

## 寒中コンクリートを対象とした強度増進標準曲線に関する研究

正会員○ 葛西 賢治\*1

同 鈴木 邦康\*2

同 濱 幸雄\*3

会員外 小林 和寛\*4

## 1. 材料施工-2. モルタル・コンクリートの物性

寒中コンクリート, 強度増進, 標準曲線, 積算温度

## 1. はじめに

寒中コンクリート施工において強度増進の過程を把握することは、合理的かつ経済的な工事計画を行うために極めて重要である。「寒中コンクリート施工指針 資料6 圧縮強度の推定方法」では、各種セメントを用いたコンクリートの強度推定方法の一つとして標準曲線が示されている<sup>1)</sup>。これは、水セメント比45%~65%のプレーンコンクリートの強度データから求められたものであるが、初期材齢および低水セメント比で標準曲線と実強度に乖離が確認されており、近年のコンクリートの高強度化に対応した標準曲線の見直し必要性が指摘されている。

本研究では高強度コンクリート、普通強度コンクリートの圧縮強度と積算温度の関係から高強度域でも使用可能な新しい強度増進式を提案することを目的とする。

## 2. 実験計画

表1、表2に普通強度コンクリート、高強度コンクリートそれぞれの実験計画表を示す。

普通強度コンクリートは水セメント比が45%、55%および65%の3水準、目標空気が4.0%の1水準で合計3種類のコンクリートを作製する。養生温度は20℃、10℃、5℃とした。調合は目標スランプ18cm、目標空気量1.0%として試し練りを行い決定した。表3、表4に普通強度、高強度のそれぞれの調合を示す。

高強度コンクリートは水セメント比が25%と35%の2水準、高性能AE減水剤の種類を4種類として合計8種類のコンクリートを作製した。養生温度は20℃、10℃、5℃の3水準とした。調合は目標空気量2.0%、目標スランプフローを650mm以下として試し練りを行い決定した。

使用材料として、セメントは普通ポルトランドセメント( $\rho = 3.16$ )、細骨材は登別産陸砂(表乾密度 $= 2.69\text{g/cm}^3$ )、粗骨材は敷生川水系安山岩砕石(表乾密度 $= 2.67\text{g/cm}^3$ )を使用した。表5に使用した高性能AE減水剤を示す。

表1 実験計画表 (普通強度)

W/C (%)	空気量 (%)	混和剤	養生温度 (°C)	スランプ (cm)
45	4.0	AE減水剤 標準形	20	18
55			10	
65			5	

表2 実験計画表 (高強度)

W/C (%)	空気量 (%)	混和剤	養生温度 (°C)	フロー (mm)
25	2.0	高性能AE 減水剤	20, 10, 5	$\leq 650$
35				

表3 調合表 (普通強度)

記号	W/C	s/a	W	絶対容積 ( $\text{l/m}^3$ )			AE減水剤 標準系
	(%)	(%)	(kg)	C	S	G	
45A	45	44.5	172	121	297	370	250ml /C100kg
55A	55	47.0	166	96	328	370	
65A	65	48.4	163	80	347	370	

表4 調合表 (高強度)

記号	W/C	s/a	W	絶対容積 ( $\text{l/m}^3$ )			高性能 AE減水剤
	(%)	(%)	(kg)	C	S	G	C × wt (%)
35B	35	46.2	175	159	299	348	1.5
35C							0.8
35D							1.0
35E							0.9
25B	25	40.3	175	222	235	348	2.0
25C							1.0
25D							1.5
25E							2.0

表5 混和剤の種類

品種	記号	主成分
AE減水剤	A	リグニンスルホン酸化合物 ポリオールとの複合物
高性能AE 減水剤	B	変性リグニン、アルキルアリルスルホン 酸および活性持続ポリマーの複合体
	C	カルボキシル系含有ポリエーテル系特 殊界面活性剤
	D	ポリカルボン酸系化合物
	E	

A study on Strength Development of Concrete for Cold Weather Concreting

Kasai Kenji et al.

養生は全て封緘養生とした。また、コンクリートごと温度管理用の試験体を作製して、銅-コンスタンタン熱電対を用いてコンクリート温度の測定を行い、所定の材齢(積算温度 30,90,210,420,840,1680,2730 ° D・D)で圧縮強度試験を行った。

3. 結果および考察

図1に水セメント比35%と25%の高強度コンクリートの養生温度ごとの強度増進の一例を示す。水セメント比35%、25%ともに初期材齢において5°C養生したコンクリートの強度が20°C養生したコンクリートの強度を下回っており、特に水セメント比25%ではその差が大きくなっている。

図2は水セメント比25%、35%の高強度コンクリートについて養生温度20°Cの各混和剤使用時の強度増進傾向を示す。この図から混和剤によって強度増進に差があることがわかる。

積算温度関数式は、コンクリートの強度増進の過程を温度と時間の関数として一義的に表すことを目的としたものであるが、今回の実験結果から従来の積算温度関数式では、高強度コンクリートの強度増進を正確に近似させることは困難である。

4. コンクリートの強度増進式の提案

(1) 等価積算温度を用いた強度増進の検討

前項の結果から高強度コンクリートの初期強度は養生温度によってかなり差があり、これまでの積算温度関数式で強度増進を一義的に表すことは困難であることがわかった。そこで須藤らによって提案されている等価積算温度 (equivalent maturity) を用いて、強度増進を記述する<sup>2)</sup>。コンクリートの強度増進はセメントの水和反応によって支配されている。従って、化学反応速度式の考え方に基いてセメントの水和反応速度を表している等価積算温度を用いることにより、適切にコンクリートの強度増進を記述できると考えられる。以下に須藤式の等価積算温度関数式を示す。

$$Me = 30 / (k_{20} / k_T)$$

$$k_t = f(w/c) \exp(-Ea/RT)$$

$$f(w/c) = a \times (w/c) + d$$

ここに、Me : 等価積算温度 (° D・D/日)

k<sub>20</sub> : 養生温度 20°Cでの反応速度定数

k<sub>T</sub> : 養生温度 T°Cでの反応速度定数

f (w/c) : 水セメント比に関する係数

Ea : 系の見かけの活性化エネルギー (Ea=39382)

f (w/c) : 水セメント比に関する係数

w/c : 水セメント比

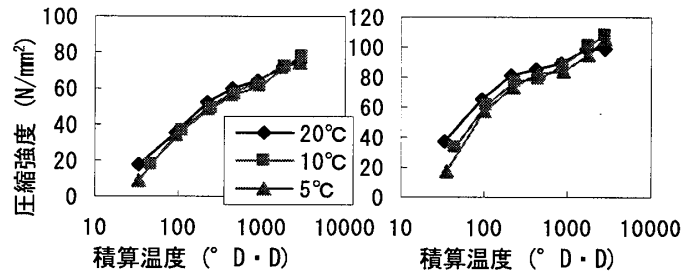


図1 積算温度と圧縮強度の関係

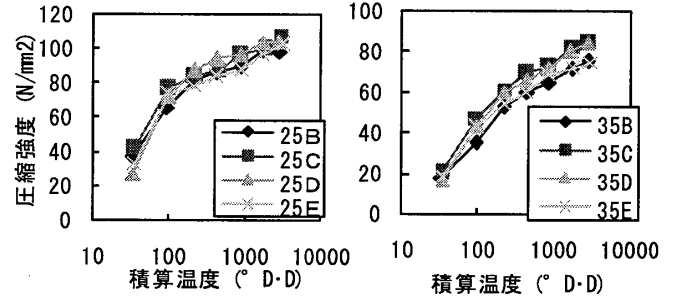


図2 混和剤による積算温度と圧縮強度の関係

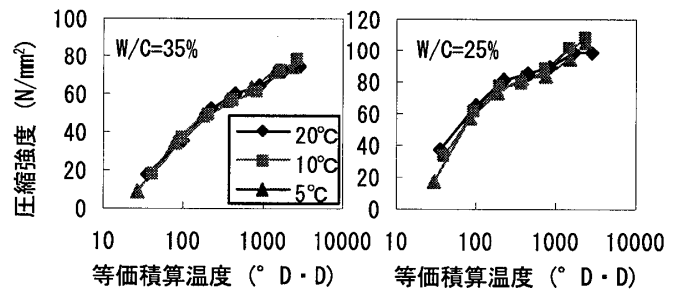


図3 等価積算温度と圧縮強度の関係

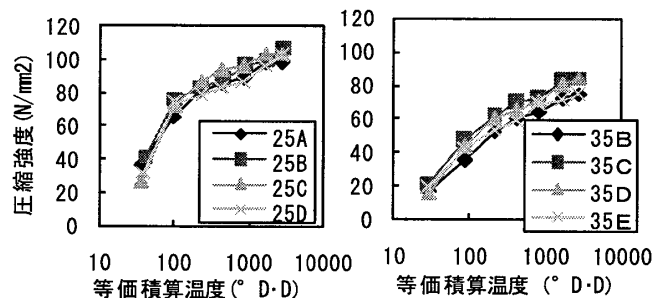


図4 混和剤による等価積算温度と圧縮強度の関係

T : 絶対温度 (K)

Ea : 系の見かけの活性化エネルギー (Ea=39382)

R : 体定数 (8.3145J/mol)

a, d : 実験定数 (a=14275045, d=3501659)

図3、4は横軸に等価積算温度をとり強度増進との関係を示したものである。図3は養生温度の違い、図4は混和剤の違いについて示したものである。従来の積算温度を用いた図1、図2と比較すると初期材齢での差がな

くなり、全体的に養生温度の差が補正され、ほぼ一義的な強度増進を示している。しかし、図3、図4を比較しても従来の積算温度と等価積算温度に変化はみられず、混和剤の違いにより強度増進に差がみられる。

須藤式の等価積算温度を用いることにより、養生温度間の差が補正され養生温度によらず一義的に強度増進を表すことができるが混和剤の差は補正されない。

(2) 活性化エネルギーを変化させた等価積算温度を用いた強度増進式の検討

等価積算温度を用いると養生温度の差はなくなり、コンクリートの種類ごとに強度増進を一義的に表すことができたが、混和剤の違いによる差は補正することができなかった。そこで Carino による積算温度の基準温度を求める方法を利用し、コンクリートごとの活性化エネルギーを求め、等価積算温度を算出することにより混和剤の種類による強度増進の差を補正できるのではないのかと考える。以下に一定の養生温度条件下でのコンクリートの強度増進式を示す。

$$\ln K_t = \ln B - (E/R)(1/T)$$

$$1/S = 1/S_u + (1/K_t \times S_u)(1/t)$$

$$K_t = B \cdot \exp(-E/RT)$$

ここに、S：強度 (N/mm<sup>2</sup>)

S<sub>u</sub>：最終強度

K<sub>t</sub>：反応速度定数 (/日)

t：材齢 (日)

B：定数

R：気体定数 (8.314J/Kmol)

E：活性化エネルギー (J/mol)

T：絶対温度 (K)

図5にコンクリートの強度と材齢の関係を示す。図6に活性エネルギーから算出した等価積算温度によるコンクリートの強度増進の一例を示す。須藤らが提案した等価積算温度と同様、強度増進の差が大きく、混和剤の種類による差も補正することはできなかった。また、すべてのコンクリートで養生温度間の差が激しくなり、養生温度の補正も難しい。原因として5℃養生をしたコンクリートの初期強度がかなり低く、図5からわかるように、5℃養生の近似式の傾きが大きくなってしまい、5℃養生したすべてのコンクリートの最終強度が20℃、10℃養生よりもかなり高い値になったことが挙げられる。

(3) ゴンペルツ曲線を用いた強度増進式の検討

温度の指標を積算温度とした場合、コンクリートの強度増進過程は、積算温度を対数とした軸上でS字状を描

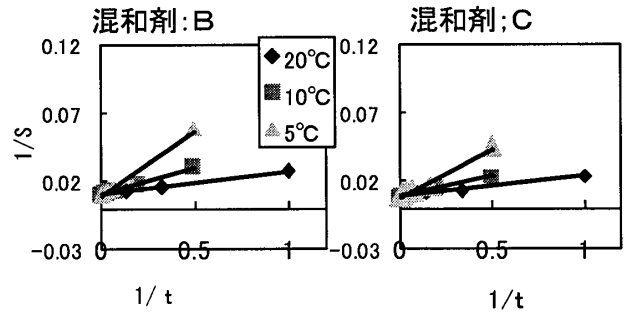


図5 材齢と強度の関係 (W/C=25%)

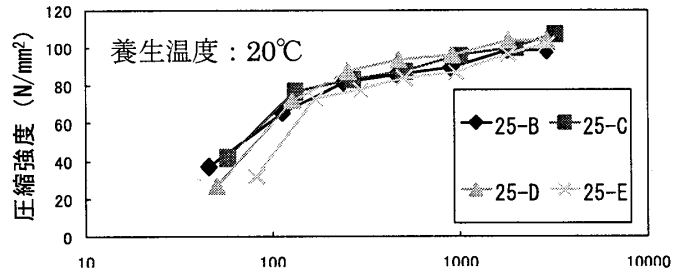


図6 活性化エネルギーを用いて算出した等価積算温度による強度増進 (W/C=25%)

表6 ゴンペルツ曲線の各係数と決定係数および相関係数

記号	係数 a	係数 b	最終強度F <sub>∞</sub>	決定係数	相関係数
45	3.65E-08	0.231	54.6	0.986	0.993
55	6.41E-09	0.240	42.1	0.945	0.972
65	2.88E-10	0.232	29.1	0.946	0.972
35B	9.71E-07	0.256	85.9	0.980	0.990
35C	1.92E-05	0.288	102.1	0.940	0.969
35D	2.26E-07	0.237	96.1	0.978	0.989
35E	6.91E-06	0.258	87.3	0.944	0.972
25B	6.34E-04	0.314	118.9	0.928	0.964
25C	9.26E-04	0.297	119.6	0.945	0.972
25D	1.02E-04	0.264	121.1	0.910	0.954
25E	9.42E-05	0.270	112.2	0.927	0.963

く。これを表す関数式として、ロジスティック曲線の他にゴンペルツ曲線がある。ゴンペルツ曲線はロジスティック曲線と比較し、変曲点を中心に左右対称とはならず、変曲点までの立ち上がりがいくぶん急である。その差は比較的小さいが、強度増進過程の近似はロジスティック曲線に比べいくぶんよいとされている。ここではゴンペルツ曲線を用いて強度増進式を提案することを目的とする。以下にゴンペルツ曲線の基本式を示す。

$$y = k \cdot a^x b^x$$

x を積算温度の対数として

$$F = F_{\infty} \cdot a^x b^x \log M$$

ここに、F：圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

F<sub>∞</sub>：最終強度 (N/mm<sup>2</sup>)

M：積算温度 (° D・D)

a、b：係数

表 6 にゴンペルツ曲線の決定係数、相関係数を示す。ゴンペルツ曲線ではコンクリートごとに係数にばらつきがあり、一本の式で強度増進を表すことはできなかった。

(4) ロジスティック曲線を用いた強度増進式の検討

現行標準曲線と同様にロジスティック曲線に近似させ、強度増進式を誘導する<sup>3)</sup>。現行式のロジスティック曲線の係数  $k$ ,  $m$  を水セメント比によらず一定の値としており、それが低水セメント比のコンクリートでの強度の乖離の一因と考えられる。須藤式の等価積算温度を導入することによって、養生温度に左右されず、セメント水比と 28 日封緘強度により係数が変化する。図 7 に最終強度  $F_{\infty}$  と調合強度の関係を示す。また、図 8 にセメント水比と係数  $k$ ,  $m$  の関係を示す。どちらも直線関係にあり調合強度、セメント水比により、ロジスティック曲線が 1 本化された。得られた強度増進式を以下に示す。

$$F = \frac{F_{\infty}}{1 + \exp(-k \times \log Me + m)}$$

ここに、 $F$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $F_{\infty}$  : 最終強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $Me$  : 等価積算温度

$$F_{\infty} = 1.2201 \times \frac{F_{20} F_{28}}{20} + 5.5279$$

$$m = -0.7618X + 6.304$$

$$k = -0.2013X + 2.4162$$

ここに、 $F_{20}$  : 20°C, 28 日養生したコンクリートの圧縮強度 (調合強度) (N/mm<sup>2</sup>)

$k$ ,  $m$  : 水セメント比により変化する係数  
 $X$  : セメント水比

この強度推定式の誘導は、封緘養生の場合について行っており、実際の構造物の強度は封緘養生の強度に対応すると仮定している。

図 9 に現行標準曲線による推定強度と実強度の関係と本研究の強度増進式による推定強度と実強度の関係を示す。本研究の強度増進式は現行標準曲線と比較し、ばらつきがなくなっており、実測値と非常によく対応をしている。表 6 に現行標準曲線と本研究の強度増進式それぞれの決定係数、相関係数を示す。本研究の強度増進式は普通強度で現行式と提案式には差が見られないが、高強度域では提案式の相関係数が高くなっている。全体的に高い相関を示している。

\*1 室蘭工業大学大学院  
 \*3 室蘭工業大学工学部 准教授・博士 (工学)  
 \*4 株式会社 大林組

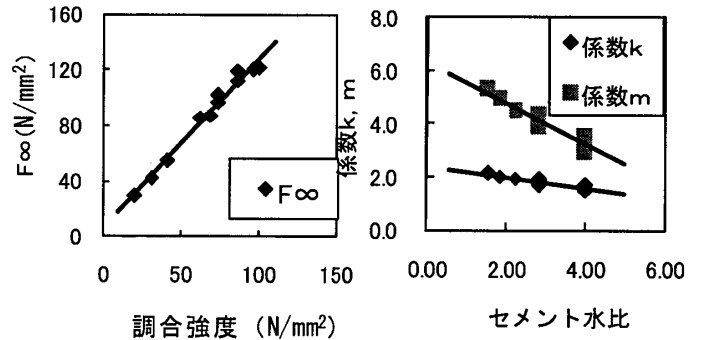


図 7  $F_{\infty}$  と  $F_{28}$  の関係

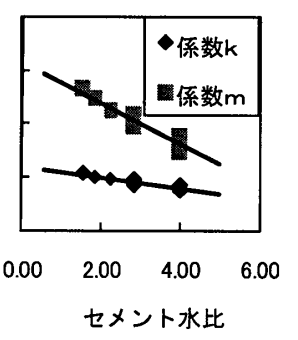


図 8 係数  $k, m$  と  $X$  の関係

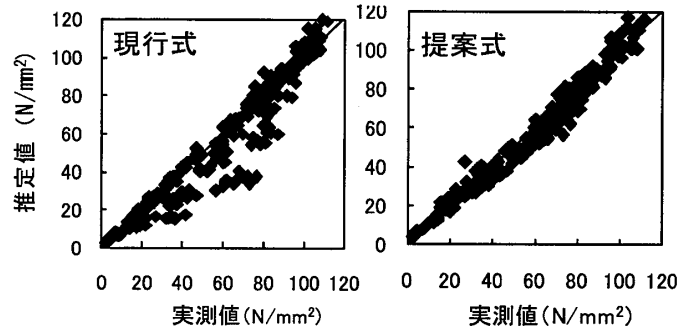


図 9 現行式および提案式による推定強度と実測値の関係

表 6 現行式および提案式の決定係数・相関係数

水セメント比 (%)	決定係数		相関係数	
	現行式	提案式	現行式	提案式
45, 55, 65	0.971	0.968	0.986	0.984
35	0.880	0.951	0.938	0.975
25	0.567	0.906	0.753	0.952
全体	0.871	0.973	0.933	0.986

5. まとめ

本研究では、等価積算温度を用い、強度増進式の諸係数を調合強度およびセメント水比の一次式で表すことにより、適用可能な水セメント比の範囲を拡張したより精度の高い強度増進標準曲線を提案した。

【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，1998
- 2) 須藤由美子，桂修，三森敏司，浜幸雄：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，No.542，pp.17-22，2001
- 3) 洪悦郎，鎌田英治，田畑雅幸，浜幸雄：ロジスティック曲線を応用した強度推定式の提案，日本建築学会構造系論文集，No.367，pp.1-6，1986

Graduate school Muroran Institute of Technology  
 Assoc.Prof., Muroran Institute of Technology. Dr. Eng  
 OBAYASHI CORPORATION