

論文 養生条件および養生温度の違いによって異なる強度発現の予測

渡部 善弘*1・宮下 幹夫*2・新迫 東洋男*3・島 弘*4

要旨: 供試体採取から脱型までの 48 時間の初期養生温度を 5, 20, 35, 50°C とし, その後は 20°C で水中養生とする実験および温度を 5, 20, 35°C と変えて封かん養生する実験を行い, 初期養生温度が早期材齢強度からの長期材齢強度の予測値ならびに標準養生強度と構造体コンクリートとの関係に及ぼす温度の影響を調査した。その結果, 初期養生温度が高くなるほど 7 日強度に対する 28 日強度の比は小さくなること, 封かん養生強度の 20°C 標準養生強度に対する比に及ぼす温度の影響はセメントの種類によって異なることなどが分かった。そして, これらの強度発現曲線は温度影響関数を修正した CEB-FIP の式で予測できることを示した。
キーワード: 標準水中養生, 強度発現曲線, 初期養生温度, 封かん養生, 養生温度, 強度発現予測式

1. はじめに

レディーミクストコンクリートの早期材齢から管理材齢までの強度発現の特性を知っておくことは, その品質管理において有用である。また, 標準養生された供試体の強度から構造体コンクリートの強度を推定する精度を上げることも必要である。

一方で, 現場採取する供試体の型枠の取外し時期は詰め終わってから 16 時間以上 3 日間以内とされ¹⁾, 脱型するまでの間は常温で保存することとなっており²⁾, この期間は特別な温度管理をしないことが一般的である。したがって, 季節によって変化する気温がそのまま初期養生温度となり, その後の強度発現に影響を与える可能性がある^{3),4)}。同じように, 構造体コンクリートも, 季節による温度変化に伴って強度発現状況が変化すると推測される⁵⁾。しかし, 打込みから脱型までの期間の温度が早期材齢強度による長期材齢強度の予測値に及ぼす影響や標準養生強度と構造体コンクリート強度との関係に及ぼす温度の影響は明らかにされていない。

そこで, 本実験では, 試料採取から 48 時間の初期養生温度を 4 水準設定し, その後の 20°C 水中養生の強度発現に与える影響および構造体コンクリートの養生条件を想定した温度が異なる封かん養生供試体の強度発現状況を調査した。さらに, 初期温度が異なる時の標準養生供試体強度の早期材齢による強度推定および現場構造物の強度推定が可能となる強度発現式の検討を行った。

2. 強度発現式の現状

強度発現式としては, 土木学会のコンクリート標準示

方書では, 昭和 61 年 (1986 年) の改訂時に, マスコンクリートの章に, 式(1)の強度発現式が提示された⁶⁾。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} f'_c(91) \quad (1)$$

CEB-FIP モデルコードでは, 圧縮強度の発現式として, 式(2)を提示している⁷⁾。

$$f_{cm}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t_T} \right)^{1/2} \right] \right\} f_{cm} \quad (2)$$

$f_{cm}(t)$: 材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm²)

f_{cm} : 材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm²)

s : セメントの種類による係数

ここに, 養生温度の影響は, 式(3)で補正された材齢 t_T を用いて表すことができるようになっている。

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (3)$$

日本建築学会では, 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説⁸⁾において, 強度発現は式(2)のような指数関数式で推定することが可能であるとし, マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説⁹⁾において, 養生温度の影響として式(3)を取り入れている。

さらに, 日本コンクリート工学会では, マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008¹⁰⁾において, 既往のセメントの種類および養生温度の影響を考慮することに加えて, 水セメント比の影響を取り入れている。

一方, 標準養生した供試体の強度と構造体コンクリートの強度の差に及ぼす気温の影響に関しては, 日本建築

*1 レッツ太平洋生コン株式会社 (正会員)

*2 愛媛県生コンクリート工業組合 中予技術センター

*3 愛媛県生コンクリート工業組合 南予技術センター

*4 高知工科大学 大学院工学研究科基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

学会建築工事標準仕様書・同解説（鉄筋コンクリート工事）¹¹⁾において、構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$ が予想平均気温によって 3 N/mm^2 あるいは 6 N/mm^2 に標準値として示されている。しかし、強度発現式は提示されていないのが現状である。

3. 実験概要

3.1 養生温度および養生条件の設定

養生温度および養生条件による区分を表-1に示す。実験は、 20°C 水中養生の前の養生温度の影響を調べるシリーズと構造体コンクリートを想定したシリーズから成る。本実験で水中養生を始めるまでの期間としては、通常は打込み後1日の場合が多いと思われるが、週末には2日あるいはそれ以上のこともあることおよび初期養生温度の影響が大きく表れることを勘案して48時間とした。その期間の養生は、目標温度 5°C 、 20°C 、 35°C および 50°C の封かん養生とした。構造体コンクリートを想定した養生条件としては、目標温度 5°C 、 20°C および 35°C の封かん養生とした。

3.2 コンクリート

(1) 種類

コンクリートの種類としては、強度発現性状にはセメントの種類が影響を及ぼすことから、本実験では、呼び強度とスランブが同じでセメントの種類を普通ポルトランドセメント(N)および高炉セメントB種(BB)に変えた2種類を用いた。

(2) 使用材料

普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の密度はそれぞれ 3.16 g/cm^3 および 3.04 g/cm^3 である。細骨材は表乾密度が 2.66 g/cm^3 の石灰岩砕砂と表乾密度 2.58 g/cm^3 の海砂を混合したものである。粗骨材は表乾密度が 3.05 g/cm^3 の輝緑岩砕石である。AE減水剤としては密度が 1.08 g/cm^3 の標準型I種であり、練混ぜ水は地下水である。それぞれの材料は、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートの材料規格に適合したものであることを各試験成績書により確認した。

(3) 配合

実施配合を表-2に示す。レディーミクストコンクリート工場で製造した規格品コンクリートを試料とした。

3.3 養生方法

試料採取時のコンクリート温度は、普通ポルトランドセメントを用いたシリーズで約 18°C 、高炉セメントを用いたシリーズで約 24°C である。供試体の作製には、プラスチック製の軽量型枠を使用した。試料採取直後から上面をビニールで二重に覆って封かん状態とし、精度が 5°C 、 20°C は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 35°C 、 50°C は $\pm 1^\circ\text{C}$ の恒温養生装置で所定の時期まで養生した。コンクリート内部温度は、温度測定用のセンサを埋め込んだ供試体を作成し、データロガーにより1時間間隔で測定した。内部温度の履歴を図-1に示す。打込み直後の初期養生温度については、凝結性状は温度によって異なる¹²⁾が、それぞれ凝結が始まるであろう6時間までには所定の温度に達している。

48時間後に、標準養生のシリーズのものは脱型して

表-1 養生温度および養生条件の設定による区分

区分名	養生温度 ($^\circ\text{C}$)		養生条件	
	48時間まで	48時間以後	48時間まで	48時間以後
5S-20W	5	20	封かん	水中
20S-20W	20			
35S-20W	35			
50S-20W	50			
5S	5	封かん		
20S	20			
35S	35			

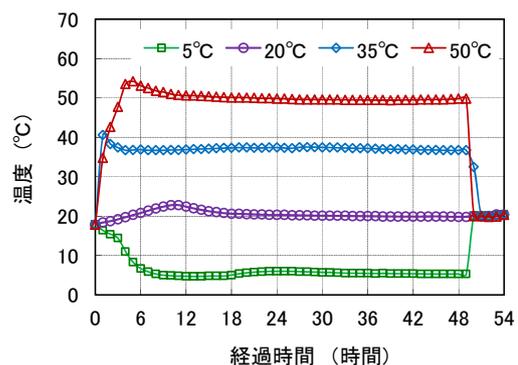
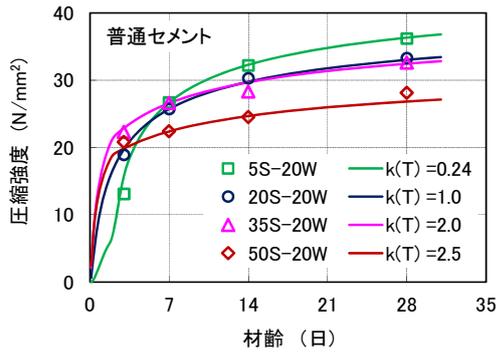


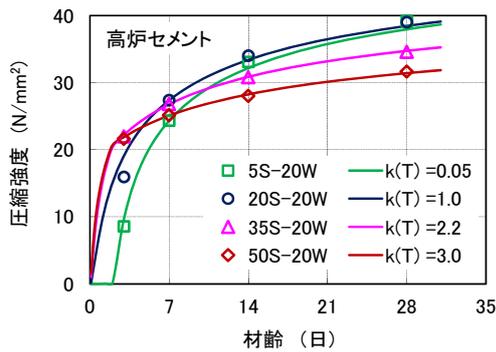
図-1 経過時間とコンクリート内部温度の関係

表-2 実施配合

配合区分名	呼び強度 (N/mm^2)	スランブ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	セメントの種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 kg/m^3						
							水	セメント	細骨材		粗骨材		AE減水剤
									砕砂	海砂	1505	2015	
N	30	18	20	N	51.0	48.8	176	345	435	422	418	628	3.45
BB	30	18	20	BB	50.0	48.5	171	342	432	419	422	633	3.42



(a) 普通ポルトランドセメント



(b) 高炉セメント B 種

図-2 初期 48 時間温度が異なる時の強度発現

20℃の水中に浸漬した。構造体コンクリートを想定したシリーズのものは、引き続き恒温養生装置内で封かん養生を行った。

3.4 試験材齢

20℃水中養生を行なう供試体は、圧縮強度試験の材齢を 3, 7, 14, 28 日とした。構造体コンクリートを想定して封かん養生を行なう供試体および基準とするために区分 20S-20W については、試験材齢を 3, 7, 14, 28, 91 日とした。

なお、圧縮強度試験時は上部を研磨して試験に供した。

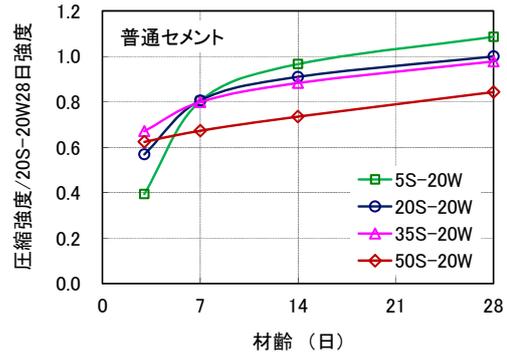
4. 実験結果

4.1 標準養生における初期 48 時間温度の影響

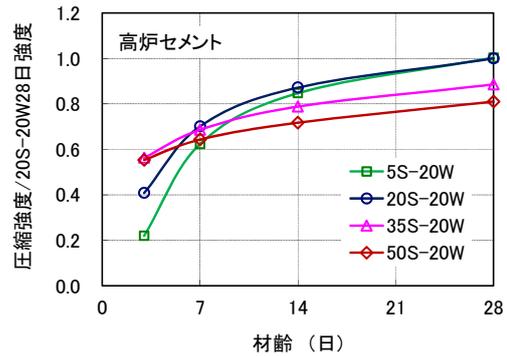
(1) 28 日強度

20℃水中養生前の打込みから 48 時間の養生温度が変わった時の圧縮強度発現状況を図-2 に示す。図中の曲線は、強度発現に及ぼす温度の影響を定量的に表すための手段として関数 $k(T)$ で計算した強度発現予測線であり、詳細は後述する。初期温度が強度発現に影響を及ぼしていることが分かる。

各強度を基準コンクリート 20S-20W の 28 日強度の比で表したものを図-3 に示す。初期養生温度の影響として、例えば Price³⁾ は打込み直後の 2 時間の温度がそれ以降の強度発現に大きな影響を及ぼすという報告をしている。一方、杉山ら¹³⁾ は、初期 3 時間の温度が強度発現



(a) 普通ポルトランドセメント



(b) 高炉セメント B 種

図-3 圧縮強度/20S-20W28 日圧縮強度

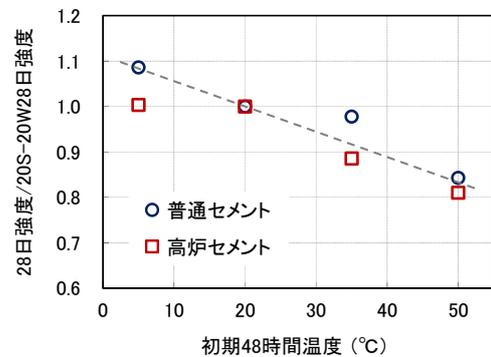


図-4 初期温度と 28 日強度比との関係

に及ぼす影響は比較的的小さいとしている。本実験では、初期 48 時間の温度の違いが標準養生 28 日強度をはじめとする強度発現性状に大きく影響を及ぼしている。

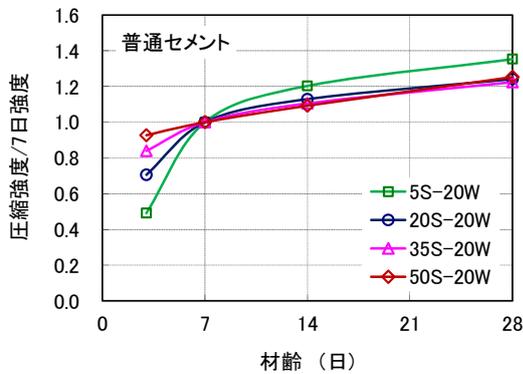
基準の 20S-20W28 日強度に対する 28 日強度の比に及ぼす初期温度の影響を図-4 に示す。Price³⁾ の報告と同じように、初期温度が高いほど 28 日強度が低下する傾向にある。普通ポルトランドセメントにおいては、5℃では 1.09 と基準よりも大きく、35℃では 0.98 で影響は小さいが、50℃では 0.84 と大きな強度低下を示した。高炉セメント B 種の場合は、5℃では 1.01 で影響は小さいが、35℃が 0.89、50℃が 0.81 とさらに強度低下の傾向を示した。すなわち、28 日強度のばらつきの原因の一つとして脱型前の養生温度があるといえる。

(2) 早期材齢強度と 28 日強度との関係

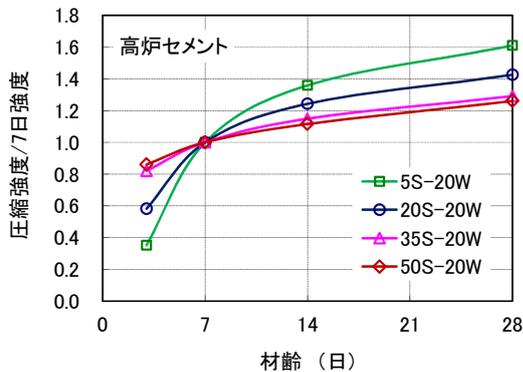
初期養生温度が標準養生 28 日強度に影響を及ぼすが、この 28 日強度を早期材齢強度から予測できるようにしたい。早期の材齢としては、一般に 3 日、4 日あるいは 7 日が考えられるが、脱型時期は最大で 3 日後の可能性があるので、ここでは 3 日あるいは 4 日は早すぎるとして、各材齢強度をそれぞれの 7 日強度の比で表したものを図-5 に示す。

普通ポルトランドセメントにおいて、材齢 3 日強度の比は、初期温度 5°C が 0.49、50°C が 0.93 と 2 倍近くの差がみられた。材齢 7 日から 28 日までの強度の伸びは、5°C が 1.35 と高かったが、35°C および 50°C では 20°C の 1.24 に近かった。

高炉セメント B 種では、材齢 3 日強度の比は、初期温度 5°C が 0.35、50°C が 0.86 と 2 倍以上の差があり、養生温度が高いほど早期材齢強度が高くなる傾向は普通ポルトランドセメントより大きい。材齢 7 日から 28 日までの強度の伸びも、5°C が 1.61 で普通ポルトランドセメントより高い値を示した。35°C および 50°C では、20°C の 1.43 よりも小さく 1.27 程度であった。すなわち、材齢 3 日あるいは 7 日から 28 日にかけての強度の増加率は、初期温度が低いほど大きくなり、その程度は普通ポルトランドセメントよりも高炉セメント B 種の方が大きい結



(a) 普通ポルトランドセメント



(b) 高炉セメント B 種

図-5 圧縮強度 / 7 日圧縮強度

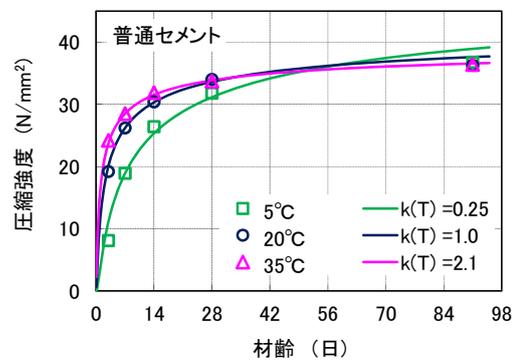
果となった。

4.2 封かん養生における温度の影響

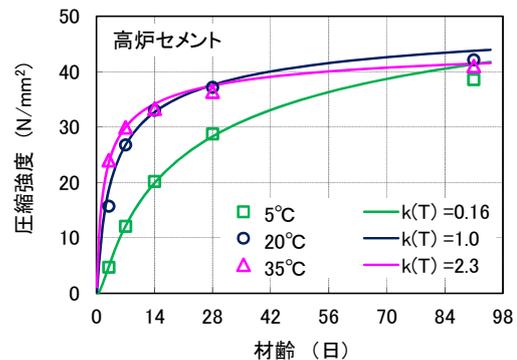
温度が異なる封かん養生における圧縮強度発現状況を図-6 に示す。構造体コンクリートの強度に対する温度の影響について、例えば、寒中コンクリートでは積算温度から強度を推定できると言われているように、封かん養生において温度の違いが強度発現に影響を及ぼしていることが分かる。図中の曲線は発現強度予測線であり、図-2 と同様である。

水中標準養生の強度から構造体コンクリートを想定した封かん養生の強度を推定することを検討するために、各温度における強度発現を標準養生 20S-20W の 28 日強度との比で表したものを図-7 に示す。各材齢における比は、高炉セメント B 種の 5°C では著しく小さくなっており、養生温度およびセメントの種類によって異なる。ただし、長期材齢である 91 日における比は、普通ポルトランドセメントでは、5°C が 1.11、20°C および 35°C が 1.09 (絶対値でそれぞれ +3.5N/mm² および +3.0N/mm²) と温度による大きな違いはなく、高炉セメント B 種では、5°C で 0.99、20°C で 1.08、35°C で 1.05 (絶対値でそれぞれ -0.5N/mm²、+3.1N/mm² および +2.0N/mm²) と温度によって多少異なる結果となった。

各材齢における 20S-20W の強度に対する封かん養生

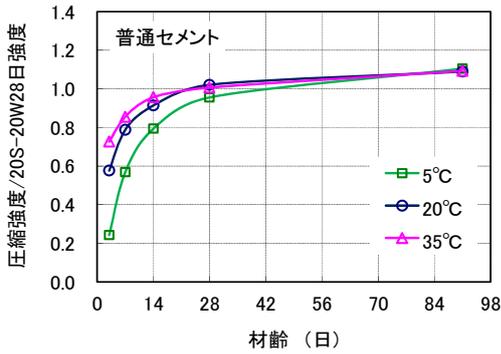


(a) 普通ポルトランドセメント

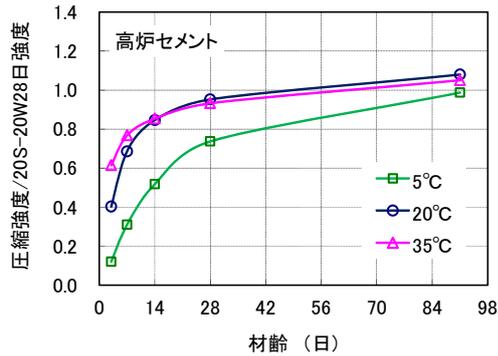


(b) 高炉セメント B 種

図-6 温度が異なる封かん養生の強度発現

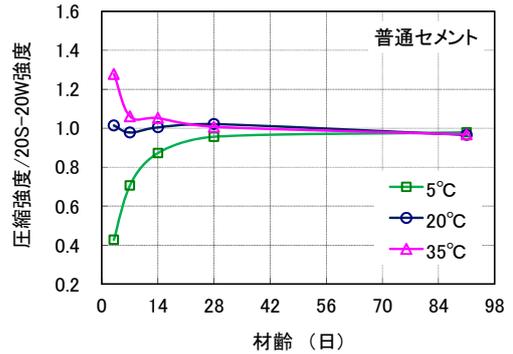


(a) 普通ポルトランドセメント

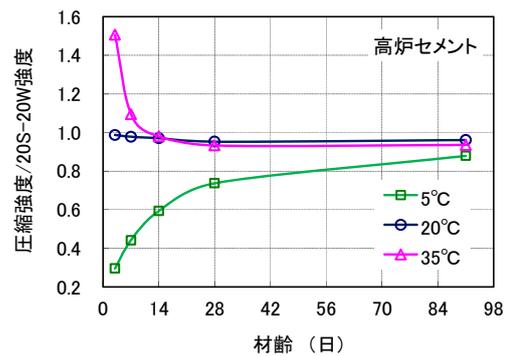


(b) 高炉セメント B 種

図-7 封かん養生強度/20S-20W28 日強度



(a) 普通ポルトランドセメント



(b) 高炉セメント B 種

図-8 封かん養生強度/20S-20W 強度

強度の比を図-8に示す。養生温度が 20°Cにおいては、48 時間以降に養生が水中と封かんだけの違いであるので差は小さい。普通ポルトランドセメントでは、材齢 28 日において 5°Cがやや小さいが、材齢 91 日では温度の影響は見られない。高炉セメント B 種では、温度の影響がより大きく、材齢 91 日においても温度の影響がみられる。セメントの種類で比較した場合、高炉セメントの方が、養生温度の影響を受けやすいことが分かる。

4.3 強度発現の予測式

初期 48 時間温度が異なる時の標準養生 7 日強度から標準養生 28 日強度および温度が異なる封かん養生の強度発現を予測する方法について検討を行った。強度発現式としては、日本建築学会^{8),9)}でも用いられているセメントの種類を表すパラメータが一つのみである式(2)で表される CEB-FIP モデルコード⁷⁾のものを用いることとする。強度発現に及ぼす温度の影響を定量的に表すための手段としては、一般的にマチュリティの概念が用いられる。ここでは、マチュリティを考慮する方法として、式(4)で表される有効材齢方式を用いる。

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i k(T) \quad (4)$$

ここに、

- t_T : 発現式の t に用いる温度補正材齢
- Δt_i : コンクリート温度が T の期間
- $k(T)$: 温度の影響度を表す関数

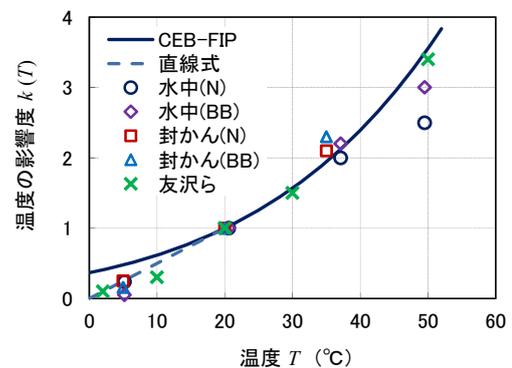


図-9 温度の影響度を表す関数

である。

7 日強度を基準とした強度発現予測値と他の材齢の強度が近くなるように、式(4)におけるそれぞれの温度に対する $k(T)$ の値を決定して計算した結果を図-2および図-6に曲線で示す。なお、式(2)におけるセメントの違いを考慮する係数 s としては、CEB-FIP モデルコードでは、普通ポルトランドセメントで 0.25 が示されているが、高炉セメントの値は示されていない。そこで、普通ポルトランドセメントには 0.25 を用い、高炉セメントについては養生温度が 20°C の時に $k(T)=1.0$ を基準としたいため、 $k(T)$ 値が 1.0 の時に最も予測誤差の小さかった 0.34 をすべての計算に用いた。これらの図から、セメント種類の係数および温度の影響度を表す $k(T)$ の値を適切に設定することにより、養生温度が異なる時の早期材齢強度から

それ以降の強度を式(2)および式(4)を用いて予測できることが分かる。その精度は、平均誤差 $0.73\text{N}/\text{mm}^2$ 、最大誤差は $3.2\text{N}/\text{mm}^2$ であり、品質管理業務では十分な精度である。

温度とその影響度を表す $k(T)$ の値との関係を図-9 に示す。友沢らは、セメントの種類と水セメント比を変えて養生温度を 2, 10, 20, 30, 50°C として 1 年間養生したコンクリートの強度発現性状を報告している¹⁴⁾。図中には、友沢らのデータで普通ポルトランドセメント、水セメント比が 55% の N55 に対して同様のことを行ったものも付加した。この時、セメント種類の係数 s は CEB-FIP や本実験と同じ 0.25 とした。なお、横軸は目標温度と一致していないものがあるが、これは図-1 に示すような温度履歴における試験期間中の平均値としているためである。図中の曲線は CEB-FIP モデルコードの式(3)で表される指数式を示している。実験結果は、10°C 以下の低温域および 50°C において CEB-FIP 式よりも小さくなっている。低温域における CEB-FIP 式は、境界条件として絶対零度の $T=-273^\circ\text{C}$ で $k(T)=0$ とする形で、水の氷点である 0°C で 0.37 という値を持つことになっていることが不適切な可能性があると思われる、実験結果は原点と基準点 (20°C, 1) を結ぶ直線上に近い結果となっている。

5. まとめ

初期 48 時間の養生温度を変えた 20°C 水中養生および温度を変えた封かん養生における強度発現曲線に関する実験結果を以下にまとめる。

- (1) 標準水中養生において、初期養生温度が 28 日強度に大きく影響する。28 日強度の低下度は、初期温度が高いほど大きく、50°C で 0.8~0.85 程度であった。逆に、5°C のように低温の場合は 28 日強度が大きくなる場合がある。これらから、極寒時や暑中においては、供試体の脱型までの保管方法に注意が必要であるといえる。
- (2) 標準水中養生において、材齢 3 日あるいは 7 日から 28 日にかけての強度の増加率は、初期養生温度が低いほど大きくなり、その程度は普通ポルトランドセメントよりも高炉セメント B 種の方が大きい結果となった。
- (3) 温度が異なる封かん養生強度の 20°C 標準養生 28 日強度に対する比は、各材齢で養生温度およびセメントの種類によって異なり、温度の影響度は普通ポルトランドセメントよりも高炉セメントの方が大きい。ただし、91 日における値は、普通ポルトランドセメントでは温度による大きな違いはなく、高炉セメント B 種では温度によって多少異なる結果となった。
- (4) 初期温度が異なる標準水中養生および温度が異なる封かん養生の強度発現は、CEB-FIP モデルコードの強度発

現式を使い、温度の影響度を表す関数を適切に設定することにより、早期強度からそれ以降の強度を予測できる。(5) 強度発現予測における温度の影響度を表す関数の実験結果は、20°C 未満では CEB-FIP モデルコードの指数式よりも小さくなり、原点と基準点 (20°C, 1) を結ぶ直線上に近い結果となった。

謝辞：本研究は JCI 四国支部「四国の生コン技術活性化委員会」の活動の一環として行ったものである。実験の実施にあたっては、委員ならびに南予生コンクリート協同組合メンバーの皆様には、貴重な意見、助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) JIS A 1132 コンクリート強度試験用供試体の作り方, 2006
- 2) JIS A 5308 レディーミクストコンクリート, 2009
- 3) W. H. Price: Factors Influencing Concrete Strength, Journal of the American Concrete Institute, No.47-31, pp.417-432, 1951.2
- 4) 神田 衛, 鈴木 脩, 石渡章介: 夏期におけるコンクリート強度の低下現象に関する一考察, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.11, pp.12-19, 1970.11
- 5) 榊田佳寛, 佐藤幸恵, 友澤史紀: 高強度コンクリートの構造体中での強度発現と調合強度, 日本建築学会構造系論文集, No.537, pp.13-20, 2000.11
- 6) 昭和 61 年制定コンクリート標準示方書[施工編], 土木学会, pp.129-130, 1986
- 7) CEB-FIP Model Code, pp.51-52, 1990
- 8) 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案), 日本建築学会, pp.68-69, 2006
- 9) マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 日本建築学会, p.9, 2008
- 10) マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 日本コンクリート工学会, pp.47-51, 2008
- 11) 建築工事標準仕様書・同解説 (鉄筋コンクリート工事), 日本建築学会, pp.16-17, 2009
- 12) 内川陽平ら: 遅延剤を用いたコンクリートの凝結特性とその予測式, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.279-284, 2007
- 13) 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, No.515, pp.23-30, 1999.1
- 14) 友沢ら: 各種温度条件におけるコンクリートの強度発現性状に関する一実験, 日本建築学会大会学術講演概要集 (東海), pp.299-300, 1985.10