

論文

[1076] 高強度コンクリートの水和発熱による温度上昇がセメントの水和と強度発現に及ぼす影響

正会員○丸嶋紀夫 (大成建設技術研究所)

正会員 戸祭邦之 (大成建設技術研究所)

正会員 黒羽健嗣 (大成建設技術研究所)

1. はじめに

高強度コンクリートでは単位セメント量が大きいため、部材断面の大きい構造体ではセメントの水和発熱による温度上昇が大きくなり、構造体強度は初期には大きい長期の増進が小さい傾向がある[1]。それゆえ、高強度コンクリートの強度管理手法の確立や強度確保のためには、初期の水和発熱による温度上昇が構造体強度に及ぼす影響について把握することが必要となる。そこで、高強度コンクリートの硬化初期の温度上昇を模擬した養生を行い、その強度と水和反応性を測定して温度上昇の及ぼす影響を検討することとした。供試体は、水和反応性の測定精度を確保するためモルタル試料にて行った。実験は、高強度コンクリートの大型試験体中に、同じコンクリートをウェットスクリーニングしたモルタル試料を打ち込んだ状態のまま養生して、自己水和発熱により初期に温度上昇したものと、同じコンクリート調合から粗骨材を除いたモルタル調合の小型供試体に、コンクリート構造体のモデル温度履歴を与えて養生したものの2種類について実施し、強度と水和反応性を比較検討した。

2. 実験概要

2.1 大型試験体養生実験

高強度コンクリートの大型試験体中に、同じコンクリートをウェットスクリーニングしたモルタル層を設けて打ち込んだもので、モルタル試料層の温度履歴が柱を想定した構造体とはほぼ同じとなるようにしたものである。

高強度コンクリートの調合は表-1に示すように設計基準強度 600 kgf/cm<sup>2</sup> を目標とするもので、材料としては、セメントには普通ポルトランドセメント(比重 3.16)、細骨材には桂川水系川砂(表乾比重 2.57、粗粒率 2.77、吸水率 3.22%)、粗骨材には津久井産砕石(最大寸法 20 mm、表乾比重 2.64、粗粒率 6.60、吸水率 0.6%)、混和剤には高性能 AE 減水剤(ナフタレン系)を使用した。

表-1 コンクリート調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤
28.5	39.0	24	1.5	160	561	654	1,042	13.5

コンクリートの打ち込みは硬化初期の温度上昇が大きくなる夏季に実施した。コンクリートはレードミクストコンクリート工場にて水平二軸式強制練りミキサーにより 3 バッチ 4.5 m<sup>3</sup> を練

り混ぜ、アジテータトラックに積載して約1時間運搬した。実大構造体は図-1に示すように、コンクリートを高さ950mmまで打ち込んだ後、コンクリートを5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを厚さ150mmに打ち込んだ。試験体の上下はポリスチレン板で断熱し、材令7日で型枠を取り外し、以後雨水がかからないように屋外養生を行った。材令7、28、91日にてφ50mmのコアをモルタル層から切り取り、結合水量、細孔分布の水和反応性試験と圧縮強度を測定した。また、比較のため同じモルタル試料をφ50×120mmのガラス容器に充填して20℃水中養生と封かん養生を行い、コア試料と同じ材令にて試験を実施した。

## 2.2 初期加熱養生実験

練りませ直後のモルタル試料を密封状態で図-2に示す養生装置に入れ、柱構造体を想定したモデル温度履歴を与えるもので、この実験では温度の影響を調べるため、最高温度が85、50℃の2つの養生を行った。

モルタルの調合は大型試験体養生実験のコンクリートの調合から粗骨材を除いた組成とし(表-2参照)、使用材料も同じとした。ただし高性能AE減水剤は練り上がりモルタルの材料分離を考慮して使用量を若干減じた。モルタルは30ℓモルタルミキサーを用いて製造した。モルタルの充填には前述と同じφ50×120mmのガラス容器を使用した。初期加熱養生は材令7日までとして、その後は封かん状態のまま20℃一定で保存した。強度と水和反応性の測定は、材令7、28、91日のほか更に初期についても検討するため1、3日を追加した。また、大型試験体養生実験の場合と同様に、比較のために20℃水中養生と封かん養生を実施した。

## 2.3 試験方法

大型試験体養生実験、初期加熱養生実験とも測定項目は同じとした。

### (1) 温度測定

大型試験体養生、初期加熱養生の初期材令のモルタル試料中心部の

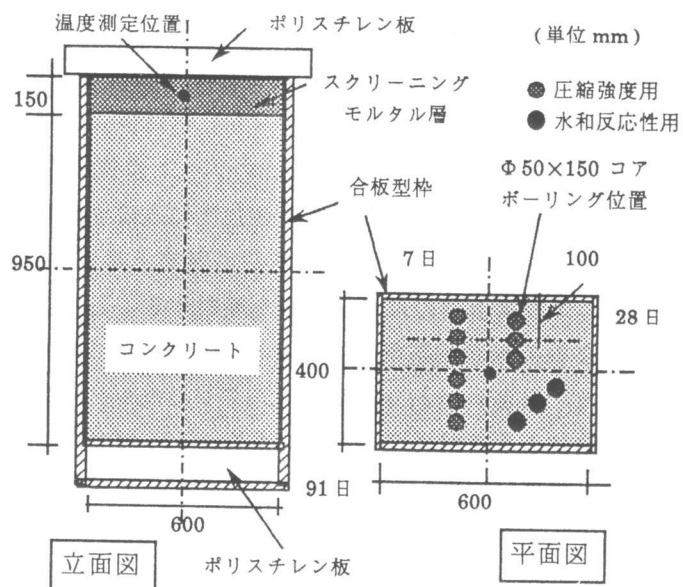


図-1 大型試験体概略図

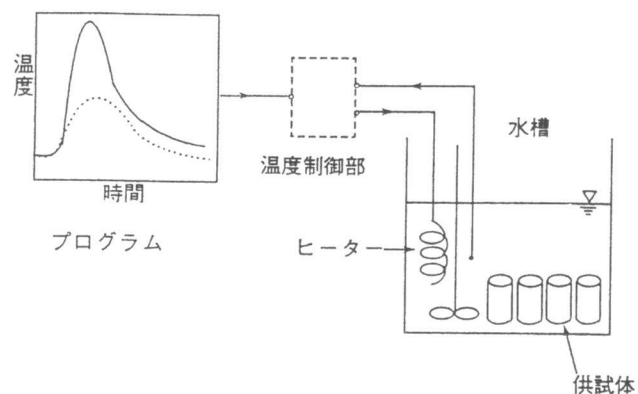


図-2 初期加熱養生装置概念図

表-2 モルタル調合

水セメント比 (%)	細骨材セメント比 (絶乾重量比)	水 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (表乾) (kg/m <sup>3</sup> )	高性能AE減水剤 (C×%)
28.5	1.130	264	927	1,081	2.0

温度履歴を、銅-コンスタンタン熱電対により測定した。

### (2) 圧縮強度測定

コア、ガラス容器充填供試体とも所定材令にて両端部を切断研磨して、 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$  に成型して圧縮強度試験用試料とした。圧縮強度試験にはアムスラー万能試験機を用いた。

### (3) 水和反応性試験

#### ○ 結合水量測定

コア、ガラス容器充填モルタル供試体とも所定材令にて約 5 mm 角に切断した後、アセトンにより水和停止し 110 °C 加熱恒量乾燥を行い、測定用試料とした。

測定は、セメント協会による方法 [2] に準じて、乾燥試料について 1000 °C 強熱減量、不溶残分、酸化カルシウムの定量分析を行い、別に使用材料のセメント、細骨材について同様の定量分析を行い、それらの結果から計算により骨材量、セメント量、結合水量を求めた。ただし、初期加熱養生実験の試料については、この方法にて一部の材令の試料について求めたところ、当然のことながら、測定結果はモルタル製造時に調合した骨材量とセメント量の比率とよく一致した。そこで、不溶残分、酸化カルシウムの定量分析は行わずに、モルタル調合の骨材量とセメント量の比率と 1000 °C 強熱減量定量分析結果を用いて、計算により骨材量、セメント量、結合水量を求めることとした。

#### ○ 細孔分布測定

結合水量測定の場合と同じ前処理したモルタル試料を、水銀ポロシメータにより細孔直径 0.003  $\mu\text{m}$  までの範囲を水銀ポロシメータにより測定した。結果は総細孔量で表した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 温度

大型試験体養生と初期加熱養生のモルタル供試体の初期の温度測定結果を図-3に示す。初期加熱養生実験では最高温度 85 °C、50 °C の 2 つの養生とも設定温度どおりであった。一方、大型試験体中のモルタルの温度は初期加熱養生と比較して温度上昇開始時間と最高温度到達時間は遅れたが、温度上昇速度や最高温度は初期加熱養生の 85 °C の場合とほぼ同程度であった。

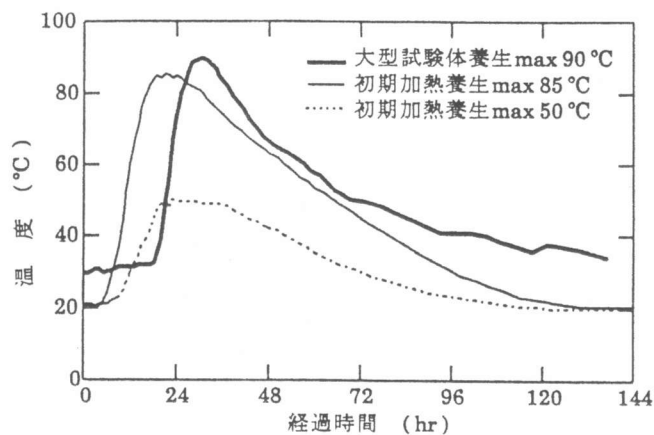


図-3 初期材令の養生温度

### 3.2 圧縮強度

大型試験体養生と初期加熱養生の圧縮強度の結果を図-4に示す。全体に圧縮強度は大型試験体養生の方が大きいですが、2つの養生実験におけるモルタル試料の空気量の違いによるものと思われる。しかし、材令の経過に伴う強度増進に及ぼす温度の影響は2つの養生実験でよく似ている。即ち、材令7日から91日間の強度変化を2つの養生実験で比較すると、材令7日では温度に拘わらず同程度の強度であるが、材令91日になると初期に高温の履歴を受けた方は強度が停滞して 20 °C の場合より低くなっている。また、2つの養生実験とも 20 °C 恒温では封かん養生の方が水中養生より長期で強度の増進がやや小さいが、モルタルの水セメント比が 28.5 % と小

いため、封かん養生の場合には反応する水分が長期では不足したものと思われる。初期加熱養生についてみると、材令1日では履歴温度が高いほど強度発現が大きいですが、材令91日になると逆に強度が小さくなり、初期温度の高い方が強度増進の程度は小さい。

### 3.3 水和反応性

セメントの水和による結合水量の結果を図-5に示す。この場合も強度の結果と同様の傾向であり、結合水量は初期に高温の履歴を受けた方が初期材令では大きいですが材令の経過に伴う増加傾向は小さい。

大型試験体養生と初期加熱養生について、同じ履歴温度での同一材令の結合水量はほぼ同じ値であることがわかる。このことから、大型試験体中でのセメントの水和による自己発熱による養生と、外部から熱を供給する初期加熱養生でセメントの水和の進行程度は同じであることがわかる。また、20℃恒温での封かん養生と水中養生の結合水量の違いは強度の場合と同様の傾向であり、封かん養生の方が材令7日以降の水和の進行程度が小さい。初期加熱養生実験について、封かん状態での最高温度の影響をみると、材令91日までの範囲では85℃、50℃、20℃の順に結合水量が大きい。このように結合水量の場合には、圧縮強度でみられたような、材令の経過による初期温度依存性の正負の逆転は生じていない。

図-6に初期加熱養生、大型試験体養生のモルタルの0.003 $\mu\text{m}$ までの総細孔量と圧縮強度の関係を示す。両者の関係は総細孔量が小さいほど圧縮強度が大きくほぼ一義的な関係であり、2つの養生実験の違いは殆どみられない。このことから、材令の経過に伴う細孔分布の変化を総細孔量で表現すると、圧縮強度の場合のように、2つの養生実験でのモルタルの空気量の違いの影響も加味されるため、細孔分布測定結果から水和反応性を議論することが難しくなる。そのため、水和反応の進行に伴う細孔量の変化としてとらえることとした。即ち、モルタル試料の最初の全空隙量をモルタルの空気量と調合時の全水量の合計として、最初の全空隙量から各材令での総細孔量を差し引いた分を、水和の進行に伴う空隙減少量とした。

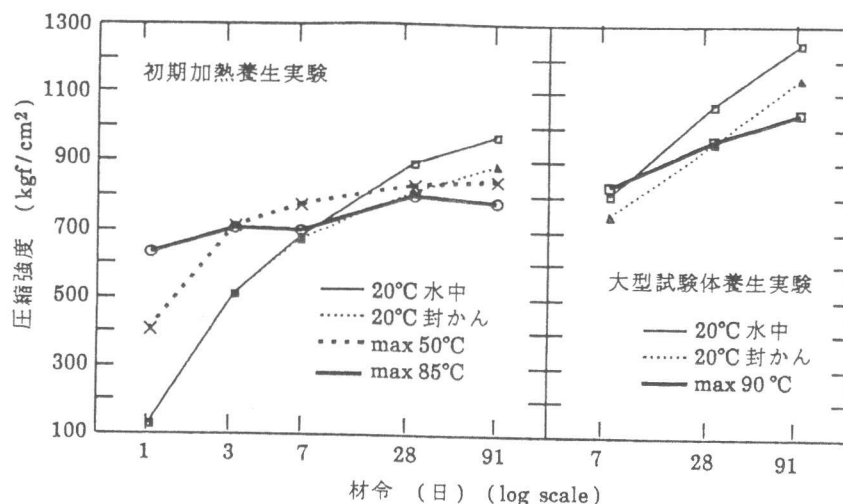


図-4 大型試験体養生、初期加熱養生の圧縮強度

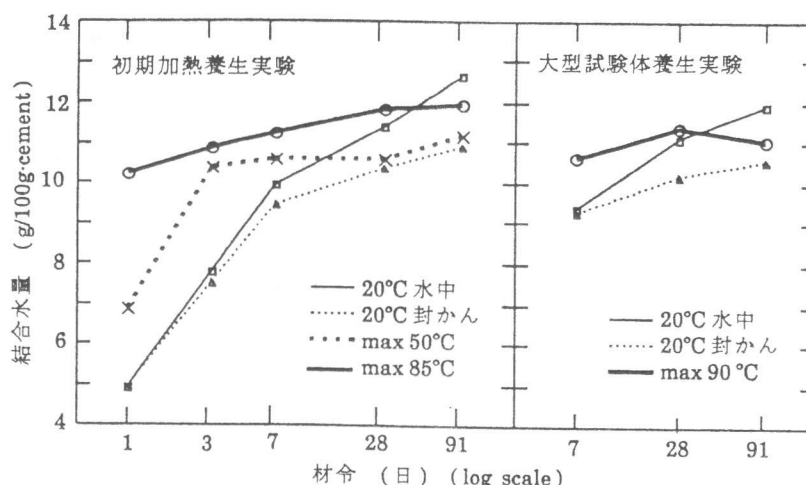


図-5 大型試験体養生、初期加熱養生の結合水量

大型試験体養生実験と初期加熱養生実験における材令の経過に伴う空隙減少量の変化を図-7に示す。この結果の最高温度の影響の傾向は、今まで述べた圧縮強度や結合水量の場合とはほぼ同様であり、高温履歴の方が初期材令では空隙減少量は大きく水和反応が活発であるが、材令の経過に伴う空隙減少量の増加傾向は小さく反応が停滞しているものと思われる。大型試験体養生と初期加熱養生について、同じ履歴温度での同一材令の空隙減少量を比較すると、2つの養生実験で空隙減少量はほぼ同じ値であり、結合水量の場合と同様に最高温度がほぼ同じであればセメントの水和の進行程度は同じであることがわかる。また、20℃恒温での封かん養生と水中養生の違いは、圧縮

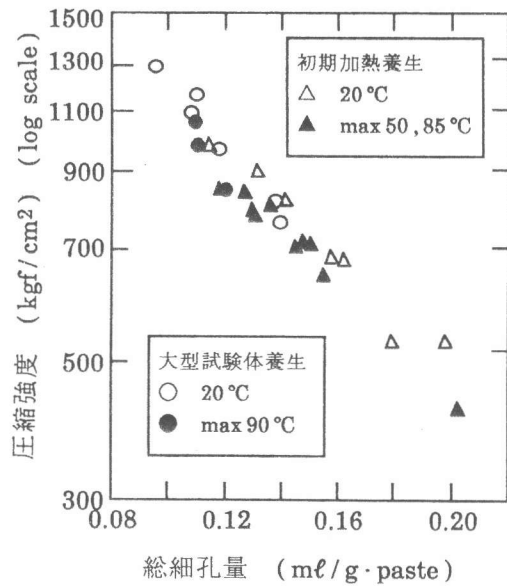


図-6 総細孔量と圧縮強度の関係

強度や結合水量の場合と同様の傾向である。初期加熱養生実験について、封かん状態での最高温度の影響をみると、材令91日では最高温度に拘わらず空隙減少量はほぼ一定値となる。材令が経過して反応が進行すると、

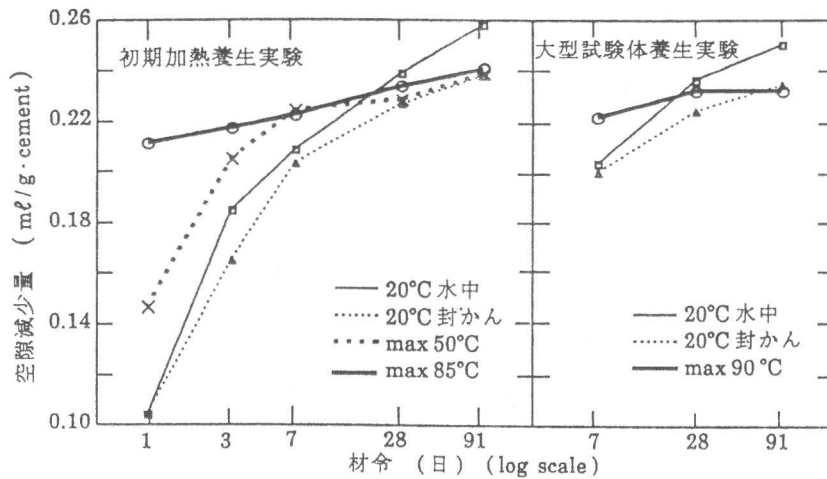


図-7 大型試験体養生、初期加熱養生の空隙減少量

反応に必要な水分が不足するために水和生成物量は、最終的には温度に無関係に、同じになるものと思われる。

### 3.4 測定項目間の検討

図-8の結合水量と圧縮強度の関係では結合水量はモルタルの空気量の影響を受けないため、結合水量と圧縮強度の関係は養生実験ごとに異なっている。また履歴温度の違いは結合水量と圧縮強度の関係に影響し、初期温度の高い方が同じ結合水量では強度が低い傾向がみられる。図-9では空隙減少量と結合水量の関係は2つの養生実験でほぼ同じであるが、初期温度の高い方が同じ空隙減少量では結合水量はわずかに大きい。

総合すると次のように考えられる。初期材令では温度が高い方が反応が促進され、結合水量が大きく、水和生成物量に相当する空隙減少量も大きい。材令が経過しても結合水量は初期温度が高い方が大きく、初期の結合水量の大きいことが影響として残っているものと思われる。一方、空隙減少量は長期材令では温度に関係なく同じとなり、内部の水分の不足により反応が停滞したものと思われる。強度は初期温度が高い方が初期には大きい長期には停滞して逆に小さく、初

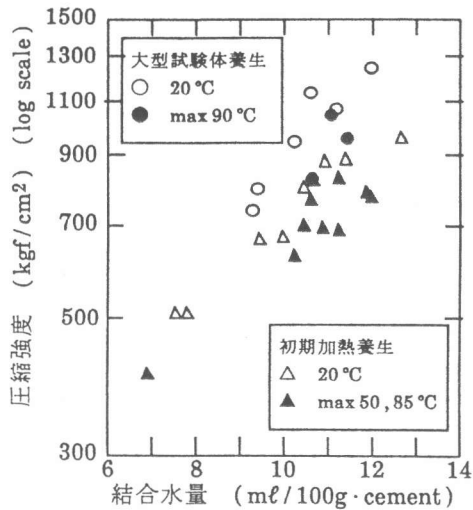


図-8 結合水量と圧縮強度の関係

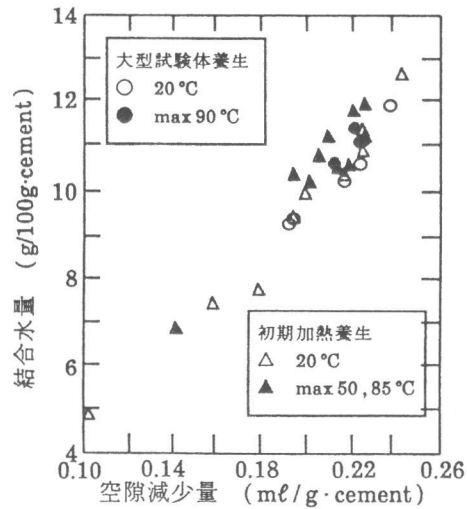


図-9 空隙減少量と結合水量の関係

期に高温で反応した結合水量と、長期での水分の不足が影響したものと思われる。このように、水和反応性の測定結果から、初期温度履歴の違いによって初期に生成する水和物の結合水量に違いが生じ、また長期には内部の水分が不足することの2点が考えられ、それらが長期材令での水和反応と強度に影響しているものと思われる。

#### 4. まとめ

設計基準強度  $600 \text{ kgf/cm}^2$  の高強度コンクリートを想定した低水セメント比の普通ポルトランドセメントモルタルによる、大型試験体養生実験と初期加熱養生実験の結果、次のことが明らかになった。

- ① 温度履歴の影響による強度発現と水和反応性の傾向については、最高温度が同じであれば、大型試験体内でのセメントの水和に伴う自己発熱による養生と、封かん状態で外部から熱を供給した初期加熱養生はほぼ同等との結果が得られた。
- ② モルタル強度とセメントの水和反応性は一定関係で、水和反応の進行が大きいほど強度は大きい。この関係には初期温度履歴も影響している。即ち、初期温度の高い方が、同じ結合水量では強度は低く、また同じ空隙減少量では結合水量はわずかに大きい傾向がみられた。
- ③ 巨視的には、初期に高温の履歴を受けたものは最初はセメントの水和反応が促進されて強度発現が大きい。長期材令では水和反応が停滞して強度増進が低減する傾向がみられた。

水和反応性の測定結果からみると、初期の温度履歴の違いによって初期に生成する水和物の結合水量に違いが生じ、また長期で水分が不足することが考えられ、それらが長期材令での水和反応と強度に影響しているものと思われる。これらについては更に詳細な研究が必要である。

[謝辞] 本研究に御助言を頂きました東京工業大学大門正機教授に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 飯島真人、戸祭邦之、黒羽健嗣：設計基準強度  $600 \text{ kgf/cm}^2$  を目標とした構造体強度の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.545~546 1989年
- 2) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-23、1971年