

## 火災時の鉄筋コンクリート柱内部の熱・水分移動に関する研究（その1）

## 高強度コンクリートによる実験

— 瀬 賢 — 長 尾 覚 博  
丹 羽 博 則 江 戸 宏 彰

## Study on Heat and Moisture Transport in Reinforced Concrete Column during a Fire (Part1)

--- Experimental Study on High Strength Concrete ---

Ken-ichi Ichise Kakuhiro Nagao  
Hironori Niwa Hiroaki Eto

## Abstract

A reinforced concrete column restrained by a steel plate and reinforced concrete column using high strength concrete (real strength  $100\text{N/mm}^2$ ) have been studied experimentally to determine heat and moisture transport in a reinforced concrete column during a fire. This report describes the fire endurance, and shows a measurement result considering temperature distribution, hydrate distribution and vapour pressure inside the reinforced concrete column. The following conclusions were obtained.

(1) The reinforced concrete column restrained by a steel plate prevented the explosion of concrete and the inner concrete and reinforced steel bar temperature rise was restrained. In the fully cured high strength reinforced concrete column of  $100\text{N/mm}^2$  class, an explosion was eased. (2) The temperature distribution, hydrate distribution and vapour pressure inside the reinforced concrete column subjected to fire heating was determined for the most part.

## 概 要

火災時の鉄筋コンクリート柱内部の熱・水分移動性状の把握を目的とし、高強度コンクリート（実強度  $100\text{N/mm}^2$ ）を使用した鋼板拘束鉄筋コンクリート柱および鉄筋コンクリート柱試験体について加熱試験を実施した。この報告は、その耐火性能と火災を受けるコンクリート構造体内部の温度分布・含水分布および水蒸気圧の測定結果および考察を示す。実験の結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 鋼板拘束柱では、コンクリートの爆裂を防ぐことができ、内部コンクリートおよび鉄筋の温度上昇を抑制できることを確認した。また鉄筋コンクリート柱においても十分な養生をしたコンクリートでは、 $100\text{N/mm}^2$  級の高強度コンクリートにおいても爆裂が緩和されることが認められた。(2) 火災加熱を受けた鉄筋コンクリート柱内部の温度分布、含水分布および水蒸気圧の推移を概ね知ることができた。

## 1. はじめに

コンクリート構造体が火災等により高温に曝される場合、コンクリート部材内部の温度特性は、コンクリートの含水状態に大きく影響を受けることが知られている。特に高強度コンクリートにおいては、これまでの研究により強度が高いほどまた含水率が高いほど爆裂が生じやすく<sup>1)</sup>、高温加熱時における水分移動が爆裂の発生に大きな影響を与えることが指摘されている<sup>2)・3)</sup>。コンクリート温度が上昇すると、物理吸着水の蒸発・結晶水の熱分解が生じ、潜熱を吸収する。また、失われた水分に応じて空隙が増大し、空隙内では物理吸着水および水蒸気の移流・拡散が生じる。

この報告は、火災時の鉄筋コンクリート柱内部の熱・水分移動の性状把握を目的とし、高強度コンクリート（実強度  $100\text{N/mm}^2$ ）を使用した鋼板拘束鉄筋コンクリ

ート柱（以下鋼板拘束RC柱）および鉄筋コンクリート柱（以下RC柱）試験体の加熱試験を実施し、測定結果からその耐火性能の確認と火災加熱を受けるコンクリート構造体内部の温度分布・含水分布および水蒸気圧の推移について考察を加えたものである。

## 2. 試験の概要

## 2.1 試験の組合せ

試験体は、Table 1に示す  $400 \times 400 \times 1200\text{mm}$  の鋼板拘束RC柱（以下CS10-T）とRC柱（以下RC10-T）を各1体、またコンクリートの初期含水率の相違を把握するための試験体2体（鋼板拘束形式とし内部は無筋としたもの、CS10-WとCS10-D）を準備した。各試験体の寸法・形状をFig.1に示す。CS10-TとRC10-T試験体の配筋は、高強度コンクリートを使用する高層RC造柱の配筋を参考に定めた。各試験体の主筋はD16（SD490）、帯筋はD6

(SHD685), また拘束鋼板にはSS400 (t=4.5mm) を使用した。使用したコンクリートの目標強度は, 各試験体とも100N/mm<sup>2</sup>とした。使用したコンクリートの調合と強度試験結果をTable 2, Table 3に示す。また使用した鋼材の機械的性質をTable 4に示す。

2.2 試験体の含水率

加熱試験直前における各試験体のコンクリートの含水率は, 円柱供試体 (100×200mm) の含水率を基に推定した。CS10-T, RC10-TおよびCS10-W試験体は, 全体をビニールで覆い概ね封緘養生に等しい条件で養生を行ったので, 現場封緘養生円柱供試体の含水率に等しいものと仮定した。なお円柱供試体の含水率は, 加熱温度110で質量が一定となるまで加熱炉で乾燥させ (約3ヶ月), その質量変化から質量含水率 (4.61% : 加熱前後における質量変化 / 加熱後の質量) を求めた。CS10-D試験体は, 上記の円柱供試体と一緒に加熱炉で強制乾燥 (110 で約3ヶ月) させ, 円柱供試体との密度比較から質量含水率を0.87%と推定した。含水率の算定結果をTable 5に示す。

2.3 試験方法

加熱は, Fig. 2に示す (財) 建材試験センター中央試験所の水平炉 (梁・床用耐火炉) にて実施した。加熱試験は, 試験体を2体ずつ (CS10-TとCS10-W, RC10-TとCS10-D) 同時に加熱した。加熱方法は, ISO 834に規定される標準加熱曲線に従い, 3時間加熱とした。また耐火炉のパーナーが対面配置となっているため, 各試験体の4面を均等に加熱できるように, 試験体を耐火炉に対して45度傾けて配置した。

2.4 測定項目

主な測定項目は, 加熱後の外観観察, 試験体の内外温度, 水蒸気圧および含水率とした。各項目の測定位置をFig.1に, 断面内部の各センサー類の配置の一例をFig.3

Table 1 試験体の種類  
Test Specimens

試験体名	CS10-T	RC10-T	CS10-W	CS10-D
構造種別	鋼板拘束柱	RC柱	鋼板拘束柱 (内部は無筋)	
断面寸法	-400×400mm			
試験体長さ	1,200 mm		600 mm	
コンクリートの目標強度	100 N/mm <sup>2</sup>			
主筋Pg (%)	12-D16 (SD490) 1.99			
拘束鋼板	PL-4.5 (SS400)		PL-4.5 (SS400)	
帯筋		4-D6@60		
Pw (%)	2.25*	0.53	2.25*	
内部コンクリートの含水条件	含水状態 (封緘養生)	含水状態 (封緘養生)	含水状態 (封緘養生)	絶乾状態 (強制乾燥)

\* 拘束鋼板を帯筋比に換算した値

Table 2 コンクリートの調合  
Concrete Mixing Proportion

目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C×%)
			C	W	S	G	
100	28	43	608	170	655	962	1.35 (高性能AE減水剤)

Table 3 コンクリートの強度試験結果  
Compressive Strength of Concrete

目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材 齢 (日)	備 考
100	96.1	195 (実験直前)	現場封緘養生
	102.8	214 (実験直後)	

Table 4 鋼材の機械的性質  
Mechanical Properties of Steel Bars and Steel Plate

供試体	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	使用部位
t=4.5 (SS400)	268	2.02	432	拘束鋼板
D16 (SD490)	564	1.95	719	主筋 (CS10-T, RC10-T)
D6 (SHD685)	736	1.99	965	帯筋 (RC10-T)

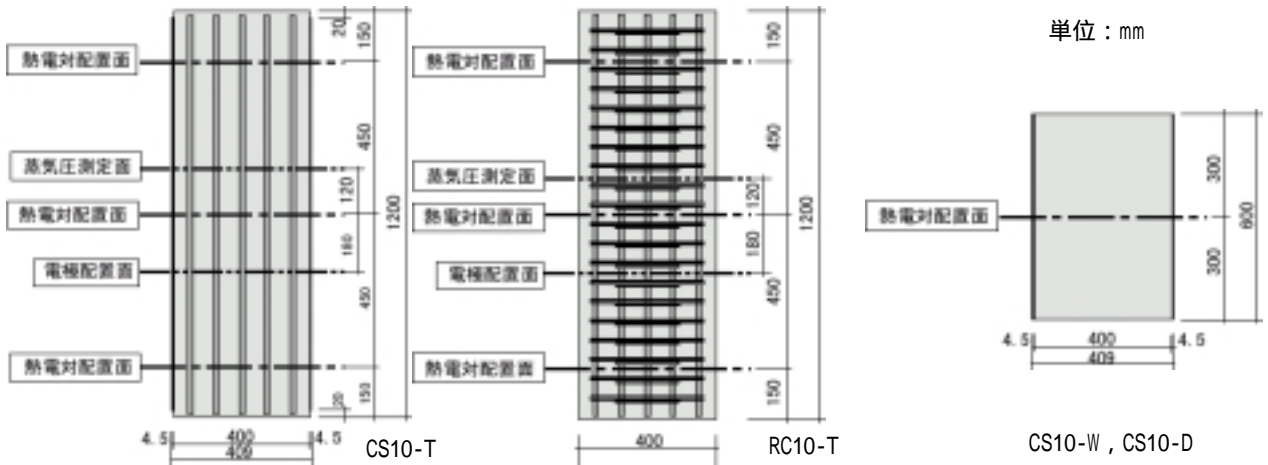


Fig.1 試験体の寸法と形状  
Size and Shape of Test Specimens

に示す。

温度測定は、素線径0.65mmのセラミック被覆K型熱電対を使用して、炉内温度、試験体の表面温度、試験体の内部温度および鉄筋温度について行った。CS10-WとCS10-Dは、試験体の材長方向の中央部の温度を測定した。またCS10-TとRC10-Tは、試験体の材長方向の中央部に加えて、柱頭および柱脚付近の計3断面に熱電対を配置し、測定した。

水蒸気圧の測定は、CS10-T試験体、RC10-T試験体内部の7ヶ所に圧力測定用パイプ(配管用炭素鋼管:外径10.5mm,内径6.5mm,肉厚2mm)を埋設し、炉外にまで延長させたパイプ先端に圧力計を取り付け測定した。

コンクリートの含水率測定は、CS10-T試験体、RC10-T試験体について電極法<sup>4)</sup>を採用した。電極法とは、内部コンクリートの所定の位置に電極を埋設し、その電極端子間で測定される電圧に基づき、含水率を推定する方法である。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 爆裂性状

鋼板拘束柱(CS10-T, CS10-WおよびCS10-D)試験体は、外周面を鋼板で覆っているため、目視による爆裂現象は認められなかった。また加熱終了後、拘束鋼板を剥がして内部コンクリートの状態を観察した結果、概ねその原形をとどめており、拘束鋼板により爆裂を防止できることを確認した。一方RC10-T試験体は、加熱10分後から爆裂音とともに爆裂が生じ、加熱から約60分後まで断続的に爆裂を継続した。爆裂は、試験体の4面全てに生じたが、爆裂深さは最大35mm程度と比較的浅く、主筋および帯筋が露出するまでには到らなかった。爆裂の深さが予想より浅かった要因としては、既往の報告例<sup>5)</sup>で示されているのと同様に養生期間が影響しており、試験体表層部の含水率が低下したものと推察する。これは、低水セメント比のコンクリートであることと試験体を封かん状態で養生したため、試験体表層部の自由水が中心部の方へ移動し、表層部の含水率が低下したものと推察する。

#### 3.2 コンクリート温度

CS10-T, RC10-T試験体の内部温度の経時変化をFig.4に示す。RC10-T試験体は、加熱初期に爆裂が生じたので、CS10-T試験体と比較して全体的に高い温度となった。表層部のコンクリート温度を比較すると、約300 を超える温度差が生じるものの、断面中心部に向かうに従って両試験体の温度差は小さくなった。断面中心部における温度差は、加熱試験中を通じて50 未満となった。

コンクリートの初期含水率をパラメータとしたCS10-W, CS10-D試験体の内部コンクリート温度の経時変化をFig.5に示す。加熱開始時の初期含水率を絶乾としたCS10-D試験体(質量含水率:0.87%)は、CS10-W試験

Table 5 含水率の推定  
Estimated Moisture Content

	加熱前の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	加熱後の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	質量含水率 (%)
円柱供試体	2.404	2.298(絶乾)	4.61(加熱前)
CS10-D	2.404	2.318	0.87(加熱後) (2.318-2.298) / 2.298

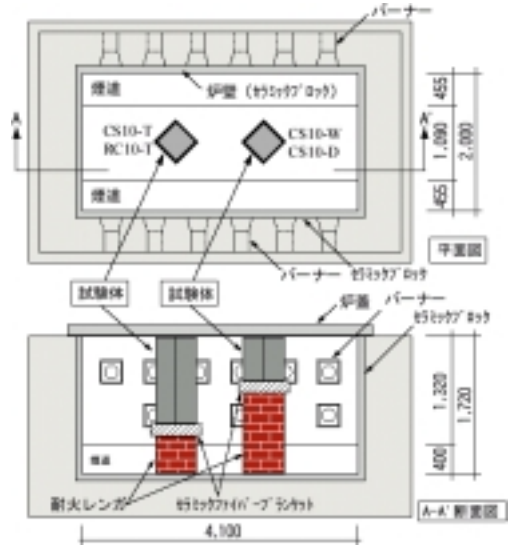


Fig.2 耐火炉  
Refractory Fire Pit

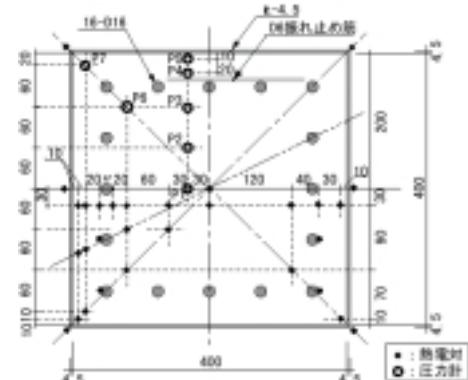


Fig.3 各センサーの配置(CS10-T)  
Setting Position of Sensors

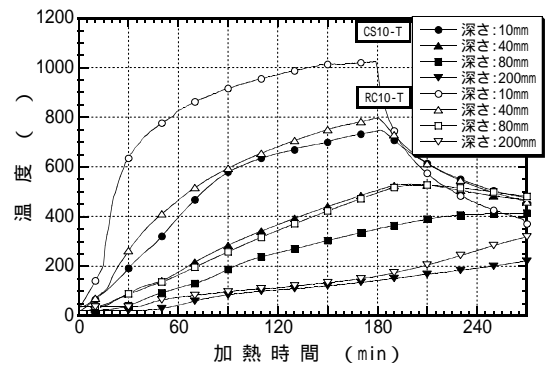


Fig.4 コンクリート温度(CS10-TとRC10-T)  
Concrete Temperature (CS10-T and RC10-T)

体(質量含水率:4.63%)に比べ、内部温度が全体的に高い傾向を示しており、その温度差は表層部で100程度、中心部では18 となった。

### 3.3 コンクリートの強度劣化領域

加熱温度が400 を超えた場合の加熱冷却後の強度試験によれば、コンクリートの圧縮強度は常温時の60%まで低下することが分かっている<sup>6)</sup>。そこで、この部分を「コンクリートの強度劣化領域」と仮定し、加熱1~3時間後における各試験体のコンクリートの劣化領域をTable 6に比較する。RC10-T試験体は、かぶりコンクリートが爆裂によって剥落したので、CS10-T試験体に比べて内部コンクリート温度の上昇が大きく、加熱初期におけるコンクリートの強度劣化領域の割合がかなり大きいことがわかる。

### 3.4 水蒸気圧

水蒸気圧の経時変化をFig.6, Fig.7に示す。RC10-T試験体は、加熱初期の爆裂により、かぶりコンクリートが剥落したため、表面から深さ30mmまでの圧力計が外部に露出した。このため、測定はコンクリートの対角方向と表面から80mm以上における結果を示す。両試験体ともに、加熱表面からの深さ20mmにおける対角部の水蒸気圧が最も高い値を示し、CS10-T試験体では加熱27分後に瞬間的に1.05MPaに達した。しかし他の測点では、最大でも0.20MPa程度の圧力上昇にすぎなかった。圧力の上昇は、断面の中心部に向かって遅くなることを確認した。また表層部ではコンクリート温度が100 に達した後、急激な圧力上昇を示しているが、断面中心部においては、コンクリート温度が100 に達する前から圧力が上昇し始めている。この現象はRC10-T試験体にも共通している。RC10-T試験体の断面中心近傍の測点では、コンクリート温度が60 程度に達する加熱45分後に圧力が1回目の極大値を示し、その後一旦圧力が低下し、コンクリート温度が100 に達した後に再び圧力が上昇して極大値を示した。この現象は、急激に熱せられた表層部で発生した水蒸気の一部が、蒸発に伴う体積膨張によって発生する圧力を駆動力として、断面中心部(=低圧側)に向かって移流・拡散して生じた圧力と考えられる。また表層部で発生した水蒸気が断面中心部に達するとき(=1回目の極大値)の断面中心部温度は、CS10-T, RC10-T試験体ともにまだ100 以下であるため、水蒸気(=気相)が冷却されて液相へと変化することにより、圧力が一旦低下する。その後、加熱の進展に従い断面中心部の温度が100 に達すると、断面中心部において水分の蒸発が始まり、それに伴い発生する圧力によって2回目の極大値を示したものと考えられる。特にCS10-T試験体は、外周面が鋼板で覆われており、加熱表面から直接外気へ水蒸気が解放されないため、断面中心部における圧力がRC10-T試験体よりも高く、また、その圧力を維持し続けているものと推察される。

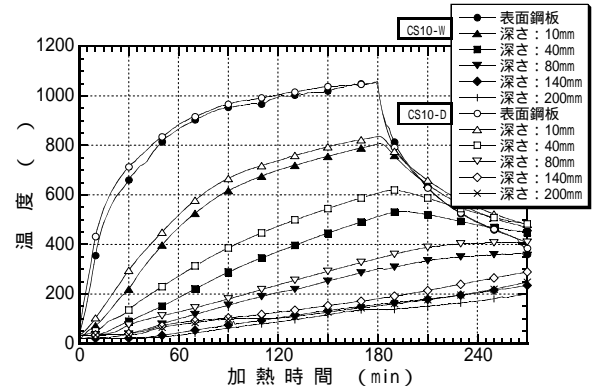


Fig.5 コンクリート温度(CS10-WとCS10-D)  
Concrete Temperature (CS10-W and CS10-D)

Table 6 コンクリートの強度劣化領域  
Strength Deterioration Area of Concrete

加熱時間	強度劣化領域の割合 (劣化領域の断面積 / 全断面積)		RC10-T CS10-T
	CS10-T (鋼板拘束柱)	RC10-T (RC柱)	
1時間後	10 %	44 %	4.4
2時間後	34 %	60 %	1.8
3時間後	54 %	82 %	1.5

\* コンクリート温度が400 を超える領域を強度劣化領域と仮定した。

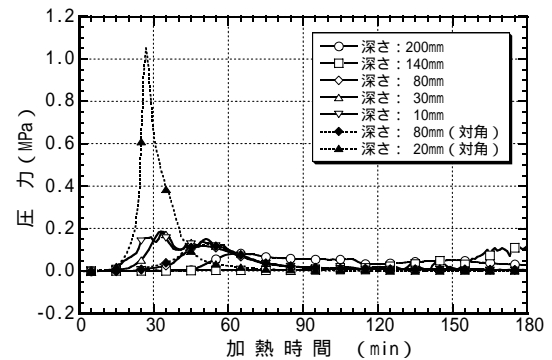


Fig.6 水蒸気圧の経時変化(CS10-T)  
Change of Vapour Pressure(CS10-T)

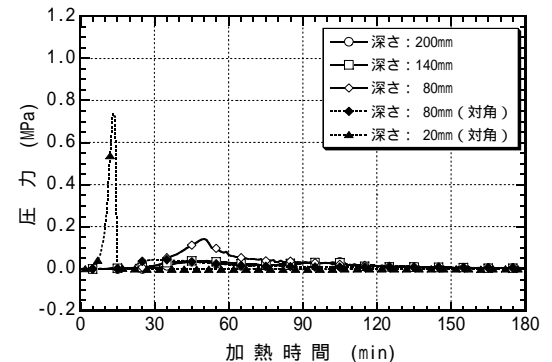


Fig.7 水蒸気圧の経時変化(RC10-T)  
Change of Vapour Pressure(RC10-T)

### 3.5 含水分布

CS10-T, RC10-T試験体の柱幅中央部における電極の出力値(以下電極値と称す)の経時変化をFig.8, Fig.9に示す。電極値は、各電極端子間の電圧の関数、すなわち含水率および温度の関数であり、含水率の増加および温度の上昇に伴い値が増加し、逆に乾燥状態においては値が減少する特性を有する。ここでは、加熱開始時の出力値でインシャライズした電極値の変化を示す。この結果から、両試験体とも表層部から中心部に向かって順に電極値が最大値に達し、その後低下することから、水分の蒸発が表面から順次進行していくことが推察できる。またCS10-Tは、RC10-Tよりも内部温度が低いにもかかわらず、電極値がRC10-T試験体よりも大きいことから、CS10-Tの内部コンクリートはRC10-Tよりも高い含水状態にあることが推察できる。

電極値がゼロとなった時点コンクリートの絶乾状態と仮定し、CS10-T, RC10-T試験体の柱幅中央部に埋設した対辺方向の電極について、各測点の加熱面(コンクリート表面)からの距離とその測点位置が絶乾状態となる加熱時間の関係をFig.10に示す。CS10-T試験体の中心部においては、加熱180分後でも電極値が大きく、まだ含水状態であるものと推察できる。コンクリートの含水領域と絶乾領域との境界(以下「乾湿インターフェイス」と称す)は、各測点間によって若干のばらつきがみられるものの、加熱時間に比例して表層部から内部へと進行していることが分かった。

### 3.6 含水分布と温度および圧力の関係

CS10-T, RC10-T試験体の乾湿インターフェイスの位置と、その時刻における断面内部の温度分布ならびに圧力分布の関係をFig.11に示す。CS10-T試験体は、加熱初期段階において乾湿インターフェイス近傍で圧力が最大となり、また乾湿インターフェイスの外側の乾燥領域においても高い圧力を示している。これは、CS10-T試験体の外周が鋼板で覆われており柱表面から水蒸気が解放されないため、乾湿インターフェイス外側の乾燥領域においても、水蒸気が多く存在しているものと推察される。また加熱60分後以降においては、乾湿インターフェイスの位置にかかわらず、断面中心部の圧力が最も高い傾向を示している。

RC10-T試験体は、加熱90分後までは乾湿インターフェイス近傍で圧力が最大となっているが、加熱の進展に従って断面内部の圧力分布が均等化されてゆき、徐々に圧力が低下してゆく傾向を示した。また加熱180分後においては、全断面が絶乾状態に至っているため、圧力はほとんど検出されていない。

## 4. まとめ

高強度コンクリートを使用した鋼板拘束RC柱およびR

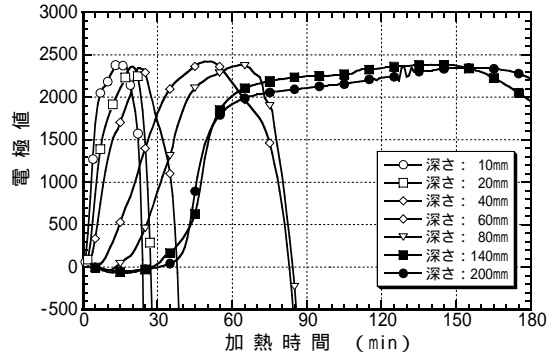


Fig.8 電極値の経時変化(CS10-T)  
Change of Electrode Tip's Value(CS10-T)

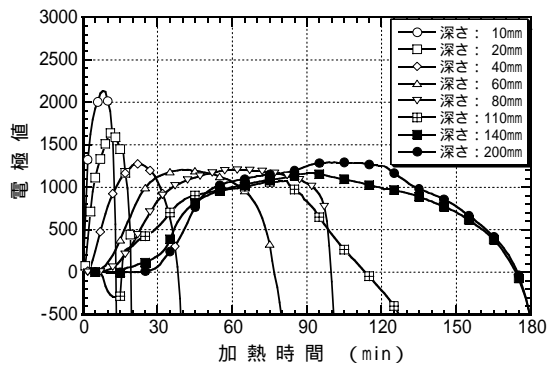


Fig.9 電極値の経時変化(RC10-T)  
Change of Electrode Tip's Value(RC10-T)

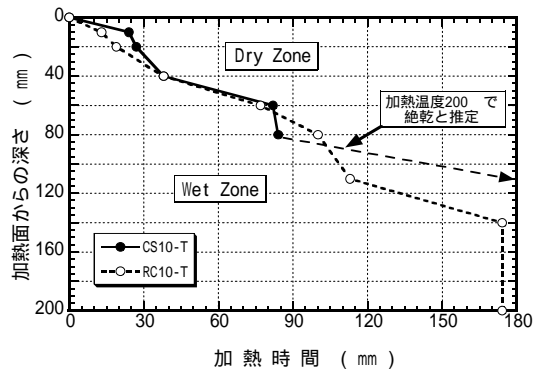
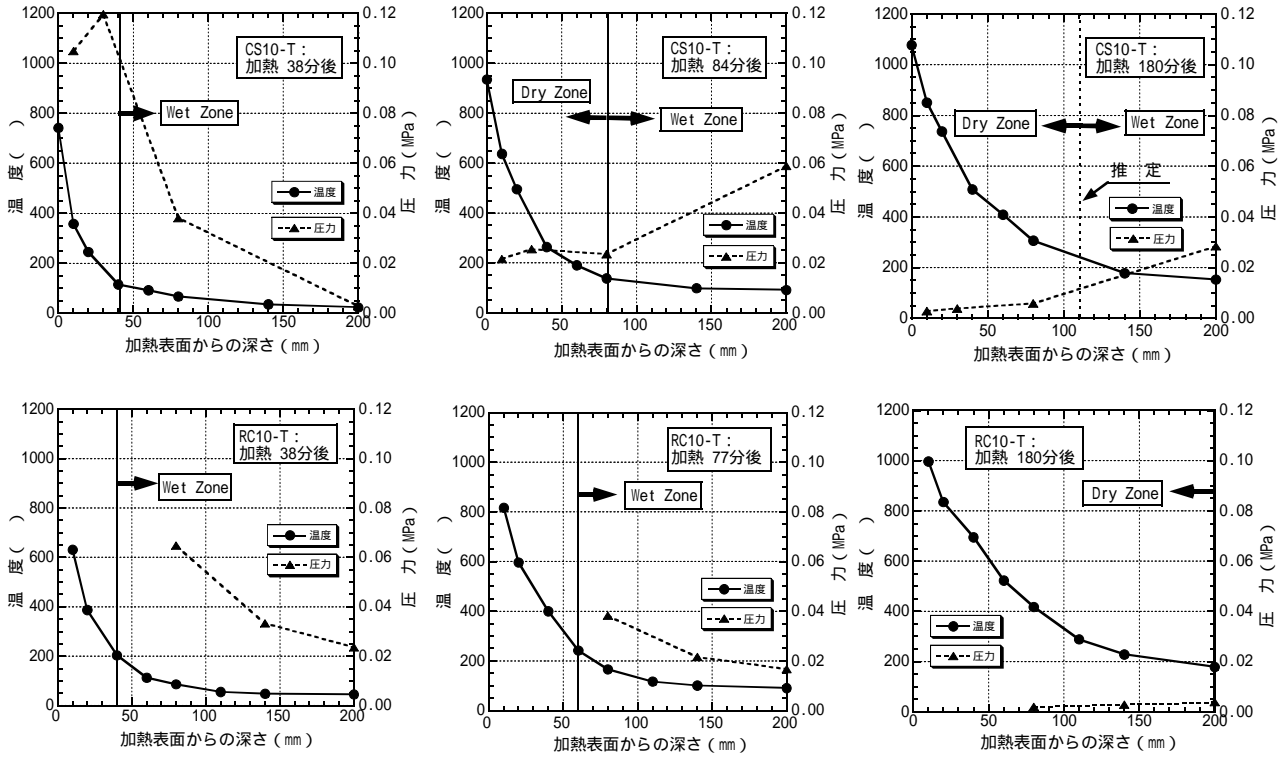


Fig.10 乾湿インターフェイスの経時変化  
Change of Dry-Wet Interface

C柱の加熱試験を実施した結果、以下のことが分かった。

- 1) 鋼板拘束RC柱では、コンクリートの爆裂を防ぐことができ、内部コンクリートおよび鉄筋の温度上昇を抑制できることを実証した。またRC柱においても十分な養生を行えば、100N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートを使用した場合においても爆裂が緩和されることが認められた。
- 2) 火災加熱を受けた場合の鋼板拘束RC柱およびRC柱において、内部温度分布、含水分布および水蒸気圧の推移を概ね知ることができた。



\*:RC10-Tは、加熱開始から30分以内にコンクリート剥離のため加熱表面から80mm未満の圧力データ除外

Fig.11 乾湿インターフェイスの位置と断面内部の温度および圧力分布  
Position of Dry-Wet Interface and Distribution of Temperature and Vapour pressure in Concrete Column Section

3) コンクリートの初期含水率をパラメータとした加熱試験を行った結果、初期含水率を絶乾とした試験体の内部コンクリート温度は、含水状態の試験体に比べて温度が全体的に高い傾向を示した。その温度差は、最大で100程度であり、3時間加熱を通じての平均的な温度差は、概ね50程度であった。

4) コンクリート内部の絶乾領域と含水領域の境界となる乾湿インターフェイスは、加熱の経過時間に比例して内部へと進行してゆく。鋼板拘束RC柱は、外周面を鋼板で覆っているため、水蒸気が外気に解放されにくく、RC柱よりも内部コンクリートの乾燥の進行が若干緩やかとなる。

5) コンクリート内部の水蒸気圧は、加熱初期段階においては乾湿インターフェイス近傍で最大値を示す。その後は加熱の経過時間に伴い、鋼板拘束柱では、断面中心部の圧力が最も大きい状態を維持しながら圧力が低下してゆく傾向を示す。一方RC柱では、断面内部の圧力分布が均等化されながら徐々に圧力が低下してゆく傾向を示す。

今後は、これらのデータを用いて熱・水分同時移動を考慮した熱伝導解析へ展開していく予定である。

参考文献

- 1) 井上他：高強度コンクリートの耐火性の評価に関する研究(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集A，pp.739～740，(1991.9)
- 2) 長尾，中根：高強度コンクリートの爆裂に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.657～662，(1996)
- 3) 長尾，中根：高強度コンクリートの爆裂制御に関する検討結果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.631～636，(1997)
- 4) 長尾，中根，一瀬：高温加熱されるコンクリート中の含水率測定法，大林組技術研究所報，No.32，pp.107～111，(1986)
- 5) 大角，飛坂，井上：高強度コンクリートの耐火性の評価に関する研究(第5報)，日本建築学会大会学術講演梗概集A，pp.1099～1100，(1993.9)
- 6) 一瀬，長尾，中根：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.535～540，(1997)