

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

酒井 正 樹 人 見 尚
神 代 泰 道

Compressive Strength Prediction Method for Concrete Considering Influences of Temperature and Drying

Masaki Sakai Takashi Hitomi
Yasumichi Koushiro

Abstract

The influences of the temperature and drying on the water content ratio and compressive strength were experimentally examined using concrete specimens and model structures. Then a compressive strength prediction method for concrete that considers the influences of the temperature and drying was proposed. In concrete specimens and model structures, the water content ratio and compressive strength of concrete samples with various mix proportions, curing temperatures and drying conditions were measured. As a result, it was confirmed that the compressive strength of the surfaces of model structures was lower than the strength of the center area. Moreover it was proved that the present prediction method is capable of evaluating the compressive strength distributions in model structures.

概 要

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役立つ。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の含水率と圧縮強度の測定結果から、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。さらには、異なる温度で養生された柱と壁を模擬した部材の圧縮強度、静弾性係数および含水率分布を実測し、供試体による実験結果から構築した強度予測手法の構造体コンクリートへの適用性を検証した。その結果、新たに提案した積算温度含水率の指標により、模擬部材の内部では従来の積算温度と同様の強度発現性状を再現でき、表層では従来では考慮できなかった乾燥の影響により強度発現が停滞する傾向を再現できた。

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るため、標準養生した管理供試体とは異なる強度発現性状となる。一般には、所定の管理材齢における管理供試体の強度と構造体コンクリートの強度差を事前に求めた上で、当該強度を割増したコンクリートの調合が決定される。一方、実環境における構造体コンクリートの強度発現を時系列に把握することができれば、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役立つほか、実躯体での品質保証が可能となり施工の信頼性向上に資する。

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^{たとえば1)}や等価材齢^{たとえば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の影響に

ついては、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や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^{たとえば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と考えられる。

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の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式を提案した。さらには、養生温度(5°C, 20°C, 35°C)を変えた柱と壁の模擬部材の圧縮強度、静弾性係数および含水率分布を測定し、提案した強度予測式の構造体コンクリートへの適用性を検証した。

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 (Degree Day, 以下D・Dと略す) 方式を基本として、これに乾燥影響を加えることとした。

2.1.1 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) を超えた分を積算したものであり、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)

2.1.2 既往の強度発現曲線 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⁵⁾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ち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こと、また過去に多くの検討実績があることから、ロジスティック曲線を採用した。

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

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

ここに、 F : 圧縮強度(N/mm^2)
 F_{∞} : コンクリートの最終到達強度(N/mm^2)
 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。

2.2.1 積算温度含水率 積算温度含水率 (Degree Water Day, 以下D・W・Dと略す) 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) を超えた分の積を積算したものであり、式(4)により定義する。

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

ここに、 M_w : 積算温度含水率($^{\circ}\text{C} \cdot \text{vol}\% \cdot \text{日}$)
 W_z : コンクリートの平均含水率(vol%)
 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 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ 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。

2.2.2 新たな強度発現曲線 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 (調合強度) 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。

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

$$F_{\infty} = \gamma_{20} F_{28} \quad (6)$$

$${}_{20}F_{28} = {}_{20}F_{28} / (1 + \exp(a \times \log_e M_{w28} + b)) \quad (7)$$

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/mm^2)
 ${}_{20}F_{28}$: 標準養生したコンクリートの最終到達強度(N/mm^2)
 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/mm^2)
 ${}_{20}M_{w28}$: 標準養生28日のコンクリートの積算温度含水率($^{\circ}\text{C} \cdot \text{vol}\% \cdot \text{日}$)

2.2.3 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Fig. 1に示す。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. 強度予測式の構築のための供試体実験

3.1 実験概要

3.1.1 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Table 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170kg/m³、180kg/m³とした。供試体(φ100mm×200mm)の作製後、構造体コンクリートを想定して材齢3日で脱型を行い、養生温度を5℃、20℃、35℃、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℃および35℃は送風式の温度可変槽に静置、養生温度20℃は恒温恒湿室に静置した。コンクリートの使用材料をTable 2、コンクリートの調合をTable 3に示す。なお、化学混和剤は、単位水量170kg/m³の調合では高性能AE減水剤、単位水量180kg/m³の調合ではAE減水剤とした。

3.1.2 測定項目 コンクリートの測定項目をTable 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ブ、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。

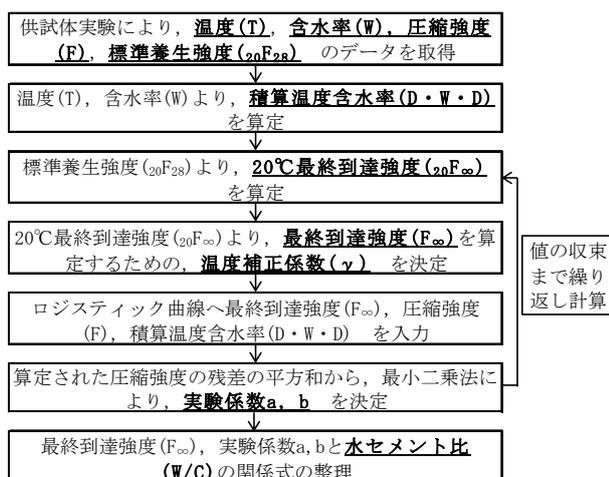


Fig. 1 強度発現曲線の決定フロー
Analysis Flow for deciding to Compressive Strength

Table 1 供試体実験の実験計画
Experimental Parameters under Using Cylinder Specimens

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) 170kg/m ³ , 180kg/m ³	2
温度	練上り温度	20℃	1
	養生温度	5℃, 20℃, 35℃	3
水分	脱型時期	材齢 3日※2	1
	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	3
	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℃のみ

Table 2 コンクリートの使用材料
Materials of Concrete

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
混和剤	-	AE 減水剤, 高性能 AE 減水剤

Table 3 コンクリートの調合
Mix Proportion of Concrete

記号	水セメント比 (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
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

Table 4 コンクリートの測定項目
Measurement Parameters of Concrete

分類	項目	試験方法
フレッシュコンクリート	スランブ	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℃乾燥質量法
	圧縮強度	JIS A 1108

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(cm³)

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。本研究では、乾燥の影響を考慮した強度発現予測を目的としており、初期材齢ではコンクリート中に豊富な水分が存在し、乾燥の影響は小さいものと判断し、打込み直後の含水率は封緘7日の含水率と同値と仮定した。

3.2 実験結果

3.2.1 フレッシュ性状 コンクリートのフレッシュ性状をTable 5に示す。スランプ、空気量ともに全ての調合でTable 3に示す目標値を満足した。

3.2.2 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Fig. 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°Cおよび35°Cでは、

養生温度20°C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°Cでは恒温恒湿室に静置したのに対し、養生温度5°Cおよび35°C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。

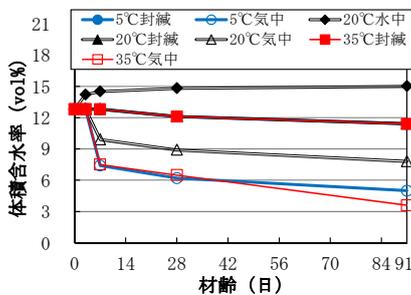
3.2.3 圧縮強度の実測値 実験により測定された圧縮強度の経時変化と実験結果から決定した強度発現曲線をFig. 3に示す。図中に点で示した結果が、実験による圧縮強度の実測値である。

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った。また、水セメント比50%では、単位水量を170kg/m³と180kg/m³の2種類を設定したが、強度発現特性はほとんど同じ傾向を示した。

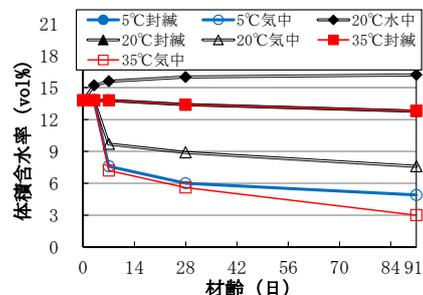
養生温度の違いについては、同一の調合および養生方法で比較すると、材齢7日までの圧縮強度は養生温度が低いほど小さくなるが、材齢91日では養生温度が高いほど若干小さくなった。

Table 5 供試体実験のコンクリートの基礎性状
Basic Properties of Concrete Cylinder Specimens

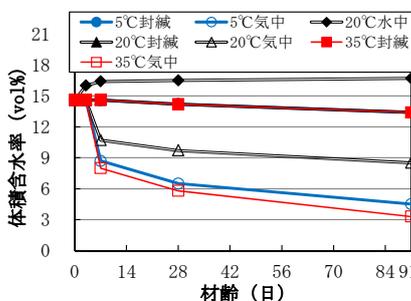
記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)	単位容積質量 (kg/m ³)
40-170	20.0	4.3	20	2328
50-170	20.0	4.3	20	2315
50-180	19.5	4.3	20	2306
60-180	18.5	4.2	20	2289



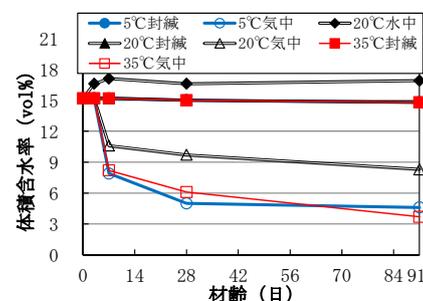
(水セメント比 40%—単位水量 170kg/m³)



(水セメント比 50%—単位水量 170 kg/m³)



(水セメント比 50%—単位水量 180 kg/m³)



(水セメント比 60%—単位水量 180 kg/m³)

Fig. 2 供試体実験の含水率の経時変化

Water Content Change of Concrete Cylinder Specimens with Time

養生方法の違いについては、材齢7日までの圧縮強度は、封緘養生と気中養生の差はわずかであるが、材齢の経過に伴って両者の差は大きくなり、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、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見られないのに対して、封緘養生では材齢28日以降も圧縮強度が増進しており、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. 強度発現式の決定

4.1 強度発現式の決定

供試体実験で決定した実験係数をTable 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Fig. 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

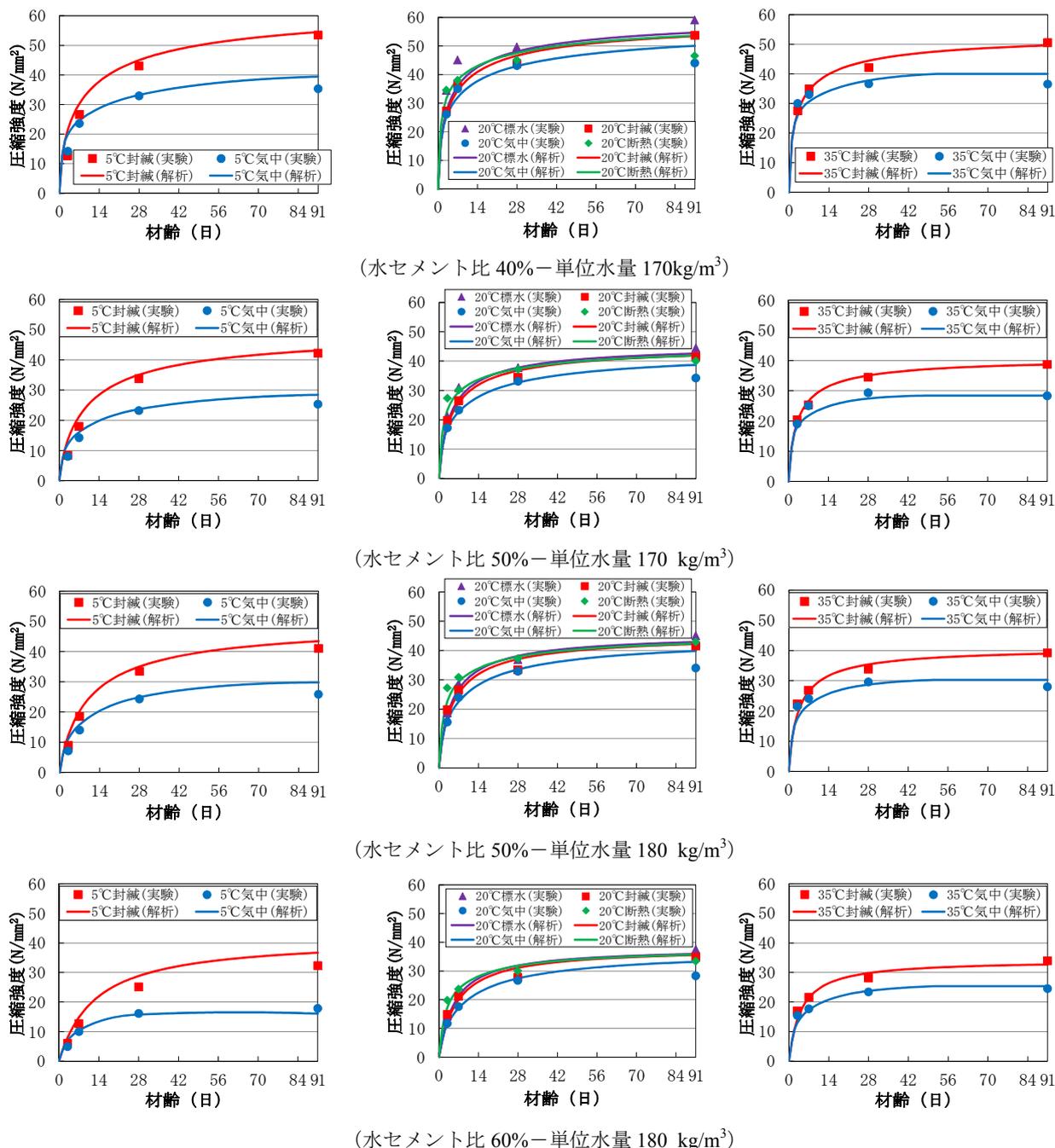


Fig. 3 供試体実験の圧縮強度の経時変化と実験結果から決定した強度発現曲線
Compressive Strength Change of Concrete Cylinder Specimens with Time

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(%)

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

Fig. 3に示した、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のうち、実験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。

調査の違いについては、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日以降も水和が進行し、強度が増進するとして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、コンクリートの平衡時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おり、補正方法については今後の課題とした。

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・W・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・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. 模擬柱・模擬壁実験による強度予測式の検証

5.1 実験概要

5.1.1 実験計画 供試体実験により提案した強度予測式の構造体コンクリートへの適用性の検証を目的として、養生温度を変えた柱と壁を模擬した部材の強度確認実験を行った。

実験計画をTable 7に示す。コンクリートの使用材料、

Table 6 供試体実験で決定した実験係数
Coefficient of the Presumption by Experiment

記号	$\gamma(-)$			$a(-)$	$b(-)$	${}_{20}F_{\infty}$ (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

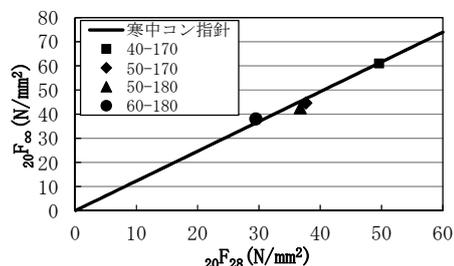


Fig. 4 ${}_{20}F_{28}$ と ${}_{20}F_{\infty}$ の関係
The Relationship between ${}_{20}F_{28}$ and ${}_{20}F_{\infty}$

Table 7 模擬部材実験の実験計画
Experimental Parameters under Using Model Structures

条件	項目	摘要	水準
試験体	模擬部材	柱：1100mm×1100mm×800mm 壁：200mm×600mm×800mm	2
	供試体	φ100mm×200mm(3本平均)	1
養生	養生温度	5℃, 20℃, 35℃	3
	乾燥条件	材齢3日脱型	1
コア採取	寸法*	乾式φ68mm×136mm(5本平均)	1
	採取位置 (Fig.5参照)	表層より34mm, 68mm, 100mm, 300mm, 500mm	5
試験	試験項目	圧縮強度, 静弾性係数, 含水率	3
	試験材齢	材齢28日, 材齢91日	2

*模擬部材の中心部では乾式φ100mm×200mm(3本平均)を採取

調査は、供試体実験の条件のうち水セメント比50%、単位水量170 kg/m³のものとした。模擬部材は1100mm×1100mm×800mmの柱と200mm×600mm×800mmの壁を模擬した2種類とした。また、品質管理用のφ100mm×200mmの供試体も併せて作製した。養生温度は、5℃、20℃および35℃とした。コンクリートの練上り温度は、養生温度に合わせてそれぞれ10℃、20℃および35℃とした。乾燥条件は、材齢3日に側面型枠を脱型し、所定の材齢まで各養生温度に設定した恒温室にて静置した。試験材齢は、材齢28日および91日とし、φ68mm×136mmの乾式コア供試体を採取した。模擬部材からのコア供試体の採取位置をFig. 5に示す。模擬部材の表層より34mm、68mm、100mm、300mm、500mmの位置をコア芯とした。また、本実験では模擬部材内部の含水率と圧縮強度分布を詳細に測定するため、コア径をφ68mmとしたため、管理供試体径100mmとの違いを比較するため、模擬部材の中心部において、φ68mmとφ100mmにて乾式コア供試体を採取した。なお、材齢28日と材齢91日のコア採取については、模擬柱では1体の模擬部材から、上下、左右が対象となる平面位置にて行い、模擬壁では材齢ごとに異なる2体の模擬部材を作製して行った。

5.1.2 測定項目 測定項目は、乾式コア供試体による含水率、圧縮強度および静弾性係数とした。測定方法は、供試体実験と同様とした。

5.2 実験結果

5.2.1 フレッシュ性状および管理供試体の基礎性状

模擬部材の作製に使用したコンクリートのフレッシュ性状および管理供試体の基礎性状をTable 8に示す。コンクリートのフレッシュ性状は、全ての養生温度で目標値を満足した。標準養生した管理供試体の圧縮強度は、養生温度5℃、20℃および35℃で、それぞれ46.7N/mm²、41.2N/mm²および34.0N/mm²となった。標準養生した管理供試体の圧縮強度は、養生温度が高いほど小さくなった。この理由として、空気量が異なった影響が考えられる。

5.2.2 模擬部材の含水率および力学特性

(1) **体積含水率** 模擬部材で採取したφ68mmの乾式コア供試体による含水率分布をFig. 6に示す。対称性を考慮して、模擬部材中心までの分布を示した。

養生温度については、養生温度5℃では、模擬柱、模擬壁ともに最も大きくなったが、養生温度35℃では、模擬柱では養生温度20℃とほぼ同等、模擬壁では最も小さくなった。模擬部材の表層と中心部の含水率の違いについては、模擬柱では表層の方が3~4.5vol%程度、模擬壁では表層の方が3vol%程度小さくなり、模擬柱の方が表層と中心部の含水率の差が大きくなった。

模擬柱と模擬壁の含水率の違いについては、表層では模擬壁の方が0.5~1vol%程度大きくなり、中心部では模擬柱の方が1~2vol%程度大きくなった。部材厚の小さな模擬壁では、中心部まで乾燥の進行が認められた。一方、部材厚の大きな模擬柱では、中心部での含水率が高くな

ったが、表層における含水率の低下量は模擬壁とほとんど同程度であった。

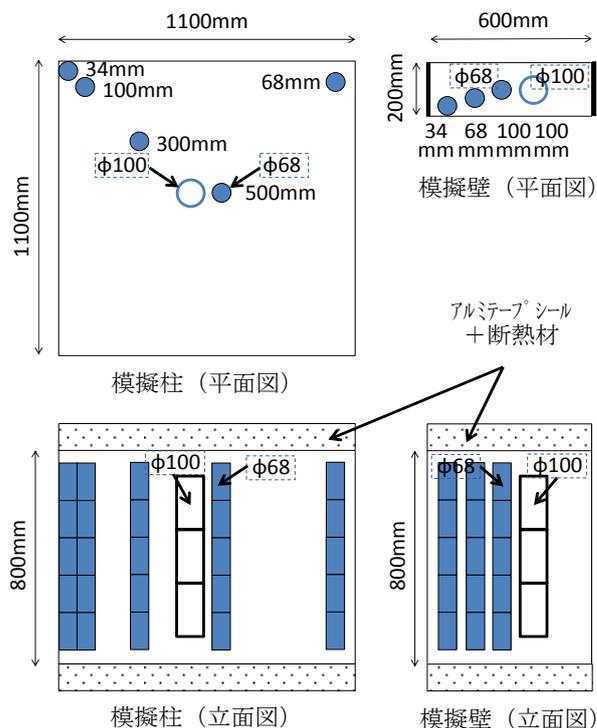


Fig. 5 模擬部材からのコア供試体の採取位置

Coring Location from Model Structures

Table 8 模擬部材実験のコンクリートの基礎性状

養生温度 (°C)	フレッシュ性状			硬化性状(標水 28 日)	
	コンクリート温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
5℃	13	18.5	3.7	46.7	31.1
20℃	22	18.5	4.9	41.2	29.4
35℃	34	19.0	5.8	34.0	27.3

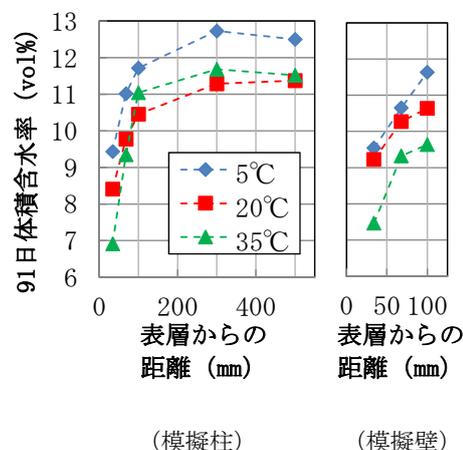


Fig. 6 模擬部材実験の含水率分布

Water Distribution in Concrete Model Structures

(2) 圧縮強度 模擬柱の中心部500mmで採取したφ68mmとφ100mmの乾式コア供試体の圧縮強度の関係をFig. 7に示す。模擬部材の中心部500mmが同一の圧縮強度であると仮定すると、φ68mmの圧縮強度の1.05倍がφ100mmの圧縮強度に相当する関係性が得られた。このことから、以降の検討においては、コア供試体(φ68mm)の圧縮強度は、管理供試体の径であるφ100mm相当に補正したものをを用いることとした。

模擬部材から取得した材齢91日の乾式コア供試体の圧縮強度と標準養生した材齢28日の管理供試体の圧縮強度の差($_{28}S_{91}$)を養生温度ごとにFig. 8に示す。養生温度5°Cでは、材齢91日の乾式コア供試体の圧縮強度は、材齢28日の管理供試体の圧縮強度よりも2.7N/mm²小さくなった。この差は、構造体コンクリートと管理供試体の違いによる強度差(ΔFと呼ばれ、一般的に3N/mm²程度)に相当するものと考えられる。また、養生温度20°Cでは、材齢91日の乾式コアの圧縮強度は材齢28日の管理供試体の圧縮強度よりも2.7N/mm²大きくなった。養生温度35°Cでは5.8N/mm²大きくなった。模擬部材については、養生温度が高いほど標準養生した管理供試体の圧縮強度に対して圧縮強度が大きくなっており、JASS 5¹⁴⁾に示される $_{28}S_{91}$ の傾向(Fig. 8)の範囲と概ね一致する傾向が認められた。

模擬部材で採取したφ68mmの乾式コア供試体による材齢91日の圧縮強度および静弾性係数の分布をFig. 9, 10

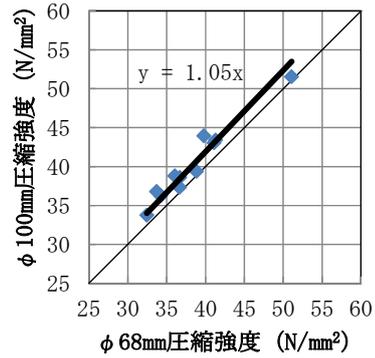


Fig. 7 模擬部材中心部のコア径と圧縮強度の関係
Relationship between Core Size and Compressive Strength

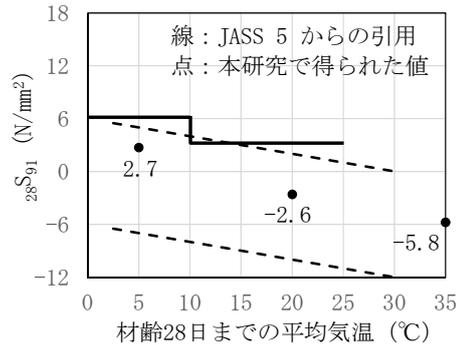


Fig. 8 コア強度と供試体強度の差($_{28}S_{91}$)の比較^{14)引用参考}
Relationship between Core Strength and Cylinder Strength

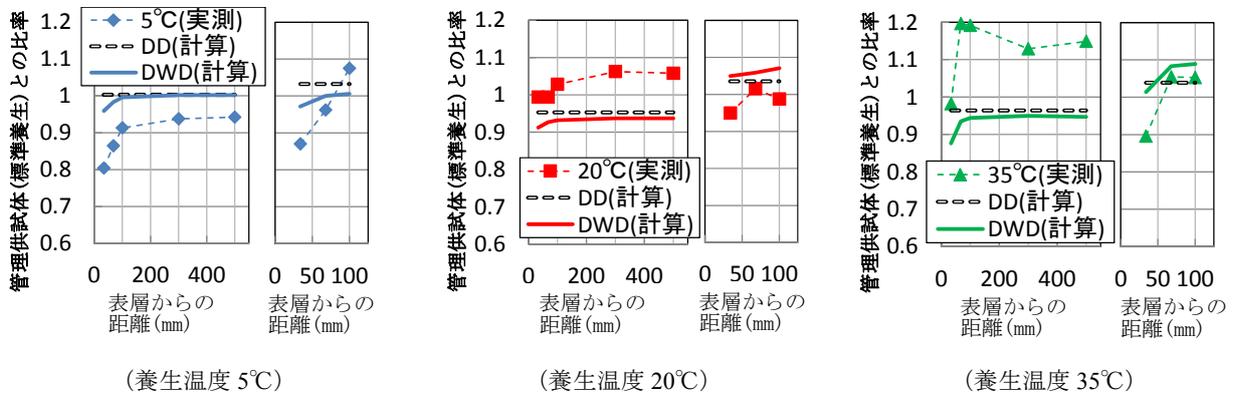


Fig. 9 模擬部材実験の圧縮強度と提案した強度発現式による予測値 (注) DD: 積算温度, DWD: 積算温度含水率
Compressive Strength Distribution in Concrete Model Structures

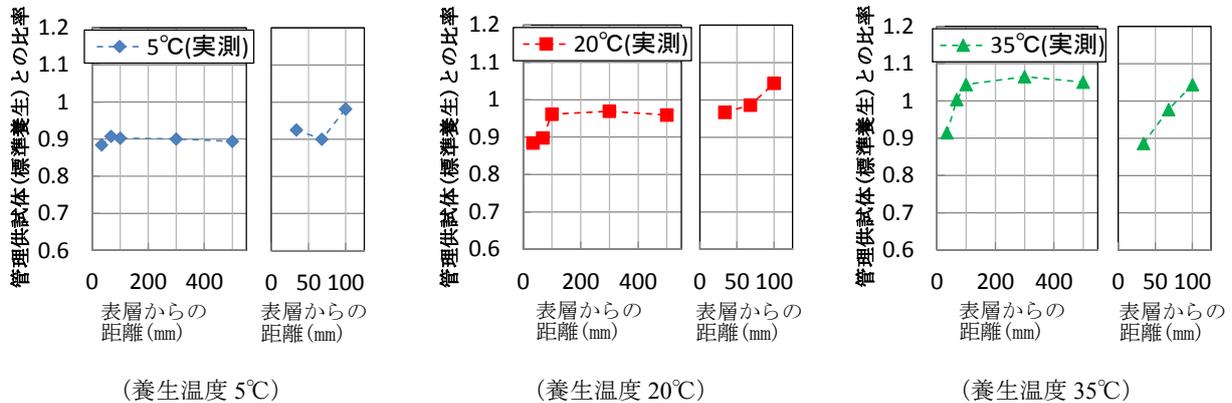


Fig. 10 模擬部材実験の静弾性係数分布
Elastic Modulus Distribution in Concrete Model Structures

に示す。対称性を考慮して、模擬部材中心までの分布を示した。また、練混ぜバッチの違いにより、管理供試体の圧縮強度が異なるため、図の縦軸は標準養生28日の管理供試体で測定された各物性値に対する比率で示した。このことは、管理供試体（標準養生）との比率が1.0の場合に、材齢91日の乾式コア供試体の圧縮強度と材齢28日の管理供試体の圧縮強度が等しいことを示している。

Fig. 9に点で示した結果が、乾式コア供試体による材齢91日の圧縮強度の実測値である。模擬柱では、養生温度が高いほど管理供試体に対する圧縮強度が大きくなった。Fig. 8に示したとおり、乾式コア供試体の圧縮強度は、管理供試体よりも養生温度35℃では1割程度大きくなり、養生温度20℃ではほぼ同等、養生温度5℃では1割程度小さくなった。模擬壁では、模擬柱と同様に養生温度が高いほど管理供試体に対する乾式コア供試体の圧縮強度が大きくなったが、養生温度の違いによる差は小さかった。

模擬柱および模擬壁ともに、表層からの距離が100mm以下の部位では圧縮強度の低下が大きくなった。湯浅ら¹⁵⁾は、乾燥開始材齢を変えた供試体の圧縮強度分布を実験的に測定し、乾燥面からの距離が50mm以下では圧縮強度の低下率が大きくなることを報告しており、本実験でも表層に近い部分においては同様の傾向が認められた。

(3) 静弾性係数 模擬柱では、養生温度が高いほど管理供試体に対する乾式コア供試体の静弾性係数が大きくなった。材齢91日の乾式コア供試体による静弾性係数は、管理供試体に対して養生温度35℃、20℃では概ね同等、養生温度5℃では1割程度小さくなった。模擬壁では、養生温度と静弾性係数には明確な関係は認められなかった。

模擬柱および模擬壁ともに、表層からの距離が100mm以下の部位における静弾性係数の低下が大きくなった。乾燥を受けたコンクリートの静弾性係数は含水率と高い相関があることが知られており^{たとえ¹⁶⁾}、本実験でも表層に近い部分での静弾性係数の低下は、含水率の低下によるものと考えられる。

5.3 強度予測式による算定結果と実測値の比較

模擬部材の乾式コア供試体により測定された圧縮強度分布と、供試体実験により決定した強度発現式による圧縮強度の予測値をFig. 9に比較して示す。Fig. 9に線で示した結果が、強度発現式による圧縮強度の予測値である。なお、強度発現式による圧縮強度の算定は、従来の積算温度(DD)と本研究で提案した積算温度含水率(DWD)の2種類の指標を用いたものを比較検討した。

従来の積算温度(DD)の指標を用いた場合、模擬部材の中心部では強度予測式により圧縮強度の実測値を概ね再現できたが、模擬部材の表層において圧縮強度の実測値が小さくなる傾向は捉えられなかった。一方、本研究で提案した積算温度含水率(DWD)の指標を用いた場合、模擬部材の中心部では従来の積算温度と同様の強度発現性状を再現でき、表層では従来では考慮できなかった乾燥の影響により強度発現が停滞する傾向を再現できた。

ただし、模擬部材の表層における強度発現停滞の度合いは、実測値と比較して小さく算定された。

ここで、模擬部材の表層における圧縮強度の実測値と算定値に誤差が生じた要因を検討する。材齢91日の乾式コア供試体の含水率分布(Fig. 6)をみると、模擬部材表層(34mm)の含水率は、養生温度5℃で9.5vol%、養生温度20℃で8.5vol%、養生温度35℃で7vol%となっている。供試体実験から構築した強度予測式においては、十分に水和の進展および圧縮強度の増進が期待できる含水率の大きさであるものの、実際の模擬部材の表層では強度発現が大きく停滞している。この理由として、含水率の低下による水和の停滞のほか、丸山ら¹³⁾が指摘する特定の乾燥状態(含水率)において圧縮強度が低下するメカニズムの影響などが考えられる。本研究においては、後者の実験データが得られていないことから、模擬部材の実験結果から強度予測式の実験係数の修正を行わず、生じた誤差については、今後の検討課題とした。

6. 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式を提案した。

さらに、養生温度(5℃, 20℃, 35℃)を変えた柱と壁を模擬した部材に対して、圧縮強度、静弾性係数および含水率分布を測定し、提案した強度予測式の構造体コンクリートへの適用性を検証した。

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・W・D)の指標を新たに提案し、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。
- 2) 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。
- 3) 模擬部材の圧縮強度は養生温度が低いほど、静弾係数は含水率が低いほど小さくなった。また、表層からの距離が100mm以下では圧縮強度、静弾性係数、含水率のいずれも低下率が大きくなった。
- 4) 新たに提案した積算温度含水率の指標により、模擬部材の内部では従来の積算温度と同様の強度発現性状を再現でき、表層では乾燥の影響により強度発現が停滞する傾向を再現できた。ただし、模擬部材の表層における強度発現停滞の度合いは、実測値と比較して小さく算定された。この理由として、含水率の低下による水和の停滞のほか、コンクリートの含水状態による強度低下のメカニズムなどが考えられ、今後の検討課題とした。

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，1959.10
- 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) 宋倉大樹：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，梶田佳寛，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°C, Concrete and Cement Research vol.66, pp.48-63, 2014
- 14) 日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5)鉄筋コンクリート工事，2009.8
- 15) 湯浅昇ほか，構造体コンクリートの表層から内部にいたる圧縮強度分布，セメント・コンクリート論文集，Vol.51，pp.840-845，1997.12
- 16) 嵩英雄ほか，高温にさらされたコンクリートの性状の変化に関する研究，コンクリート工学年次講演論文集，pp.25-28，1979.5