

水セメント比の適用範囲を拡張したコンクリート強度予測式の提案

A PROPOSAL OF COMPRESSIVE STRENGTH PREDICTION METHOD ENHANCED THE APPLICABLE RANGE OF WATER-CEMENT RATIO

谷口 円*, 桂 修**, 濱 幸雄***, 吉野 利幸****
*Madoka TANIGUCHI, Osamu KATSURA, Yukio HAMA
and Toshiyuki YOSHINO*

Compressive strength prediction of concrete is essential in cold weather concreting. Maturity method and strength prediction method using logistic curve have been used for cold weather concreting in Japan. This method is limited within the range from water to cement ratio 45% to 65%. In this paper, we propose a strength prediction method for enhancing the range of water to cement ratio. The experimental data in the past was used and analyzed. As a result, the approximation by Gompertz curve showed high accuracy in the strength prediction of the concrete within the wide range of water-cement ratio. We propose the new strength prediction method for applying Gompertz curve.

Keywords: *Strength Development, Cold Weather Concreting, Maturity, Strength Prediction, Standard Curve*

強度増進性状, 寒中コンクリート, 積算温度, 強度推定, 標準曲線

1. はじめに

コンクリートの圧縮強度は水とセメントの水和反応に伴い発現し、強度増進性状は温度と時間に大きく依存し、低温下では遅延することが知られている。そのため、寒冷期のコンクリート工事には特別な注意が必要とされ、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説（以下、寒中指針と略す）」¹⁾では、初期凍害の防止、所定の材齢で所要のコンクリート強度を得ることを目的とした計画、施工方法が示されている。

寒中コンクリートのこれらの目標を達成するには、寒冷条件下でのコンクリートの強度発現の遅れを把握すること、すなわち圧縮強度増進性状の温度時間依存性を把握することが重要となる。

既往の研究において、圧縮強度増進の温度時間依存性はそれらを複合的に表す温度時間関数によって表現される。同じ温度時間関数の計算値であれば、温度履歴によらずその時点での圧縮強度はほぼ等しいことが示され、ASTMには実験室でのモルタル実験とあわせた強度予測手法が規格化されている²⁾。

我が国では、積算温度が温度時間関数として広く用いられ、寒中指針では1998年の改定時に水セメント比45~65%の範囲のコンクリートについて、ロジスティック曲線による強度増進の標準式が積算温度の関数として示された。吉田ら³⁾は水セメント比65~75%の範囲で温度時間関数として積算温度を採用し、ロジスティック曲線と

ゴンペルツ曲線の適用性を検討した結果、材齢28日以前では、ゴンペルツ曲線の相関が高いことを示している。また、桂ら⁴⁾は、水セメント比28~45%の高強度コンクリートの強度増進式として、ゴンペルツ曲線による近似式を示した。

しかしながら、いずれの場合もこれらの強度増進式は実験データに基づく実験式であるため、その適用は基となる実験の水セメント比の範囲に限定される。そのため現状では、一般的なコンクリートから高強度コンクリートの強度範囲まで適用可能な強度増進式が提示されるには至っていない。また、寒中指針に提案されたロジスティック曲線による予測式では若材齢での予測強度が実施工でのコンクリート強度と乖離する傾向があることが指摘されている⁵⁾。

そこで本研究では、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、フライアッシュセメントB種、高炉セメントB種を使用したコンクリートについて、より広範な水セメント比に対応し、初期材齢から長期材齢までの範囲に対応する強度増進予測式を提案することを目的として、既往の研究成果に基礎をおき、筆者らが行ってきた約20年前からの実験データと現在流通しているセメント、混和剤を使用した近年の実験データを用い、積算温度との関係で、解析・検討を行った。

2. 利用した実験データの概要

* 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
研究職員・工修
(室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻
博士後期課程)

** 北海道立北方建築総合研究所居住科学部
主任研究員・博士(工学)

*** 室蘭工業大学大学院くらし環境系領域
准教授・博士(工学)

**** 北海道立北方建築総合研究所生産技術部
主任研究員・博士(工学)

Researcher, Materials and Properties Section, Production Engineering Dept., Hokkaido Northern Regional Building Research Inst., M. Eng.
(Graduate Student, Graduate School of Eng., Muroran Institute of Technology)

Senior Researcher, Residential Planning Dept., Hokkaido Northern Regional Building Research Inst., Dr. Eng.

Assoc. Prof., College of Environmental Technology, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Senior Researcher, Production Engineering Dept., Hokkaido Northern Regional Building Research Inst., Dr. Eng.

表 1 実験データの概要

文献名	発表年次	セメント種類	水セメント比の範囲 (%)	養生温度 (°C)	文献番号
各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性状	1990	普通 早強 高炉B フライアッシュB	45, 55, 65	5, 10, 20	1)6)
高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状	1991	普通	45, 55, 65	5, 10, 50, 30, 40	7)
高強度コンクリートの低温強度増進特性について	1993	普通	28, 32, 37, 45	5, 10, 20, 30, 40	4)
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	2007	普通	25, 35, 45, 55, 65	5, 10, 20	5)
寒中コンクリートを対象とした各種セメントの強度増進標準曲線の検討	2008	早強 フライアッシュB 高炉B	30, 40, 50, 60	5, 10, 20	8)
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	2008	普通*	30, 40, 50, 60	5, 10, 20	9)

*この文献では、普通、中庸熱、低熱ポルトランドセメントを対象としているが、普通ポルトランドセメントのデータのみを使用した

解析に用いた実験データの概要を表 1 に示す。

実験に使われたコンクリート試験体はすべて実験室内で作製したものである。

セメントは普通ポルトランドセメント (以下 N とする), 早強ポルトランドセメント (以下 H とする), フライアッシュセメント B 種 (以下 FB とする), 高炉セメント B 種 (以下 BB とする) の 4 種類を対象としている。文献⁶⁾ではセメントの製造会社を普通セメント 4 社, 早強セメント 3 社, フライアッシュセメント B 種 2 社, 高炉セメント B 種 3 社のもので実験が行われている。使用された化学混和剤は主成分がそれぞれ異なる AE 減水剤, 高性能 AE 減水剤であり, 空気量の調整には AE 助剤が使用されている。

試験体形状はすべて φ100×200mm の円柱試験体である。養生条件は、構造体コンクリートの強度発現予測を前提とするため、その水分条件に近いと考えられる封緘養生としている。養生温度は表 1 に示す通りで、寒中コンクリートを対象とするため、5~20°C の設定温度が多く、N では一部で高温となる 30, 35, 40°C での検討も行っている。

封緘試験体は、設定温度に調整された一定温度での恒温室内での養生を行っている。試験体の温度は、試験体内に埋め込んだ TC 熱電対により測定されデータロガーに記録された。

なお、コンクリートの強度試験は、計画した積算温度に達した時点で行われていた。文献 4) に、15° D・D 程度が含まれるが、他は 30~5400° D・D の範囲であった。この設定は、寒中コンクリート工事での初期養生打ち切りや型枠脱型材齢に対応するための初期材齢を想定したものとされている。

3. 温度時間関数と強度増進曲線

コンクリートの強度増進式は、温度時間関数とあわせてこれまでいくつかの提案がある。温度と時間の影響を標準となる温度条件下での材齢に換算し、強度増進式を表すものとして、Chengju¹⁰⁾らは指数関数、対数関数、双曲線について検討している。Tank, Carino¹¹⁾は、独自の双曲線を提案し、土木学会標準示方書ではゴーラル曲線が用いられている。また、氏家¹²⁾は材齢の関数として、ロジスティック曲線、ゴンペルツ曲線、双曲線、ゴーラル曲線を用いた比較検討を行っている。

一方で、温度時間関数として積算温度を用いたものは、前述のロジスティック曲線とゴンペルツ曲線による式が提案されている。寒中指針では、計画、調査、管理が積算温度を用いて体系化されており、強度増進の標準曲線にも積算温度による関数が用いられている。

こうした背景のもと、ここでは、温度時間関数には以下に示す式であらわされる積算温度を適用することとする。

$$M = \sum (T + 10) \Delta t \quad (1)$$

ここに、M: 積算温度 (° D・D)

T: 期間 Δt のコンクリート温度 (養生温度) の平均 (°C),

Δt: 期間 (日)

積算温度を用いた予測とするため、ロジスティック曲線、ゴンペルツ曲線での適用性の検討を行う。既往の文献¹⁴⁾における強度増進曲線としてのロジスティック曲線、ゴンペルツ曲線は以下の式であらわされる。

ロジスティック曲線

$$F = F_{inf} / (1 + \exp(a \times \log_{10} M + b)) \quad (2)$$

ゴンペルツ曲線

$$F = F_{inf} \times \exp(a \times M^b) \quad (3)$$

ここに、F: 積算温度 M での圧縮強度 (N/mm²),

F_{inf}: 最終到達強度 (N/mm²),

M: 積算温度 ((1)式で算出される),

a, b: 実験定数

これら二つの成長曲線の形状の違いは、ロジスティック曲線では F_{inf}/2 となる点を中心に点対称な曲線であるが、ゴンペルツ曲線は点対称とならない曲線である¹³⁾。そのため、ゴンペルツ曲線はロジスティック曲線にくらべ、変曲点までの立ち上がりが幾分急激であり、強度増進過程の近似は、ゴンペルツ曲線の方が幾分良いと寒中指針中でも述べられている¹⁾。

これらの成長曲線の形状は実験定数 a, b によって決定される。葛西らは、ロジスティック曲線での近似を行った既往の研究の中で実験定数をセメント水比の関数とすることで、予測曲線としての適合性が向上することを示した⁵⁾。氏家らはロジスティック曲線、ゴンペルツ曲線それぞれの近似において、係数 b を水セメント比の関数として示した¹²⁾。式(2)(3)の両辺を最終到達強度 (F_{inf}) で除すると、それぞれの曲線は最終到達強度に対する各積算温度時の強度比の増進形状を表すこととなる。図 1 に文献⁹⁾での普通ポルトランドセメントコンクリートのデータを用い、実測値である 20°C 182 日 (約 5460° D・D) の圧縮強度に対する各材齢での強度の比を算出し、積算温度との関係の水セメント比ごとに示す。従来の寒中指針の強度増進曲線は、対象を 45~65% の範囲のコンクリートとし、ロジスティック曲線の係数 a, b をセメント種類ごとに一定の値として、強度比の

増進曲線を同一のものとしていた。この図でもその範囲であれば、水セメント比にかかわらず、ほぼ同様の強度比の増進曲線となることがわかる。一方、高強度となる水セメント比 30%では、強度発現の立ち上がりの時期が若干早く、その後の強度比の増進速度も速く、高水セメント比のものとは比べて強度増進が異なる傾向が認められる。

また、図 2 に F_{inf} を一定の値として、係数 a, b の値のうちそれぞれ片方を一定とし、もう片方を変えたロジスティック曲線(式(2))の強度比の変化を、図 3 には F_{inf} を一定の値として、係数 a, b の値のうちそれぞれ片方を一定とし、もう片方を変えたゴンペルツ曲線(式(3))の強度比の変化を示す。ロジスティック曲線では、係数 b が小さいと強度の立ち上がり時期が早く、係数 a が大きいとその後の強度増進の速さが遅くなる。一方、ゴンペルツ曲線では、係数 a が大きくなると強度の立ち上がり時期が早く、係数 b が小さくなるとその後の強度増進の速さが速くなった。図 1 から対象とするコンクリートの強度に応じて、コンクリートの強度増進曲線の形状が異なることが認められ、成長曲線の係数を強度に応じ変化させることで強度増進曲線の適合性が向上するものと考えられる。

ここでは、まずこれら二つの成長曲線の適合性を表 1 に示した広範囲な水セメント比のコンクリートでの 20°C 養生の結果のみを用いて比較検討し、ロジスティック曲線とゴンペルツ曲線のどちらがより広範囲な強度増進の過程において強度増進曲線としての適合性が高いかを検討する。その後、適合性が高いと判断された成長曲線を表 1 に示したデータの養生温度が異なるすべてのコンクリートでの強度増進の試験結果に近似し、コンクリートの強度増進予測曲線の提案を行うこととする。

4. 標準条件 (20°C) における広範囲な水セメント比のコンクリート強度増進データを用いた成長曲線の適用性検討

表 1 の実験データからすべての文献の 20°C 養生の結果を用い、ロジスティック曲線とゴンペルツ曲線のどちらがより広範囲な強度増進の過程において強度増進曲線としての適合性が高いかを比較検討する。ロジスティック曲線(式(2))とゴンペルツ曲線(式(3))中の実験定数は、実験結果から非線形最小二乗法により使用したコンクリートごとに求めた。なお、最終到達強度 (${}_{20}F_{inf}$) は、以下の式により、20°C 28 日の試験結果から求められるものとした。

ロジスティック曲線

$${}_{20}F_{inf} = {}_{20}F_{28} \times (1 + \exp(a \times \log_{10}({}_{20}M_{28}) + b)) \quad (4)$$

ゴンペルツ曲線

$${}_{20}F_{inf} = \frac{{}_{20}F_{28}}{\exp(a \times {}_{20}M_{28}^b)} \quad (5)$$

ここに、 ${}_{20}F_{inf}$: 20°C の実験結果での最終到達強度(N/mm²),

${}_{20}F_{28}$: 20°C における材齢 28 日での圧縮強度(N/mm²),

${}_{20}M_{28}$: 圧縮強度測定時の積算温度(° D · D)

コンクリートごとに求めた近似式から計算された圧縮強度は、実測値との相関係数 0.99 以上と高い相関を示し、標準誤差も 3.0N/mm² 以下となり、コンクリートの強度増進の過程をよくあらわしていると考えられる。

図 4 にロジスティック曲線を調査ごとに近似して得られた実験定数 a, b と 28 日強度の逆数の関係をセメント種類ごとに、図 5 にゴンペルツ曲線を近似して得られた実験定数 a, b と 28 日強度の逆数の関

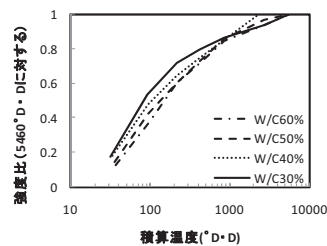


図 1 強度比増進曲線の一例

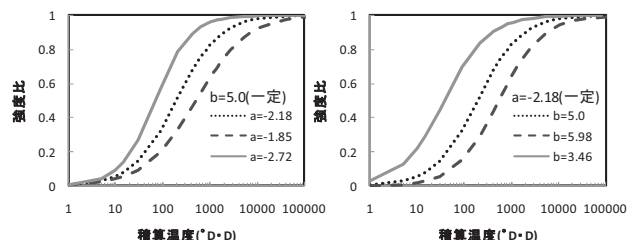


図 2 定数 a, b によるロジスティック曲線形状の変化の一例

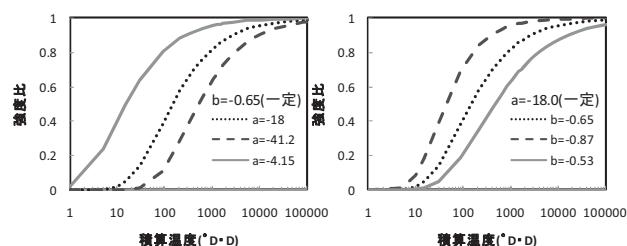


図 3 定数 a, b によるゴンペルツ曲線形状の変化の一例

係をセメント種類ごとに示す。なお、ここで 28 日強度との関係で表したのは、寒中コンクリート計画時に強度予測式が適用される場合に、設計基準強度 (または耐久設計基準強度) は決定されているものの、使用するコンクリートの水セメント比が明確に示されていることは少ないと考えたためである。図 4 のロジスティック曲線の係数 a, b はばらつきが認められるものの、強度の逆数と概ね線形の関係を示していた。係数 a では N が異なる傾きを示した。図 5 のゴンペルツ曲線についても、ばらつきは大きいと強度の逆数と線形を示す傾向は認められ、その傾きは係数 b ではセメントごとに異なっていた。氏家ら¹²⁾の検討では、両成長曲線の係数が、セメント種類を問わず水セメント比の増加に伴い大きくなるものとして示されている。しかしながら、本研究では、曲線形状を決定する係数 a, b は、強度の逆数との線形関係を持つものの、その傾きの傾向は明確なものではなかった。氏家らの検討では、最終到達強度をセメント種類それぞれに固有の 28 日強度に対する比で与え決定していた。一方、本研究では、最終到達強度は係数 a, b と 20°C 28 日強度の実験結果から計算にて求まるものとしているため、既往の研究と異なる傾向を示したと考えられる。よって、ここでは式(2)(3)の実験定数 a, b の値はセメント種類ごとに 28 日強度の逆数と線形関係にあるとして、以下の式の形で表し、実験結果から実験定数 a_1, a_2, b_1, b_2 を非線形最小二乗法により決定することとした。

$$a = a_1 \times 1/{}_{20}F_{28} + a_2 \quad (6)$$

$$b = b_1 \times 1/{}_{20}F_{28} + b_2 \quad (7)$$

ここに、 a_1, a_2, b_1, b_2 : 実験定数

表 2 に実験定数 a_1, a_2, b_1, b_2 を示す。これにより、ロジスティック曲線とゴンペルツ曲線を近似した広い強度範囲のコンクリートの強度増進曲線が得られ、計算強度と実測強度の比較から、それぞれの成

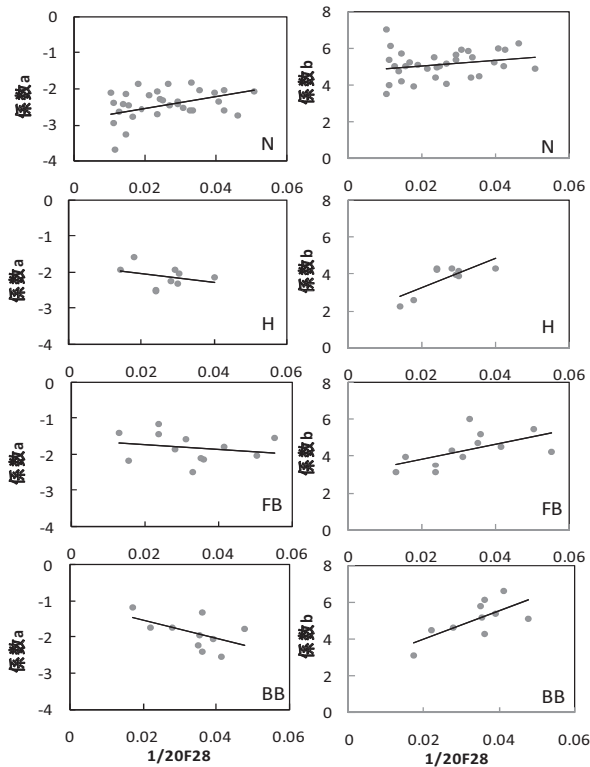


図4 28日強度の逆数とロジスティック曲線の係数 a, b の関係

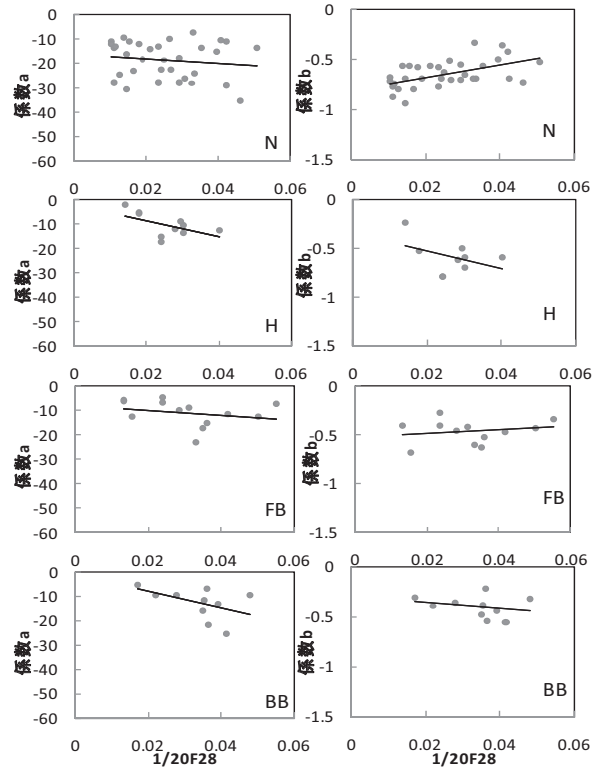


図5 28日強度の逆数とゴンペルツ曲線の係数 a, b の関係

長曲線のコンクリート強度増進式としての適合性について検討を行うこととした。

図6に表1の養生温度20°Cでのすべての実測強度と成長曲線別に得られた計算強度の関係を示す。全材齢で見ると、ロジスティック曲線、ゴンペルツ曲線のどちらの場合も相関係数に明確な差は認められなかった。寒中コンクリートでは、初期凍害防止のための強度や型枠の脱型時期決定のための強度予測が必要とされる。そこで、強度範囲を10N/mm²未満とそれ以上に区分し、実測強度と計算強度の残差から各曲線の予測精度について検討を行った。残差は計算強度から実測強度を引いたものとした。表3にそれぞれの残差の最大値、最小値、平均、標準偏差を強度区分ごとに示す。図7にこれらの統計値から求められる確率密度曲線を示す。

10N/mm²以下で比較すると、ロジスティック曲線の近似では、ばらつきが大きく、最も確率の高い誤差範囲が0.75 N/mm²を中心とした分布となり、計算値が大きくなる結果となった。このことは、寒中コンクリートで必要とされる初期強度の予測で、予測強度が実際の強度よりも高くなる危険性があることを示しており、実用上好ましくない。一方、ゴンペルツ曲線による近似では誤差のばらつきもロジスティック曲線に比べ小さく、最も確率の高い誤差範囲が0.11 N/mm²中心とした範囲となった。

10 N/mm²以上の強度で比較すると、どちらも計算値が実測強度よりも低く算出される確率がやや高くなっている。標準偏差では、ゴンペルツ曲線による値が小さい結果となった。

以上のことから、広範囲な材齢、強度に対応できる強度増進予測曲線には、ゴンペルツ曲線の近似がより精度が高く適用できるものと考え、以降温度条件を変えたコンクリートの強度発現予測にはゴンペルツ曲線を適用し、検討を行うこととした。

表2 係数 a, b の一覧

セメント種類	ロジスティック曲線		ゴンペルツ曲線	
	a	b	a	b
N	$4.9_{20}/F_{28}-2.4$	$42.8_{20}/F_{28}+3.8$	$-751.5/_{20}F_{28}-5.7$	$0.2/_{20}F_{28}-0.7$
	$-108.3/_{20}F_{28}+0.9$	$219.2/_{20}F_{28}-2.1$	$-365.0/_{20}F_{28}+1.9$	$-5.7/_{20}F_{28}-0.4$
H	$-20.8/_{20}F_{28}-1.0$	$66.5/_{20}F_{28}+2.1$	$-184.6/_{20}F_{28}-3.3$	$0.1/_{20}F_{28}-0.4$
	$-40.4/_{20}F_{28}-0.5$	$108.0/_{20}F_{28}+1.5$	$-404.4/_{20}F_{28}+1.5$	$-5.6/_{20}F_{28}-0.2$
FB				
BB				

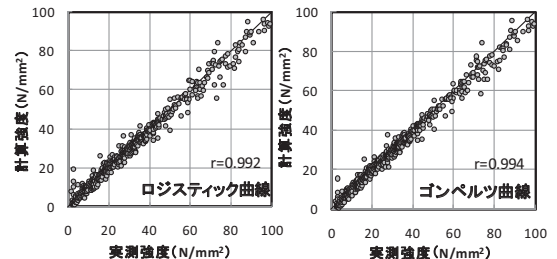


図6 各種セメントを用いた養生温度20°Cの実測強度と計算強度の関係

表3 2つの曲線での残差の統計値

統計値	ロジスティック曲線		ゴンペルツ曲線	
	10N/mm ² まで	10N/mm ² 以上	10N/mm ² まで	10N/mm ² 以上
最大値	17.11	10.55	12.90	10.67
最小値	-3.67	-17.31	-3.07	-14.91
平均	0.75	-0.68	0.11	-0.56
標準偏差	2.95	3.04	2.22	2.76

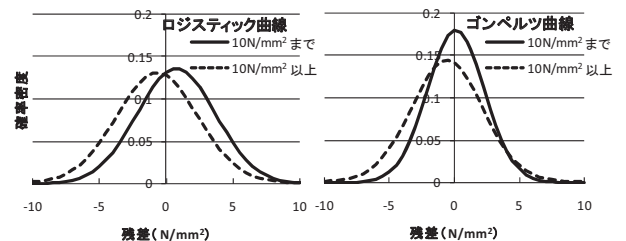


図7 2つの曲線での残差の確率密度曲線

表 4 各実験定数の値

実験定数	セメント種類			
	N	H	FB	BB
C_f	-0.00003	-0.00260	-0.00155	0.01064
a_1	623.0	-347.9	-235.0	-276.7
a_2	-37.8	0.5	-8.8	-3.6
b_1	15.4	-4.7	0.6	-1.3
b_2	-1.1	-0.4	-0.6	-0.4
C_M	0.542	1.114	1.189	1.338

5. ゴンペルツ曲線による強度推定式の提案

5.1 初期温度の補正

前述の積算温度式では低温で養生した場合と 20℃, またはそれ以上の高温で養生した場合に, 初期材齢における同一積算温度で得られる強度が異なることが指摘され, 強度推定に用いる場合にはその補正が必要となる¹⁵⁾. この補正は, ロジスティック曲線が強度推定式として提案された際に, 積算温度式に補正項を加えることで解消されている. 本研究においても, 適用する曲線は異なるが同様の考え方により, 補正を行う. 初期温度補正項を加え, (1)式は次式のように表わすものとする¹⁾.

$$M_c = M + C_M(T_{24} - 20) \quad (8)$$

ここに, M_c : 温度補正を行った積算温度(° D・D),

M : 積算温度(° D・D)

T_{24} : 打設後 24 時間のコンクリート平均温度 (°C),

C_M : 実験定数 (積算温度の温度補正係数)

5.2 係数 a, b

ゴンペルツ曲線の形状を決定する係数 a, b は前述の標準条件 (20℃) での強度増進の検討結果から, 20℃養生での 28 日強度の関数として表すことができた. ここでは, 前述の式(6)(7)をすべての養生温度の実験結果にあてはめ, 実験定数 a_1, a_2, b_1, b_2 をセメント種類ごとに決定した. 表 4 にその値を示す.

20℃の結果から得られた表 2 と比較すると, N の係数を表す式で傾き (a_1) が逆転することが認められた. ここで, 本研究の範囲で 28 日強度の最も高い 96.2N/mm² のコンクリート, 最も低い 19.7N/mm² のコンクリートについて近似曲線の形状を検討する. 最終到達強度に対する強度の比が 0.01 となる積算温度を強度の立ち上がり時期として比較すると, 96.2N/mm² のコンクリートでは 7.7° D・D, 19.7N/mm² のコンクリートでは 2.5° D・D と大差がない結果となった. 一方, 強度の比が 0.8 となる時点での積算温度は, 96.2N/mm² のコンクリートでは 193° D・D, 19.7N/mm² のコンクリートでは 33694° D・D となり, 大きく異なることとなった. 図 3 に示した通り, 係数 a, b の値でゴンペルツ曲線の形状は変化し, 係数 a は強度の立ち上がり時期, 係数 b はその後の中長期材齢での強度増進の速さに関係していた. 解析データ数の増加により, N では強度の立ち上がり時期はコンクリートによって大差がなく, その後の強度発現の速さが異なるものとして表されたと考えられる.

5.3 最終到達強度 F_{inf}

コンクリートの強度発現は, 温度条件により影響を受け長期材齢での強度が初期の高温履歴により低下することが知られている¹⁴⁾¹⁵⁾. これらは高温による初期の反応に伴う組織構造の変化などに起因するとされ¹⁶⁾, 積算温度による温度と時間の影響で表現されるものではないと考えられる.

ここでは既往の検討で得られた結果から, 長期強度の低下は, 標準養生温度と初期履歴平均温度の差と比例関係にあるもの¹⁾として, 最終到達強度に補正を加えることとした. 最終到達強度は, 5.2 で求められる係数 a, b と, 20℃28 日強度から計算され, 初期の温度が及ぼす最終到達強度への影響は以下に示す補正項によって表わされるものとした.

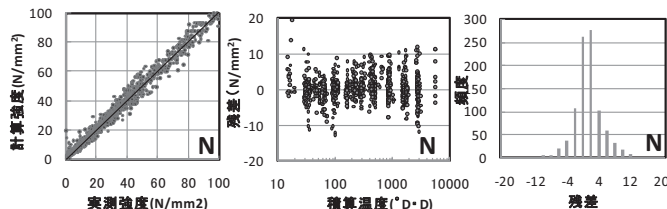


図 8 強度増進曲線の適合性 (普通ポルトランドセメント)

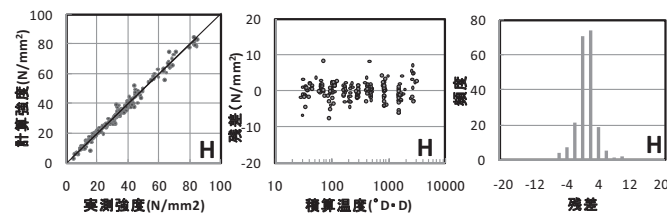


図 9 強度増進曲線の適合性 (早強ポルトランドセメント)

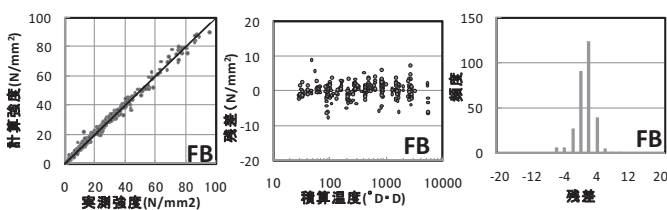


図 10 強度増進曲線の適合性 (フライアッシュセメント B 種)

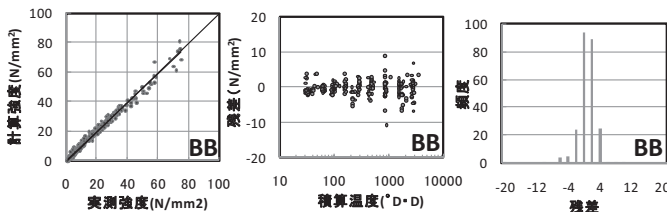


図 11 強度増進曲線の適合性 (高炉セメント B 種)

表 5 相関係数, 寄与率と残差の統計値

統計値	N	H	FB	BB
データ数	942	204	300	245
相関係数	0.990	0.992	0.994	0.992
寄与率	0.980	0.983	0.989	0.983
残差の平均値	0.17	-0.09	0.17	-0.19
残差の標準偏差	3.68	2.35	2.14	2.14

$$F_{inf} = \frac{{}_{20}F_{28}}{\exp(a \times {}_{20}M_{28}^b)} \times (1 + C_f(T_{24} - 20)) \quad (9)$$

ここに, ${}_{20}F_{28}$: 20℃28 日の強度(N/mm²),

${}_{20}M_{28}$: 20℃28 日での積算温度,

C_f : 実験定数 (最終到達強度の温度補正係数)

各定数は非線形最小二乗法によりセメントごとに求め, 表 4 に示した. N の高温による長期強度低下を得られた補正係数 C_f から計算すると, 45℃では 20℃養生のもの 99%に相当する. 一方, 材齢 365 日の 45℃養生の強度は 20℃養生の 94%程度以下であったと報告されている¹⁴⁾. 本研究で得られた結果では, 高温による強度低下が小さいが, その原因は現段階では明らかではない. しかしながら, 本研究は対象が寒中コンクリートであり, コンクリートが初期に特

に高温の環境下に曝されることはないものと考え、実験データから得られた値を用いることとした。しかし、予測式の適用拡大には初期の高温履歴が強度に及ぼす影響の更なる検討が必要と考える。

5.4 強度増進曲線の適合の検討

5.1～5.3 で得られた強度予測式による計算強度と、実測強度の関係、積算温度と残差の関係および残差のヒストグラムをセメント種類別に図8～図11に示す。相関係数、寄与率、残差の統計値を表5に示す。すべてのセメントで相関係数0.99以上となった。残差の標準偏差は最も大きかったNでも3.68N/mm²であり、すべてのセメントにおいて、予測式はよい適合を示すものと考えられる。

しかしながら、Nの15° D・D程度の初期材齢の範囲で、計算強度が実測強度を大きく上回るものが認められた。これは、高性能AE減水剤の使用量や種類により異なる凝結遅延の影響から初期強度の立ち上がりが遅れること¹⁷⁾に起因すると考えられる。現時点ではその詳細についての定量的な知見が得られておらず、本研究ではその影響に対して実験検討を行っていない。よって、高性能AE減水剤の使用量の多い高強度コンクリートの極初期の強度予測に本実験式を適用するには注意が必要であり、現段階では、本提案式の適用範囲は30° D・D以上での予測に用いることが望ましいと考える。また、寒中コンクリートを対象とした場合の適用範囲の上限は、840° D・Dとする。

5.5 ゴンペルツ曲線による強度増進式

以上の検討から得られた寒中コンクリートの強度増進式を以下に示し、低水セメント比のコンクリートを含めた強度増進の標準曲線として提案する。

なお、実験式であることから、適用の範囲は基となる実験データの範囲とすることが望ましい。本研究での範囲は水セメント比を普通ポルトランドセメントでは25%から65%、早強ポルトランドセメント、フライアッシュセメントB種、高炉セメントB種では30%から65%、積算温度は30° D・Dから840° D・D、温度範囲は普通ポルトランドセメントでは5℃から40℃、早強ポルトランドセメント、フライアッシュセメントB種、高炉セメントB種は5℃から20℃であった。温度が低い場合、実験の範囲は5℃までであるが、凍結しない範囲では通常の積算温度を用いる場合と同様に適用可能であると考えている。各実験定数は表4に示す。

$$F = F_{inf} \times \exp(a \times M_c^b) \quad (10)$$

ここに、

F_{inf} : コンクリートの温度補正を行った最終到達強度 (N/mm²)

$$F_{inf} = \frac{{}_{20}F_{28}}{\exp(a \times {}_{20}M_{28}^b)} \times (1 + C_f(T_{24} - 20)) \quad (11)$$

${}_{20}F_{28}$: 20℃28日の圧縮強度(N/mm²),

${}_{20}M_{28}$: 20℃28日の積算温度(° D・D),

C_f : セメント種類ごとに決まる実験定数,

T_{24} : 打ち込みから24時間のコンクリートの平均温度(°C)

a, b : ゴンペルツ曲線の係数

$$a = a_1 / {}_{20}F_{28} + a_2 \quad (12)$$

$$b = b_1 / {}_{20}F_{28} + b_2 \quad (13)$$

a_1, a_2, b_1, b_2 : セメント種類ごとに決まる実験定数(表4)

M_c : コンクリートの温度補正を行った積算温度 (° D・D)

$$M_c = \left(\sum_0^t (T_c + 10) \Delta t \right) + C_M (T_{24} - 20) \quad (14)$$

T_c : コンクリートの平均温度 (°C),

Δt : 平均温度算出のインターバル時間 (日),

C_M : セメント種類ごとに決まる実験定数

6. まとめ

本研究の結果は以下に要約される。

- 1) 強度増進曲線として用いるゴンペルツ曲線は、ロジスティック曲線に比べ、広範囲な水セメント比、材齢に対応可能であることを示した。
- 2) 寒中コンクリートでの強度増進を予測する方法として、ゴンペルツ曲線による強度増進式を提案した。この適用は、水セメント比は普通ポルトランドセメントでは25%から65%、早強ポルトランドセメント、フライアッシュセメントB種、高炉セメントB種では30%から65%の範囲とし、積算温度は30° D・Dから840° D・Dとする。

参考文献

- 1) 寒中コンクリート施工指針・同解説, 日本建築学会, 1998
- 2) ASTM C1074-98: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method
- 3) 吉田隆行, 岡永健, 御厨祐, 大坪正典: 成長曲線によるコンクリート強度推定法の研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.14, No.1, pp.555-560, 1992
- 4) 桂修, 鎌田英治, 洪悦郎: 高強度コンクリートの低温強度増進特性について, 自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, pp. 41-48, 1993.5
- 5) 葛西賢治, 鈴木邦康, 濱幸雄, 小林和寛: 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, 日本建築学会北海道支部研究報告論文集, pp. 25-28, 2007
- 6) 鎌田英治, 洪悦郎, 林直樹: 各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性状, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.360-365, 1990
- 7) 吉野利幸, 大塚隆男, 鎌田英治: 高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.370-375, 1991
- 8) 葛西賢治, 三森敏司, 濱幸雄: 寒中コンクリートを対象とした各種セメントの強度増進標準曲線の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) A-1, pp.889-890, 2008
- 9) 谷口円, 桂修, 松村宇, 吉野利幸: 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, コンクリート工学年次論文報告集, vol. 30, No.1, pp. 357-362, 2008
- 10) Guo Chengju: Maturity of Concrete: Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI Materials Journal, Vol. 86, No.4, pp. 341-353, Jul.-Aug. 1989
- 11) Tank, R. C., and Carino, N. J., : Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 1, pp.74-83, Jan.-Feb. 1991
- 12) 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
- 13) 養谷千風彦: 回帰分析のはなし, 東京図書, pp. 181-217, 1991
- 14) 杉山央, 榊田佳寛: 初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp. 23-30, 1999.1
- 15) 鯉淵清, 山口博之, 久保田賢, 石川陽一: 初期に60, 80℃で養生した高強度コンクリートの水和と強度, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp. 204-209, 1991
- 16) A. M. Neville: Properties of Concrete, pp. 359-365, 2002
- 17) たとえば, 中島浩二, 棚野博之, 友澤史紀, 児玉和己, 福士勲, 加藤元久, 榊田佳寛: 高強度コンクリート用混和剤の開発に関する研究(その2. フレッシュコンクリートの経時変化と圧縮強度), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.23-24, 1990

(2008年10月10日原稿受理, 2009年4月13日採用決定)