

# 高温を受けるコンクリート部材の諸物性に関する研究（その4）

——600°C加熱時の模擬部材内部の温度・含水率および強度——

長尾 覚博 中根 淳

## Experimental Studies on Characteristics of Concrete Members Subjected to High Temperature (Part 4)

——Temperature, Moisture Migration, and Strength after Heating of Mass Concrete  
Mock-up Specimens on Heating at 600 °C——

Kakuhiro Nagao Sunao Nakane

### Abstract

This report summarizes the experimental results concerning temperature, moisture migration, strength, and elastic modulus after heating of mass concrete mock-up specimens on heating from the bottom lining face at 300 °C and 600 °C so as to correctly estimate the characteristics of concrete structures subjected to high temperatures.

As a result, it is confirmed that strength and elasticity of concrete members can be explained by temperature and moisture migration behavior.

### 概 要

本報は、高温を受けるコンクリート部材の諸物性を明らかにするため、マスコンクリートを想定した実大模擬部材の一面を300°C、600°Cに加熱し、加熱に伴うコンクリート内部の温度・水分量、加熱終了後の強度・弾性係数を調査した結果をまとめたものである。

その結果、高温を受けるコンクリート部材内部の強度・弾性係数は、温度・含水挙動と密接な関係があることを示した。

## 1. はじめに

高温を受ける可能性のある鉄筋コンクリート構造物の品質評価のためには、高温下のコンクリート部材の物性変化を把握しておく必要がある。

筆者らは既に、実構造体を模擬した供試体の一面を175°Cで長期間加熱し、コンクリート断面内の温度・含水率・圧縮強度・弾性係数等の調査を行ない<sup>1)</sup>、多くの知見を得ることができた。

一方、200°Cを超える高温下におけるコンクリート部材の物性が問われることがしばしばあり、このような現状に対処するため実大模擬部材(φ1000×1500 Hmm, ベント機構付, 1面開放他面シール)の1面を300°Cおよび600°C(2ケース)に加熱し各種調査を行なった。

本報告は、調査結果のうち温度・含水率および加熱後の圧縮強度・弾性係数の結果をまとめたものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 模擬部材の考え方

実験では、実構造体の壁体部から図-1に示すような部材を一部切り取ってきたという考え方で、実大部分模擬部

材を設定した。なお、配筋および断熱材は省略しコンクリートとライナの境界面が設定温度となるように加熱を行なった。

### 2.2 測定試験項目

本実験では以下の項目について調査を行なった。

- ① 温度分布
- ② 含水率分布
- ③ 水蒸気圧分布\*
- ④ 供試体開放面からの蒸気水量\*
- ⑤ ベント管からの放出水量\*
- ⑥ コンクリートひずみ\*
- ⑦ 加熱後の強度・弾性係数

\* (注) 本報告から除外

### 2.3 実験内容

2.3.1 使用材料および調合 コンクリートの骨材,セメントなどの使用材料,及びスランプ,水セメント比等コンクリートの調合については,別途実施した175°C加熱実験<sup>1)</sup>との整合性をはかり,表-1のとおりとした。

2.3.2 模擬部材の仕様 模擬部材の仕様は図-2に示すとおりで,φ1000 mm×1500 mmの円筒状とし,周囲をt=3 mm,底面をt=6 mmの鋼板ライナ(SM41B相当)

でシールし、底面には3/4B(内径 20 mmφ, 材質: 炭素鋼)のベント管を配置し上面は開放とした。さらに断熱材(t=20)で周囲を断熱した。

2.3.3 実験条件 実験開始材令, 加熱前養生, 加熱中の暴露条件, 一実験条件当たりの供試体数等の条件は以下のとおりとした。

(1) 実験開始材令: コンクリート打込後, 材令91日以降

(2) 加熱前養生: コンクリート打込み後, 外気条件下で材令7日まで封緘養生, 以後端部一面乾燥状態

(3) 加熱中の暴露条件: 一面開放, 底面および側面周囲はシール状態

(4) 一実験条件当たりの模擬部材数: 1体とした。模擬部材の種類と数量は表-2に示すとおりである。

2.3.4 測定法

(1) 温度の測定: 温度測定用のセンサーにはシース管で被覆されたアルメルクロメル熱電対を用いた。

(2) 含水率の測定: 含水率の測定は電極法によった。すなわち, コンクリート中に埋設した電極の電極間抵抗を測定し, あらかじめ作成した校正曲線から含水率を読み取った。

(3) 圧縮強度・弾性係数: 加熱終了後にコア供試体を採取し, 圧縮強度試験, 弾性係数測定試験を行なった。コアの採取位置は前述の図-2に示すとおりである。

2.3.5 各センサーの取り付け位置 各センサーの取り付け位置は前述の図-2に併記したとおりで, 加熱面から開放面への分布が調査できるように配置した。

2.3.6 加熱方法 加熱は模擬部材底部ライナを電気ヒーターにより, 図-3に示す加熱パターンで行なった。

加熱パターンは200°Cを超える温度として, 最高温度300°C, 600°Cを設定した。なお, 温度のコントロールはプログラム式温度調節器およびヒーター容量制御器によった。

2.3.7 計測システム 各種調査の全体計測システムは, 図-4に示すとおりである。

2.3.8 強度管理試験 調査強度および加熱前強度確認のため, 下記の要領により強度管理試験を実施した。

(1) 試験項目:

(a) 圧縮強度 (b) 弾性係数

(2) 供試体および養生:

(a) 供試体: 100 mmφ×200 mmH シリンダー供試体。なお, 供試体は模擬部材1体について打込み時に4回採取(一条件3本)した。

(b) 養生: 養生は標準水中養生, 現場封緘養生, 現場水中養生, 現場気中養生とし, 試験材令は4週, 13週(加熱開始前)とした。

3. 実験結果および考察

3.1 まだ固まらないコンクリートの性質

コンクリートは各模擬部材とも高さ方向に4層に分割して打込んだ。まだ固まらないコンクリートの性質は表-3に示すとおりで, ほぼ所要の品質が確保できた。

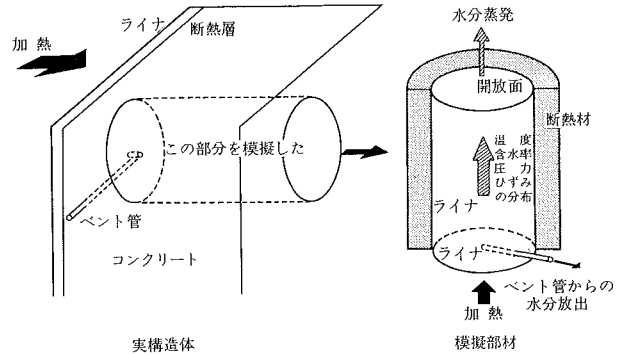


図-1 模擬部材の考え方

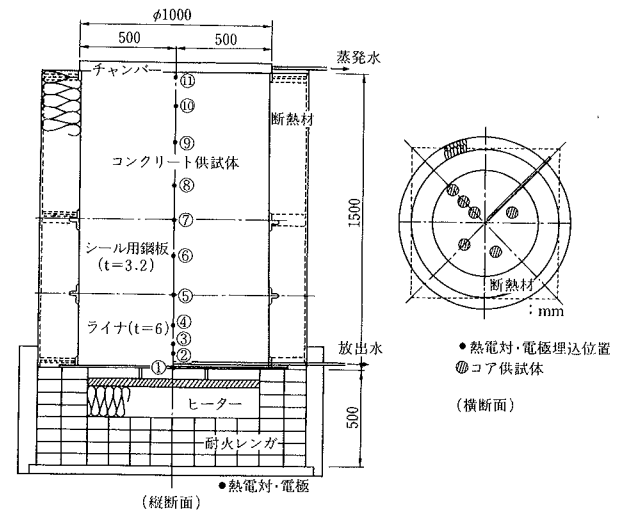


図-2 模擬部材の仕様

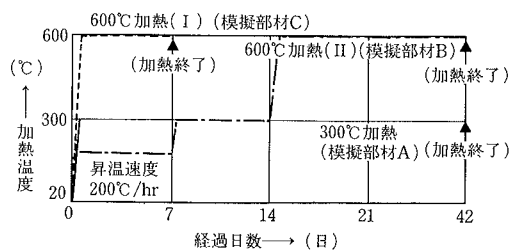


図-3 加熱パターン

表-1 コンクリートの調合

スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	セメント	水	細骨材	粗骨材	減水剤	AE剤
12±1.5	4±1	55	42.5	282	155	791	1083	2.82	2.26

(注) 粗骨材…青梅産 砕石 セメント…フライアッシュB種  
細骨材…木更津産 山砂 混和剤…ボゾリスNo8(4倍液), 303A(1%溶液)

表-2 模擬部材の種類と数量

No.	寸法 (cm)	加熱パターン	供試体数	総数
A	φ100×150	300°C	1	4
B	φ100×150	600°C (II)	1	
C	φ100×150	600°C (I)	1	
D	φ100×150	非加熱	1	

### 3.2 強度管理試験

強度試験結果を表-4に示す。

これより、標準養生供試体強度のばらつきは少なく、材令28日で300~330 kgf/cm<sup>2</sup>、材令91日で370~410 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

また、加熱直前(材令91日)の現場気中養生は240 kgf/cm<sup>2</sup>程度、現場封緘および現場水中が300 kgf/cm<sup>2</sup>程度でいずれもばらつきは少なかった。

### 3.3 加熱開始前までの温度、含水率

**3.3.1 温度測定結果** コンクリート打込み後の部材内部温度の変化は図-5に示すとおりで、打込み後水和熱によってコンクリート温度は上昇し、材令3日目に最高温度約45°Cに達し、材令7日目で外気温とほぼ同様の温度に戻っている。また、各模擬部材間の温度履歴の差はほとんど認められなかった。

**3.3.2 含水率測定結果** 各種養生シリンダー供試体と加熱用模擬部材の含水状態を、電極間抵抗値の経時変化と比較する(図-6)と、模擬部材の抵抗値の変化は、各種養生供試体のうち、現場封緘養生と現場水中養生の中間に位置し、温度条件をほぼ同等と見なせば、模擬部材の加熱前の含水状態は現場封緘養生と現場水中養生の中間程度と考えられる。すなわち、模擬部材はごく表層部を除いてほぼ飽水状態となっており、長期間にわたりマスコンクリート内部は乾燥が進みにくいことがわかる。

### 3.4 加熱実験結果

**3.4.1 温度測定結果** 加熱後の模擬部材内部各点の温度変化は、図-7に示すとおりである。

これより、各模擬部材とも加熱開始後2~3日目で内部温度の上昇は緩慢となり、14日以降はほぼ横ばい状態となっている。

図-8に断面内温度分布の経時変化を示す。

これより、加熱面近傍の温度は、加熱開始とともに急速に上昇し、それに伴って水分移動も急速に生じていることが推察される。また、各模擬部材とも水分の蒸発が急速に進むと思われる100°C以上の温度範囲が時間経過とともに徐々に上部開放面に移動し、300°C、600°C(II)加熱ではほぼ14日で定常状態に近くなり、断面内の温度は円弧状の分布を示す。これは、加熱に伴ってコンクリート中の含水状態が変化し、コンクリートの熱特性値が断面内で不均一になることによると推察される。

さらに定常状態における開放表面温度は、加熱温度300°Cで約60°C、600°C(II)で約70°Cであった。100°C以下の温度域は、300°C加熱で模擬部材上部の1/3、600°C(II)加熱で上部の1/6の範囲であった。一方、600°C(I)加熱模擬部材では加熱時間が短いため、過渡的であるが加熱7日目の温度分布は600°C(II)加熱における600°C加熱開始後7日目とほぼ同様であった。いずれの部材も1.5mの断面寸法内で加熱面と開放面の温度差は非常に大きく、これによる断面内の強度、弾性係数のばらつきが予想される。

**3.4.2 含水率の測定結果** 加熱に伴う含水率の経時変化を図-9に示す。これより、部材内部の含水率は、加熱

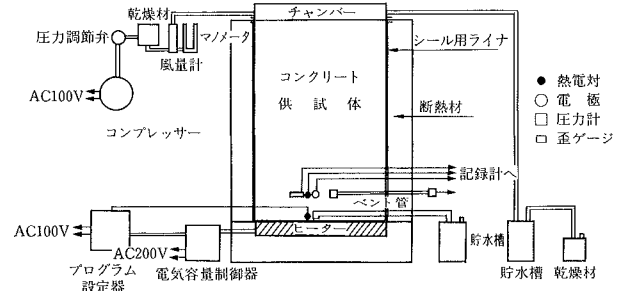


図-4 計測システム

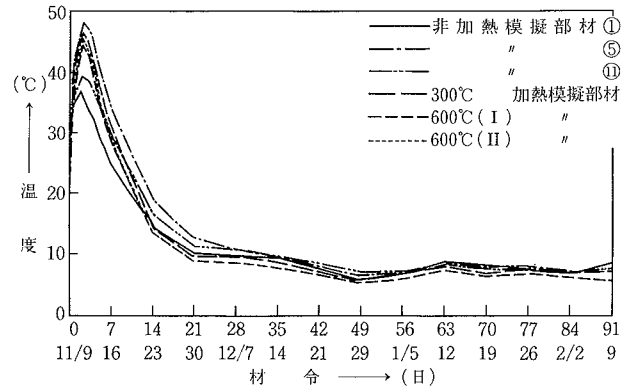


図-5 コンクリート打込後の温度変化

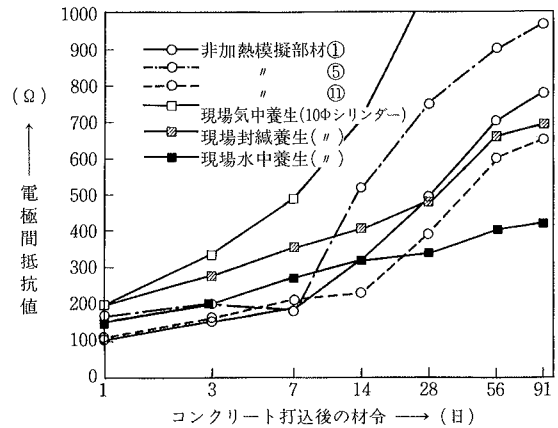


図-6 電極間抵抗値の経時変化

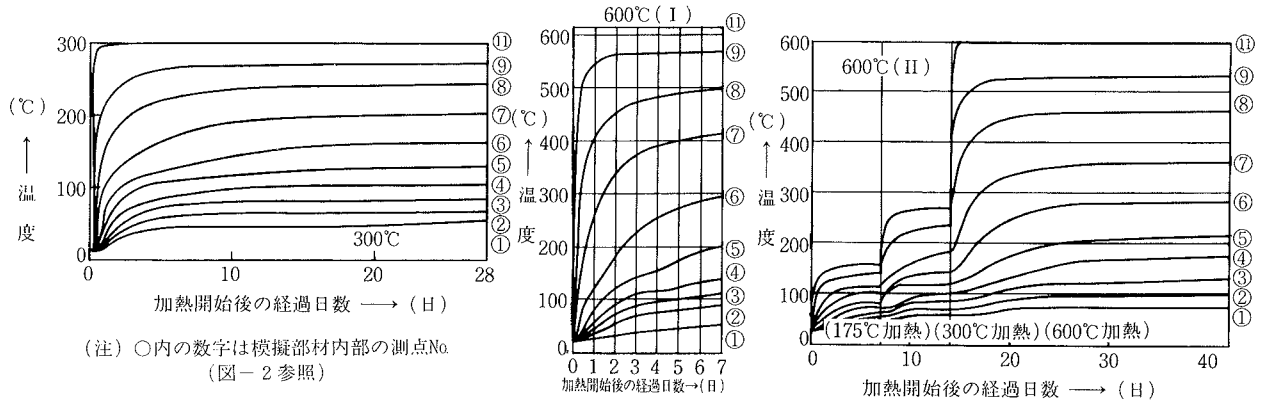
表-3 まだ固まらないコンクリートの性質

項目	スランプ(cm)		温度(°C)		空気量(cm)		単位容積重量(kg/l)	
	流動化前	流動化後	流動化前	流動化後	流動化前	流動化後	流動化前	流動化後
平均値	15.0	19.8	17.0	17.0	4.3	4.0	2.319	2.908

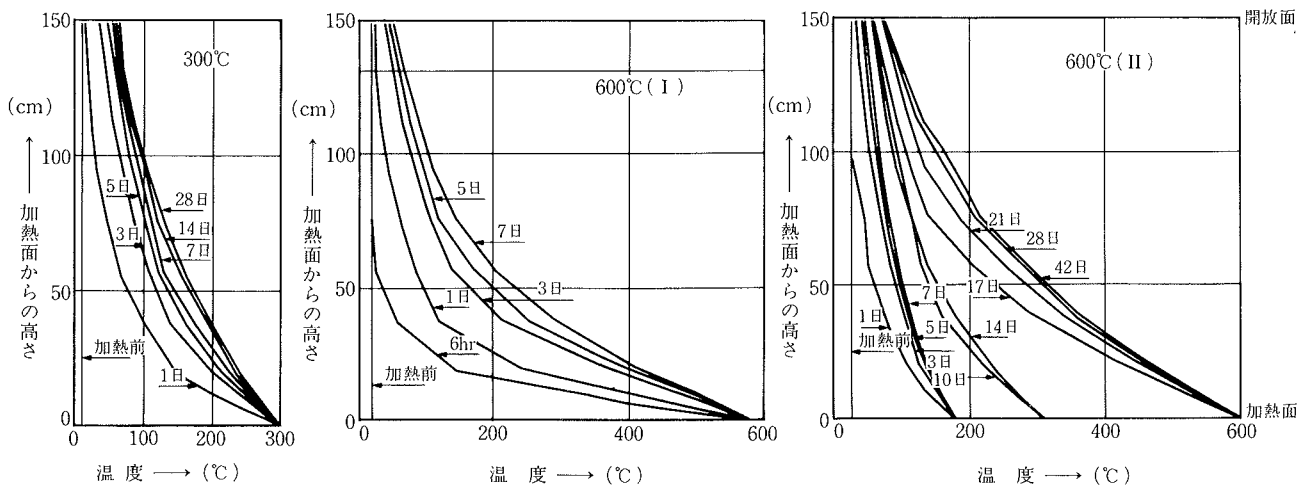
表-4 強度管理試験結果

材令	28日				91日			
	FW	FC	FA	SW	FW	FC	FA	SW
範囲	—	—	—	300 334	302 332	300 323	239 242	371 414
平均	—	—	—	318	319	313	241	394

(注) FW: 現場水中 FC: 現場封緘 FA: 現場気中 SW: 標準水中



図一七 加熱後の模擬部材内部の温度変化



図一八 断面内温度分布の経時変化

面近傍がごく初期に絶乾状態となり、時間の経過とともに絶乾のゾーンが徐々に開放面に向かって上昇する。また、開放面のごく表層も時間の経過とともに幾分乾燥が進行する傾向となっている。

各模擬部材とも加熱終了時には断面の上部がかなり高含水率のゾーンとなり、300°C、600°C (I) では断面の約1/2が、600°C (II) でも約1/3が加熱開始前の含水率を超える高含水率のゾーンとなっている。また前回実施した175°C加熱実験<sup>1)</sup>に比較して高含水率のゾーンがかなり上部開放面に片寄っているが、これは、水分移動を惹起するコンクリート内部の蒸気圧が175°C加熱よりも大であるためと推察される。この結果より、一面を相当高温に持続加熱されてもマスコンクリート内部の含水状態は加熱によって水分が散逸しない条件(シール)と、する条件(アンシール)両者の特性が併存し、これらの含水挙動が強度・弾性係数に大きな影響を与えるものと考えられる。

**3.4.3 模擬部材の圧縮強度・弾性係数** 非加熱および加熱模擬部材内部の圧縮強度・弾性係数および単位容積質量の試験結果を図一10(a)~(c)に示す。

(1) 非加熱模擬部材の圧縮強度・弾性係数： 圧縮強度

は模擬部材中央部でやや高めとなっているが上、中、下で400~450 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲で断面内の大きな片寄り認められなかった。また、弾性係数についても上、中、下の差は少なく、3.0~3.5×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>の範囲で、コンクリート打込み時に断面を4分割して分離打設した効果が認められる。

(2) 加熱終了後の模擬部材の圧縮強度・弾性係数：300°C加熱後の断面内圧縮強度は、350(加熱面)~400 kgf/cm<sup>2</sup>(開放面)の分布を示している。

また、弾性係数も加熱面が約1.8×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>、開放面が約3.0×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>でほぼ直線分布となった。

600°C (I)加熱では、圧縮強度および弾性係数とも300°C加熱とほぼ同様の傾向であったが、加熱面の弾性係数が若干300°C加熱の場合よりも小さく約1.5×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>であった。

600°C (II)加熱では、圧縮強度が開放面から中央部にかけて300°C、600°C (I)加熱とほぼ同様の傾向を示したが、中央部から加熱面にむかってむしろ強度が若干増大している。

以上の結果から、各模擬部材共弾性係数については加熱面に近い程その低下が大きく、その最小値は600°C (II)加

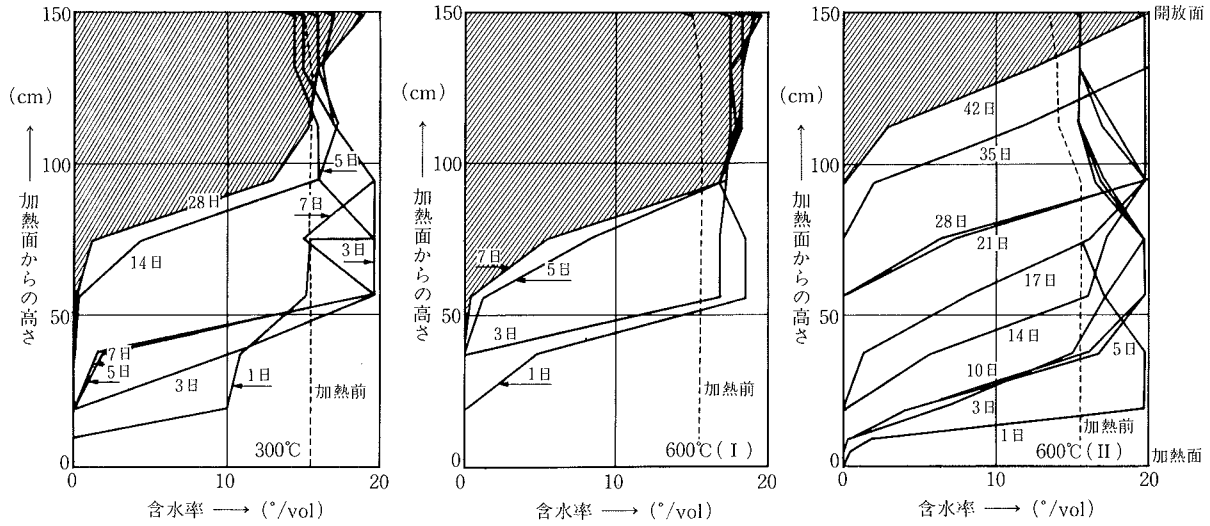


図-9 含水率の経時変化

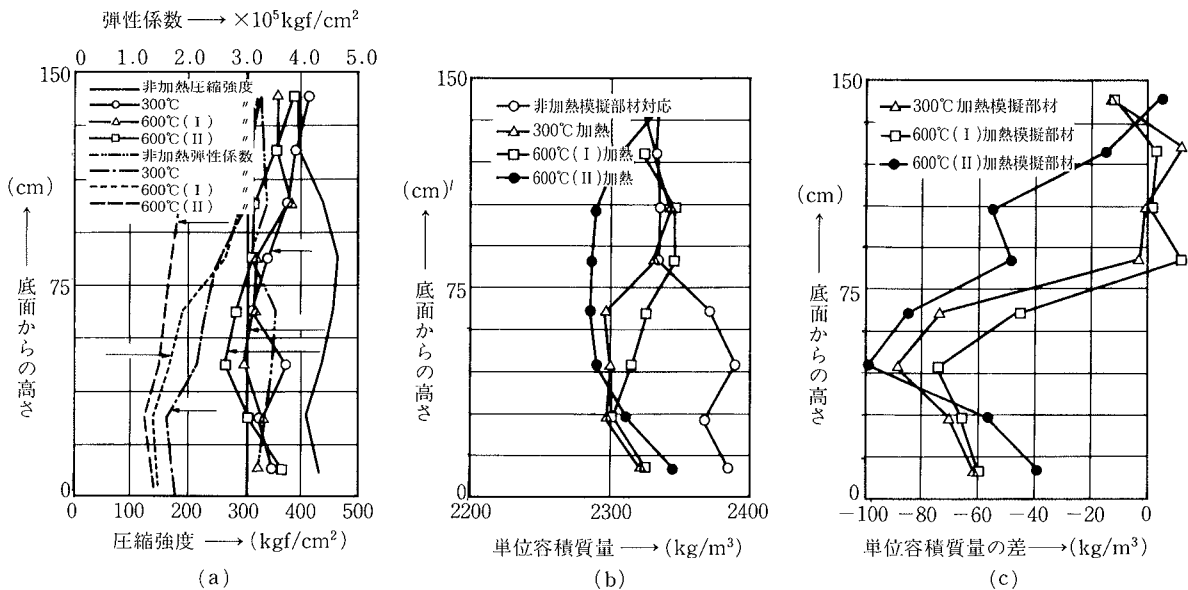


図-10 圧縮強度・弾性係数および単位容積質量

熱において、非加熱部材に比較し約40%の残存比であった。

圧縮強度については各加熱模擬部材共非加熱部材に比較して100%~60%の残存比の範囲であったが、その分布は既報告の175°C加熱 Mock-up 試験<sup>1)</sup>の結果と比較して、加熱面の強度劣化が少ない結果となっている。これは、高温および高圧力下での熱水反応による強度増進とも考えられ今後の検討課題と思われる。

また、圧縮強度・弾性係数ともテストピースレベルの300°C、600°C加熱の結果<sup>2)</sup>よりもその残存比はかなり高く、部材レベルでは高温加熱を受けても強度特性はテストピースレベルほど劣化しないものと考えられる。

単位容積質量の結果を図-10(b), (c)に示した。

これより、非加熱部材についてはコア採取直後の単位容積質量は下部ほど大となっているが、その差は最上部と最

下部で50 kg/m<sup>3</sup>程度であった(図-10 (b))。

加熱模擬部材と非加熱部材との差(図-10 (c))は、加熱面に近い程大となっており、単位容積質量の差を含水量によるものと考えれば、前述の図-9に示したように含水率の分布と非常に近似した傾向を示している。

なお、加熱面近傍の単位容積質量の減少が予想より少なかったのは、圧密あるいはコア採取時による吸水も影響していると思われるが、熱水反応によって組織が緻密になったことも考えられる。

(3) 温度と圧縮強度・弾性係数との関係：断面内の加熱開始後定常時の温度と圧縮強度・弾性係数との関係を図-11~12に示した。これより、300°C程度では加熱温度が高くなるほど圧縮強度が低下する傾向が認められるが、加熱面近傍の強度増進があるため、300°C以降は加熱温度が上昇

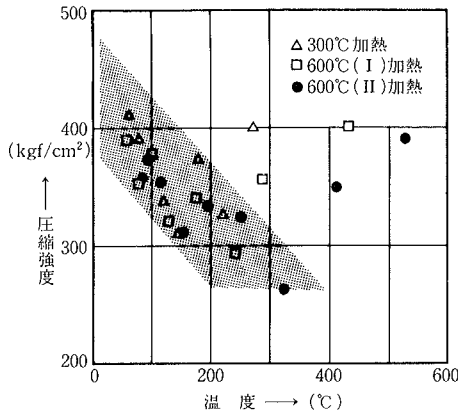


図-11 温度と圧縮強度

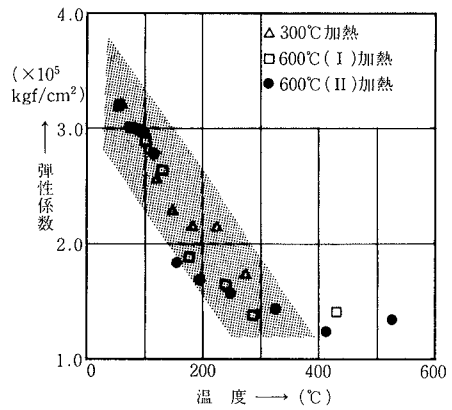


図-12 温度と弾性係数

するとむしろ圧縮強度が増大する結果となっている。

弾性係数については、加熱温度が高くなるに従い300°C程度まではほぼ直線的に低下し、300°C以降は横ばい状態となっている。

ちなみに、既報のテストピースレベルの実験<sup>2)</sup>では600°Cまでの高温に加熱されたコンクリートの残存圧縮強度および残存弾性係数は加熱温度の上昇に比例して低下しているが、今回の模擬部材における結果から、実部材においては加熱温度が上昇しても一義的には必ずしも低下しないことが予想される。

(4) 含水率と圧縮強度・弾性係数との関係：コア供試体の試験時の含水率と圧縮強度・弾性係数との関係を図-13~14に示した。

この含水率にはコンクリートコア採取時の吸水の影響も含まれているため、加熱終了時の実際の含水率よりも大と考えられるが、加熱面近傍を除くと圧縮強度・弾性係数いずれも含水率が低下するに従い、その値が低下する傾向が認められる。すなわち、高温加熱による圧縮強度・弾性係数の劣化は、加熱によるコンクリート中の水分移動が影響していると考えられ、高温下における圧縮強度・弾性係数を評価する上で含水率が重要な因子になるものと考えられる。

#### 4. まとめ

今回の実験結果をまとめると以下のことがいえる。

- ① 加熱模擬部材内部の温度は加熱後14日でほぼ定常に達し、円弧状の分布を示す。
- ② 加熱模擬部材の含水率は上部開放面近傍が高含水率、加熱面に近い程低含水率の分布を示す。
- ③ 高温加熱によるマスコンクリート内部の含水状態はシール、アンシール両条件が併存する。

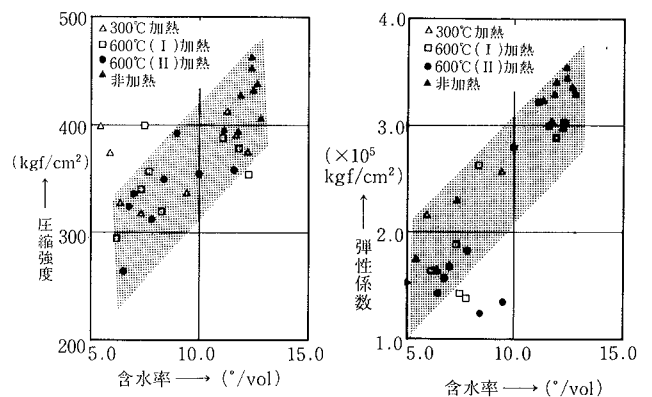


図-13 含水率と圧縮強度

図-14 含水率と弾性係数

④ 加熱模擬部材内部の圧縮強度・弾性係数の最小値は非加熱模擬部材に比較し、圧縮強度が約70% (300°C加熱)~60% (600°C (II)), 弾性係数が約50% (300°C加熱)~40% (600°C (II))の残存比となった。

⑤ 加熱模擬部材の圧縮強度・弾性係数の劣化はテストピースレベルの加熱試験結果よりかなり少ない。

⑥ 加熱面近傍を除くと加熱温度が高く含水率が低い程圧縮強度・弾性係数の劣化は大きい。

⑦ 高温下におけるコンクリートの圧縮強度・弾性係数を評価する上で含水率が重要な因子となる。

#### 参考文献

- 1) 長尾覚博, 他: 高温を受けるコンクリート部材の諸物性に関する研究, 大林組技術研究所報, No. 35, p. 81~87, (1987)
- 2) 長尾覚博, 他: 高温を受けるコンクリート部材の諸物性に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 39, p. 46~50, (1989)