

論文 高強度コンクリートの強度および収縮に及ぼす初期高温履歴の影響

鎌田 健太郎*1・菅田 紀之*2・佐藤 克俊*1

要旨：高強度コンクリートの強度および収縮に及ぼす水和発熱の影響を検討するために、練混ぜ直後から水和発熱を模擬した温度履歴をコンクリートに与え、圧縮強度試験および収縮試験を行った。その結果、50℃以上の温度を与えると初期強度は増加するが、長期的な強度増加は小さくなること、収縮が著しく小さくなることを明らかにした。また、従来の収縮予測式の適用性について検討した。

キーワード：高強度コンクリート、収縮、圧縮強度、温度履歴、水和発熱

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化・高耐久化に伴うコンクリートの高性能化・高機能化の要求により、圧縮強度が 100 N/mm²を超えるような高強度コンクリートに関する研究が、実用化に向け行われている。高強度コンクリートは、単位結合材量が多くなるため、実構造物に適用した場合、打込み後 1 日程度で、水和反応に起因する発熱により内部の温度が 70℃から 90℃にも達するという報告¹⁾がある。このような初期高温履歴がコンクリートに作用した場合、強度や収縮特性が変化するものと考えられる。

そこで本研究では、打込み直後から水和発熱による温度変化を模擬した温度履歴を高強度コンクリートに与え、温度と圧縮強度および収縮の関係について検討を行った。また、収縮ひずみに関しては、土木学会コンクリート標準示方書・設計編(平成 8 年版)²⁾および CEB-FIP Model Code 1990³⁾の予測式による予測値と本実験値とを比較し、高強度コンクリートに対する予測式の適用性について検討を行った。

表-1 コンクリートの配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	SF	S	G	SP
20	41.7	140	630	70	688	947	10.25
25			504	56	740	1019	7.28
30			420	47	775	1066	4.68

表-2 使用材料

材 料	特 性 等
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 比重：3.15
シリカフューム(SF)	比表面積：230,000 cm ² /g 比重：2.2
細骨材(S)	陸砂 表乾比重：2.69
粗骨材(G)	碎石 2005 表乾比重：2.65
高性能AE減水剤(SP)	ポリカルボン酸系

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻（正会員）

*2 室蘭工業大学講師 工学部建設システム工学科 工博（正会員）

2. 実験概要

2.1 コンクリート

本研究に用いた高強度コンクリートの配合および使用材料を表-1および表-2に示す。水結合材比(W/B)には20%, 25%, 30%の3種類を採用し、目標スランプフローおよび空気量を55 cm および1.5%として配合を決定した。結合材には普通ポルトランドセメントおよびシリカフェーム、細骨材には陸砂、粗骨材には碎石を用い、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。実験に用いた供試体は直径10 cm、高さ20 cmの円柱供試体である。なお、表-3は、28日間封緘養生を行ったコンクリートの圧縮強度の値である。

2.2 温度履歴

本研究では文献1)によるコンクリートの温度変化の実験結果をもとに、コンクリートを型枠へ打込んだ後、封緘状態で図-1および図-2に示すような温度履歴をコンクリートに与えた。最高温度は練混ぜ後22時間において20℃, 50℃, 70℃, 90℃の4種類、与えた時間は68時間および144時間の2種類とし、その後は試験開始時まで20℃の恒温室内において封緘状態を維持した。実験パラメータは表-4に示すとおりであり、24ケースとなる。

2.3 収縮試験方法

コンクリートの収縮試験は、温度20℃、相対湿度70%に制御された恒温恒湿室内で行った。乾燥開始材齢は与えた温度履歴に応じて68時間の場合は3日、144時間の場合は7日の2種類とし、試験期間中のひずみの変化を供試体内の埋込型ひずみゲージにより測定した。測定期間は6日間である。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-3は、封緘状態において144時間温度履歴を与えたコンクリートの材齢91日までの圧

表-3 封緘養生したコンクリートの圧縮強度の平均値

W/B(%)	圧縮強度(N/mm ²)
20	102.6
25	87.4
30	68.0

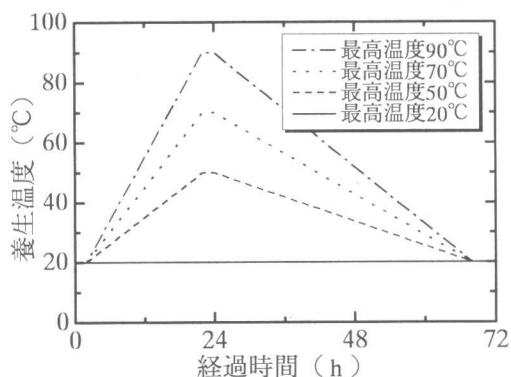


図-1 68時間の温度履歴

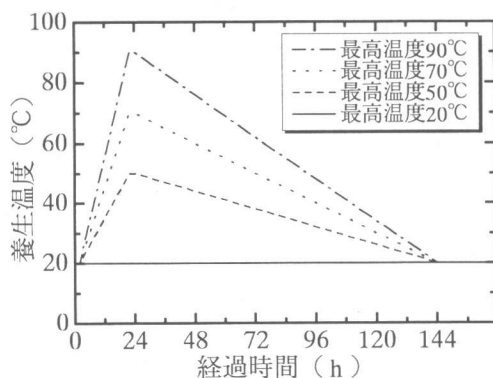


図-2 144時間の温度履歴

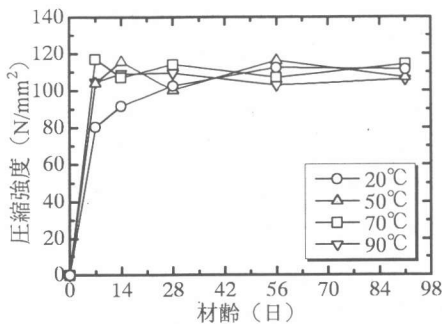
表-4 実験パラメータ

W/B(%)	温度履歴(h)	最高温度(°C)
20	68	20
25		50
30	144	70
		90

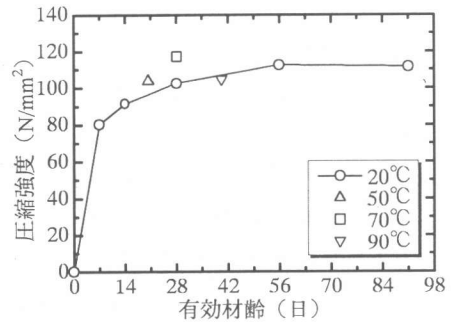
縮強度を示している。図から、温度 20℃で封緘養生したコンクリートは材齢とともに圧縮強度が増加していることがわかる。しかしながら、50℃以上の温度履歴を与えたコンクリートは材齢 7 日においてほぼ最高強度に達し、以後は 20℃の場合のような強度の増加は見られず、水結合材比 25 % および 30 % の材齢 91 日における圧縮強度は、20℃で封緘養生したコンクリートよりも小さくなった。また、50℃以上の温度

履歴を作用させた場合、温度によって圧縮強度の値に大きな違いは見られないことがわかる。以上から、50℃以上の温度履歴を与えると初期材齢における強度の増加は見られるが、その後の強度の増加は見られず長期強度は小さくなる場合があること、温度によって強度に差があまりないことがわかった。

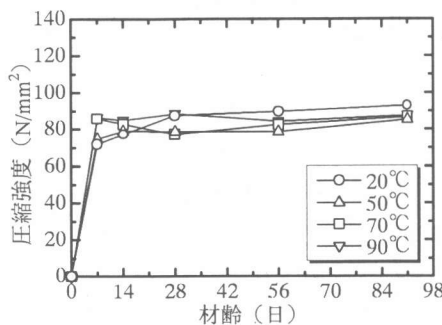
図-4 は、温度による水和反応速度の違いを考慮するため、横軸に有効材齢をとり圧縮強度



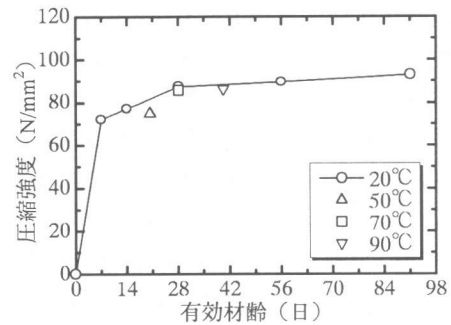
(a) W/B = 20 %



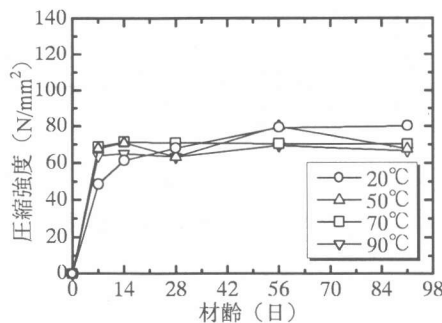
(a) W/B = 20 %



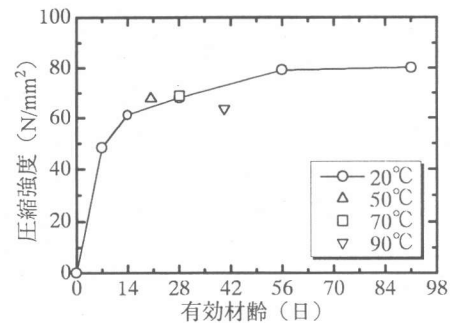
(b) W/B = 25 %



(b) W/B = 25 %



(c) W/B = 30 %



(c) W/B = 30 %

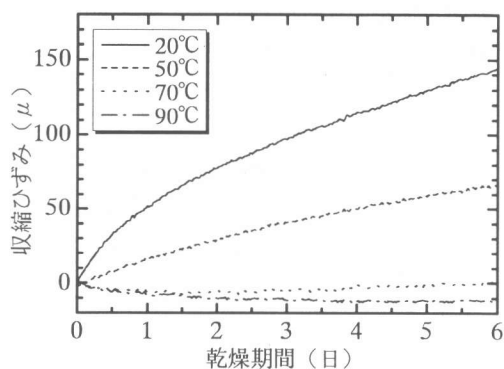
図-3 圧縮強度

図-4 有効材齢と圧縮強度

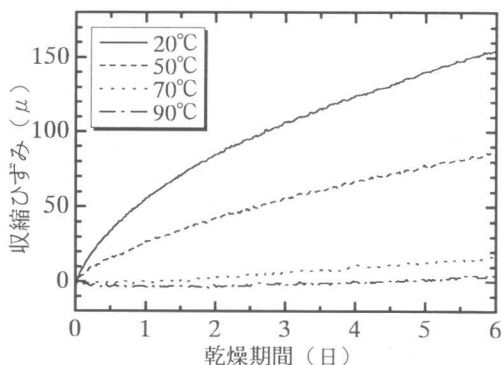
を示したものである。なお、50℃以上の温度履歴を作用させたコンクリートについては、実際の材齢7日のみの圧縮強度をプロットしている。図から、水結合材比20%の70℃で若干大きく、30%の90℃で若干小さくなってはいるものの、他の結果はほぼ20℃養生の線上にのっていることがわかる。以上より、50℃以上の温度履歴を受けた場合においても、有効材齢を用いて表すと、おおむね20℃で封緘養生したコンクリートの圧縮強度に相当することがわかった。

3.3 収縮

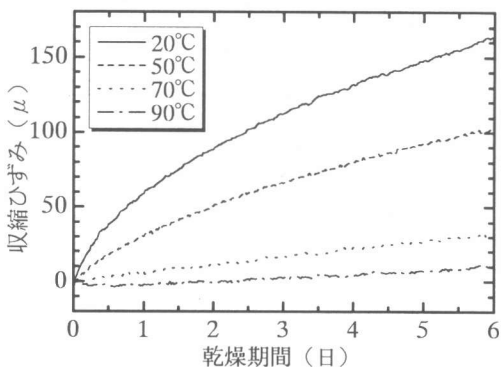
図-5および図-6は、封緘状態において温度履歴を与えたコンクリートの、乾燥開始材齢3日および7日の収縮ひずみの時間的変化を示している。乾燥開始材齢が3日の場合、7日の場合ともに水結合材比が大きいほどひずみが大きくなっていることがわかる。また、同じ水結合材比においても乾燥開始材齢3日のひずみの方が7日よりも大きくなっている。さらに、温度履歴のひずみへの影響を見てみると、すべての水結合材比において最高温度が高くなるほど収縮量が小さくなっていることがわかる。50℃の温度履歴を与えた乾燥開始材齢3日の6日経過時における収縮ひずみは20℃で封緘養生したコンクリートの50%から60%程度、乾燥開始材齢7日に対しては25%から30%程度となっている。70℃以上の温度履歴を与えると収縮量が極端に減少しており、乾燥開始材齢3日の水結合材比20%、7日の20%、7日の25%における90℃の6日経過時のひずみは膨張側になっている。また、乾燥初期の段階で膨張しているケースもある。これは、高温の温度履歴を受けたことにより水和反応が促進され、供試体内の水が消費されたため過度の自己乾燥状態となっていたコンクリートが、試験開始時に封緘状態を解いたことにより吸水したためであると考えられる。



(a) W/B = 20 %

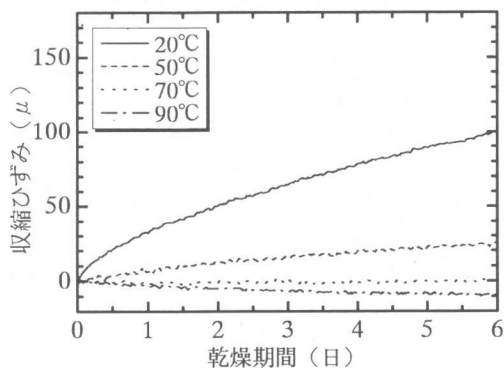


(b) W/B = 25 %

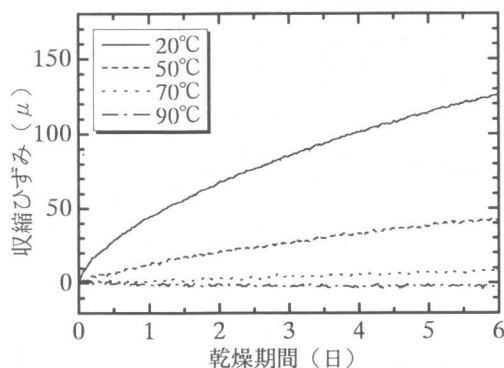


(c) W/B = 30 %

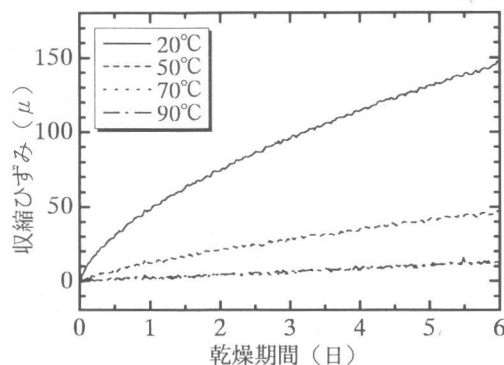
図-5 乾燥開始材齢3日の収縮ひずみ



(a) W/B = 20 %



(b) W/B = 25 %



(c) W/B = 30 %

図-6 乾燥開始材齢 7 日の収縮ひずみ

3.4 予測式との比較

土木学会標準示方書・設計編(平成8年版)²⁾(以後、示方書式)および CEB-FIP Model Code

1990³⁾(以後、CEB 式)のコンクリートの収縮予測式は、次の式(1)および式(2)のように示される。

$$\varepsilon'_{cs} = [1 - \exp(-0.108 t^{0.56})] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (1)$$

$$\varepsilon'_{sh} = -500 + 780 [1 - \exp(RH/100)]$$

$$+ 380 \log_e W - 50 [\log_e (V/S)/10]^2$$

t : 乾燥期間(日)

RH : 相対湿度(%)

W : 単位水量 (kg/m^3)

V : 体積 (mm^3)

S : 外気に接する面積 (mm^2)

V/S : 体積表面積比(mm)

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cso} \beta(t) \quad (2)$$

$$\beta(t) = \left\{ \frac{t}{350(h_0/h_{ref})^2 + t} \right\}^{0.5}$$

$$h_0 = 2A_c/u$$

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH}$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = 160 + 10 \beta_{sc} (9 - f_{cm}/f_{cmo})$$

$$\beta_{RH} = 1.55 \left\{ 1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right\}$$

t : 乾燥期間(日)

A_c : 部材の断面積 (mm^2)

u : 外気に接する部材の周長(mm)

$$h_{ref} = 100 \text{ mm}$$

$$\beta_{sc} = 5 \text{ (普通ポルトランドセメント)}$$

$$f_{cmo} = 10 \text{ N}/\text{mm}^2$$

f_{cm} : コンクリートの

材齢 28 日圧縮強度 (N/mm^2)

RH : 相対湿度(%)

これらの式において、本研究の実験パラメータに関する変数は示方書式には無く、CEB 式に圧縮強度(W/B の影響)が存在するのみで、温度履歴の影響を考慮する変数を持っていないことがわかる。

図-7 に 20°C で封緘養生したコンクリートの実験結果と示方書式および CEB 式による収縮ひずみを比較して示す。実験結果と示方書式の結果を比較すると、乾燥開始材齢 3 日では、水結合材比 20 % の結果が良く一致し、乾燥開始材齢 7 日では、水結合材比 30 % の結果が良く

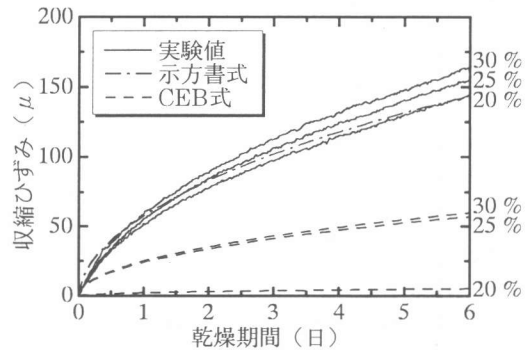
一致していることがわかる。しかしながら、示方書式では水結合材比および乾燥開始材齢の影響を考慮することが出来なく、予測値は全て同一の曲線になっていることがわかる。実験結果と CEB 式による結果を比較すると、CEB 式による結果は実験結果よりも小さくなっており、特に乾燥開始材齢 3 日の水結合材比 20 % の場合には、予測値は実験値の約 1/20 になっている。また、乾燥開始材齢 7 日の水結合材比 20 % の場合に、予測値は実験値の約 1/8 になっていることがわかる。しかしながら、CEB 式においては強度の影響が考慮できるため、水結合材比の違いによる収縮の変化が表現されている。また、図には示していないが、CEB 式による結果は、50℃の温度履歴を作用させた実験結果にほぼ等しくなっている。

以上より、高強度コンクリートの収縮の予測式には、水結合材比および乾燥開始材齢を考慮する必要があるものと考えられる。また、温度履歴の影響を考慮する方法を検討する必要があるものと考えられる。

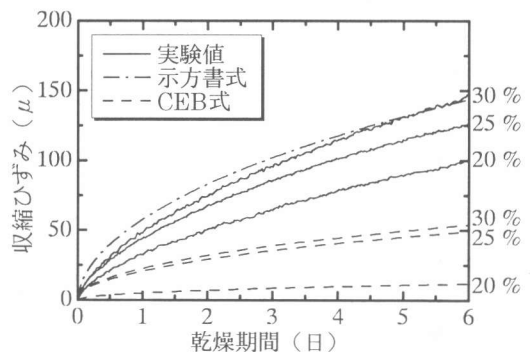
4. まとめ

本研究の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 50℃以上の温度履歴を作用させると初期材齢における強度は増加するが、その後の強度の増加はなく長期強度は 20℃で養生したものより小さくなる場合がある。また、温度の違いによる強度の差はあまりない。
- 2) 水結合材比が大きいほど、乾燥開始材齢が若いほど収縮は大きくなる。
- 3) 初期高温履歴を作用させると収縮量は減少する。70℃以上の温度履歴を作用させると収縮量は大幅に減少し、吸水膨張する場合もある。
- 4) 20℃で封緘養生した高強度コンクリートの収縮の予測には、土木学会コンクリート標準示方書・設計編(平成 8 年版)の予測式の適用性がよい。



(a) 乾燥開始材齢 3 日



(b) 乾燥開始材齢 7 日

図-7 20℃封緘養生の収縮ひずみの
実験値および予測値

参考文献

- 1) 陣内浩・黒羽健嗣・並木哲・後藤和正：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.255～260，1994
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成 8 年版)設計編，土木学会，pp.26～29，1996
- 3) CEB：CEB-FIP Model Code 1990，Thomas Telford，1993