

評価するため、9水準の積算温度で各温度別材齢を算して決めた。各種試験方法はKS, JIS, ASTMなど各種規準により行なった。

4. 実験結果および分析

4.1. 高流動コンクリートの強度発現性状

各結合材の種類別養生温度による強度発現の性

状をFig.4に表した。

4.1.1. O.P.Cの強度発現

結合材として普通ポルトランドセメントを使用した高流動コンクリートの場合、養生温度 20, 30℃での1日圧軸強度は20 N/mm²以上の初期強度を表しており、材齢28日の圧縮強度は50 N/mm²の強度を示している。

また、養生温度 5、10℃の場合圧縮強度発現の性状は類似な水準であり、低温の環境ではコンクリートの強度発現に対する温度の影響が小さくなった。しかし、20℃以上の温度ではコンクリートの強度発現に対する温度の影響が大きく示された。

4.1.2. O.P.C-FA30の強度発現

O.P.C-FA30の場合、養生温度5~20℃での強度発現は類似な水準であり、養生温度30℃では5~20℃の場合と比べ高い強度発現水準を示した。

また、O.P.Cを結合材として使用した場合と類似した強度発現の性状を表わした。

4.1.3. R.B.Cの強度発現

ビーライトセメントを利用した高流動コンクリートの圧縮強度は他の結合材に比べて同一な養生温度で約10 N/mm²低い強度発現の水準を示した。また、R.B.Cの場合10℃以上の温度でのコンクリートの強度発現は養生温度によって大きい影響を受けている。

4.1.4. B.S.Cの強度発現

高炉スラグセメントを使用した高流動コンクリートの強度は養生温度変化に一定の強度発現を示しており、それは材齢50日以後でも類似な強度発現水準である。

4.2. 積算温度とコンクリートの圧縮強度の関係の検討

Nurse-Saul函数を応用した積算温度と強度関係を表したFig.5はO.P.C-FA30を除いた3種類のコンクリー

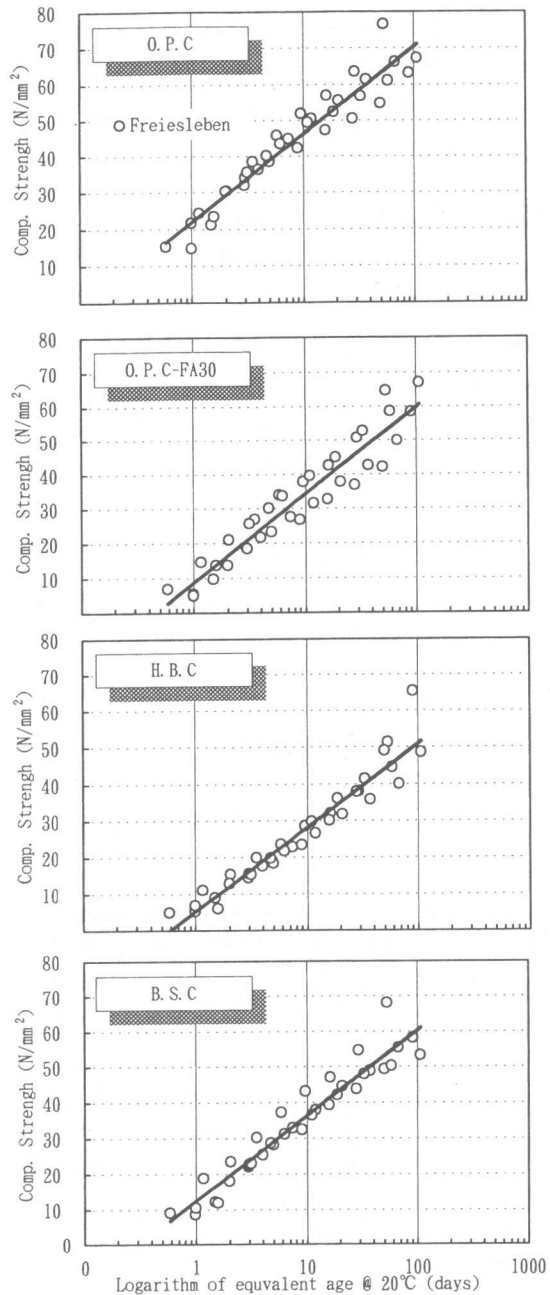


Fig. 6 Compressive strength verse maturity

トの強度発現に対する温度の影響を良く説明している。また、F.Hansenの式を利用した場合、Nurse-Saul函数を応用した等価材齢に比べて同一な等価材齢において類似な強度発現水準を表われており、Arrhenius式を利用したF.Hansenの式は初期材齢におけるコンクリートの強度発現特性をよく表わしている。

しかし、等価材齢28日以降は高温と低温において養生温度によるコンクリートの強度が逆転しているため、本実験の範囲では等価材齢28日以前の高流動コンクリートの強度を予測した方が妥当である。

4.3 高流動コンクリートの強度予測

図6は積算温度と強度発現の性状をPlowmanの強度予測式によって表したものである。Plowmanの強度予測式は強度と積算温度の関係を1次関数に表わすため長期材齢のコンクリート強度を予測するには不適當であると思われる。しかし、本実験の材齢28日以前では4種類の結合材において相関係数値が高くなり、高流動コンクリートの強度予測が可能である。

また、Plowmanの予測式は単純なため現場での適用が容易であると思われる。Plowmanの予測式は下式(5)の通りである。⁸⁾

$$S = a + b \ln(M) \quad (5)$$

S : コンクリートの圧軸強度

M : 積算温度

Plowman式による係数導出の結果と決定係数値は表6に示した。

Table 6. A constant calculated by Plowman equation

Equation of Plowman			
S = a + b ln(M)			
Type of binder	a	b	r ²
O.P.C	21.919	10.523	0.9254
O.P.C-FA30	8.774	11.073	0.9049
H.B.C	5.143	9.944	0.9277
B.S.C	12.401	10.396	0.9236

5. 結論

高流動コンクリートの強度管理に関する積算温度の適用性検討の実験により次のような研究結果が得られた。

- 1) 結合材量が多量に使用される粉体系の高流動コンクリートにおいて、圧縮強度は結合材の種類より大きい影響を受けていることが分かった。そして強度発現に対する、温度の影響は混合セメントを使用したコンクリートにおいて大きく受ける。

- 2) Nurse-Saul 関数を応用したRastrupの関数は、コンクリートの強度に対する温度の影響をよく説明している。また、Arrhenius関数を応用したF. Hansenの関数によるコンクリートの強度に対する温度の影響をより正確に説明しており、これを利用したコンクリートの強度予測が可能であると思われる。
- 3) 本実験に適用した既存の圧縮強度予測モデル式であるPlowman式は高い相関係数を示した。特に、Plowman式は、単純なため、現場での適用が有効であると思われる。

参考文献

1. 金武漢 外 : モルタルおよびコンクリートの積算温度と圧縮強度に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第355, 昭和60年9月。
2. 吉培秀, 金武漢, 南宰鉉, 権寧璉 : “積算温度方式による高強度コンクリートの圧縮強度予測”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp735~736. 1999. 9.
3. Moohan, Kim., Jaehyun, Nam., Gyuyong, Kim., Baesu, Khil., Janghyun, Han., : An Experimental Study on Strength Control of High Fluidity Concrete by Maturity Method, KCI, 2000. 3. (in Publishing)
4. Nurse, R. W.: Steam Curing of Concrete, Magazine of Concrete Research (London), V. 1, No. 2, June 1949, pp. 79-88.
5. Saul, A.G.A : “Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure”, Magazine of Concrete Research, Vol 2, No.6, March 1951, pp.127~140.
6. Rastrup, E.,: Heat of Hydration in Concrete, Mag, Concr. Res., 1(1), 21, 1949.
7. Freiesleben Hansen, P. and Pederson, J. : “Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength”, Nordisk Betong, 1977, pp.19~34.
8. Plowman, J.M., Maturity and the Strength of Concrete, Mag. Concr. Res.,8(22),13, 1956
9. Bergstrom, Sven G.: “Curing Temperature, Age and Strength of Concrete,” Magazine of Concrete Research (London), V.5, No. 14, Dec. 1953, pp. 61-66.