

# 被覆による高強度コンクリート爆裂防止法の研究

起橋 孝徳\* 早川 邦夫\* 河野 政典\*

## 1. はじめに

高強度コンクリート部材は火災時の高温加熱によって爆裂を生じることが知られており、爆裂に伴う断面欠損等による部材損傷が近年問題視されるようになってきている。高強度コンクリートの爆裂対策としては、既に樹脂繊維等を当該コンクリート中に混入する方法が提案されている。しかし、この手法では繊維混入によってフレッシュコンクリートのワーカビリティが低下し、密実なコンクリートの打設が困難になる。また、高温履歴を受けることによる構造躯体の劣化は避けられないため、火災で受けた温度履歴の程度によっては爆裂を生じなかった構造部材でも、性能回復のためにコンクリートや鉄筋を取り替える補修を要することが考えられる。このため、ここでは部材表面に保護層を設けて構造躯体への温度伝達を抑制することによって爆裂を防止する方法について検討することとした。

## 2. 実験概要

爆裂対策は、最適な被覆材料の選択を主な検討項目とし、その最終的な判定は IS0834 加熱曲線による模擬柱の荷重加熱試験によって行った。但し、荷重加熱試験を行える回数には限りがあるため、これに先立って被覆材料の適否について小規模な要素試験を行って荷重加熱試験に用いる材料の選択を行った。検討の手順を以下に示す。

- i. 検討材料の選定：一般に用いられている防・耐火材料や内装仕上げ材料を対象とし、耐火性能の期待できるものを抽出する。
- ii. 要素実験：板状の小型試験体を製作して市販の電気炉による一方向加熱試験を行い、加熱による爆裂の有無や基本的な熱物性を確認する。
- iii. 温度解析：要素実験で得られた温度履歴から、

試験体コンクリート及び被覆材料の熱物性値を算出し、材料検証試験および荷重加熱試験における試験体の温度履歴を推測する。

- iv. 材料検証試験：IS0834 加熱曲線に近い加熱が可能な小型耐火炉を用いて、板状試験体の一方向加熱試験を行い、要素実験で抽出した材料の適用性や温度解析の妥当性についての検証を行い、荷重加熱試験に用いる材料を決定する。
- v. 荷重加熱試験：実際の柱形状を模擬した試験体に対して IS0834 加熱曲線による荷重加熱試験を行ない、採用した被覆材料が爆裂対策として有効であることを確認する。

## 3. 要素実験

### 3.1 試験方法

加熱試験には市販の電気炉（最高温度：1150℃、出力：2.4kW）を用い、電気炉の扉を取り外した開口を塞ぐ様に試験体を設置し、試験体に対して炉内から一方向の加熱を与えた。断面のイメージを図-1に、試験時の外観を写真-1に示す。

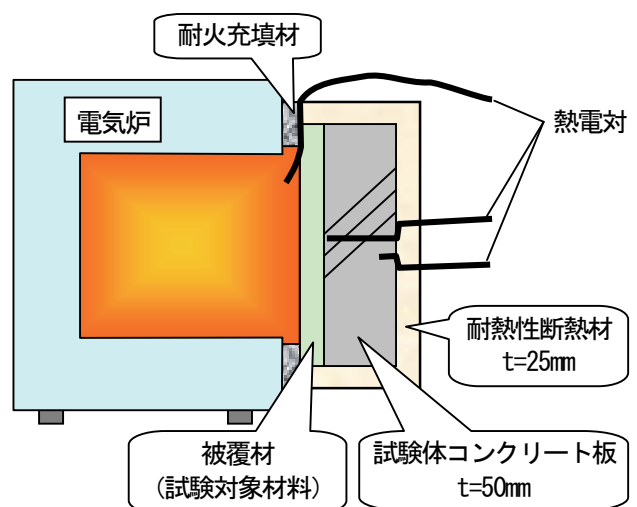
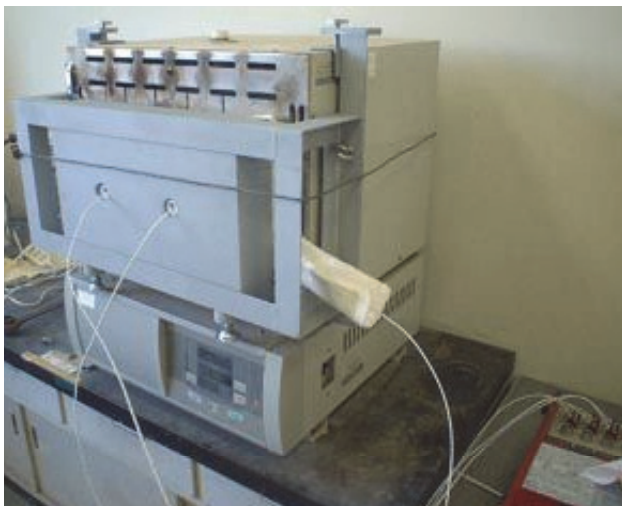


図-1 要素実験方法（断面イメージ図）

\*技術研究所



写真－1 試験状況（要素実験）

試験体は電気炉の形状に合わせて設定した寸法（280×370×50 mm）の板状に、熱源側表面、および熱源側コンクリート表面から 40mm の位置に熱電対を埋設して 100 N/mm<sup>2</sup> 級の高強度コンクリートを打設し、このコンクリート板の熱源側表面に各種材料によって被覆を施した。コンクリートの混和材にはシリカフェウムを、混和剤には高性能減水剤を使用した。コンクリート調合を表－1に、試験対象とした被覆材料を表－2に示す。

表－1 コンクリート調合

W/B (%)	S/a (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	B	S	G
20.0	42.4	155	775	637	875

※B：セメント+シリカフェウム

表－2 要素実験対象被覆材料

適用材料	仕様	厚さ	
被覆なし	—	—	
けい酸カルシウム板	耐火2時間	25 mm	
	耐火1時間	15 mm	
強化石膏ボード	耐火2時間	36 mm	
仕上塗材	熱発泡型防火用	約 0.3 mm	
モルタル	普通	C:S=1.3(質量比)	20 mm
		市販軽量骨材使用	10 mm
	軽量	表層5mmのみ普通	20 mm
			35 mm
	耐火	耐火1時間	20 mm
	ポリプロピレン繊維混入	0.1 重量%	20 mm
0.2 重量%		30 mm	
		10 mm	

加熱温度は、IS0834 加熱曲線を目標として 180 分間に 1, 150℃まで上昇させることとしたが、熱が試験体を透過することや電気炉自体の加熱能力が不足していたことなどにより、初期の温度上昇は目標とした温度に及ばなかった。このため、試験の一部では試験開始時の炉内に赤熱状態の木炭を入れて初期の温度上昇を促進させた。加熱試験中は、炉内とコンクリート板の温度履歴を熱電対で測定した。

### 3.2 試験結果

試験中の爆裂の有無と炉内および試験体表面の最高温度を表－3に示す。爆裂を生じなかった被覆材料は、繊維混入けい酸カルシウム板（以下、ケイカル板と称す）、強化石膏ボード、および厚さ 20mm 以上の軽量モルタル、耐火モルタル、繊維混入モルタルであった。爆裂を生じた試験体については、爆裂発生と同時に試験を終了しているため、炉内の最高温度は所定の温度には至っていない。一方、爆裂を生じなかった試験体についても、加熱能力の不足から試験時間の 3 時間に所定の温度に達しないものもあった。このため、要素実験で爆裂を生じたものは爆裂防止のための被覆材として不適当であることは判定できたが、ここで爆裂を生じなかった被覆材の全てが IS0834 加熱曲線による試験でも爆裂防止性能を持つとは言えない。

表－3 実験結果（要素実験）

被覆材料		爆裂有無	最高温度(°C)				
			炉内	表層			
被覆なし		—	有	435	434		
ケイカル板		t=25	無	1064	272		
		t=15	無	1131	387		
強化石膏ボード		t=36	無	1130	383		
熱発泡型防火塗材		t=0.3	有	478	446		
モルタル	普通	t=20	有	906	396		
		t=10	有	955	477		
	軽量	t=20	無	1119	740		
		t=35	無	1127	363		
		t=20	無	892	436		
	耐火	t=20	無	892	436		
		繊維混入	0.1 重量%	t=20	無	753	554
			t=30	無	1091	678	
	0.2%重量	t=10	有	861	479		

爆裂発生時のコンクリート表面温度は、おおよそ 400℃前後から 500℃であったが、爆裂しなかった試

験体の中にはこの温度域を越えているものもあり、爆裂はコンクリート表面の最高温度のみでは判断できないことが判った。要素実験時のコンクリート表面温度履歴について、爆裂の有無によって分類したものを図-2に示す。爆裂を生じた全ての試験体の温度履歴は、爆裂を生じなかったものに比べてコンクリート表面の温度上昇が早いことが図から見て取れる。このことから、コンクリートの爆裂は、単位時間当たりの温度上昇量（以下、温度上昇速度と称す）と到達温度域の二つの条件を満たした場合に発生すると考えられる。

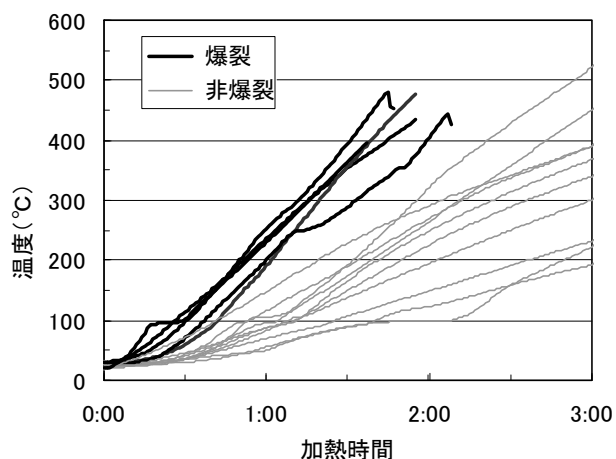


図-2 試験体温度履歴（要素実験）

#### 4. 解析による温度予測

要素実験の加熱温度は、装置の能力から IS0834 の標準加熱曲線とは異なっている。また、試験体の大きさや形状から、実際の柱とは熱容量が異なり、隅角部分の評価も出来ていない。このため、当社保有の FEM 解析プログラム (FEAST7) を使用して、要素実験時の温度計測結果から逆解析によってコンクリートと被覆材料の熱伝導率や比熱容量を算出し、これを基に IS0834 標準加熱曲線に従った加熱を行った場合の順解析を行って、板状試験体や実際の柱における温度履歴を推定した。

コンクリートの表面温度について、補正の過程毎に表した解析例を図-3に示す。要素実験結果 (①) と比較すると、同形状の試験体では加熱温度の違いにより初期の温度上昇が大きくなる (②)。これを模擬柱に置き換えると、平面部分では試験体の大きさ（熱容量）によって温度上昇量は小さくなるが (③)、隅角部分では2方向から加熱されることにより温度上昇量

は著しく大きくなる (④) ことが予測された。

模擬柱試験体の仕様で解析した試験体コンクリートの隅角部表面温度履歴と、要素実験結果を図-4に示す。解析による推定温度は、厚さ 25mm のケイカル板で被覆した場合を除き、要素実験で爆裂を生じた温度上昇速度と温度域を上回る結果を示しており、これらの試験体については加熱载荷試験による爆裂発生の危険性がある事が予測された。

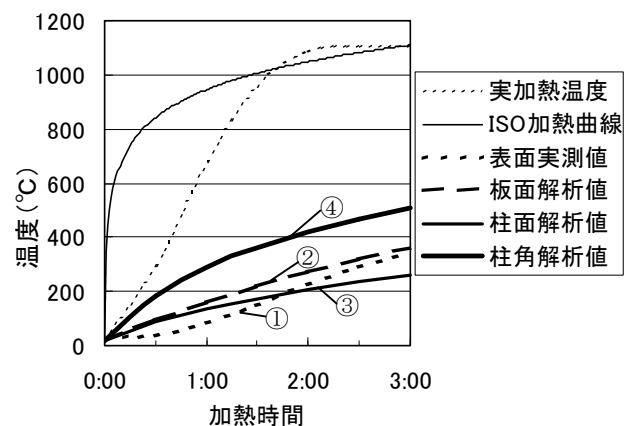


図-3 補正要因別温度履歴解析結果（例）

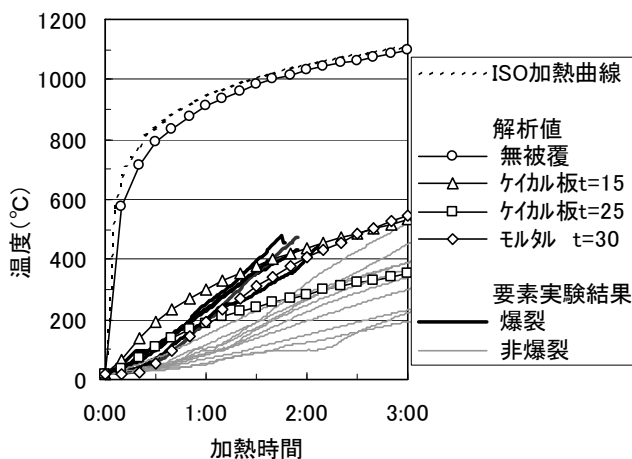


図-4 温度履歴対比（解析—要素実験）

#### 5. 材料検証試験

##### 5.1 試験方法

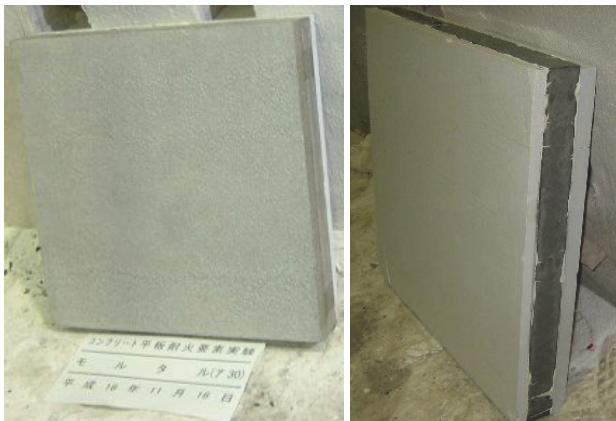
試験体は板状で加熱炉の形状に合わせて設定した寸法 (550mm×550mm×50 mm) とし、試験中は炉内、熱源側コンクリート表面、および鉄筋かぶり深さ位置の3点で温度履歴を測定した。試験対象の材料を表-4に示す。試験対象とする被覆材料は、要素実験で爆裂

を発生させず、コンクリートの温度上昇抑制に効果があると考えられたもののうち、厚さ 15mm のケイカル板と厚さ 30mm のモルタルを抽出した。

加熱試験は小型耐火炉を用いて行い、要素実験と同様の一方向加熱とし、加熱は、IS0834 加熱曲線（最高温度 1,110°C）となるよう手動で温度調整して3時間加熱した。試験体形状を写真-2に、加熱試験状況を写真-3に示す。

表-4 使用被覆材料（材料検証試験）

適用材料	摘要	厚さ(mm)
ケイカル板	耐火1時間仕様	15
普通モルタル	C:S=1:3(重量)	30



モルタル試験体 写真-2 材料検証試験体  
ケイカル試験体



写真-3 材料検証試験体

## 5.2 試験結果

各試験体の加熱炉およびコンクリート表面における最高温度を表-5に示す。ケイカル板で被覆した試験体では試験終了まで爆裂は生じなかったが、モルタルで被覆した試験体は温度上昇速度が早く、加熱開始120分時点で要素実験での爆裂発生温度域に達した。

このことから、モルタル試験体については爆裂の発生が予見されたため、爆裂の衝撃による炉の破壊を回避するために加熱試験を中断した。これらの結果から載荷加熱試験で対象とする被覆材には、二種類の厚さ（15mm、25mm）のケイカル板を用いることとした。

コンクリート表面の温度履歴の実測値と解析値の対比を図-5に示す。モルタルで被覆した試験体の実験値は、モルタル中の水分の蒸発によって約100°Cで温度上昇に停滞が生じたが、試験中断まではほぼ解析値で近似できていた。また、ケイカル板で被覆した試験体では実験値は解析値よりも若干低目になったが、材料間の傾向は類似しており、解析結果を基に爆裂発生の有無が概ね予測可能であると考えられる。

表-5 材料検証試験結果

適用材料	爆裂	最高温度(°C)	
		炉内	表面
ケイカル板	無	1,110	320
普通モルタル	有(推定)	1,044	389

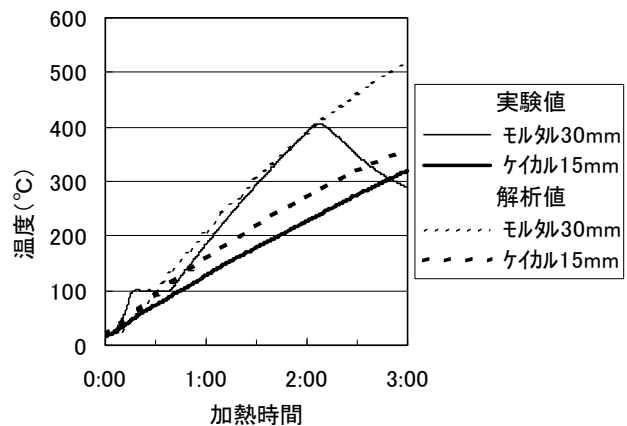


図-5 試験体温度履歴（材料検証試験）

## 6. 載荷加熱試験

### 6.1 試験方法

試験体柱は、要素実験と同じ  $Fc100N/mm^2$  の高強度コンクリートで製造し、表層や鉄筋位置および中心部に熱電対を埋設した。被覆をしていない試験体の形状および温度計測位置を図-6に示す。

試験体諸元を表-6に、爆裂対策の仕様を表-7に示す。爆裂対策は、要素実験の結果等から厚さ 25mm または 15mm のケイカル板で表面被覆を施した場合とし、比較のために無被覆の試験体を用意した。

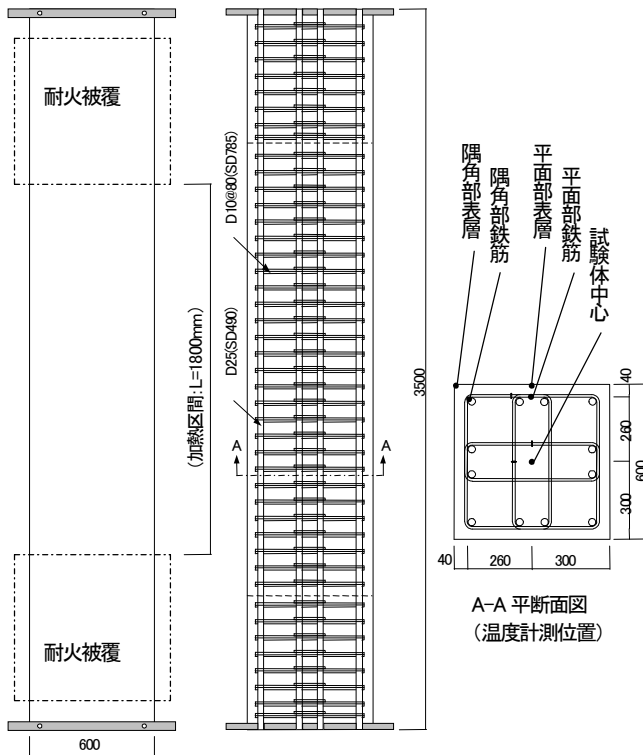


図-6 載荷加熱試験体(無被覆)

表-6 柱試験体諸元

柱寸法(mm)		600×600×3500
コンクリート	設計基準強度	100 N/mm <sup>2</sup>
	水セメント比	20 %
鉄筋	主筋	12-D25, SD490
	帯筋	4-D10@80, SD785

表-7 爆裂対策の仕様

爆裂対策	厚さ
無被覆	—
ケイカル板(直貼り)	25mm
	15mm

加熱炉の熱源には都市ガス(燃焼能力: 46.090 kJ/m<sup>3</sup>)を用い、加熱温度の管理は試験体面から10cm離れた位置の測定値で行った。また、載荷軸力は9000 kNとした。試験条件を表-8に示す。また、載荷加熱試験機に試験体を設置した状況を写真-4に示す。

表-8 加熱試験条件

載荷軸力比	$F_c \times 0.25$ (載荷軸力 9000kN)
加熱温度	ISO 834 標準加熱
加熱時間	3時間加熱、後追9時間、計 12 時間
加熱区間	柱全長の内、中間高さの 1800 mm



写真-4 載荷加熱試験準備状況

## 6.2 試験結果

被覆または爆裂の有無にかかわらず、何れの試験体でも試験中の収縮計測値は ISO834 の規定値以内にあり、軸力は試験開始から3時間の加熱および後追い9時間の試験終了までの間保持していた。このことから、本実験の諸元における高強度コンクリート柱は、被覆の有無にかかわらず耐火3時間性能を持っていることが判った。

無被覆の試験体では、コンクリートの表層温度は試験開始直後から急激に上昇し、加熱開始から6分後には爆裂が始まった。最高温度は主筋位置で800°Cを上回り、試験終了時には、試験体のかぶりコンクリートは失われて全面で帯筋や四隅の主筋、および中子筋に拘束されている主筋の一部が露出していた。

厚さ25mmのケイカル板で被覆した試験体では、加熱試験中にケイカル板表面で亀裂が観察されたが、爆裂は生じなかった。また、コンクリート平面部表層における最高温度は200°C以下で、コンクリート強度が低下し始める温度<sup>1)</sup>には至らなかった。加熱試験後の試験体被覆およびコンクリート表面状態を写真-5に示す。ケイカル板の亀裂は試験体の冷却に伴って大きくなったが、被覆を剥がして観察したところ、その内側のコンクリート表面は健全であることが確認できた。

厚さ15mmのケイカル板で被覆した試験体では、加熱開始から約2時間後に隅角部で爆裂が始まり、その影響で被覆材が浮いたため、試験体全面にわたって爆裂が進行した。試験後の試験体は、無被覆の場合と同様に帯筋や主筋が露出していた。

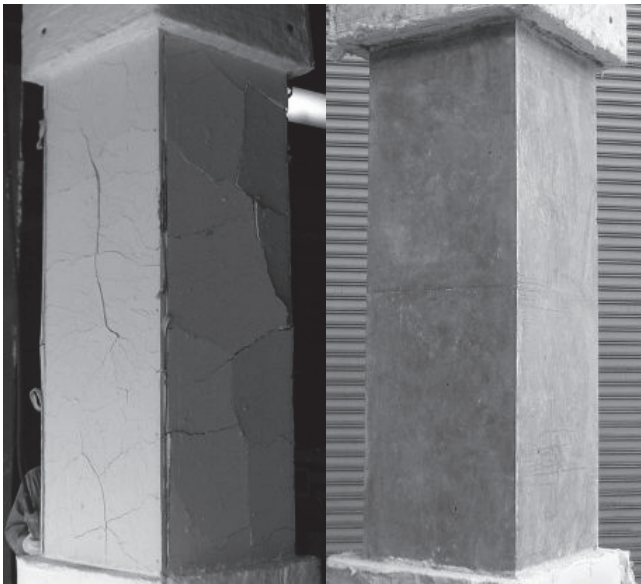


写真-5 加熱試験後試験体状態(ケイカル、t=25mm)

## 7. 温度解析値と実験値の比較

荷重加熱試験時の実測値と、解析による温度履歴の比較を図-7～9に示す。解析値の温度履歴は、被覆の有無にかかわらず何れの試験体についてもコンクリートの爆裂が始まるまでの実測値によく近似しており、本研究に基づく解析手法によって実大柱の温度予測が精度良く行えることが確認できた。

## 8. まとめ

高強度コンクリートの火災時における爆裂対策として、部材表面に保護層を設けて構造躯体への温度伝達を抑制することによる爆裂防止方法について、小規模な要素実験や温度解析、および柱部材の荷重加熱試験を行って検討した結果、以下のことがわかった。

- i. 高強度コンクリートの爆裂発生の有無は、加熱によって到達する温度の高さだけではなく、そこに至る温度上昇速度にも依存する
- ii. 本実験の高強度コンクリート柱は、被覆の有無にかかわらず耐火3時間性能を満足する
- iii. ケイカル板を被覆に用いた措置により、厚さ25mmで3時間、厚さ15mmでは2時間弱、爆裂を防止でき、厚さ25mmの場合にはコンクリート表面における強度低下も防ぐことが出来る
- iv. 要素実験に基づいて温度解析を行うことにより、爆裂発生の有無を予測することが可能である

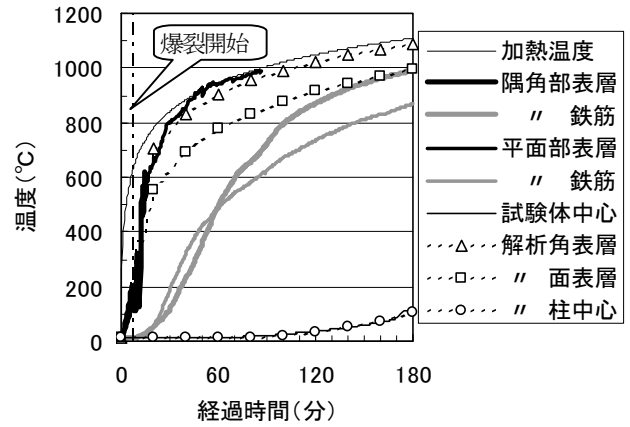


図-7 温度履歴比較(無被覆)

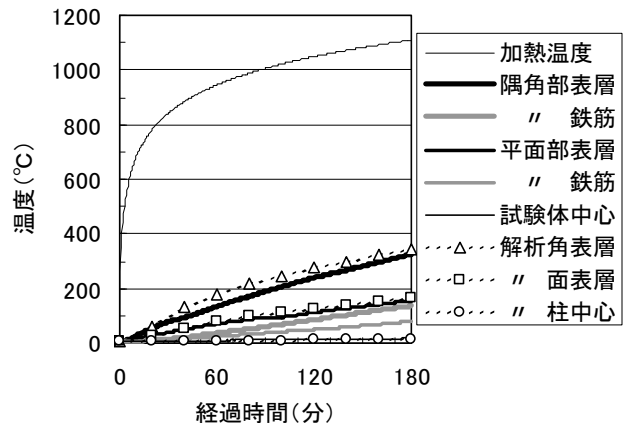


図-8 温度履歴比較(ケイカル、t=25mm)

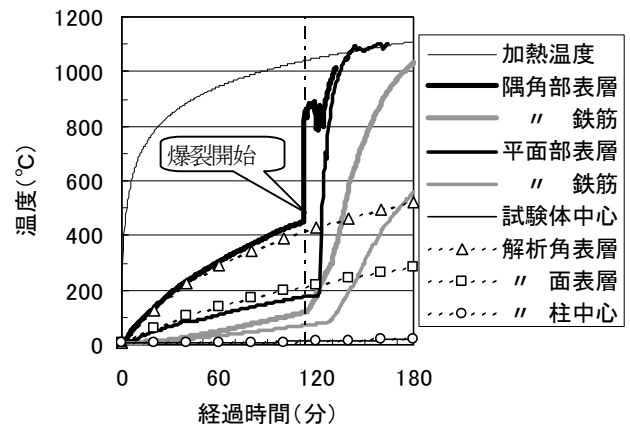


図-9 温度履歴比較(ケイカル、t=15mm)

## 9. おわりに

本研究は、(株)奥村組と五洋建設(株)との共同研究「高強度コンクリートの爆裂防止対策」により実施した。

### 【参考文献】

- 1) 一瀬賢一、他、「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、pp535～540、1997