初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性

STRENGTH DEVELOPMENT OF CONCRETE CURED UNDER HIGH TEMPERATURE CONDITIONS IN AN EARLY AGE

杉山 央*, 梶田佳寛**

Hisashi SUGIYAMA and Yoshihiro MASUDA

The long term strength development of concrete cured under high temperature conditions in an early age was studied. High temperature conditions at curing were planned with systematic varying of the temperature-time factors in the experiment. The strength development of concrete was found to be affected by maximum temperature, pre-curing time, post-curing temperature and heating rate. The time dependence of the effect of curing temperature on the strength development of concrete was indicated. The strength of concrete at a long age strongly depends on the curing temperature at the time of 0 - 0.5 day since concrete is mixed up.

Keywords : *High temperature condition at curing, Strength development, Maximum temperature, Pre-curing time, Post-curing temperature, Heating rate*

高温履歴, 強度発現, 最高温度, 前養生時間, 後養生温度, 温度上昇勾配

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造建築物の品質の向上、施工の合理化を目的として、これまでの壁や床などの部材に加えて、柱や梁についてもコンクリートのプレキャスト化が進められている^{1)~8)}。プレキャストコンクリートでは、工場での生産効率を上げるため、コンクリート打込み後初期の段階で加熱養生すなわち人為的に高温を履歴させる手法を用いて、初期材齢でのコンクリートの強度発現を促進させている。このため、加熱養生条件と初期強度発現の関係を明らかにすることが重要視され⁹⁾、その後の強度発現に関しては軽視される傾向にあった。しかし、柱や梁などの構造体として用いられる場合には、建築物の供用開始以後の強度を把握あるいは推定することが必要であり、長期的な強度発現性を明らかにしておくことが求められる。

一方、鉄筋コンクリート造建築物の高層化・大型化の傾向に伴って、高強度のマスコンクリートを使用するケースが増えている。マスコンクリートの内部では、自己のセメント水和熱が蓄積されることによって温度の上昇が生じ、非定常な高温履歴を受ける。この初期材齢での高温履歴はマスコンクリートの長期的な強度発現性に影響を及ぼす¹⁰⁾。マスコンクリートを高強度化した場合、単位セメント量が増加するため、さらに顕著な高温履歴および強度発現への影

響が現れ、しばしば問題とされている^{1),2),7),8),10)}。しかし、高温履歴と強度発現に関する定性的な傾向はすでに明らかにされているものの^{10)~14)}、定量的あるいは系統的な検討は十分に行われていないのが実状である。

非定常な高温履歴には温度と時間の組み合わせにより、無数の条件が存在する。従って、コンクリートの強度発現に対して、どのような条件の高温履歴が、どのような影響を、どれだけ及ぼすのかを系統的に検討する必要がある。

このような背景のもと、本研究では高温履歴の特性をコンクリートの練上がりから温度上昇開始までの温度および時間、温度上昇勾配、最高温度、温度下降勾配、温度下降の終了以後の温度などの種々の要因（以降、温度履歴要因と記す）を用いてモデル的に表し、それぞれの温度履歴要因がコンクリートの材齢1日から365日までの強度発現に及ぼす影響を詳細に検討した。

なお、本研究では、強度発現および強度増進の用語を次のように使い分けた。

- ・強度発現(性); 材齢0(コンクリートの練上がり時)から材齢 t 日にかけての強度の増加量あるいは増加の傾向
- ・強度増進(性); 材齢 t_1 日から t_2 日までの期間($t_1 < t_2$)の強度の増加量あるいは増加の傾向

* 建設省建築研究所第2研究部 主任研究員・工修

** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

Senior Research Scientist, Dept. of Building Materials and Components, Building Research Institute, Ministry of Construction, M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

2. 実験概要

あらかじめ計画した温度履歴条件をコンクリート供試体に履歴させ、所定材齢で圧縮強度試験を行った。

2.1 使用材料および割合

セメントにはTable 1に示す性質の普通ポルトランドセメントN1およびN2を1:1の割合で混合して用いた。骨材にはTable 2に示す性質の鬼怒川産川砂Sおよび岩瀬産碎石Gを用いた。コンクリートの割合をTable 3に示す。なお、高温履歴によってコンクリート中の空気が熱膨張し、強度に影響を及ぼすことも考えられる。このため、消泡剤を用いてコンクリート中の空気量を低減した。

2.2 コンクリート供試体の形状・寸法および養生方法

コンクリート供試体は $\phi 100 \times 200$ mmの円柱形とし、個数は各条件、各材齢ごとに3個ずつとした。実際のプレキャストコンクリート部材やマスコンクリート部材においては、表層部で水分の逸散が、また、内部で水分の移動が生じており、これらが強度に及ぼす影響も少なくないと考えられる。しかし、本実験では水分の供給および逸散のほとんどない封かん状態でコンクリート供試体を養生し、温度履歴と強度発現の関係のみを検討することとした。型枠にはJIS A 5308 付属書 11に規定するブリキ製の軽量型枠を使用し、コンクリートを打ち込んだ直後に型枠ごと封かん状態にした。その後、圧縮強度試験材齢にて開封・脱型した。また、練混ぜバッチ間の強度差を補正する目的で、それぞれの練混ぜバッチにおいて標準

養生のコンクリート供試体も作製した。

2.3 温度履歴条件

本実験では、初期材齢での高温履歴をFig.1に示す高温履歴パターンにモデル化して、温度履歴条件を計画した。なお、Fig.1の中で、 T_{pre} はコンクリートの練上りから温度上昇開始までの期間の温度（以降、前養生温度と記す）、 t_{pre} はコンクリートの練上りから温度上昇開始までの時間（以降、前養生時間と記す）、 T_{max} は最高温度、 T_{post} は温度下降の終了以後の温度（以降、後養生温度と記す）、 S_{heat} は温度上昇勾配、 S_{cool} は温度下降勾配である。温度上昇勾配の標準値は $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ に、また、温度下降勾配の標準値は $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ に設定した。Fig.1の高温履歴パターンを基にそれぞれ温度履歴要因を設定して、2シリーズ、計27パターンの温度履歴条件を計画した。温度履歴条件のシリーズAをFig.2に、また、シリーズBをFig.3に示す。

既往の研究^{10),13),14)}では、各種の温度履歴要因の中でコンクリートの強度発現に最も大きな影響を及ぼす要因は最高温度であることが指摘されている。そこで、シリーズAでは最高温度、前養生時間、および最高温度と前養生時間の組み合わせによる影響を検討した。すなわち、最高温度90、75、60、45 $^{\circ}\text{C}$ のそれぞれの場合について、前養生時間を0.5h、3h、24hに設定した。一方、シリーズBでは、I)

Table 1 Properties of ordinary portland cements

Symbol	Specific gravity	Blaine* (cm ² /g)	Setting time (h-min)		Mineral composition (%)			
			Initial	Final	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
N1	3.16	3330	2-15	3-15	53.7	20.9	8.6	8.8
N2	3.15	3250	2-25	3-58	52.1	22.1	9.5	8.2

* Blaine specific surface area

Table 2 Properties of aggregates

	Symbol	Kind	Max. size (mm)	Specific gravity*	Adsorption (%)	Fineness modulus
Fine	S	River sand	5	2.58	2.07	2.88
Coarse	G	Crushed stone	20	2.66	0.68	6.64

* At saturated surface-dried condition

Table 3 Mix proportion of concrete

W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Unit content (kg/m ³)				Admixture* (C×%)	
			W	C	S	G	Ad1	Ad2
40	18.0±1.5	1.0±0.7	160	400	872	972	1.0	0.1

* Ad1; Water reducing agent, Ad2; Air reducing agent

Fig.1 High temperature pattern at curing

Fig.2 Temperature-time conditions (Series A)

前養生温度、Ⅱ)後養生温度、Ⅲ)温度上昇勾配、Ⅳ)温度下降勾配、Ⅴ)前養生温度・最高温度・後養生温度の組み合わせの影響を検討した。なお、シリーズBでは、すべての温度履歴条件に共通して前養生時間を3hとした。これらに加えて、比較のため、20℃一定の温度条件(封かん養生)を計画した。

実験では、計画した温度でコンクリートが練り上がるように、練混ぜの24時間前から使用材料およびミキサを所定の温度に保持し、所定の温度の実験室でコンクリートの練混ぜおよびコンクリート供試体の成形を行った。コンクリート供試体成形後の温度の制御は、コンクリート供試体の中心部が計画した温度履歴条件と同じ温度を履歴するように加熱養生槽内の温度を調節することで行った。なお、温度履歴の開始時間はコンクリートの練上がり時とした。コンクリート供試体が実際に履歴した温度と計画した温度履歴条件との差は、すべての温度履歴条件を通じて、 $\pm 3^\circ\text{C}$ の範囲内であった。

Fig.3 Temperature-time conditions (Series B)

2.4 圧縮強度試験

材齢1, 3, 7, 28, 91 および 365 日において圧縮強度試験を行った。試験方法はJIS A 1108 に従った。

3. 実験結果および考察

3.1 最高温度および前養生時間と強度発現の関係

シリーズAの強度発現をFig.4に示す。なお、Fig.4には、高温履歴を受けたコンクリート(以降、高温履歴コンクリートと略記)とともに、20℃一定の温度条件で封かん養生したコンクリート(以降、20Sコンクリートと略記)の強度発現も示した。前養生時間が0.5hおよび3hの高温履歴コンクリートでは、20Sコンクリートに比べて、材齢1日までの強度発現が著しい。しかし、材齢1日以降の強度増進は緩やかとなり、7日で20Sコンクリートの強度を下回り、その後は材齢の経過とともに20Sコンクリートとの強度の差が大きくなる。前養生時間が24hの高温履歴コンクリートでは、20Sコンクリートに比べて、材齢1日から3日までの強度増進が著しい。しかし、3日以降の強度増進は緩やかとなり、28日で20Sコンクリートの強度を下回る。

高温履歴コンクリートの強度発現を定量的に検討するため、(1)式に示す強度発現率を定義した。なお、20Sコンクリートの場合、(1)式の F_t には(2)式に示すものを用いた。また、高温履歴コンクリートの場合、練上がり温度が20℃の条件では(1)式の F_t に(3)式に示すものを用い、練上がり温度が20℃以外の条件では(1)式の F_t に(4)式に示すものを用いた。

Fig.4 Strength development of concrete (Series A)

$$f_t = \frac{F_t}{20S F_{365}} \times 100 \quad (1)$$

ただし、20Sコンクリートの場合、

$$F_t = 20S F_t \quad (2)$$

高温履歴コンクリートの場合、

$$F_t = h F_t \times \frac{20W(20S) F_t}{20W(h) F_t} \quad (\text{練上がり温度} = 20^\circ\text{C}) \quad (3)$$

$$F_t = h F_t \quad (\text{練上がり温度} \neq 20^\circ\text{C}) \quad (4)$$

ここに、 f_t : 材齢 t 日における強度発現率 (%)

$20S F_{365}$: 20Sコンクリートの材齢365日における強度 (N/mm²)

$20S F_t$: 20Sコンクリートの材齢 t 日における強度 (N/mm²)

$h F_t$: 高温履歴コンクリートの材齢 t 日における強度 (N/mm²)

$20W(20S) F_t$: 20Sコンクリートと同じ練混ぜバッチより採取した標準養生コンクリートの材齢 t 日における強度 (N/mm²)

$20W(h) F_t$: 高温履歴コンクリートと同じ練混ぜバッチより採取した標準養生コンクリートの材齢 t 日における強度 (N/mm²)

(1)式の強度発現率では、20Sコンクリートの材齢365日の強度を基準の強度としている。ただし、この基準強度はあくまでも終局強度ではないため、温度履歴条件によっては(1)式の強度発現率が100%を超える場合も考えられる。(3)式では、材料の計量誤差などによって発生する練混ぜバッチ間の強度差を補正する目的で、各々の練混ぜバッチにおける標準養生コンクリートの強度を用いて、20Sコンクリートの強度を基準とした強度の補正を行っている。ただし、

B・I・1、B・I・2、B・I・4、B・V・1、B・V・2およびB・V・4では、練上がり温度が20℃ではないため、高温履歴コンクリートと同一の練混ぜバッチから適切な標準養生コンクリートを得ることができなかった。そこで、(4)式に示すように練混ぜバッチ間の強度差の補正は行わず、(1)式における F_t として、 $h F_t$ の値をそのまま用いることとした。

各材齢における最高温度と強度発現率の関係を前養生時間ごとに Fig.5 に示す。なお、Fig.5 の中で最高温度20℃の値は、20Sコンクリートの強度発現率である。最高温度の違いにより高温履歴コンクリートの強度発現率が大きく異なることが明らかである。

前養生時間0.5hおよび3hでは、最高温度が高いほど f_t が大きい。 f_t を比較すると、20Sコンクリートで20%を示したのに対して、前養生時間0.5hの場合には、最高温度45℃で23%、60℃で34%、75℃で42%、90℃で44%を示した。また、前養生時間3hの場合には、最高温度45℃で27%、60℃で38%、75℃で46%、90℃で47%を示した。材齢1日以降の強度発現率の増加は最高温度が高いほど小さくなり、3日から7日にかけては最高温度によらず大差ない強度発現率を示した。材齢28日以降では、最高温度が高いほど強度発現率が小さくなる。 f_{365} を比較すると、20Sコンクリートの100%に対して、前養生時間0.5hの場合には、最高温度45℃で87%、60℃で84%、75℃で79%、90℃で73%を示した。すなわち、最高温度の違い(20～90℃の範囲)により、材齢365日の強度発現率には27%の差が生じた。また、前養生時間3hの場合には、最高温度45℃で94%、60℃で86%、75℃で84%、90℃で82%を示

Fig.5 Relation between maximum temperature and the degree of strength development (Series A)

Fig.6 Relation between pre-curing time and the degree of strength development (Series A)

した。すなわち、最高温度の違いにより、材齢365日の強度発現率には18%の差が生じた。

前養生時間24hでは、最高温度が高いほど f_3 が大きい。しかし、材齢3日以降の強度発現率の増加は最高温度が高いほど小さくなり、材齢91日以降では、最高温度が高いほど強度発現率が小さくなる。 f_{365} を比較すると、最高温度45℃で97%、60℃で93%、75℃で90%、90℃で88%を示した。すなわち、最高温度の違いにより、材齢365日の強度発現率には12%の差が生じた。前養生時間72hの高温履歴コンクリートでは、材齢3日から91日にかけての強度発現率が20Sコンクリートよりも大きく、 f_{365} は20Sコンクリートと大差ない98%を示した。すなわち、72h以降の高温履歴は長期的な強度発現を著しく停滞させることはない。

各材齢における前養生時間と強度発現率の関係を最高温度ごとにFig.6に示す。同じ最高温度であっても、前養生時間が短い高温履歴コンクリートほど、すなわち、早期に高温履歴を受けたコンクリートほど長期材齢での強度発現率が小さい。また、前養生時間が異なることによる強度発現率の差異は最高温度が高い場合ほど著しい。前養生時間0.5hと24hの場合について f_{365} を比較すると、その差は最高温度45℃で10%、60℃で9%、75℃で11%、90℃で14%であった。一方、 f_1 を比較すると、前養生時間0.5hの方が3hの場合よりも小さい。すなわち、コンクリート打ち込み直後の高温履歴は、初期強度発現に対しても、有利に働かないことがわかる。

以上より、最高温度は高温履歴コンクリートの強度発現に大きな影響を及ぼす温度履歴要因であるが、同じ最高温度であっても前養生時間が異なると、すなわち、最高温度を履歴するタイミングが異なると、コンクリートの強度発現は大きく異なることが明らかである。既往の研究では、高温履歴と強度発現の関係を検討する際に、高温履歴の特性を表すパラメータとして最高温度を用いる場合が多く見受けられた^{15)~17)}。比較的限られた範囲の温度履歴条件については、最高温度を目安として強度発現の評価・予測を行っても大きな誤差が生じないと考えられる。しかし、広い範囲の温度履歴条件についても強度発現の評価・予測を可能とするためには、最高温度以外の温度履歴要因を考慮する必要がある。

3.2 温度履歴要因と強度発現の関係

シリーズBの強度発現をFig.7に示す。また、各材齢における温度履歴要因と強度発現率の関係をFig.8に示す。なお、B・Vは前養生温度、最高温度および後養生温度のそれぞれの要因を変えたシリーズであるが、Fig.8では最高温度との関係を示した。

B・Iでは、前養生温度が高いほど材齢1日での強度発現率は大きい、7日以降の強度発現率は小さくなる傾向が認められる。しかし、前養生温度の違いによる強度発現率の差異は小さい。前養生温度の違い(5~50℃の範囲)により生じた強度発現率の差は、材齢1日で5%、365日で6%であった。

B・IIでは、後養生温度が高いほど3日以降の材齢での強度発現率が大きくなる傾向が認められ、この傾向は材齢の経過とともに著しくなる。すなわち、後養生温度が高いと長期材齢での強度増進を促進させ、後養生温度が低いと長期材齢での強度増進を停滞させることがわかる。後養生温度の違い(5~35℃の範囲)により生じた強度発現率の差は、材齢3日で6%、365日で18%であった。

B・IIIでは、温度上昇勾配が大きいほど材齢3日以降の強度発現率

が小さくなる傾向が認められる。特に、B・III-1(温度上昇勾配20℃/h)ではこの傾向が著しく、材齢365日の強度発現率は74%であった。また、B・III-1は温度上昇勾配が5℃/h以下の条件に比べて、材齢1日での強度発現率も小さい。すなわち、コンクリートの練上がりから0.5日までの期間に急激な温度上昇を伴った高温履歴を受けると、材齢1日の段階で強度発現の停滞傾向が現れることがわかる。温度上昇勾配の違い(1~20℃/hの範囲)により生じた強度発現率の差は、材齢365日で15%であった。

B・IVでは、温度下降勾配が大きいほど、すなわち早期に20℃まで降温した条件ほど材齢1日での強度発現率は小さいが、28日以降の強度発現率が大きくなる傾向が認められる。しかし、温度下降勾配の違いによる強度発現率の差異は小さい。温度下降勾配の違い(0.5~10℃/hの範囲)により生じた強度発現率の差は、材齢365

Fig.7 Strength development of concrete (Series B)

Fig.8 Relation between the temperature-time factors and the degree of strength development (Series B)

日で6%であった。

B・Vでは、材齢91日および365日において、温度履歴条件の違いによる強度発現率の差異が小さい。この理由としては、B・V-1およびB・V-2では最高温度が高いことによって長期材齢での強度増進が停滞する傾向と、後養生温度が高いことによって長期材齢での強度増進が促進される傾向とが相まって、長期材齢でB・V-3と大差ない強度発現率を示したと考えられる。また、B・V-4では後養生温度が低いため、材齢3日以降の強度増進が停滞したと考えられる。

3.3 温度履歴要因が強度発現に及ぼす影響についての定量的な検討

3.1 および3.2の結果より、高温履歴コンクリートの強度発現を検討するには最高温度などの単一のパラメータと関連づけることは難しく、高温履歴の特性を表す複数の温度履歴要因がパラメータとして必要であること、また、それぞれの温度履歴要因によって強度

発現に及ぼす影響の大きさは異なることが明らかになった。そこで、各々の温度履歴要因が高温履歴コンクリートの強度発現に及ぼす影響の定量的な検討を統計解析の手法を用いて行った。ここでは、20Sコンクリートの温度履歴条件および強度発現率を基準とした(5)式および(6)式を定義し、各材齢での高温履歴コンクリートと20Sコンクリートの強度発現率の差 Δf_t と温度履歴要因との関係を前進ステップワイズ回帰分析を用いて数値化した。

$$f_t = {}_{20S}f_t + \Delta f_t \quad (5)$$

$$\Delta f_t = a_1 \times (T_{pre} - 20) + a_2 \times (T_{max} - 20) + a_3 \times (T_{post} - 20) + a_4 \times S_{heat} + a_5 \times S_{cool} + a_6 \times t_{pre} \quad (6)$$

ここに、 f_t : 高温履歴コンクリートの材齢 t 日における強度発現率(%)

${}_{20S}f_t$: 20Sコンクリートの材齢 t 日における強度発現率(%)

Δf_t : 高温履歴コンクリートと20Sコンクリートの材齢 t 日における強度発現率の差(%)

T_{pre} : 前養生温度(°C)

T_{max} : 最高温度(°C)

T_{post} : 後養生温度(°C)

S_{heat} : 温度上昇勾配(°C/h)

S_{cool} : 温度下降勾配(°C/h)

t_{pre} : 前養生時間(h)

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$: 偏回帰係数

前進ステップワイズ回帰分析とは、各ステップごとに分析を行い、指定したF-in値以上で最も大きなF値を持つ変数を回帰方程式に取り込み、回帰方程式に含まれている変数の中で指定したF-out値よりも小さなF値を持つ変数を回帰方程式から削除する手法である。従って、 Δf_t と密接な関係にある温度履歴要因は早いステップ段階で回帰方程式に取り込まれ、 Δf_t にあまり関係のない温度履歴要因は回帰方程式に取り込まれない。ここでは、F-in値として4.0、F-out値として2.0を設定した。

前進ステップワイズ回帰分析の結果をTable 4に示す。なお、Table 4中の()内の数値は標準化回帰係数である。標準化回帰係数とは、データをすべて平均0、分散1に標準化し、それを基に計算した回帰係数であり、標準化回帰係数の絶対値を比べることで Δf_t に対する各々の温度履歴要因の貢献度(影響の大きさ)を比較することができる。

Δf_1 については、最高温度が最も密接な関係にあり、卓越した影響を及ぼしている。最高温度が1°C高いと、材齢1日での強度発現率は約0.4%大きくなる。次いで、前養生時間が密接な関係にあり、前養生時間が0.5hの場合のように温度上昇の開始時期が早いと、材齢1日での強度発現率は小さくなる。また、温度上昇勾配および温度下降勾配の影響は小さい。

Δf_3 については、前養生時間および後養生温度が取り込まれたが、回帰方程式の寄与率が0.62と低く、密接な関係は認められない。

Δf_7 については、温度上昇勾配および前養生時間が密接な関係にあり、大きな影響を及ぼしている。前養生時間が長いほど、すなわち、高温を履歴する時期が遅いほど材齢7日の強度発現率は大きくなる。また、後養生温度が高いほど材齢7日の強度発現率は大きくなる。他方、温度上昇勾配、前養生温度および最高温度が大きいほ

Table 4 Results of stepwise regression analysis

Δf_t	Step	Coefficient a						Multiple R ²	R ² change
		T _{pre}	T _{max}	T _{post}	S _{heat}	S _{cool}	t _{pre}		
Δf_1	1	-	0.43	-	-	-	-	0.963	-
	2	-	0.37	-	-	-	1.11	0.969	0.006
	3	-	0.40	-	-0.44	-	1.46	0.976	0.007
	4	-	0.42	-	-0.39	-0.75	1.66	0.981	0.005
		-	(0.96)	-	(-0.12)	(-0.11)	(0.23)		
Δf_3	1	-	-	-	-	-	0.53	0.550	-
	2	-	-	0.23	-	-	0.52	0.624	0.074
		-	-	(0.27)	-	-	(0.73)		
Δf_7	1	-	-	-	-0.94	-	-	0.393	-
	2	-	-	-	-1.26	-	0.28	0.629	0.236
	3	-	-0.08	-	-0.80	-	0.32	0.686	0.057
	4	-	-0.11	0.28	-0.70	-	0.34	0.747	0.061
	5	-0.28	-0.08	0.47	-0.86	-	0.33	0.803	0.056
		(-0.31)	(-0.41)	(0.43)	(-0.57)	-	(0.61)		
Δf_{28}	1	-	-0.23	-	-	-	-	0.676	-
	2	-	-0.28	-	-	-	0.30	0.799	0.123
	3	-	-0.30	0.46	-	-	0.33	0.881	0.082
	4	-	-0.24	0.42	-0.57	-	0.33	0.906	0.025
	5	-0.29	-0.21	0.61	-0.73	-	0.32	0.935	0.029
		(-0.23)	(-0.78)	(0.40)	(-0.34)	-	(0.43)		
Δf_{91}	1	-	-0.31	-	-	-	-	0.806	-
	2	-	-0.37	-	-	-	0.31	0.887	0.081
	3	-	-0.28	-	-0.87	-	0.32	0.923	0.036
	4	-	-0.31	0.32	-0.77	-	0.34	0.947	0.024
	5	-0.31	-0.28	0.52	-0.94	-	0.33	0.967	0.021
		(-0.19)	(-0.79)	(0.26)	(-0.35)	-	(0.34)		
Δf_{365}	1	-	-0.31	-	-	-	-	0.837	-
	2	-	-0.35	-	-	-	0.22	0.879	0.042
	3	-	-0.37	0.41	-	-	0.24	0.921	0.042
	4	-	-0.30	0.36	-0.69	-	0.25	0.945	0.024
	5	-0.29	-0.27	0.55	-0.85	-	0.24	0.964	0.019
		(-0.18)	(-0.79)	(0.29)	(-0.32)	-	(0.26)		

Forward selection stepwise regression F-in = 4.0, F-out = 2.0

(); Standardized coefficient

ど材齢 7 日の強度発現率は小さくなる。

Δf_{28} については、最高温度が最も密接な関係にあり、その影響も大きい。最高温度のみを変数とした場合には寄与率が 0.68 と低く、前養生時間、後養生温度、温度上昇勾配などを変数に取り込むことにより、寄与率が 0.90 以上になる。

Δf_{91} および Δf_{365} についても、最高温度、前養生時間、後養生温度、温度上昇勾配および前養生温度を変数に用いることで、寄与率が高くなる。材齢 28 日、91 日および 365 日では、前養生時間が短く、前養生温度および最高温度が高く、温度上昇勾配が急激で、後養生温度が低い条件ほど強度発現率が小さくなることわかる。

3.4 履歴温度がコンクリートの強度発現に及ぼす影響の時間依存性

3.3 の結果より、コンクリートの強度発現に及ぼす高温履歴の影響は、コンクリートの練上がり起点とした経過時間によって異なるものと考えられる。そこで、初期材齢を 0 ～ 0.5 日、0.5 ～ 1 日、1 ～ 2 日、2 ～ 3 日、3 ～ 5 日および 5 日以降の 6 区間に分け、それぞれの区間の平均履歴温度と、各材齢における高温履歴コンクリートと 20S コンクリートの強度発現率の差 Δf_t の関係を (7) 式で

Table 5 Results of multiple regression analysis

Δf_t	Coefficient b						Multiple R ²
	T [*] _{0-0.5d}	T [*] _{0.5-1d}	T [*] _{1-2d}	T [*] _{2-3d}	T [*] _{3-5d}	T [*] _{5d-}	
Δf_1	0.19 (0.21)	0.42 (0.79)	- -	- -	- -	- -	0.968
Δf_3	0.01 (0.02)	-0.10 (-0.47)	0.39 (1.20)	-0.05 (-0.09)	- -	- -	0.816
Δf_7	-0.27 (-0.59)	-0.18 (-0.67)	0.28 (0.65)	-0.36 (-0.45)	0.75 (0.73)	-0.07 (-0.06)	0.884
Δf_{28}	-0.49 (-0.77)	-0.09 (-0.24)	-0.04 (-0.06)	-0.20 (-0.17)	0.64 (0.44)	0.27 (0.17)	0.935
Δf_{91}	-0.59 (-0.73)	-0.14 (-0.28)	-0.06 (-0.07)	-0.32 (-0.22)	0.30 (0.16)	0.70 (0.36)	0.960
Δf_{365}	-0.62 (-0.78)	-0.07 (-0.16)	-0.17 (-0.23)	-0.09 (-0.06)	-0.08 (-0.04)	0.97 (0.50)	0.953

(); Standardized coefficient

定義し、その関係を重回帰分析を用いて検討した。なお、ここでは 20S コンクリートの温度履歴条件および強度発現率を基準としたため、各区間の平均履歴温度についても 20℃ を基準とした (8) 式に示す T^{*} を重回帰分析に用いた。

$$\Delta f_t = b_1 \times T^{*}_{0-0.5d} + b_2 \times T^{*}_{0.5-1d} + b_3 \times T^{*}_{1-2d} + b_4 \times T^{*}_{2-3d} + b_5 \times T^{*}_{3-5d} + b_6 \times T^{*}_{5d-} \quad (7)$$

ただし、

$$T^{*}_{t_1-t_2} = T_{t_1-t_2} - 20 \quad (8)$$

ここに、 Δf_t : 高温履歴コンクリートと 20S コンクリートの材齢 t 日における強度発現率の差 (%)

T_{t₁-t₂}: 時間 t₁ から t₂ にかけての平均履歴温度 (℃)b₁, b₂, b₃, b₄, b₅, b₆: 偏回帰係数

重回帰分析の結果を Table 5 に示す。なお、Table 5 中の () 内の数値は標準化回帰係数である。

Δf_1 については、0 ～ 0.5 日の平均履歴温度に比べて 0.5 ～ 1 日の平均履歴温度の影響が大きく、0.5 ～ 1 日の高温履歴は材齢 1 日までの強度発現を著しく促進させることがわかる。

Δf_3 については、1 ～ 2 日の平均履歴温度の影響が大きく、1 ～ 2 日の高温履歴は材齢 3 日での強度発現率を大きくする。逆に、0.5 ～ 1 日の高温履歴は材齢 3 日での強度発現率を小さくする傾向にある。

Δf_7 については、3 ～ 5 日の平均履歴温度の影響が大きく、3 ～ 5 日の高温履歴は材齢 7 日での強度発現率を大きくする。逆に、0 ～ 0.5 日および 0.5 ～ 1 日の高温履歴は材齢 7 日での強度発現率を小さくする。なお、 Δf_3 および Δf_7 の回帰方程式については、3.3 において温度履歴要因を変数に用いた場合よりも高い寄与率を示しており、各区間の平均履歴温度を変数に用いた方が強度発現率を的確に推定できることがわかる。

Δf_{28} および Δf_{91} については、3 日以前の平均履歴温度が高いほど強度発現率は小さくなり、逆に、3 日以降の平均履歴温度が高いほど強度発現率は大きくなる。強度発現率を低下させる要因の中で、

最も影響が大きいのは0～0.5日の平均履歴温度であり、次いで0.5～1日の平均履歴温度である。すなわち、高温履歴を受ける時期が早期であるほど、長期材齢での強度発現率の低下が著しいことがわかる。

Δf_{365} については、5日以前の平均履歴温度が高いほど強度発現率は小さくなり、逆に、5日以降の平均履歴温度が高いほど強度発現率は大きくなる。 Δf_{28} および Δf_{91} と同様に、0～0.5日の平均履歴温度の影響が著しく、0～0.5日の平均履歴温度が1℃高いと材齢365日での強度発現率は約0.6%小さくなる。また、2～3日および3～5日の平均履歴温度の影響は小さい。

以上の通り、コンクリートの強度発現に及ぼす履歴温度の影響には時間依存性があることが明らかになった。高温履歴を受けたコンクリートの強度発現を検討するには、最高温度や前養生時間などの温度履歴要因をパラメータに用いるよりも、履歴温度の影響を材齢(時間)ごとに区分してパラメータに用いる方が汎用性が高いと考えられる。今後は、強度発現に及ぼす履歴温度の影響を連続的に時間積分する方向への発展が必要である。

4. まとめ

高温履歴を受けたコンクリートの強度発現性を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 温度履歴要因の中でも最高温度は強度発現に大きな影響を及ぼす要因である。最高温度が高いほど材齢1日での強度は大きい、材齢28日以降の強度は小さくなる。
- 2) 前養生時間が強度発現に及ぼす影響は大きい。同じ最高温度であっても前養生時間が短いほど、すなわち、早期に高温履歴を受けたコンクリートほど長期的な強度発現は小さい。
- 3) 前養生温度(コンクリートの練上がりから3時間の温度)が強度発現に及ぼす影響は小さい。
- 4) 後養生温度(温度下降の終了以後の温度)が強度発現に及ぼす影響は大きい。後養生温度が高いと長期材齢での強度増進を促進させ、後養生温度が低いと長期材齢での強度増進を停滞させる。
- 5) 温度上昇勾配が大きいほど材齢3日以降の強度増進が停滞する。温度下降勾配が強度発現に及ぼす影響は小さい。
- 6) 最高温度だけを指標として高温履歴を受けたコンクリートの強度発現を推定することはできない。しかし、最高温度、前養生時間、後養生温度、温度上昇勾配および前養生温度をパラメータに用いれば、強度発現を推定することができる。
- 7) コンクリートの強度発現に及ぼす履歴温度の影響には時間依存性がある。高温履歴を受ける時期が早期であるほど長期的な強度発現は小さくなる。特に、コンクリートの練上がりより0.5日間の履歴温度の影響は著しい。

謝辞

本研究の実施にあたり、前田弘美氏(当時建設省建築研究所)、不動建設(株)・宮本鯉輔氏、東洋建設(株)・安田正雪氏、(株)新井組・岩井信彰氏および東海興業(株)・中川雄二氏にご協力いただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 杉山 央, 榊田佳寛, 阿部道彦, 安田正雪, 白石清隆, 塩見伊津夫: 高強度プレキャストコンクリートの促進養生条件と強度性状(その1. 冬期実験の計画および温度履歴), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.1089-1090, 1993.9
- 2) 白石清隆, 榊田佳寛, 阿部道彦, 杉山 央, 安田正雪, 塩見伊津夫: 高強度プレキャストコンクリートの促進養生条件と強度性状(その2. 冬期実験における強度性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.1091-1092, 1993.9
- 3) 塩見伊津夫, 森 浩之: 高強度コンクリートを用いたプレキャスト柱部材の製造実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.1093-1094, 1993.9
- 4) 黒羽健嗣, 黒岩秀介, 後藤和正ほか: 超高強度コンクリートによるPCa柱の製造実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.709-710, 1994.9
- 5) 佐治 昭, 梅本宗宏, 平賀友見: 高層RC造のPCa部材に用いた高強度コンクリートの品質, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.589-590, 1995.8
- 6) 寺井靖人, 徳永 優, 中村敏昭, 梅本宗宏, 直原克己: 高強度プレキャストコンクリートの構造体強度に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.749-750, 1996.9
- 7) 杉山 央, 榊田佳寛, 阿部道彦, 前田弘美, 長谷川拓哉: 高強度プレキャストコンクリート製造時の温度履歴と強度発現性状の関係(その4. 早強ならびに低発熱型セメントを用いた模擬部材の温度履歴), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.757-758, 1996.9
- 8) 前田弘美, 榊田佳寛, 阿部道彦, 杉山 央, 長谷川拓哉: 高強度プレキャストコンクリート製造時の温度履歴と強度発現性状の関係(その5. 早強ならびに低発熱型セメントを用いた模擬部材の強度性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.759-760, 1996.9
- 9) 仕入豊和, 地濃茂雄: コンクリートの初期強度におよぼす温度条件(20～90℃)の影響, 日本建築学会論文報告集, 第320号, pp.1-11, 1982.10
- 10) 地濃茂雄, 杉山 央: マッシブなコンクリートの強度発現傾向(セメントの水和熱の蓄積による高温履歴の影響), 日本建築学会構造系論文報告集, 第436号, pp.1-12, 1992.6
- 11) 地濃茂雄, 仕入豊和: コンクリートの強度発現におよぼす温度履歴条件(20～90℃)の影響, 日本建築学会論文報告集, 第337号, pp.1-11, 1984.3
- 12) Paul Klieger: Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength, Journal of the American Concrete Institute, pp.1063-1081, 1958.6
- 13) 宮本鯉輔, 榊田佳寛, 阿部道彦, 杉山 央, 安田正雪: 高強度プレキャストコンクリート製造時の温度履歴と強度発現性状の関係(その1. 初期温度履歴要因と強度発現性状に関する基礎的実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.713-714, 1994.9
- 14) 杉山 央, 榊田佳寛, 阿部道彦, 宮本鯉輔, 安田正雪: 高強度プレキャストコンクリート製造時の温度履歴と強度発現性状の関係(その2. 初期高温履歴の強度発現への影響を予測する関数モデルの提案), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.715-716, 1994.9
- 15) 高 範勲, 近藤五郎, 森田司郎: 水和熱による初期高温履歴を考慮したコンクリートの強度発現則に関する研究; セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.820-825, 1992
- 16) 紺野弘毅, 山田人司: 超高強度コンクリートの構造体強度と強度管理手法について, コンクリート工学年次報告集, Vol.15, No.1, pp.47-50, 1993
- 17) 田中敏嗣, 竹内 良, 丸岡正知, 富田六郎: 初期材齢に高温履歴を受けた高強度コンクリートの強度発現性状, コンクリート工学年次報告集, Vol.19, No.1, pp.193-198, 1997

(1998年5月15日原稿受理, 1998年7月31日採用決定)