

高温を受けるコンクリート部材の諸物性に関する研究

長尾 寛 博 一 瀬 賢 一 中 根 淳

Experimental Studies on Characteristics of Concrete Members Subjected to High Temperature

Kakuhiro Nagao Ken-ichi Ichise Sunao Nakane

Abstract

Occurrence of thermal stresses and changes in physical properties of concrete are conceivable in Concrete structures subjected to high temperatures such as nuclear power plant buildings. It is well known that the temperature and moisture content of a concrete have great influences on its properties. However, there are only a few examples of research where moisture migration in relation to temperature hysteresis of a heated concrete structure has been studied.

At the present time, estimates of the characteristic value of concrete subjected to high temperatures are based on results obtained with small test pieces.

This report summarizes the research results on temperature, moisture migration, strain variation, and strength and elastic modulus after heating of two types of mass concrete mock-up specimens on heating from the bottom lining face at 175°C for 91 days in view of the beforementioned situation.

As a results, effective data for estimating the characteristics of concrete structures subjected to high temperatures were obtained.

概 要

原子力施設建屋などの高温にさらされるコンクリート構造体では、熱応力の発生やコンクリート物性の変化が考えられる。一方、コンクリートの諸物性はその温度および水分量によって、大きな影響を受けることが知られている。しかし、加熱に伴うコンクリート構造体内部の温度および水分量についての調査例は少ない。従って、高温加熱を受けるコンクリート材料物性の評価は、小型のテストピースによる結果に基づいているのが現状である。この報告は、このような現状に対応し、マスコンクリートを想定した2種類の実大模擬部材の一面を175°Cに91日間持続加熱し、加熱に伴うコンクリート内部の温度、水分量、ひずみの変化、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。

試験の結果、高温を受けるコンクリート構造体の諸物性を評価する上で必要な、多くの知見を得ることができた。

1. はじめに

この報告は、高温加熱を受けるマスコンクリート構造体の諸物性を把握するために行なった実験の結果をまとめたものである。実験では、高温加熱によってコンクリートから発生する水蒸気を抜くために設ける、ベント機構の有無2種類の実大部分模擬部材の一面を175°C一定に91日間持続加熱し、加熱に伴うコンクリート内部の温度、水分量、ひずみの変化および加熱後の強度、弾性係数を調査した。

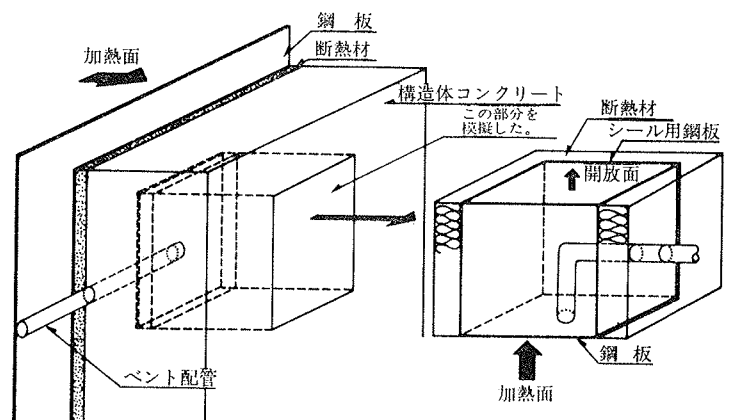


図-1 模擬部材

2. 実験概要

2.1. 模擬部材

実験は、コンクリート実構造体の壁体部を図-1に示すように一部切り取ってきたという想定 of 模擬部材を用い、加熱側鋼板内面に発生する蒸気を抜くためのベント管のある場合とない場合の2ケースについて、鋼板背面を急速に175℃まで昇温した後91日間持続加熱し、各種調査を行なった。

2.2. 測定項目

測定項目は①温度履歴および分布、②含水率履歴および分布、③ひずみ、④ベント管からの放出水量および⑤加熱終了後の強度・弾性係数である。なお、ここで言う含水率とは、コンクリート単位体積あたりの自由水の体積の割合を言い、(°/vol)で表示する。

2.3. コンクリートの調合

コンクリートの使用材料および調合は、原子力施設用コンクリートを想定し表-1に示すとおりとした。

2.4. 試験条件

加熱開始材令、加熱前養生、加熱中の暴露条件、供試体数などの条件は、表-2に示すとおりである。

2.5. 模擬部材の形状寸法

模擬部材は鋼板で5面をシールし1面を開放させ、加熱面から開放面に向かって一方向にのみ、熱および水分移動が生ずるようにした。この際、加熱面の水蒸気圧によって水分がシール用外枠とコンクリートとの間隙を伝わって放出されないよう厚さ方向に止水板を設け、シール用外枠とコンクリートとの間に断熱と止水のためにシリコンパッキング材を充填した。また、熱の移動防止のために周囲をグラスウールで断熱した。

ベント管はφ150mmとし、加熱側鋼板面の中央に設置した。さらに管は断面中央で直角に折り曲げ、側面から外部に取り出し冷却用パイプに接続した。

その形状寸法および各部詳細は図-2に示すとおりである。

2.6. 測定方法

前述2.1.の各種測定および調査の方法は表-3に示すとおりである。

2.7. 測定位置

温度、含水率、ひずみの測定位置および強度試験用コア供試体の抜き取り位置は、断面内の分布が調査できるよう図-3に示す位置とした。

使用材料			コンクリートの調合 (kg/m ³)							混和剤	
セメント	粗骨材	細骨材	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	セメント	水	砂	砂利	遅延型減水剤 (cc)	AE剤 (cc)
フライアッシュ B種	硬質砂岩	硬質砂岩 + 陸砂	10±1.5	55	43	236	164	777	1046	0.745	32.78

表-1 使用材料およびコンクリートの調合

項目	条件
(1) 供試体の種類	ベント管のあるものとないもの各1体、計2体
(2) 供試体の形状寸法	150×150×150cm 角立方体
(3) 加熱開始材令	91日以降
(4) 加熱期間	3箇月
(5) 加熱温度	鋼板側コンクリート表面温度を175℃(一定)とする。
(6) 加熱方法	電気パネルヒーターによる。
(7) 加熱開始までの養生条件	現場養生
(8) 加熱中の暴露条件	供試体の一面が大気条件にさらされる。
(9) 温度の制御方法	電気容量制御器と温度設定器による。

表-2 試験条件

項目	測定方法
a. 含水率	電極法* による。
b. 温度	高温用C-C熱電対による。
c. 内部ひずみ	高温用埋込型ひずみゲージによる。
d. ベント管からの放出水量	ベント管から放出された蒸気をリード管中で冷却し、貯水する。
e. 強度・弾性係数	コア供試体による。

(注) *電極法について

下図に示す電極をコンクリート中に埋設し、電極間抵抗値(R)を測定し、あらかじめ人工的に含水率を変化させた小型の供試体で、コンクリート中の含水率とRとの関係を求めて作成した校正曲線から、実測しようとする部位の含水率を読み取るものである。



表-3 測定方法

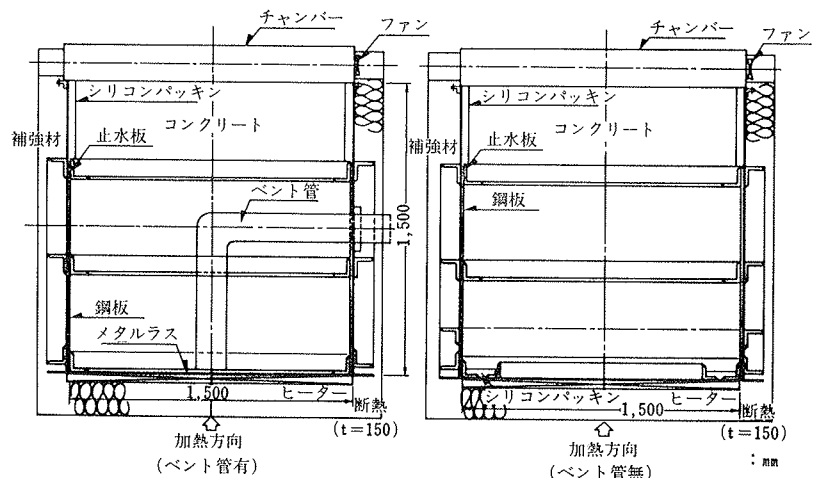


図-2 模擬部材の形状寸法および詳細

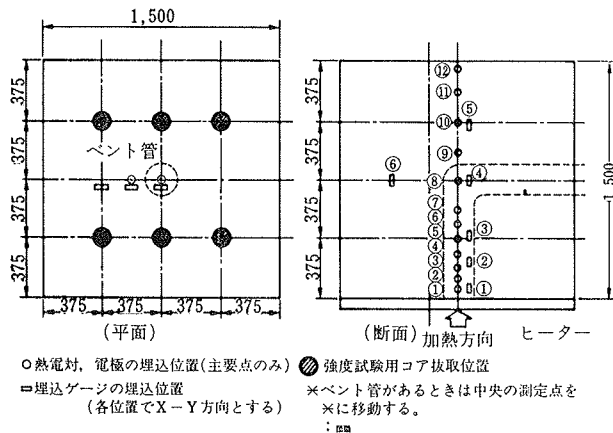


図-3 測定箇所

3. 実験結果および考察

3.1. 加熱開始までの温度履歴

打込後のコンクリート温度変化を図-4に示す。これより、部材内部の温度は水和熱により材令3日目に最高約40℃に達し、材令7日以降は外気温にほぼ等しい温度となった。また、各模擬部材の温度履歴の差はほとんど認められず、加熱開始前までの強度発現に及ぼす温度履歴の影響は等価と見なすことができる。

3.2. 加熱開始後の温度変化

加熱開始後の温度変化は、図-5に示すとおりである。これより、鋼板背面温度は加熱開始後2~3時間で所定の175℃まで達し、2日目から緩慢な変化となっている。

図-6に温度分布の経時変化を示す。これより、鋼板面に近い部分の温度は加熱開始とともに急速に変化している。また、水分の蒸発が急速に進むと思われる100℃以上の温度範囲は徐々に上部に移動し、ベント管のある模擬部材ではほぼ14日で定常状態になり、断面内の温度分布はほぼ直線状態となっている。定常状態におけるコンクリート開放面温度は約50℃で、100℃以上の温度域は模擬部材の下部約1/2のゾーンであった。

一方、ベント管のない模擬部材下部の温度上昇速度は幾分遅く、これは水分移動が緩慢なための影響と思われる。しかし、定常状態の温度分布はベント管のある供試体とほぼ同様であった。

3.3. 加熱開始後の含水率の変化

加熱に伴う含水率の経時変化を図-7に示す。

これより、ベント管のある供試体は、加熱前約15.5%程度程度の含水状態であったものが、加熱開始後鋼板背面がごく初期に絶乾に近い状態となり、時間の経過とともに絶乾のゾーンが徐々に上っていく傾向となった。

一方、開放面も時間の経過とともに乾燥が進行し、加

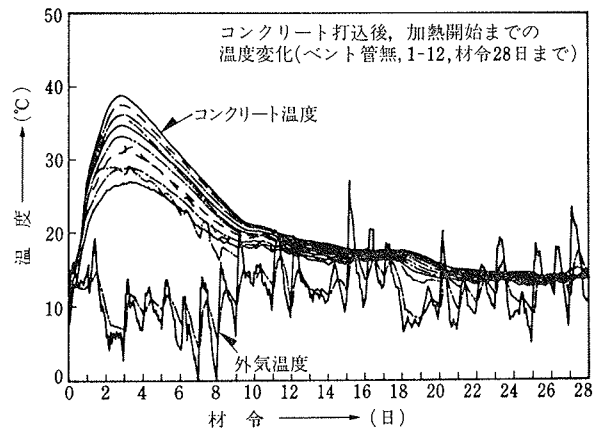
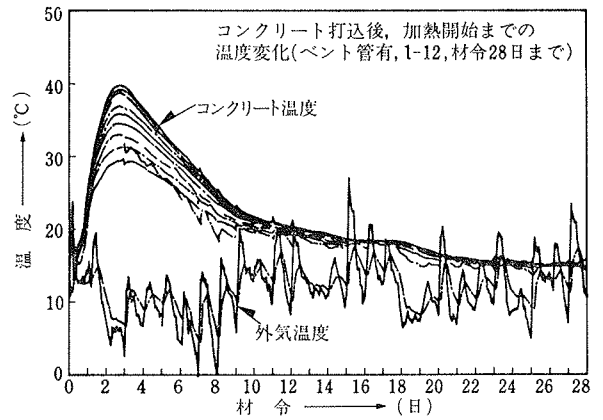


図-4 打込後のコンクリート温度の変化

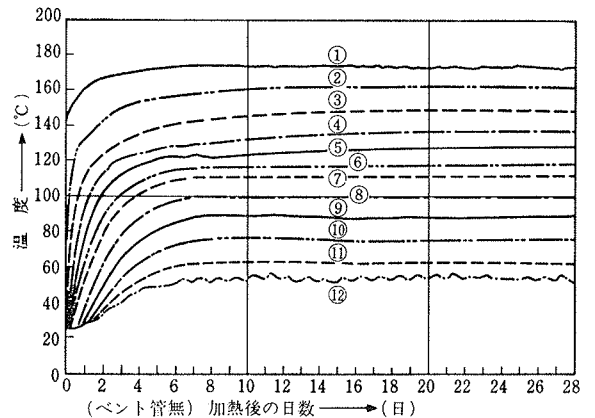
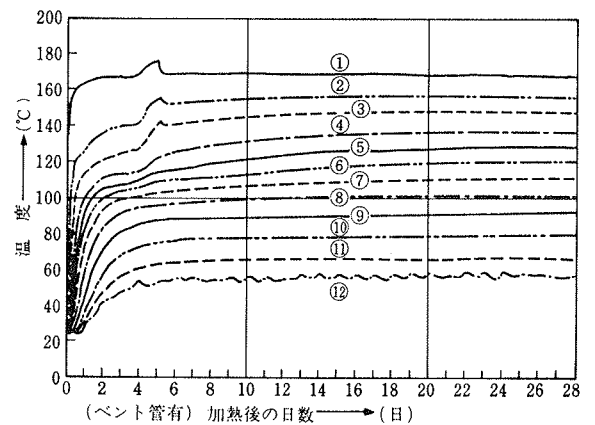


図-5 加熱開始後の模擬部材内部の温度変化

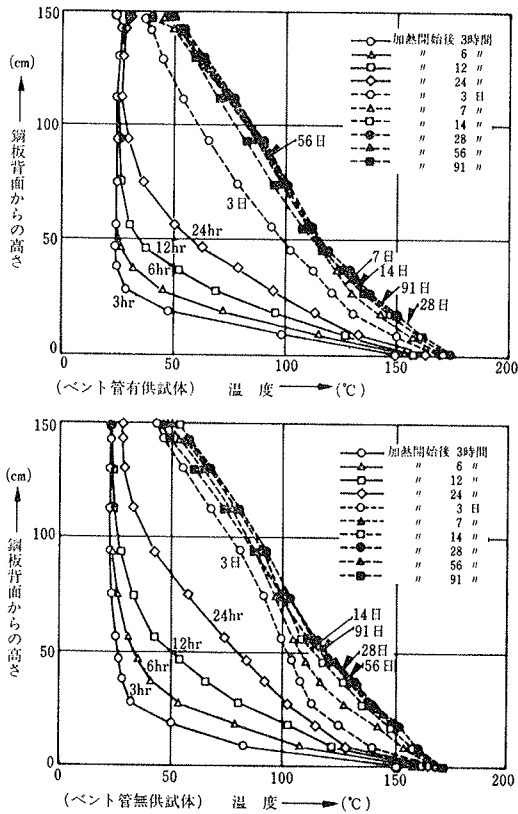


図-6 断面内温度分布の経時変化

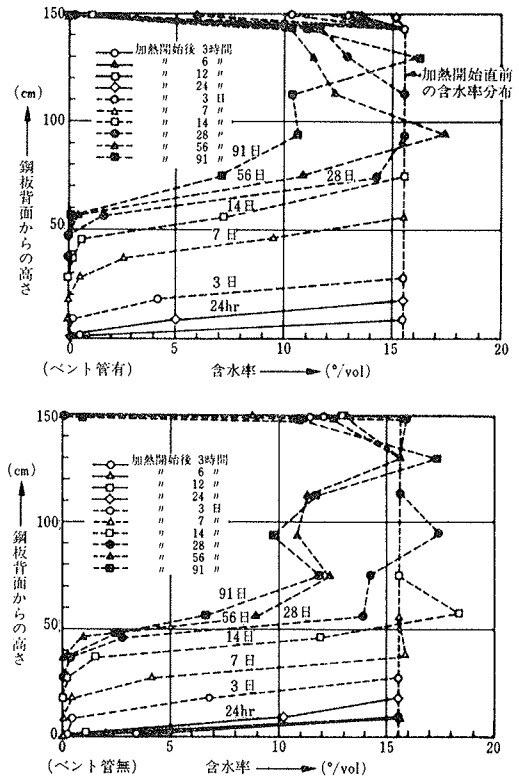


図-7 含水率の測定結果

熱開始後21日で開放面の表層部は絶乾に近い状態になった。また、91日加熱後の含水率分布は開放面および加熱面が乾燥状態で、中央よりやや上部が高含水率となった。

ベント管のない供試体の加熱開始直前の含水状態は、ベント管有とほぼ同様であったが、ベント管のあるものに比べて加熱に伴う含水率の低下の度合いが幾分緩慢で、加熱開始後7日程度ではまた断面内はかなり高含水状態を保持している。また、91日加熱後の含水率分布はベント管のあるものと同じパターンとなったが、高含水率のゾーンはベント管のあるものより広面積となった。

これはベント管から放出される水量による差と考えられる。

3.4. ベント管からの放出水量

ベント管からの放出水量の経時変化を図-8に示す。これより、放出水量は加熱開始後7日目ぐらいまでは比較的急激に増大し、以後緩慢となっている。91日加熱後の放出水量は総量約150lとなり、加熱した鋼板の見付面積1m²当り約70lが、また予想される供試体の全含水量約500lのうち30%程度がベント管から放出されたことになる。

3.5. ひずみの測定結果

前述の図-3に示した各測点のひずみは外部拘束のな

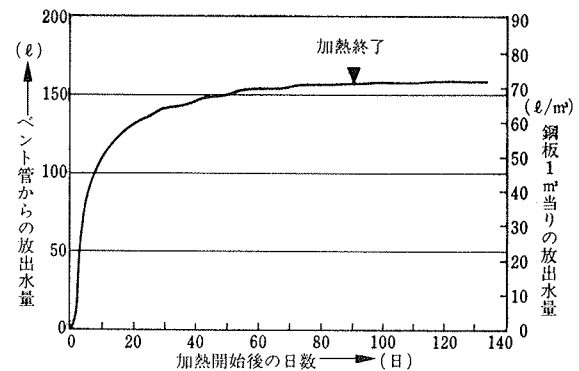


図-8 ベント管からの放出水量

い条件で、下式によって表わされるものである。

$$\epsilon\delta = \epsilon t + \epsilon\sigma + \epsilon s$$

$\epsilon\delta$: ひずみの測定値, ϵt : 熱ひずみ

$\epsilon\sigma$: 応力ひずみ, ϵs : 水分変化によるひずみ

3.5.1. 加熱開始までのひずみの変化 打込後から加熱前までの各測点のコンクリートひずみは、ベント管のあるものもないものも同一位置の温度変化と比例関係にあり、含水率の変化による影響が認められない傾向を示した(図-9)。

3.5.2. 加熱開始後のひずみの変化 加熱開始後の供試体各部のひずみの変化は図-10に示すとおりである。

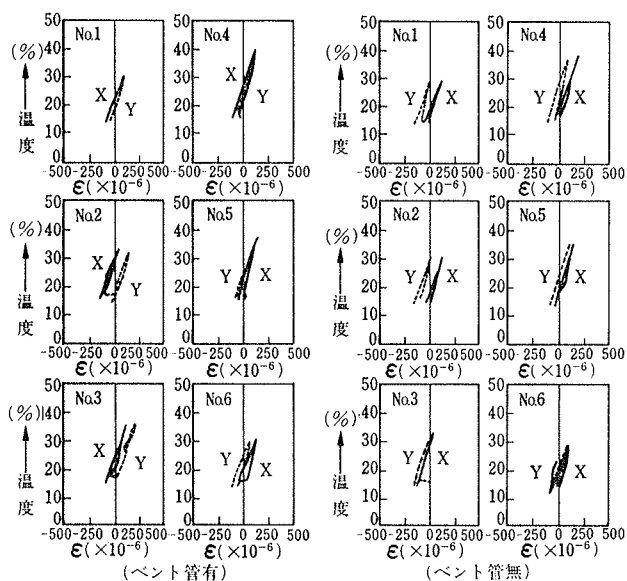


図-9 加熱開始前のひずみの変化

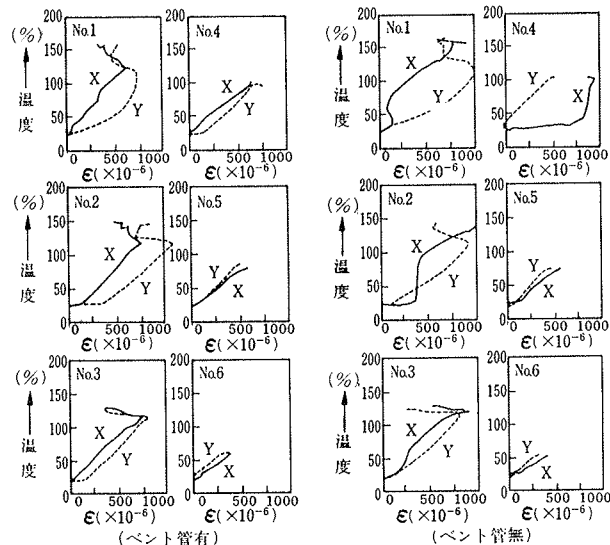


図-10 加熱開始後のひずみの変化

これより、ひずみの変化は温度変化の範囲によってかなり相違する結果となっている。

すなわち、100℃までのひずみと温度との関係は比例関係が認められるが、100℃を超える温度域ではひずみの変化が停滞する結果となっている。これは、温度上昇に伴う膨張と水分蒸発による収縮が相殺し合っているためと考えられる。これらの傾向は、「100℃までは直線的にひずみが増大し、100℃を越えるとひずみの変化は水分蒸発によって停滞する」という、小型のテストピース(φ150×300mm)レベルの実験におけるアンシール(加熱によりコンクリート中の水分が蒸発する)条件での測定結果と同様となっている。なお、加熱鋼板面に近い部分のひずみ(図-10のNo. 1, 2, 3)が非線型的な複雑な挙動を示しているのは、含水率の急速な変化に起因していると思われる。

また、ひずみと温度との関係から、全測点のX-Y方向の見かけの線膨張係数を30⇔50℃の温度区間で求めると表-4に示す結果となる。これより、ベント管のあるものはないものに比較して、やや線膨張係数が小となっているが、両者とも大差がない。また、その値も0.7~1.0×10⁻⁵/℃、平均0.8×10⁻⁵/℃程度で、テストピースレベルの熱膨張ひずみから求めた既報告²⁾の値、約1.0×10⁻⁵/℃より若干小となったが、低温度においては自由膨張に近いものといえる。一方、前述のように高温になると、水分の蒸発による収縮の影響が卓越し、温度の上昇にもかかわらずひずみの増加は停滞し、むしろ収縮する結果となっている。これらの結果を断面内のひずみ分布として示したのが図-11である。これより、温度上

		(×10 ⁻⁵ /℃)			
模擬部材		ベント管有		ベント管無	
Na	方向	X	Y	X	Y
1		0.48	0.77	—	—
2		0.68	0.86	—	1.18
3		0.80	0.74	0.60	0.90
4		0.84	0.80	0.85	0.65
5		0.85	0.80	0.78	0.68
6		0.95	1.05	1.03	0.90
平均		0.77	0.84	0.82	0.88

表-4 線膨張係数の測定結果

昇に伴いまず鋼板面に近い部分のひずみが増大し、時間の経過とともに供試体の非加熱面側のひずみが大となり、温度分布と類似の傾向となっている。しかし、温度上昇に伴う水分蒸発により、加熱側は次第に収縮の傾向を示している。すなわち、高温加熱に伴うコンクリートのひずみの評価には、水分移動の影響が無視できないことが分かる。

3.6. 強度・弾性係数の試験結果

3.6.1. 加熱前の強度・弾性係数 管理用標準水中養生供試体および各種養生供試体の強度試験結果を表-5に示す。これより、模擬部材上中下に対応する標準水中養生供試体強度は、380~410 kg/cm²、静弾性係数(1/4 F.時のセカントモデュラス)は3.4~3.7×10⁵ kg/cm²の範囲となり、ばらつきも少なく供試体全体の品質の均一性は十分確保されていると思われる。ただし、打込み後の上下方向の圧密差による強度勾配については加熱前の状態を今回調査できなかったので不明である。

また、各種養生供試体と模擬部材の打込後からの含水状態を比較するために、両者の電極間抵抗値の経時変化を比較すると（図-12参照）、模擬部材の抵抗値の変化は、各種養生供試体のうち、現場封かん養生と現場水中養生の中間に位置していることが分かる。これより、温度条件をほぼ同等と見なせば、模擬部材の養生条件は現場封かん養生と現場水中養生の中間程度と考えられ、加熱前強度はごく表層部を除いて現場封かん養生と現場水中養生の中間値の約 400 kg/cm² 程度と推察される。

また同様に、静弾性係数についても約 3.5×10⁵ kg/cm² 程度と推察される。

3.6.2. 加熱終了後の強度・弾性係数 91日間加熱終

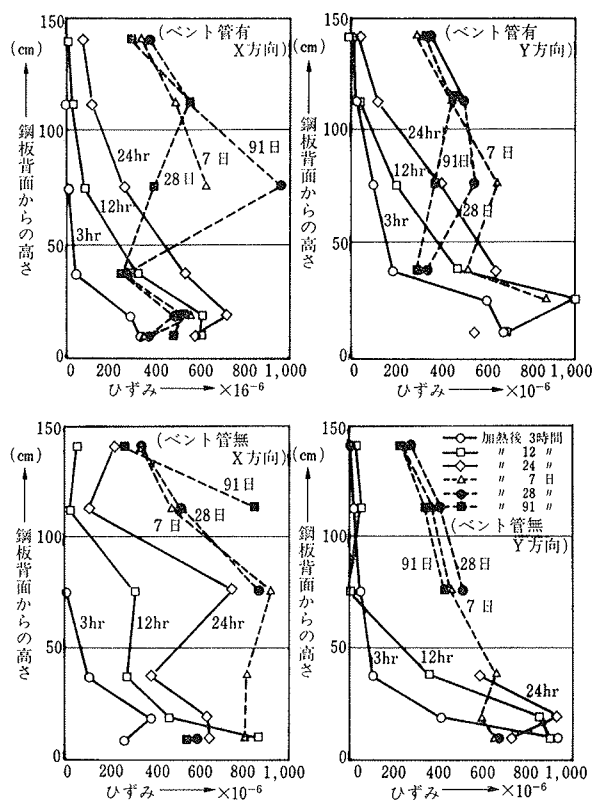


図-11 断面内のひずみ分布の変化

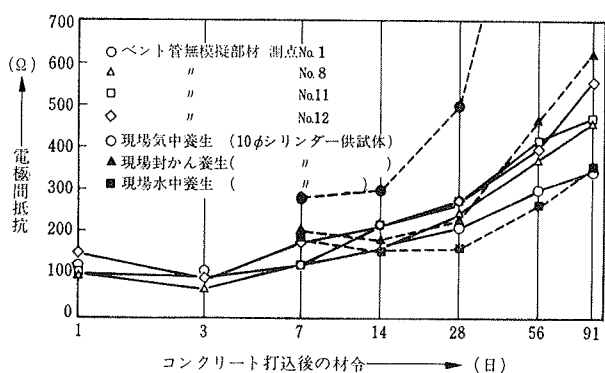


図-12 各種養生供試体と加熱測定用供試体の電極間抵抗値の経時変化

了後に、模擬部材の温度が常温に戻ってからコア供試体採取し、強度・弾性係数を調査した。その結果は図-13~14に示すとおりである。これより、ベント管のあるなしにかかわらず、最大強度は断面中ほどで 500 kg/cm²

養生	供試体 No.*	●●Fc	ベント管有				ベント管無				総平均
			▲▲Ec	1	2	3	平均	1	2	3	
標準水中	Fc		381	410	404	398	381	384	400	388	398
	Ec		3.36	3.47	3.72	3.52	3.41	3.26	3.67	3.45	3.48
現場水中	Fc		408	420	446	425	399	423	428	417	421
	Ec		3.51	3.62	3.62	3.58	3.62	3.59	3.47	3.56	3.57
現場気中	Fc		189	195	223	202	189	253	200	214	208
	Ec		1.64	1.88	2.08	1.87	1.96	2.46	2.01	2.14	2.01
現場封かん	Fc		356	391	395	381	352	359	377	363	372
	Ec		3.48	3.62	3.36	3.49	3.58	3.45	3.55	3.53	3.51

(注) * 供試体の各層に対応している ●●Fc: 強度 (kg/cm²)

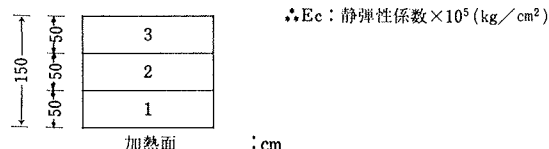


表-5 各種養生供試体の強度試験結果 (材令91日)

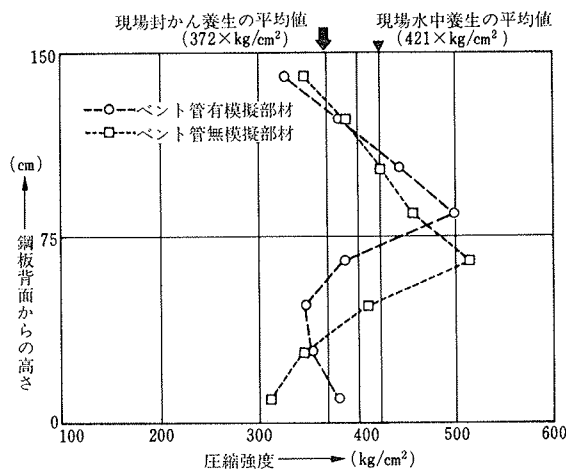


図-13 加熱後の断面内強度

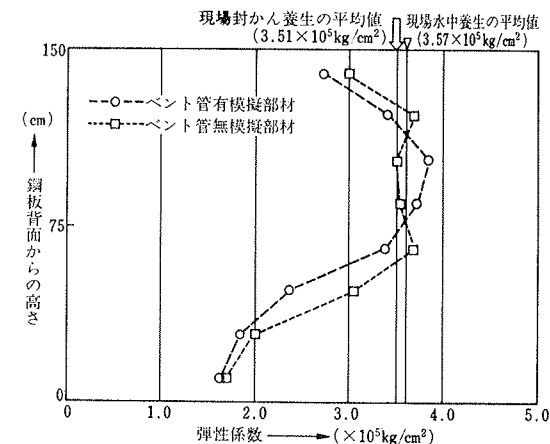


図-14 加熱後の断面内静弾性係数

cm² 程にも達した。全断面内での最小値は加熱鋼板側の最下層であったが、その値は高さ方向の圧密による強度増加分 (1.5 m 高さで約 25 kg/cm² 程度³⁾) を考慮しても設計基準強度 240 kg/cm² を上回っている。また現場封かん養生との比較でも約84%となっており、高温加熱による著しい強度の低下はないものと思われる。

なお、断面中ほどの強度が大となったのは、高温で、しかも高含水率の状態が長時間継続したことによって、強制的に未水和部分の水和が促進されたことによるものと推察される。

静弾性係数については、その分布は強度と類似の傾向を示しているが、加熱鋼板側の低下が大きく、現場封かん養生供試体との比較でも約4割程度の低下を示し、既に報告されているテストピースレベルの実験結果¹⁾ともよく類似したものとなっている。しかし全断面の平均値としては、2.94 (ベント管有)、3.02 (ベント管無) × 10⁵ kg/cm² となり、両者とも大差ない結果となっている。

これより、今回の模擬部材断面のコンクリートのみの軸剛性 { $\Sigma A_i \cdot E_i$ (A_i : 断面積, E_i : 供試体各部の弾性係数)} および曲げ剛性 { $\Sigma E_j \cdot I_j$ (I_j : 供試体各部の断面2次モーメント, E_j : 供試体各部の弾性係数)} の変化を、ひびわれの影響を無視し、現場封かん養生を基準として算出した結果と比較すると、それぞれ約80~86%、約70~74%の低下となり、高温加熱によって2~3割程度の剛性低下があると推察される。

図-15は含水率と静弾性係数の関係を示したもので、含水率と静弾性係数には相関が認められる。

これより、加熱による含水率の低下が弾性係数の低下を惹起する主要因の一つであることが容易に推察できる。

すなわち、高温加熱によってコンクリート中の含水率が低下し、骨材とペースト界面にマイクロクラックが生じたため弾性係数が低下したと考えられるが、熱劣化の影響は不明であるため、今後検討の余地がある。

4. まとめ

今回の調査結果により、以下のことが明らかになった。

(1) 高温加熱時のマスコンクリートの含水率分布は、中央部よりやや上部で最大値を示し、加熱面、開放面が低含水率となる。

(2) ベント管のあるなしにかかわらず、91日加熱後の断面内温度分布および含水分布は平衡状態に達し、分布形状は類似の傾向を示す。

(3) 供試体の含水量は、供試体の1/2が絶乾状態に近く、1/2はほぼ飽水状態に保持され、シール、アンシー

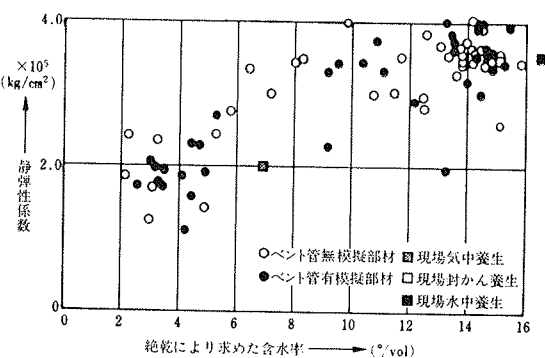


図-15 含水率と静弾性係数との関係

ル両条件の特性を示す。

(4) 175°C 一定に91日間持続加熱したときのベント管からの全放水量は、加熱鋼板見付面積 1 m² 当り約70l となり、予想される供試体全水量の約30%が放出された。また、加熱開始後初期の放出が大であった。

(5) 断面内のひずみは、100°C 未満の部位では、温度とひずみは比例関係にあり、100°C を超える部位では、水分蒸発の影響により非線形の挙動を示す。

(6) 100°C 未満の温度範囲における見かけの線膨張係数は、ほぼ 0.7~1.0 × 10⁻⁵/°C の範囲となった。

(7) 加熱終了後の断面内強度は、現場封かん養生と比較して、加熱面側で約80~100%、高含水率ゾーンでは135%となった。

(8) 加熱終了後の断面内静弾性係数は、現場封かん養生供試体強度と比較して、加熱面側で約60%、高含水率ゾーンでは100~105%となった。

(9) 高温加熱による弾性係数の低下は、加熱に伴う含水率の低下が主要因と思われる。

この実験により、高温加熱を受けるマスコンクリート部材の諸物性を評価するために必要な、多くの情報を得ることができた。

参考文献

- 1) 大池, 他: 高温と外荷重とを受けるコンクリート構造物に関する実験的研究, その2. 高温を受けたコンクリート材料の強度性状, 日本建築学会大会梗概集, (昭和60.10), pp. 871~872
- 2) 大池, 他: 高温と外荷重とを受けるコンクリート構造物に関する実験的研究, その3. 20~175°C のコンクリート材料の熱変形性状, 日本建築学会大会梗概集, (昭和60.10), pp. 873~874
- 3) 永井, 他: 構造体コンクリートの強度管理に関する研究, その8. 実験結果—2, 日本建築学会大会梗概集, (昭和53.9), pp. 219~220