

論文 温度と乾燥の影響を考慮したコンクリートの強度予測手法に関する研究

酒井 正樹^{*1}・人見 尚^{*2}・神代 泰道^{*2}

要旨：本研究では、調合条件、養生温度および養生方法を変えたコンクリート供試体に対して含水率と圧縮強度を測定し、温度と乾燥の両方の影響を考慮した新たな強度予測手法を提案した。本研究で得られた結果を次にまとめる。(1) 平均温度と平均含水率の積と材齢の積算値である積算温度含水率の指標を新たに提案した。(2) 積算温度含水率とロジスティック曲線を用いた強度発現曲線により、従来の積算温度では区別できなかった、乾燥の影響を考慮したコンクリートの強度予測が可能となった。(3) 養生条件が異なる供試体の圧縮強度の実測値と強度発現曲線による予測値の比較検討を行い、提案した強度予測手法の適用性を確認した。

キーワード：圧縮強度、温度、乾燥、含水率、積算温度

1. はじめに

構造体コンクリートは、温度や乾燥の影響を受けて、標準養生した供試体と異なる強度発現性状となる。そのため、実環境における構造体コンクリートの強度発現性状を把握することは、品質確保および型枠存置期間や養生期間などの合理的な施工計画の立案に資する。

コンクリートの強度発現予測に関しては、古くから研究が盛んである。とりわけ寒中コンクリート工事では、初期材齢における強度発現が停滞するため、材齢の代わりに積算温度^{たとえ1)}や等価材齢^{たとえ2)}などの温度と材齢の積算値を用いた強度推定の研究が進められてきた。また近年では、水結合材比30%以下の高強度コンクリートの強度予測³⁾に対しても積算温度が用いられるなど、多方面にわたって研究が展開されている。

コンクリートの強度発現性状におよぼす温度影響については、従来の積算温度の考え方を基本としながら、水の化学ポテンシャルの変化に着目して凍結などの水分状態の影響を考慮した等価積算温度⁴⁾やレディーミクストコンクリートを用いた屋外暴露実験から得られた0°Cをはさんで氷点下まで連続的に扱える積算温度式⁵⁾など、予測の精度が向上している。一方、乾燥の影響については、初期材齢ではコンクリート中に豊富な水分が存在していること、また、温度履歴と異なり乾燥履歴は直接測定できないこともあり、あまり研究が進められてこなかった。しかしながら、近年では、構造体コンクリート中の水分の解析的予測に関する研究^{たとえ6)7)}が進められており、従来の手法による温度履歴と解析的手法による水分履歴を組み合わせることで、温度と乾燥の両方の影響を考慮したコンクリートの強度予測が可能となる。

本研究では、調合条件(水セメント比40%, 50%, 60%), 養生温度(5°C, 20°C, 35°C)および養生方法(気中, 封緘, 水中, 簡易断熱)を変えたコンクリート供試体に対して含水率と圧縮強度を測定し、温度と乾燥の両方の影響を考慮した新たな強度予測手法を提案した。

2. コンクリートの強度予測手法

2.1 既往の積算温度方式による強度予測手法

コンクリートの強度増進におよぼす温度影響を考慮する手法として、積算温度や等価材齢がある。本研究では、洪¹⁾が提案した積算温度(D・D)方式を基本として、これに乾燥影響を加えることとした。

(1) 積算温度

積算温度はコンクリートの平均温度のうち、その温度以下では強度増進がないと考える基準温度(T_0)を超えた分を合計したものであり、式(1)により定義される。なお、本研究における T_0 は、JASS 5をはじめとして一般的に用いられている -10°C とした。

$$M_t = \sum_{z=1}^n (T_z - T_0) \Delta t \quad (1)$$

ここに、 M_t ：積算温度($^\circ\text{C} \cdot \text{日}$)、 z ：経過時間(日)

n ：計算終了時間(日)、 Δt ：時間刻み(日)

T_z ：コンクリートの平均温度($^\circ\text{C}$)

T_0 ：その温度以下では強度増進がないと考える基準温度(本研究では -10°C)

(2) 強度発現曲線

コンクリートの強度発現は、空隙率理論に基づく成長曲線となることが知られている。洪⁸⁾は、式(2)に定義されるロジスティック曲線を用いて、コンクリートの強

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

度発現を比較的精度よく近似できることを示した。また近年では、谷口ら⁹⁾により、式(3)に定義されるゴンペルツ曲線を用いたコンクリートの強度増進の標準曲線が提案されている。ロジスティック曲線は変曲点を中心に点対称な曲線、ゴンペルツ曲線は変曲点までの立上がりやや急な曲線で、両者の差は比較的小さいものの、初期材齢での強度増進過程においてはゴンペルツ曲線の方が近似の精度が幾分高いとされる⁹⁾。本研究では、初期材齢に限らず材齢91日までの強度発現を検討するため、ロジスティック曲線を基本として検討することとした。

$$F = F_{\infty} / (1 + \exp(a \times \log_e M_t + b)) \quad (2)$$

$$F = F_{\infty} \exp(c \times M_t^d) \quad (3)$$

ここに、 F ：圧縮強度(N/mm²)

F_{∞} ：コンクリートの最終到達強度(N/mm²)

M_t ：積算温度(°C・日)

a, b, c, d ：実験係数

2.2 新たな積算温度含水率方式による強度予測手法

本研究では、従来の積算温度の考え方を基本として、これに乾燥の影響を加えた積算温度含水率を新たに定義し、ロジスティック曲線を用いて温度と乾燥の両方の影響を考慮した新たな強度発現曲線を決定した。

(1) 積算温度含水率

積算温度含水率 ($D \cdot W \cdot D$) は、コンクリートの平均温度のうち、その温度以下では強度増進がないと考える基準温度 (T_0) を超えた分とコンクリートの平均含水率のうち、その含水率以下では強度増進がないと考える基準含水率 (W_0) を超えた分の積を合計したものであり、式(4)により定義される。

$$M_w = \sum_{z=1}^n (T_z - T_0)(W_z - W_0)\Delta t \quad (4)$$

ここに、 M_w ：積算温度含水率(°C・vol%・日)

z ：経過時間(日)， n ：計算終了時間(日)

Δt ：時間刻み(日)

T_z ：コンクリートの平均温度(°C)

W_z ：コンクリートの平均含水率(vol%)

T_0 ：その温度以下では強度増進がないと考える基準温度(本研究では-10°C)

W_0 ：その含水率以下では強度増進がないと考える基準含水率(本研究では4.6vol%)

温度と含水率の積としたのは、いずれか一方でも基準を下回ると強度発現が停止するためである。丸山ら¹⁰⁾は、セメントの水和反応は析出律速プロセスで変化し、水和反応速度は単位体積あたりの含水率に依存すると仮定している。積算温度含水率は、水和反応プロセスに関係する2つの指標を掛け合わせたもので、その物理量が示す意味は必ずしも明確ではないものの、この関数式が実験式であり、関数近似を目的とすることから、実用上

差し支えないものと判断した。次に、 W_0 については、空隙内の水の一部は水和生成物上に吸着しており、析出プロセスつまり水和反応に関与しない¹¹⁾とされる。佐藤ら¹²⁾は、養生条件を変えたコンクリートの含水率と圧縮強度の変化を実験的に確認しており、質量含水率が2~3%まで低下すると、強度の発現が停滞もしくは強度が低下することを示している。本研究においては、コンクリートの密度を2.3g/cm³と仮定して、質量減少率2%に相当する、体積含水率4.6vol%を W_0 と設定した。

(2) 強度発現曲線

コンクリートの強度発現曲線は、式(5)に示されるロジスティック曲線とした。コンクリートの最終到達強度は、標準養生を行った材齢28日における圧縮強度(調査強度)から算定することとし、初期の温度履歴が高温であるほど長期強度は低下、初期の温度履歴が低温であるほど長期強度は増加することから、打込み後24時間のコンクリートの平均温度による補正係数を設けた。

$$F = F_{\infty} / (1 + \exp(a \times \log_e M_w + b)) \quad (5)$$

$$F_{\infty} = \gamma_{20} F_{\infty} \quad (6)$$

$${}_{20}F_{\infty} = {}_{20}F_{28} / (1 + \exp(a \times \log_e {}_{20}M_w + b)) \quad (7)$$

ここに、 F_{∞} ：温度補正を行ったコンクリートの最終到達強度(N/mm²)

M_w ：積算温度含水率(°C・vol%・日)

${}_{20}F_{\infty}$ ：標準養生したコンクリートの最終到達強度(N/mm²)

γ ：打込み後24時間のコンクリートの平均温度による補正係数(実験係数)

${}_{20}F_{28}$ ：標準養生28日の圧縮強度(N/mm²)

${}_{20}M_w$ ：標準養生28日のコンクリートの積算温度含水率(°C・vol%・日)

a, b ：実験係数

(3) 強度発現曲線決定のためのプロセス

養生方法を変えたコンクリート供試体の含水率と圧縮強度の測定結果から、積算温度含水率とロジスティック曲線を用いた強度発現曲線を決定するフローを図-1に

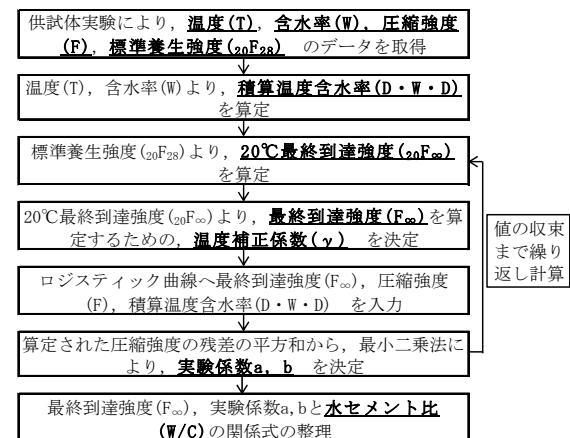


図-1 強度発現曲線の決定フロー

示す。未知数である実験係数 a, b は、実験により得られた積算温度含水率と圧縮強度をロジスティック曲線に当てはめ、残差の平方和から最小二乗法により最適値として決定した。また、実験係数 a, b および ${}_{20}F_{\infty}$ については、水セメント比との関係式として整理した。

3. 含水率と圧縮強度の測定実験

3.1 実験概要

(1) 実験計画

温度と乾燥の両方の影響を考慮した強度発現曲線を決定するため、調合条件、養生温度および養生方法を変えたコンクリート供試体に対して含水率と圧縮強度を測定した。実験計画を表-1に示す。コンクリートの調合は、セメント種別を普通ポルトランドセメント、水セメント比を40%、50%、60%とし、水セメント比50%のみ単位水量を $170\text{kg/m}^3, 180\text{kg/m}^3$ とした。供試体 ($\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$) の作製後、材齢3日で脱型を行い、養生温度を $5^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}$ 、養生方法を封緘、気中、水中、簡易断熱の条件として材齢91日まで養生し、材齢3日、7日、28日、91日で含水率および圧縮強度を測定した。なお、養生温度 5°C および 35°C は送風式の温度可変槽に静置、養生温度 20°C は恒温恒湿室に静置した。コンクリートの使用材料を表-2に、調合を表-3に示す。なお、化学混和剤は、単位水量 170kg/m^3 の調合では高性能 AE 減水剤、単位水量 180kg/m^3 の調合では AE 減水剤とした。

(2) 測定項目

コンクリートの測定項目を表-4に示す。コンクリートのフレッシュ性状として、練り上がり直後のスランプ、空気量、コンクリート温度、単位容積質量、硬化性状として含水率、圧縮強度を測定した。なお、含水率は式(8)により算定した。

$$W = \frac{U_t - U_{d,105}}{V} \times 100 \quad (8)$$

ここに、 W ：体積含水率(vol%)

U_t ：加熱材齢 t 日の質量(g)

$U_{d,105}$ ：加熱材齢 t 日の 105°C 乾燥後の質量(g)

V ：供試体体積(cm^3)

なお、含水率の測定時期は材齢7日以降としたが、強度発現曲線の決定にあたっては、打込み後からの含水率を求める必要がある。しかしながら、初期材齢におけるコンクリート中の水分量の変化を求めるには、水和反応による水分消費量を解析的に算定¹⁰⁾するなど容易ではないため、本研究においては、打込み直後の含水率を封緘7日の含水率と同値と仮定することとした。

3.2 実験結果

(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状を表-5に示す。スラ

表-1 実験計画

条件	項目	摘要	水準数
調合 ^{※1}	セメント種別	普通ポルトランドセメント	1
	水セメント比	40%, 50%, 60%	3
	単位水量	(水セメント比50%のみ) $170\text{kg/m}^3, 180\text{kg/m}^3$	2
温度	練上り温度	20°C	1
	養生温度	$5^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}$	3
水分	脱型時期	材齢3日 ^{※2}	3
	養生方法	封緘, 気中, 水中 ^{※3} 簡易断熱	4
測定	含水率	7日, 28日, 91日	4
	圧縮強度	3日, 7日, 28日, 91日	4

※1：調合記号は「水セメント比-単位水量」とする

※2：水中養生は翌日脱型、※3：水中養生は 20°C のみ

表-2 コンクリートの使用材料

種類	記号	概要
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm^3)
細骨材	S	木更津産陸砂 (表乾密度 2.60g/cm^3 , 吸水率 1.69%, F.M. 2.75)
粗骨材	G	青梅産碎石 (表乾密度 2.64g/cm^3 , 吸水率 0.81%, F.M. 6.68, 実績率 58.6%)
水	W	上水道水

表-3 コンクリートの調合

記号	水セメント比 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)			
				W	C	S	G
40-170	40	18	4.5	170	425	821	903
50-170	50	18	4.5	170	340	910	884
50-180	50	18	4.5	182	364	806	938
60-180	60	18	4.5	182	303	899	895

表-4 コンクリートの測定項目

分類	項目	試験方法
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	単位容積質量	JIS A 1116
硬化性状	含水率	105°C 乾燥質量法
	圧縮強度	JIS A 1108

表-5 コンクリートのフレッシュ性状

記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)	単位容積質量 (kg/m^3)
40-170	20.0	4.3	20	2328
50-170	20.0	4.3	20	2315
50-180	19.5	4.3	20	2306
60-180	18.5	4.2	20	2289

ンプ、空気量ともに全ての調合で目標値を満足した。

(2) 含水率の実測値

実験により測定された含水率の経時変化を図-2に示す。封緘養生では、材齢の経過に伴う含水率の変化はほぼ認められなかった。水中養生では、外部からの水分供給があり、材齢の経過とともに含水率が増加した。気中養生では、材齢の経過とともに含水率が低下し、とりわけ、養生温度5℃および35℃では、養生温度20℃と比較して、経時による含水率の低下量が大きくなった。この理由として、養生温度20℃では恒温恒湿室に静置したのに対し、養生温度5℃および35℃では送風式の温度可変槽に静置しており、温度可変槽内にて乾燥を促進させるような気流が生じた影響によるものと推察される。

(3) 圧縮強度の実測値

実験により測定された圧縮強度の経時変化と実験結果から決定した強度発現曲線を図-3に示す。図中に点で示した結果が、実験による圧縮強度の実測値である。

調合の違いについては、水セメント比が小さいほど圧縮強度が大きくなるが、同一の養生温度および養生方法で比較すると、強度発現特性は水セメント比に関わらずほとんど同じ傾向を示した。

養生温度の違いについては、材齢7日までの圧縮強度は養生温度が低いほど小さくなるが、材齢91日では養生温度が高いほど若干小さくなった。

養生方法の違いについては、材齢7日までの圧縮強度は養生方法の違いによらずほとんど同等となるが、材齢91日では封緘養生を基準として、気中養生では70%程度、水中養生では110%程度となり、簡易断熱養生ではほと

んど同等となった。また、気中養生では材齢28日以降の圧縮強度の増進がほとんど認められず、乾燥の影響により強度発現性状が異なることが確認された。

4. 強度発現曲線の決定と検証

4.1 強度発現曲線の決定

含水率と圧縮強度の測定実験から決定した実験係数 γ 、 a 、 b および ${}_{20}F_{\infty}$ を表-6に示す。また、 ${}_{20}F_{28}$ と ${}_{20}F_{\infty}$ の関係について既往の研究と比較したものを図-4に示す。図中の実線は、日本建築学会の寒中コンクリート施工指針・同解説⁹⁾にて、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの324データから誘導した圧縮強度発現の標準曲線から求めた ${}_{20}F_{28}$ と ${}_{20}F_{\infty}$ の関係である。本研究での ${}_{20}F_{28}$ と ${}_{20}F_{\infty}$ の関係は、既往の標準曲線による結果と概ね一致した。実験結果から決定した実験係数 a 、 b および ${}_{20}F_{\infty}$ と水セメント比の関係を式(9)~(11)に示す。

$$a = -0.0186(W/C) + 0.0888 \quad (R^2=0.96) \quad (9)$$

$$b = 0.157(W/C) - 1.66 \quad (R^2=0.96) \quad (10)$$

$${}_{20}F_{\infty} = -1.15(W/C) + 104 \quad (R^2=0.87) \quad (11)$$

ここに、W/C：水セメント比(%)

表-6 含水率と圧縮強度の測定実験で決定した実験係数

記号	γ (-)			a (-)	b (-)	${}_{20}F_{\infty}$ (N/mm ²)
	5℃	20℃	35℃			
40-170	1.1	1.0	0.9	-0.641	4.559	61.0
50-170				-0.820	5.953	44.6
50-180				-0.882	6.535	42.5
60-180				-1.012	7.696	38.0

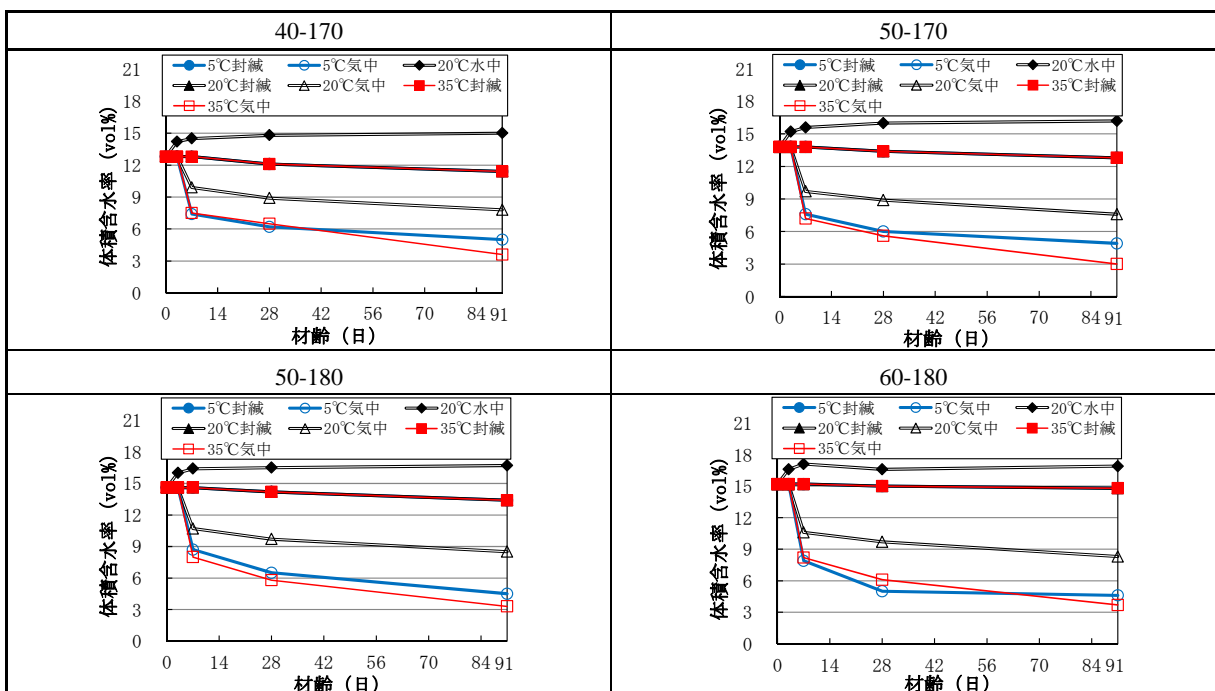


図-2 実験により測定された含水率の経時変化

4.2 含水率と圧縮強度の実測値との比較による強度発現曲線の適用性の検証

実験により測定された圧縮強度の経時変化と実験結果から決定した強度発現曲線を図-3に示す。図中に線で示した結果が、実験結果から決定した強度発現曲線による圧縮強度の予測値である。

調合の違いについては、同一の養生温度および養生方法で比較すると、強度発現曲線による圧縮強度の予測値は、水セメント比の違いに関わらず圧縮強度の実測値とほとんど同等の値となった。

養生温度の違いについては、養生温度5℃および35℃では、強度発現曲線による圧縮強度の予測値は、気中養生において材齢の経過に伴い強度発現が停滞する傾向を再現できており、圧縮強度の実測値とほとんど同等の値

となった。一方、養生温度20℃では、強度発現曲線による圧縮強度の予測値は、気中養生の材齢91日において実測値よりも大きく評価された。ただし、養生温度20℃では、養生温度5℃および35℃と比較して、気中養生における含水率の低下量が小さく、材齢91日においても8vol%程度の含水率を有しているため、材齢28日以降も

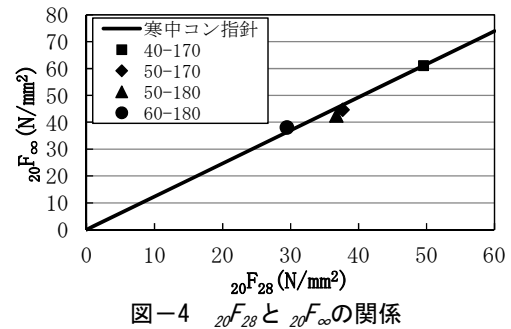


図-4 $20F_{28}$ と $20F_{\infty}$ の関係

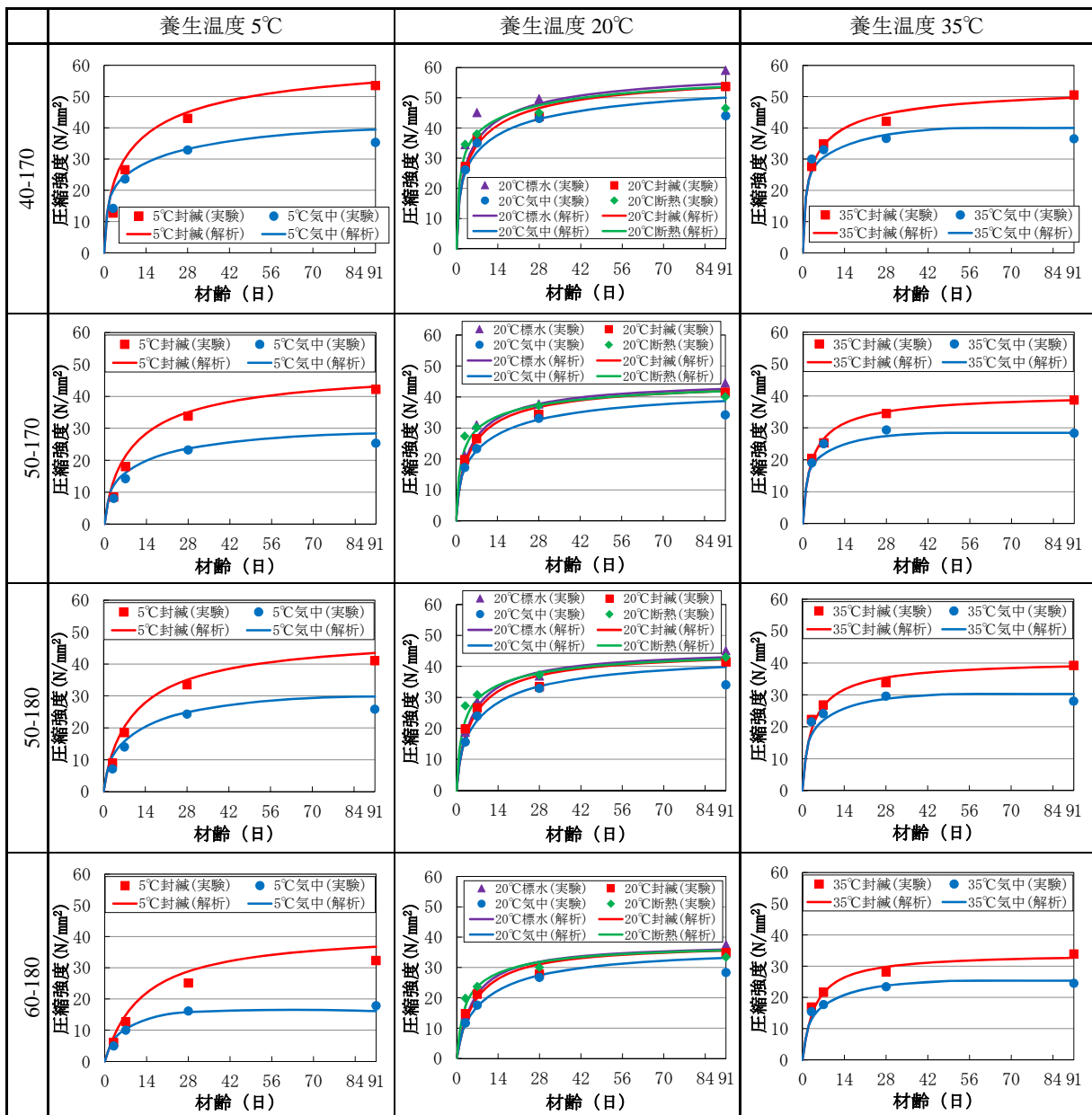


図-3 実験により測定された圧縮強度の経時変化と実験結果から決定した強度発現曲線

水和が進行し、強度が増進するとした強度発現曲線の評価は妥当な解釈といえる。そこで、気中養生の実測値で材齢の経過に伴い強度発現が停滞する傾向について、水和以外の要因について検討することとした。

丸山ら¹³⁾は十分に強度が発現したコンクリートに対して、試験時の乾燥程度を変えて圧縮強度の測定を行い、コンクリートの含水状態により圧縮強度が低下する領域があることを指摘している。本実験においても、養生温度 20℃の気中養生は、恒温恒湿室 (20℃, 60%R.H.) に静置したため、コンクリートの含水状態の影響による強度低下が生じた可能性があり、水和により強度が増進するプラスの効果と乾燥程度により強度が低下するマイナスの効果が相殺して、強度発現が停滞もしくは強度が低下したものと推察される。また、この傾向は養生温度 5℃ および 35℃の一部でも認められているため、補正方法については今後の課題である。

養生方法の違いについては、養生温度に関わらず封緘養生、水中養生、および材齢 91 日を除いた気中養生では、強度発現曲線による圧縮強度の予測値は、圧縮強度の実測値とほとんど同等の値となった。簡易断熱養生では、初期材齢における圧縮強度の予測値が小さくなるものの、初期材齢において急激に強度が増進し、長期材齢において強度発現が頭打ちとなる傾向を再現できた。

以上より、積算温度含水率 ($D \cdot W \cdot D$) の指標とロジスティック曲線を用いた強度発現曲線により、養生条件の異なる供試体の材齢 91 日までの圧縮強度を概ね再現することができ、従来の積算温度 ($D \cdot D$) では区別できなかった、乾燥影響を考慮したコンクリートの強度予測が可能となった。

5. まとめ

本研究では、調合条件 (水セメント比 40%, 50%, 60%), 養生温度 (5℃, 20℃, 35℃) および養生方法 (気中, 封緘, 水中, 簡易断熱) を変えたコンクリート供試体に対して含水率と圧縮強度を測定し、温度と乾燥の両方の影響を考慮した新たな強度予測手法を提案した。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 平均温度と平均含水率の積と材齢の積算値である積算温度含水率 ($D \cdot W \cdot D$) の指標を新たに提案した。
- (2) 積算温度含水率とロジスティック曲線を用いた強度発現曲線により、従来の積算温度では区別できなかった、乾燥の影響を考慮したコンクリートの強度予測が可能となった。
- (3) 養生条件が異なる供試体の圧縮強度の実測値と強度発現曲線による予測値の比較検討を行い、提案した強度予測手法の適用性を確認した。
- (4) コンクリートの含水状態による強度低下の影響、異

なるセメント種別に対する強度発現曲線の適用性の拡大および供試体実験により決定した強度発現曲線の模擬部材を用いた実証実験が今後の課題である。

参考文献

- 1) 洪悦郎：コンクリートの強度推定実用法の提案とその応用，日本建築学会論文報告集，第 63 号，1959
- 2) 谷口円，桂修，佐川孝広，濱幸雄：等価材齢によるコンクリート強度推定手法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 668 号，2011.10
- 3) 穴倉大樹：積算温度方式による高強度コンクリートの圧縮強度推定に関する基礎的研究，建材試験センター建材試験情報 2013.6，pp.6-11，2013.6
- 4) 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.17-22，2001.4
- 5) 谷口円，濱幸雄，桂修：氷点下のコンクリートの強度増進と温度時間，日本建築学会構造系論文集，第 640 号，pp.995-1004，2009.6
- 6) 丸山一平，五十嵐豪，岸直哉：セメント硬化体中の水分移動に関する基礎研究，日本建築学会構造系論文集，第 668 号，pp.1737-1744，2011.10
- 7) 石田哲也，前川宏一，岸利治，磐田吾郎，楠原千佳子：温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化，土木学会論文集，No.795，V-68，pp.39-53，2005
- 8) 洪悦郎ほか，ロジスティック曲線を応用したコンクリートの強度推定式の提案—普通ポルトランドセメントの場合—，日本建築学会論文報告集，第 542 号，pp.1-7，1986.9
- 9) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，pp.219，1998.2
- 10) 丸山一平，五十嵐豪：高経年化した部材中のコンクリート強度予測手法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 673 号，pp.323-332，2012.3
- 11) P. M. Dove and J. D. Rimstidt: Silica - water interactions Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v.29, pp.259-308, 1994.1
- 12) 佐藤幸恵，樹田佳寛，中村成春，鹿毛忠継，杉山央：湿潤養生が高強度コンクリートの強度発現に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 551 号，pp.1-6，2002.1
- 13) Ippei Maruyama, Hiroshi Sasano, Yukiko Nishioka and Go Igarashi: Strength and young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90℃, Concrete and Cement Research vol.66, pp.48-63, 2014