

# 被覆による高強度コンクリート爆裂防止法の研究

森 達哉\* 竹内 博幸\*  
山浦 一郎\*

## 要 旨

高強度コンクリートの火災時における爆裂対策として、表面に保護層を設け、構造躯体への温度伝達を抑制する方法について検討した。一般に用いられている耐火材や仕上げ材から耐火の可能性が高いと考えられる適用材料を選定し、電気炉による加熱試験、小型耐火炉 (ISO加熱曲線に近い加熱が可能) を用いての加熱試験、の2段階の要素実験を経て適用材料を抽出し、実際の柱形状の試験体によりISO 834加熱曲線による載荷加熱試験を行った。適用材料抽出過程では、2回の要素実験の結果から、試験体コンクリート及び被覆材の熱物性値を算出し、載荷加熱試験時の温度履歴を推定した。実験の結果、①爆裂はコンクリート表面の温度上昇勾配が大きい場合に発生し、発生温度域は400℃前後であること、②高強度コンクリート柱は、本実験の諸元においては、被覆の有無にかかわらず耐火3時間性能を満足すること、③ケイカル板を被覆に用いた場合、 $t=25\text{mm}$ で3時間、 $t=15\text{mm}$ では2時間弱、爆裂を防止できること、④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こと、等が明らかになった。

## 1. はじめに

高強度コンクリートの火災時における爆裂対策として、表面に保護層を設け、構造躯体への温度伝達を抑制する方法について検討した。適用材料を選定する要素実験および、被覆による爆裂防止措置を施した高強度コンクリート柱の載荷加熱試験を行った試験結果、要素実験時の温度計測値を基に推定した温度履歴と実測値の比較結果について報告する。

## 2. 実験概要

爆裂対策の検討は以下のフローにて行った。

- ① 適用材料の選定: 一般に用いられている耐火材や仕上げ材を対象とし、耐火の可能性が高いと考えられるものを抽出した。
- ② 要素実験1: 板状の小型試験体を製作して電気炉による加熱試験で基本的な性状を確認した。
- ③ 要素実験2: ISO 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加熱試験を行い、載荷加熱試験に用いる材料を抽出した。
- ④ 温度解析: 上記2回の要素実験の結果から、試験体コンクリート及び被覆材の熱物性値を算出し、載荷加熱試験時の温度履歴を推定した。
- ⑤ 載荷加熱試験: 実際の柱形状の試験体により ISO 834 加熱曲線による載荷加熱試験を行った。

## 3. 要素実験1

### 3.1 試験方法

加熱試験は電気炉 (最高温度: 1150℃、出力: 2.4Kw) を用いて行い、図-1に示すように電気炉開口を覆って炉内からの一方向加熱とした。加熱温度は、ISO834 加熱曲線为目标として90分間に1,150℃まで上昇させ、その状態を180分間保持した。なお、試験の一部では電気炉による初期の加熱能力不足を補うために、炉内に別の熱源を入れて温度上昇を促進させた。試験体は280×370×50mmの板状とし、炉内、熱源側コンクリート表面、鉄筋かぶり深さ位置 (表面から50mm) の3点に熱電対を設置して温度履歴を測定した。試験対象とした被覆材料を表-1に示す。

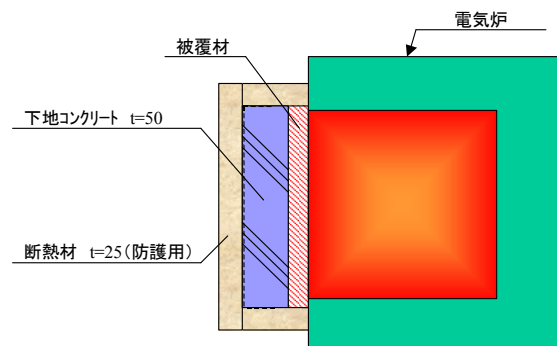


図-1 試験体 (要素実験1)

\*本社 建築エンジニアリング部

### 3.2 試験結果

実験時における加熱曲線と試験体温度履歴の一例を図-2に示す。また、実験結果として、試験体の各部位における最高温度と爆裂の有無を表-2に示す。

これらの実験において、爆裂発生の温度域は400℃前後となっていたが、温度上昇勾配が緩やかな場合には700℃以上でも爆裂しなかったものもあり、爆裂はコンクリート表面の温度上昇勾配が大きい場合に発生することが分かった。このことから、爆裂防止性能は被覆材の断熱性能に大きく影響されることが推察されたため、爆裂の発生がなく、コンクリート面の温度上昇を効果的に抑えているケイカル板 t=25 および同 t=15 と軽量モルタル t=35 を要素実験2の適用材料として抽出した。

なお、強化石膏ボードは、爆裂抑制効果が認められたが、加熱後において材料が原形を保持できない状態であったため、試験対象としては除外した。

## 4. 要素実験2

### 4.1 試験方法

加熱試験は小型耐火炉を用いて行い、要素実験1と同様に炉内からの一方向加熱とした。加熱温度は、ISO834 加熱曲線(最高温度 1,110℃)となるよう手動で調整し、3時間加熱とした。試験体は550×550×50mmの板状とし、炉内、熱源側コンクリート表面、鉄筋かぶり深さ位置の3点に熱電対を設置して温度履歴を測定した。試験体例(ケイカル板 t=15)を写真-1に、試験対象の材料を表-3に示す。

なお、要素実験1の結果では普通モルタルと軽量モルタルの性能が近似しているとみられたため、要素実験2においては普通モルタル t=30 について試験を行うこととした。

### 4.2 試験結果

実験時における加熱曲線と試験体温度履歴を図-3に示す。また、試験体の各温度と爆裂の有無を表-4に示す。ケイカル板で被覆した試験体ではコンクリート表面温度が低く抑えられ爆裂の発生はなかったが、モルタルで被覆した試験体は、加熱開始120分時点で爆裂発生の温度域に達したため、加熱を停止した。

これらの結果により、爆裂の発生がなく、コンクリート温度の上昇を抑える能力の高いケイカル板を載荷加熱試験の被覆材料として選定した。

表-1 使用被覆材料(要素実験1)

適用材料	摘要	厚さ(mm)
けい酸カルシウム板 (以下、ケイカル板とする)	耐火2時間仕様	25
	耐火1時間仕様	15
強化石膏ボード*	耐火2時間仕様	21+15
熱発泡型防火塗材	水性内装仕上げ塗材	約0.34
モルタル	軽量骨材使用	35
		20
	繊維混入(PPF*0.2%)	10

注] \*)ポリプロピレン繊維

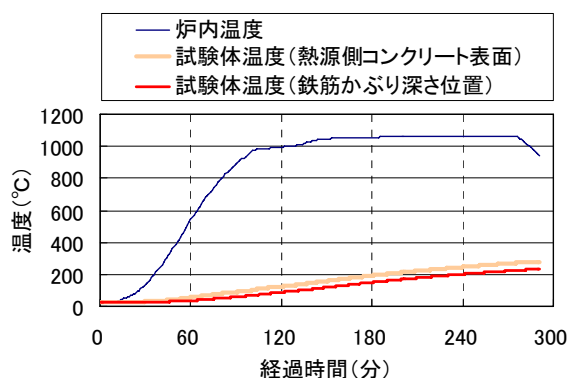


図-2 試験体温度履歴(要素実験1:ケイカル板 t=25)

表-2 実験結果(要素実験1)

適用材料	爆裂有無	時間(分)	温度(°C)		評価
			表面	内部*	
ケイカル板 t=25	無	—	272	224	◎
ケイカル板 t=15	無	—	339	255	○
強化石膏ボード*	無	—	383	288	○
熱発泡型防火塗材	有	130	446	281	×
軽量モルタル t=35	無	—	363	253	○
軽量モルタル t=20	無	—	740	538	△
繊維混入モルタル t=10	有	106	479	257	×

注] \*)鉄筋かぶり深さ位置(表面から50mm)



写真-1 要素実験2試験体(ケイカル板 t=15)

## 5. 載荷加熱試験

### 5.1 試験方法

要素実験の結果に基き材料を選定し、被覆による爆裂防止措置を施した高強度コンクリート柱の載荷加熱試験を行った。載荷軸力は9000kNとし、試験体面から10cm離れた位置の測定値で加熱温度の管理を行った。また、加熱炉の熱源には都市ガス(燃焼能力:46.090kJ/m<sup>3</sup>)を用いた。試験体は、Fc100N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートで製造した柱で、無被覆のもの、厚さ25mmまたは厚さ15mmの繊維混入けい酸カルシウム板(以下、ケイカル板とする)で表面被覆を施したもの、の計3体とした。無被覆の場合の試験体形状と温度計測位置を図-4に示す。

また、載荷加熱試験の条件を表-5に、試験体諸元および爆裂対策の仕様を表-6に示す。

### 6. 解析による温度予測

要素実験の加熱温度は、装置の能力によりISO834の標準加熱曲線とは一致しておらず、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るため、要素実験の結果のみから被覆材料の爆裂抑制能力を推定することには限界がある。このため、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FEM解析を行って実際の柱における温度履歴を推定し、載荷加熱試験の結果との比較を行った。解析による推定温度は、厚さ25mmのケイカル板で被覆したもの以外は、要素実験で爆裂を生じた温度を上回っており、これらの試験体については加熱試験による爆裂発生の可能性がある事が予測された。

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-5に示す。

### 7. 載荷加熱試験結果

全ての試験体において試験中の収縮計測値はISO834の規定値以内となっており、軸力は試験終了までの12時間の間保持されていた。

初めに試験を行った無被覆の試験体では、コンクリートの表層温度が試験開始直後から急激に上昇し、加熱開始6分後には爆裂を開始した。最高温度は主筋位置で800℃を上回った。試験後の試験体はかぶりコンクリートが失われており、全面に渡り帯筋や主筋が露出していた。

次に実験を行った、厚さ25mmのケイカル板で被覆した試験体では、コンクリートの最高温度は隅角部表層で300℃を上回ったが、爆裂には至らなかった。加熱試験中盤以降にケイカル板表面で亀裂が観察され、加熱終了後、亀裂は試験体の冷却に伴って大きくなったが、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。

表-3 使用被覆材料(要素実験2)

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	川砂使用	30

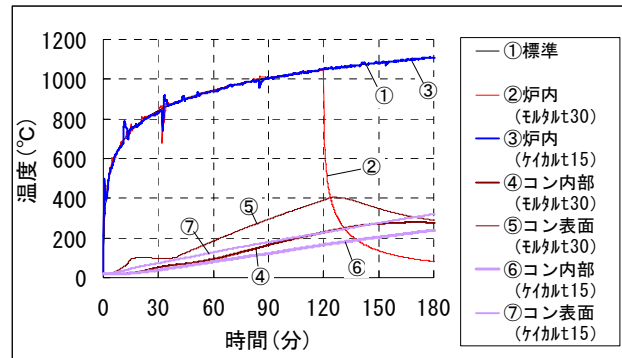


図-3 試験体温度履歴(要素実験2)

表-4 実験結果(要素実験2)

適用材料	爆裂有無	時間(分)	温度(°C)		評価
			表面	内部	
ケイカル板	無	180	320	239	○
普通モルタル	有	120	389	229	×

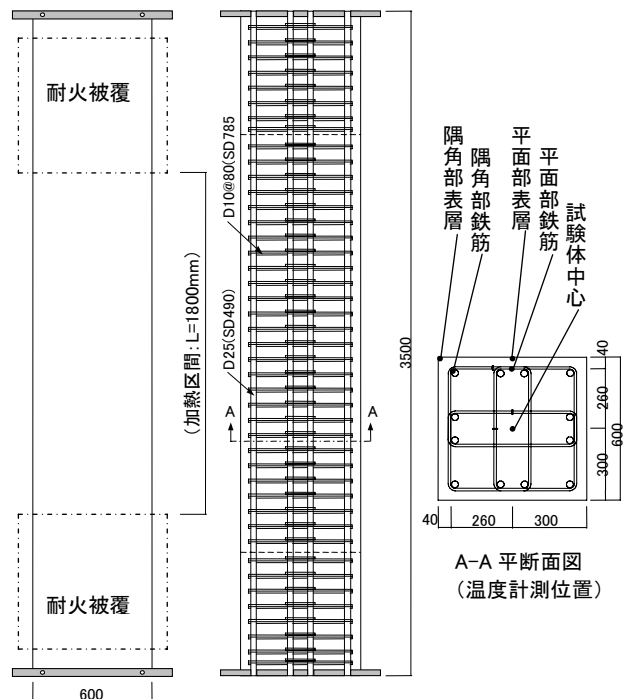


図-4 載荷加熱試験体(無被覆)

### 8. 温度解析値と実験値の比較

コンクリートの爆裂が始まるまでは、全ての試験体において、解析による温度履歴と実測値の温度履歴とは近似しており、本研究における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。載荷加熱試験時の実測値と、解析によるコンクリート隅角部表面、平面部表面および柱中心部の温度履歴の比較を図-6~8に示す。

### 9. まとめ

適用材料を選定する要素実験および、被覆による爆裂防止措置を施した高強度コンクリート柱の載荷加熱試験を行った結果、以下のことがわかった。

- ① 爆裂はコンクリート表面の温度上昇勾配が大きい場合に発生し、発生温度域は 400℃前後である
- ② 高強度コンクリート柱は、本実験の諸元においては、被覆の有無にかかわらず耐火3時間性能を満足する
- ③ 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、爆裂を防止できる
- ④ 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

### 10. 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。

表-5 加熱試験条件

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
	加熱区間	1800 mm

表-6 柱試験体諸元および爆裂対策の仕様

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	
爆裂対策仕様	無被覆	ケイカル板直貼り 厚さ 25mm	ケイカル板直貼り 厚さ 15mm

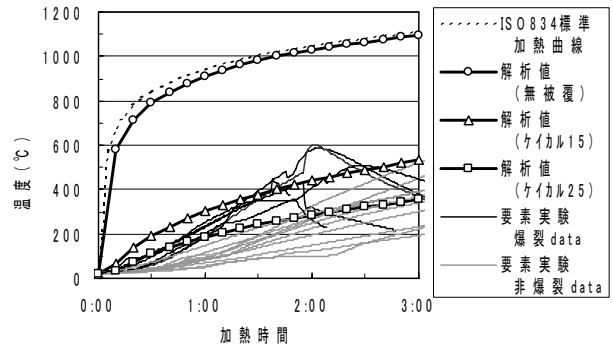


図-5 温度履歴対比(解析-要素実験)

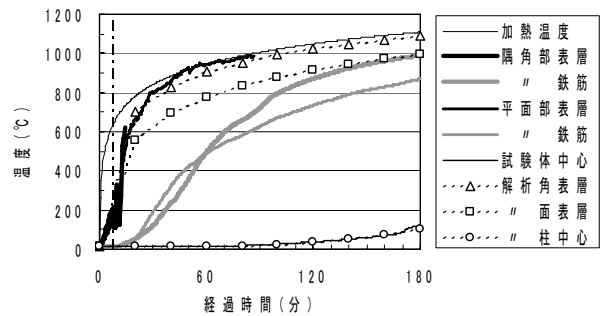


図-6 温度履歴比較(無被覆)

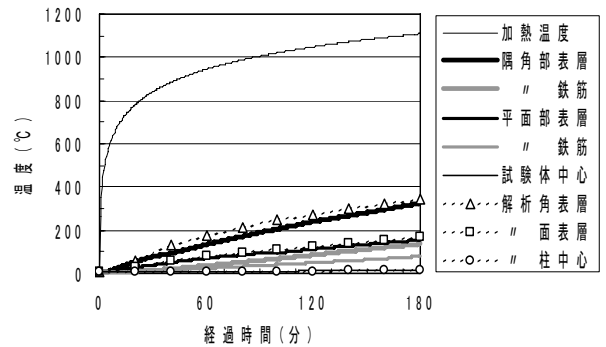


図-7 温度履歴比較(ケイカル 25mm)

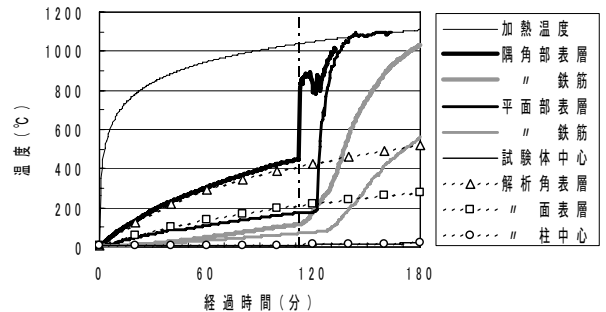


図-8 温度履歴比較(ケイカル 15mm)