

# 論文 各種セメントを使用したコンクリートの圧縮強度増進性状

谷口 円<sup>\*1</sup>・桂 修<sup>\*2</sup>・松村 宇<sup>\*1</sup>・吉野利幸<sup>\*3</sup>

**要旨:** 鉱物組成が大きく異なる普通, 中庸熟, 低熟の各種ポルトランドセメントを使用したコンクリートの強度増進性状に及ぼす養生温度と材齢の影響について実験・検討を行った。本実験の範囲では, 低熟セメントを使用したコンクリートには従来の積算温度を適用出来ないこと, 等価材齢(equivalent age)により一義的に記述できることを示した。さらに, 等価材齢の算定に用いる活性化エネルギーの値はセメント種類により異なり, セメントの鉱物組成に依存することを示した。

**キーワード:** 各種セメント, 圧縮強度増進性状, 養生温度, 鉱物組成, 活性化エネルギー, 等価材齢

## 1. はじめに

コンクリートの強度増進は養生温度と材齢に依存し, これらの関係を一義的に記述する温度時間関数として積算温度, 等価材齢(equivalent age)がある。わが国では日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」において, 洪による基準温度を $-10^{\circ}\text{C}$ とした積算温度方式により, 気象条件から強度増進の計画・管理までが体系化され, 1998年の改定からは圧縮強度の推定方法としてロジスティック曲線による標準曲線が積算温度を用いて示されている<sup>1)</sup>。また, Carinoらは, 実験室でのコンクリートまたはモルタルの強度実験から, 強度推定を行う方法を提案し<sup>2)</sup>, この手法はASTM C1074 “Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”にとりこまれ, 積算温度式利用の場合の基準温度(datum temperature)の算出手法や, 等価材齢を利用する場合に必要なコンクリートの見かけの活性化エネルギーの算出方法が示されている<sup>3)</sup>。

一方, 低熟ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは, 従来の基準温度を $-10^{\circ}\text{C}$ とした積算温度では温度・時間依存性を一律に表せない<sup>4)</sup>, メーカーにより強度発現性が異なる点<sup>5)</sup>が指摘されている。コンクリートの圧縮強度はセメントの水和反応の進行とともに増大す

る。セメントの水和反応は, その主要鉱物であるユーライト, ビーライト, アルミネート, フェライト(以下,  $\text{C}_3\text{S}, \text{C}_2\text{S}, \text{C}_3\text{A}, \text{C}_4\text{AF}$ とする)の反応によるものであり, 強度発現は, 大半を占める $\text{C}_3\text{S}, \text{C}_2\text{S}$ の反応の影響を大きく受ける。既往の研究では,  $\text{C}_2\text{S}$ の反応は $\text{C}_3\text{S}$ に比べ温度依存性が高いこと<sup>6)</sup>が知られ, 佐川ら<sup>7)</sup>はセメント鉱物毎の反応の温度・時間依存性を記述したモデルを報告している。近年, 利用の増えている中庸熟や低熟ポルトランドセメントの鉱物組成は, 中庸熟の $\text{C}_3\text{S}$ は50%以下, 低熟の $\text{C}_2\text{S}$ は40%以上とJISに定められ, 普通・早強ポルトランドセメントと大幅に異なり, セメント自体の反応の温度・時間依存性が大きく異なることが予測される。

以上のことをふまえ, 本研究では, 鉱物組成の異なるセメントの強度増進性状に及ぼす養生温度, 材齢の影響を明らかにし, 強度増進予測を可能としていくことを目

表-1 セメントの性状と鉱物組成(Bogue式)

セメント種類	ブレン比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	鉱物組成(%)			
			$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$
普通ポルトランドセメント	3450	3.17	63	12	8	9
中庸熟ポルトランドセメント	3100	3.24	46	32	5	13
低熟ポルトランドセメント	3330	3.24	33	49	2	11

表-2 コンクリートの調査

	水セメント比 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	絶対容積( $\text{l}/\text{m}^3$ )			質量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			化学混和剤の使用量( $\text{C}\times\%$ )	
					セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	AE剤
普通ポルトランドセメント	60	20	45.9	176	93	315	372	293	812	1070	1.00	0.0040
	50	20	44.4	176	111	296	372	352	764	1070	1.00	0.0040
	40	20	42.9	170	134	279	372	425	720	1070	0.70	0.0040
	30	20	48.0	175	184	286	310	583	738	892	1.60	0.0100
中庸熟ポルトランドセメント	60	20	47.8	175	90	330	360	292	852	1037	1.00	0.0043
	50	20	46.4	175	108	312	360	350	805	1037	1.00	0.0030
	40	20	45.1	169	130	296	360	423	763	1037	0.60	0.0025
	30	20	49.2	170	175	300	310	567	775	892	1.50	0.0080
低熟ポルトランドセメント	60	20	48.2	172	88	335	360	287	863	1037	1.00	0.0040
	50	20	46.8	172	106	317	360	344	818	1037	1.00	0.0040
	40	20	45.4	167	129	299	360	418	772	1037	0.53	0.0025
	30	20	49.2	170	175	300	310	567	775	892	1.10	0.0073

\*1 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部技術材料開発科 (正会員)

\*2 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部技術材料開発科 博士(工学) (正会員)

\*3 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部 博士(工学) (正会員)

的として、セメント種類、水セメント比、養生温度を変えたコンクリートの圧縮強度試験を行い、温度時間関数と強度増進の関係について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントの3種類とした。表-1に各セメントのブレーン比表面積、密度、Bogue式により算出した鉱物組成を示す。

混和剤は水セメント比60,50%についてはリグニンスルホン酸塩・オキシカルボン酸塩を主成分とするAE減水剤標準型、40,30%については、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤標準型を使用した。空気量の調整にはAE助剤を使用した。

細骨材は当麻産陸砂（表乾密度2.58g/cm<sup>3</sup>）、粗骨材には当麻産碎石（表乾密度2.88g/cm<sup>3</sup>）を使用した。

### 2.2 コンクリートの調合および試験体の作製

コンクリートの調合は日本建築学会「コンクリートの調合設計指針・同解説」により試し練りを行って決定した。空気量は4.5%，スランプは水セメント比60-40%では18cm，水セメント比30%ではスランプフロー60cmを目標とした。表-2にコンクリートの決定調合を示す。練り上がり温度は15℃を目標とし、材料を恒温室にて保管・冷却し温度を調整した。コンクリートの練り混ぜは、100リットル強制二軸型ミキサーを用いて行った。練り上がり後、空気量、スランプ、温度を測定し、直ちにφ10×20cmの円柱供試体を作製し、所定の温度に調整した恒温室で封緘養生を行った。水中養生の試験体は、普通ポルトランドセメントの試験体は打設後1日まで、中庸

表-3 実験計画

セメント種類	水セメント比(%)	練り上がり温度(°C)	養生条件	養生温度(°C)	圧縮強度測定材齢(日)
普通ポルトランドセメント	30	15	封緘養生	5	3, 7, 14, 28, 56
				20	91, 182
中庸熱ポルトランドセメント	40	15	水中養生	20	7, 28, 91
低熱ポルトランドセメント	60				

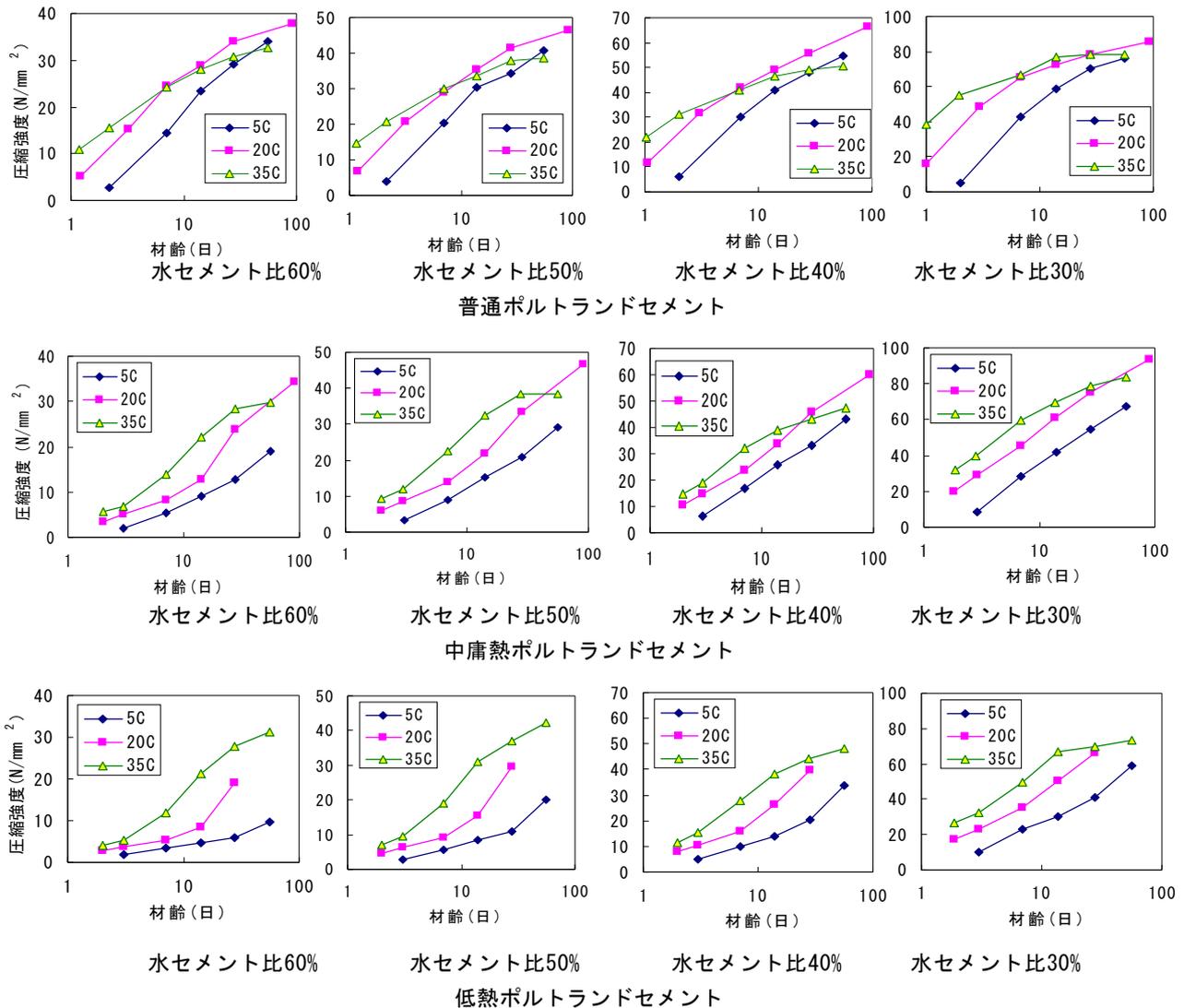


図-1 材齢と圧縮強度の関係

熱、低熱ポルトランドセメントは2日まで20℃の定温室  
内で封緘養生した後に脱型し、20℃水中にて養生した。

### 2.3 実験方法

表-3に実験計画を示す。

作製した試験体は5,20および35℃で所定の材齢まで封緘養生し、圧縮強度を測定した。測定材齢は、各温度において基準温度を-10℃とした場合の積算温度がほぼ等間隔となるような材齢とした。水中養生については材齢3,7,28日で圧縮強度を測定した。なお、ここでは実験の都合上、普通ポルトランドセメント、中庸熱セメントは91日まで、低熱セメントは56日(20℃のもの28日)までの結果についての報告とする。

水中養生を除く試験体では、各調合、養生条件ごとに中心部分に熱電対を埋め込んだ試験体を用意し、打設直後から10分間隔で温度を測定し記録した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 実験結果

図-1に圧縮強度と材齢の関係をセメント種類、水セメント比ごとに示す。低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、圧縮強度の増進が極めて緩慢で、特に低温での強度増進は進まず、養生温度による違いが大きい結果が示されていた。

#### 3.2 既往の温度時間関数による検討

ここでは、本実験で得られた封緘養生試験体の結果への既往の温度時間関数の適用性について検討する。検討する温度時間関数は、基準温度を-10℃とした積算温度、ASTM C1074の手法を適用して基準温度を算定した積算温度(以降、ASTM積算温度と表記)と見かけの活性化エネルギーを算定することによる等価材齢とした。

積算温度は以下の式で示される。

$$M(t) = \sum_0^t (T - T_0) \quad (1)$$

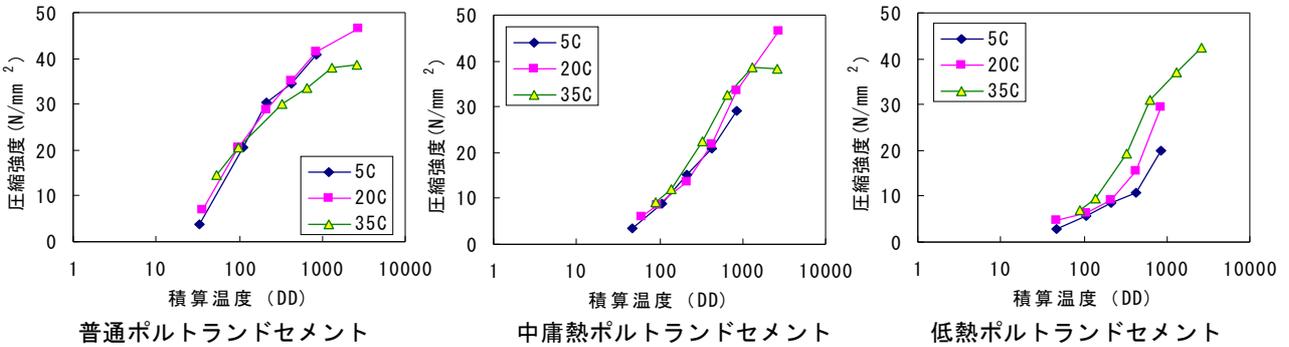


図-2 積算温度と圧縮強度の関係(水セメント比50%)

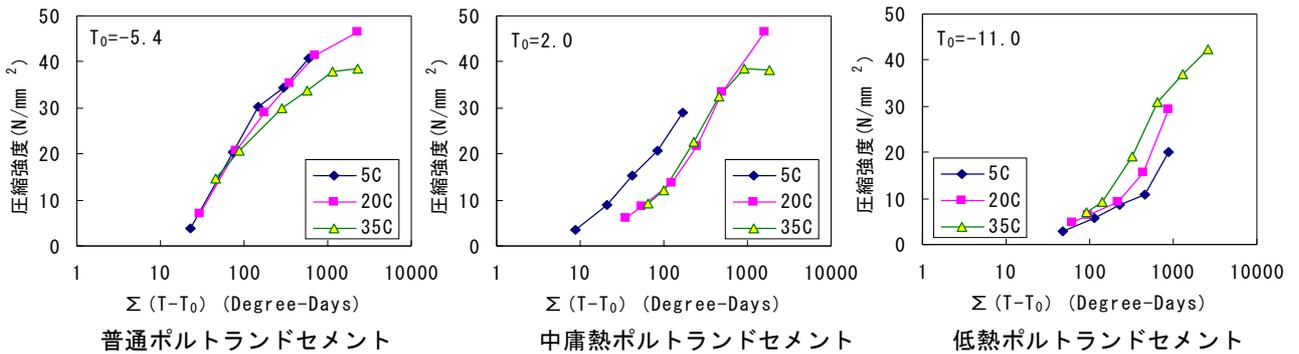


図-3 ASTM C1074で算出した基準温度での積算温度と圧縮強度の関係(水セメント比50%)

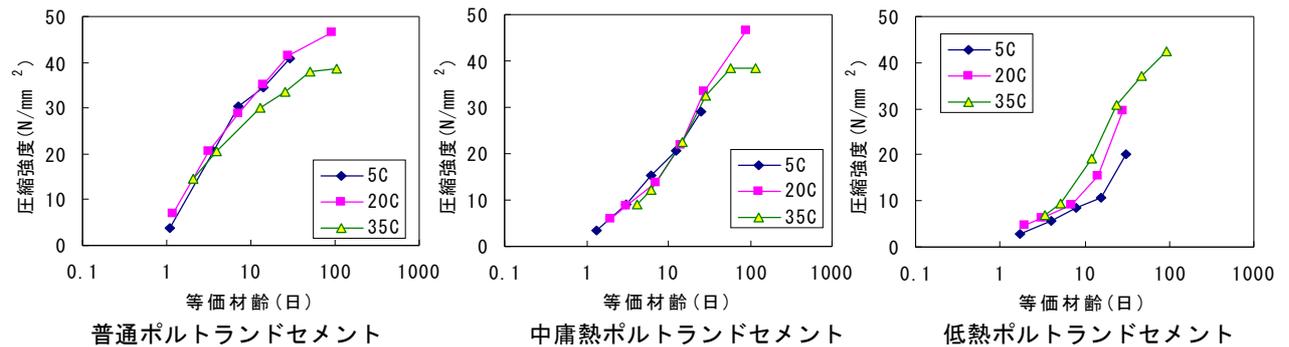


図-4 等価材齢と圧縮強度の関係(水セメント比50%)

ここに、M(t)：材齢tまでの積算温度(DD)

T：養生温度(°C)

T<sub>0</sub>：基準温度(datum temperature)(°C)(ここでは、積算温度は-10°C、ASTM積算温度ではそれぞれの割合に  
適する値がASTMC1074により算定される)

また、等価材齢は以下の式で示される。

$$t_e = \sum_0^t \exp\left(\frac{-E}{R}\left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{293}\right)\right) \times \Delta t \quad (2)$$

ここに、t<sub>e</sub>：等価材齢

E：見かけの活性化エネルギー(KJ/mol)

R：気体定数8.314J/molK

T<sub>c</sub>：期間Δtの間のコンクリート平均温度(K)

Δt：温度T<sub>c</sub>である時間(日)

図-2に積算温度と圧縮強度の関係をセメント種別に水セメント比50%のものについて示す。普通ポルトランドセメントでは、5°C養生の初期材齢および35°C養生の長期材齢で圧縮強度が低い結果となったが、圧縮強度増進は積算温度でほぼ一義的に記述された。中庸熱ポルトランドセメントでは、材齢初期の養生温度による強度のばらつきが幾分少なく、5,20°C養生はほぼ同様な傾向となった。低熱ポルトランドセメントは、養生温度により異なる曲線となった。

図-3にASTM積算温度と圧縮強度の関係を示す。普通ポルトランドセメントでは、基準温度がT<sub>0</sub>=5.4°Cとなり、初期材齢の養生温度による強度のばらつきが少なく、5,20°Cではほぼ1本の曲線となった。35°C養生は、長期材齢での強度発現の違いが認められた。中庸熱ポルトランドセメントでは、T<sub>0</sub>=2.0°Cとなったが、図を見るとこの算定方法では適切な基準温度値が得られたとはいえない。低熱ポルトランドセメントは温度による強度発現の違いを一義的に表すことはできていない。

図-4に等価材齢と圧縮強度の関係を示す。普通ポルトランドセメントでは、材齢初期の養生温度による強度のばらつきが少なく、5,20°C養生では等価材齢と強度の関係はほぼ同様な関係を示した。35°C養生では、等価材齢でも長期材齢での強度発現の違いが認められた。中庸熱ポルトランドセメントは、35°C養生の長期材齢の一部をのぞき、養生温度によらず同様な材齢と強度増進の関係として表せていた。低熱ポルトランドセメントの場合は、この場合でも温度条件による強度発現の違いを一義的に表すことはできなかった。

これらの傾向は、ここに示していない水セメント比の異なる割合においてもほぼ同様であった。普通ポルトランドセメントのコンクリートはいずれの温度時間関数を用いても、高温の長期材齢や低温の初期強度発現を除くと、その適用性はよいと考えられる。中庸熱ポルトラ

ンドセメントでは積算温度、等価材齢により、高温の長期材齢の一部を除くと温度と材齢の影響をほぼ一義的に表せた。低熱ポルトランドセメントでは、積算温度ではその強度増進を一義的に表すことはできず、ASTMC1074の強度予測手法でも適切に予測できない場合があった。ASTMでは、材齢1日から28日までの実験結果を用いて算定を行うが、低熱セメントを用いたコンクリートでは強度増進が遅く、得られる強度値の幅が狭いため、算定の過程で行う直線近似に誤差を生じ易いことが原因と考えられる。Carinoによる報告<sup>2)</sup>でも、低熱セメントは対象としておらず、組成の大半をC<sub>3</sub>Sがしめる普通ポルトランドセメントの強度増進が主であった。以上のことから、中庸熱、低熱ポルトランドセメントでは、C<sub>3</sub>Sの含有量が多いため、C<sub>3</sub>Sの反応の温度依存性が強度発現に及ぼす影響が大きく、従来の積算温度の利用ではその温度・時間依存性を表せない場合があると考えられる。

### 3.3 等価材齢に関する検討

ここでは、温度時間関数として等価材齢を使用する場合に必要な見かけの活性化エネルギー(以下活性化エネルギーとする)算出方法についての新たな検討を行う。等価材齢は式(2)で示すとおり、Arrhenius則による基準温度に対する反応速度定数の比であり、活性化エネルギーの値により決定される。このことから、適切な活性化エネルギーの値を得、等価材齢を算出すれば、養生温度条件の異なるコンクリートの強度増進でも、1つの強度増進式で表すことができると考えられる。ここでは得られた実験データでの基準温度20°C養生での結果か

表-4 実験値から決定した20°Cでの強度増進標準曲線の係数と見かけの活性化エネルギー

	普通ポルトランドセメント			
	W/C60%	W/C50%	W/C40%	W/C30%
a	-2.7917	-2.4484	-1.8922	-3.2106
b	1.9093	1.6768	1.3291	1.3695
F <sub>∞</sub>	38.0	47.6	69.0	81.3
実験値と計算値の相関係数	0.9975	0.9961	0.9927	0.9954
見かけの活性化エネルギー(KJ/mol)	27.2	25.9	26.9	41.1
	中庸熱ポルトランドセメント			
	W/C60%	W/C50%	W/C40%	W/C30%
a	-2.7194	-2.3363	-2.0155	-1.8749
b	3.6657	3.0610	2.4433	1.9564
F <sub>∞</sub>	41.2	57.2	73.4	109.2
実験値と計算値の相関係数	0.9941	0.9979	0.9996	0.9996
見かけの活性化エネルギー(KJ/mol)	31.5	32.1	25.9	35.2
	低熱ポルトランドセメント			
	W/C60%	W/C50%	W/C40%	W/C30%
a	-2.8227	-2.5163	-2.0825	-1.8700
b	4.5373	3.9791	3.1069	2.3210
F <sub>∞</sub>	47.7	69.1	81.4	109.3
実験値と計算値の相関係数	0.9817	0.9885	0.9969	0.9990
見かけの活性化エネルギー(KJ/mol)	45.6	38.8	33.2	34.7

ら、標準曲線としての強度増進式を得た後、5,35℃の結果をその式に代入し、各等価材齢での圧縮強度計算（予測）値と実測値との差が最小となるように活性化エネルギーの値を決定することとした。標準曲線となる強度増進式は、等価材齢の関数としてロジスティック曲線りで表されるものとした。式を以下に示す。

$$F = \frac{F_{\infty}}{(1 + \exp(ax + b))} \quad (3)$$

ここに、F：材齢tでの圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）

F<sub>∞</sub>：無限の長期材齢に対応する圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）

x：等価材齢t。

a,b：定数

ただし、F<sub>∞</sub>は20℃の28日の測定結果（F<sub>28</sub>）を用いて以下の式により算定される。

$$F_{\infty} = F_{28} \times (1 + \exp(a \times (\log_{10}(28)) + b)) \quad (4)$$

標準曲線の係数a,bは、セメント種、水セメント比別の

養生温度20℃での実験結果から最小二乗法近似により決定した。

表-4に実験値から決定した20℃での強度増進標準曲線の係数、実測値と計算値の相関係数およびコンクリートの活性化エネルギーを示す。図-5にC<sub>3</sub>Sの割合と活性化エネルギー、C<sub>2</sub>Sの割合と活性化エネルギーの関係を水セメント比ごとに示す。活性化エネルギーは、各セ

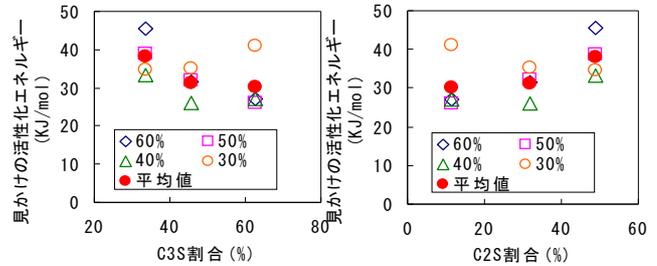


図-5 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S割合と見かけの活性化エネルギーの関係

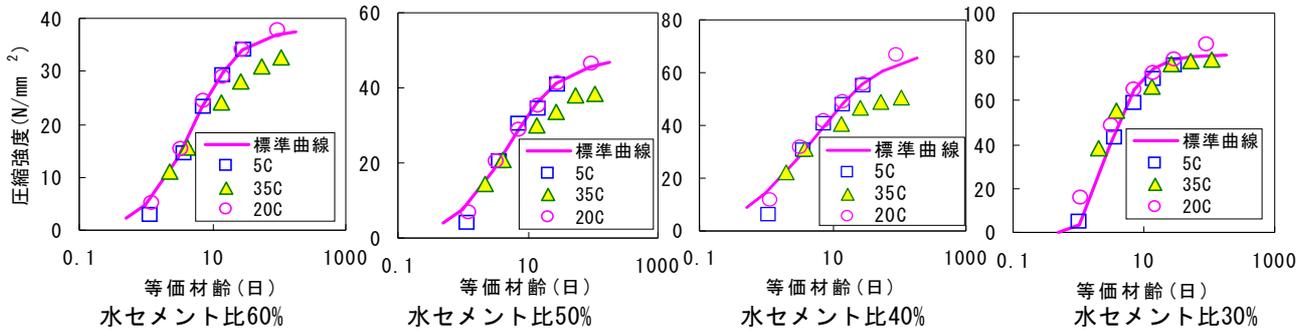


図-6 等価材齢と圧縮強度の関係（普通ポルトランドセメント）

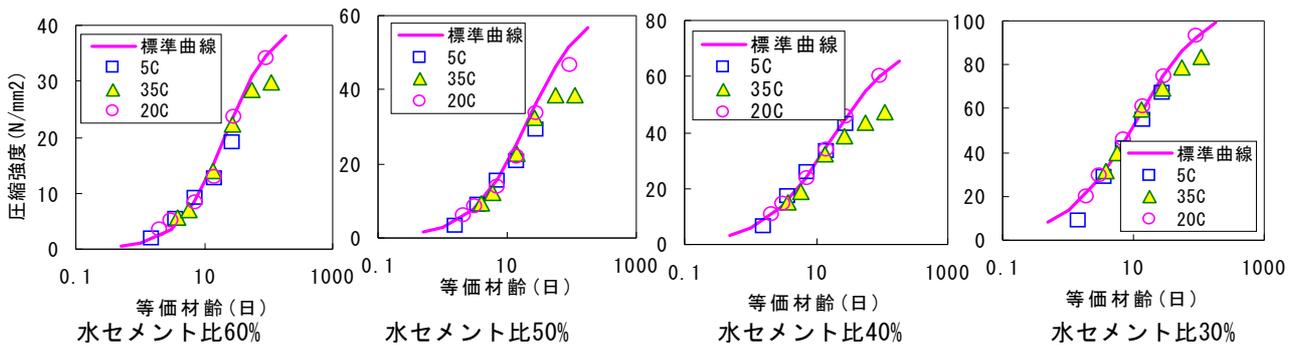


図-7 等価材齢と圧縮強度の関係（中庸熱ポルトランドセメント）

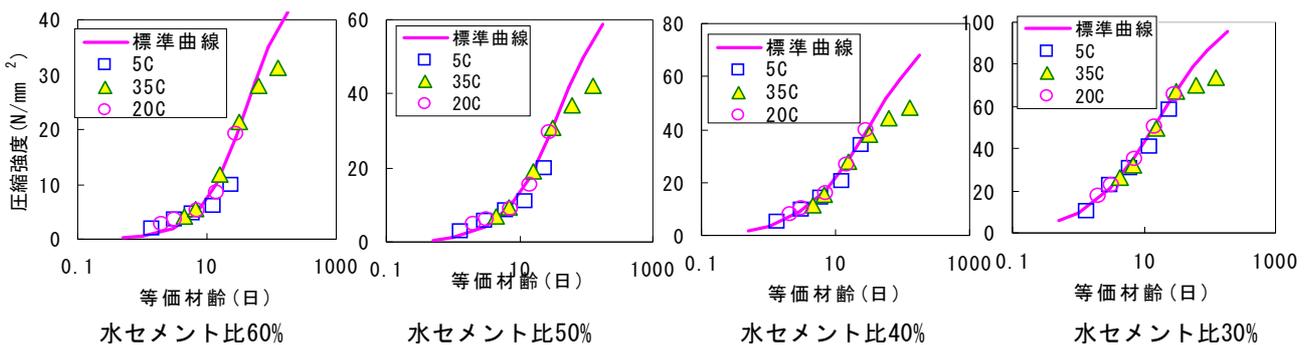


図-8 等価材齢と圧縮強度の関係（低熱ポルトランドセメント）

メントとも水セメント比でばらついていた。しかしながら、 $C_3S$ 割合が増加すると活性化エネルギーが低下し、 $C_2S$ 割合が増加すると活性化エネルギーが増加する傾向が認められた。このことから、ここでの各セメントの活性化エネルギーの値は、水セメント比別に求めた活性化エネルギーの平均値を使用することとした。得られた活性化エネルギーの値は普通ポルトランドセメントで30.3 KJ/mol、中庸熱ポルトランドセメントで31.2 KJ/mol、低熱ポルトランドセメントは38.1KJ/molとなった。

図-6に普通ポルトランドセメントの等価材齢と圧縮強度の関係に標準曲線をあわせて示す。等価材齢10日以前の比較的初期では、全ての温度での結果が標準曲線に概ね一致していた。10日以降でも5℃養生は標準曲線で一義的に表せていた。35℃養生は等価材齢10日以降で標準曲線より強度が低下していた。

図-7に中庸熱ポルトランドセメントの等価材齢と圧縮強度の関係に標準曲線をあわせて示す。水セメント比60,50,30%では、35℃養生で等価材齢100日以降の結果を除き、各養生温度の結果がほぼ標準曲線と一致することが確認された。また、水セメント比40%では、5℃養生は標準曲線にほぼ一致しているが、35℃養生の結果が、標準曲線で得られる強度より若干低下する傾向が認められた。

図-8に低熱ポルトランドセメントの等価材齢と圧縮強度の関係に標準曲線をあわせて示す。35℃養生で等価材齢70日程度以降を除けば、各養生温度の結果がほぼ標準曲線に一致していた。

35℃養生で認められた長期材齢の強度低下は、初期温度の高い場合には、初期水和時に形成される組織構造の違いが強度増進に悪影響を与えるものとされ、今回検討した反応速度の違いで容易に表現できるものではないと考えられる。それを除けば、セメント種を問わず、養生温度の異なる圧縮強度増進は適切な活性化エネルギーの値による等価材齢によって標準曲線とほぼ一義的に表されることが確認された。

以上のことから、本研究の範囲では、養生温度の異なるコンクリートの強度増進では、等価材齢により強度増進がほぼ一義的に表すことができ、等価材齢算定にあたり求められる活性化エネルギー値はセメントそれぞれの鉱物組成に依存することが示された。また、鉱物組成が普通ポルトランドセメントとは大幅に異なるセメントの場合には、従来の基準温度を-10℃とする積算温度を適用することは難しい。一方、セメントや調合それぞれにASTMC1074を適用し、基準温度、活性化エネルギーを算出する手法は圧縮強度の管理や推定には有用であるが、使用材料・調合それぞれに異なる積算温度、活性化エネルギーを用いるため、相互の比較や過去のデータとの互

換性が失われることに注意が必要となる。

#### 4. まとめ

- 1)低熱ポルトランドセメントコンクリートは、その強度発現性状が普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートとは異なり、基準温度を-10℃とした積算温度により温度・時間依存性を表すことは出来ない。
- 2)低熱セメント、中庸熱セメントを用いたコンクリートでも等価材齢によって温度・時間依存性を一義的に記述することが可能である。また、本研究の範囲で、等価材齢算定に必要なセメントごとの見かけの活性化エネルギーはセメントの鉱物組成に依存することを示した。

#### 謝辞

本実験の実施にあたり、日鐵セメント株式会社、株式会社フローリックより材料の提供・実験への多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を示します。

#### 参考文献

- 1)日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，pp.218-226，1998
- 2)Nicholas J.Carino, Rajesh C.Tank :Maturity Functions for Concretes Made with Various Cements and Admixtures, ACI Material Journal, pp.188-196, 1992
- 3)ASTM C1074-98:Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method
- 4)小山宣幸，平田久則，上田厚元，小島利広：低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの積算温度に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，vol.19，pp.523-528，1997
- 5)因幡芳樹，永田浩治，洪空，嵩英雄：各種セメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次論文報告集，vol.22，No.2，pp.475-480，2000
- 6)浅賀喜与志，大門正機，小西和夫，吉田孝三郎：低熱セメントの各構成鉱物の水和反応に及ぼす養生温度の影響，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.58-63，1991
- 7)佐川孝広，桂修，関口岳彦，若杉伸一：粒度分布を考慮したセメント鉱物の反応速度と強度発現，セメント・コンクリート論文集，No.59，pp.45-52，2005
- 8)須藤由美子，桂修，吉野利幸，三森敏司，濱幸雄：凍結および乾燥を受けたセメント硬化体の水和反応速度と強度増進，日本建築学会構造系論文集，第542号，pp.17-22，2001
- 9)A.M.Neville:Properties of Concrete -fourth edition，pp.359-365，2002