

論文 被覆材料による高強度コンクリートの爆裂防止対策の研究

竹内 博幸^{*1}・森 達哉^{*2}・河野 政典^{*3}・起橋 孝徳^{*4}

要旨: 高強度コンクリートの火災時における爆裂防止対策として被覆材料により構造体への温度伝達を抑制する方法について検討した。電気炉による簡易加熱試験と小型耐火炉による中規模加熱試験の2段階の要素実験を経て適用材料を抽出し、最終段階では、実大規模での載荷加熱試験を行った。その結果、けい酸カルシウム板(厚さ 25 mm)の被覆により3時間耐火性能が得られることが明らかになった。また、要素実験時の温度計測値から FEM 解析により推定した温度履歴と載荷加熱試験時の実測値を比較したところ、被覆の有無に関わらず、両者はよく近似し、本研究による解析手法の有効性が確認できた。

キーワード: 高強度コンクリート, 爆裂, 耐火, 被覆材料, 要素実験, 載荷加熱試験

1. はじめに

高強度コンクリートの火災時における爆裂防止対策として、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。

¹⁾ 本報では、適用材料を選定する2段階の要素実験結果および被覆材料による爆裂防止対策を施した実大規模の高強度コンクリート柱の載荷加熱試験結果について報告する。また、要素実験時の温度計測値に基づきFEM温度解析により推定した温度履歴と載荷加熱試験時の温度実測値を比較検討した結果についても報告する。

2. 実験概要

爆裂防止対策の検討は、以下に示すフローにて行った。

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て、温度伝達抑制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

被覆材料と構造躯体を模擬した板状の小型試験体を電気炉に装着して加熱する試験により適用材料の基本的な性状を確認した。

③ 要素実験 2

ISO834 の加熱曲線に近い加熱が可能な小型耐火炉を用いて、板状の模擬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

上記の2段階の要素実験結果からFEM温度解析により試験体コンクリートおよび被覆材料の熱的物性値を算出し、載荷加熱試験時の温度履歴を推定した。

⑤ 載荷加熱試験

①から④に基づき抽出された材料を被覆材料とした実大規模の柱状試験体を用いてISO834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

要素実験 1 における加熱試験は、電気炉(出力: 2.4kW, 最高温度: 1,150℃)を用いて行い、図-1に示すように、試験体により電気炉の開口を覆い、炉内からの一方向加熱とした。加熱温度は、ISO834 加熱曲線を目標として、90 分間で1,150℃まで上昇させた後、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

*1 五洋建設(株) 建築本部 建築エンジニアリング部課長 (正会員)

*2 五洋建設(株) 建築本部 建築エンジニアリング部 (非会員)

*3 (株)奥村組 技術研究所 建築生産グループ (正会員)

*4 (株)奥村組 技術研究所 建築生産グループ (非会員)

よる初期の加熱能力の不足を補うため、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、被覆材料と構造躯体を模擬した 280×370×50 mm 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 50 mm）の 3 箇所に熱電対を設置して温度履歴を測定した。試験体に用い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。

3.2 試験結果

要素実験 1 の加熱試験における加熱曲線と試験体の温度履歴の一例を図-2～4 に示す。また、試験体の各測点における最高温度と試験体コンクリート部分の爆裂の有無・程度の評価を表-3 に示す。

これらより、爆裂発生温度域は熱源側コンクリート表面で 400～500℃ の範囲となったが、温度上昇勾配が緩やかな場合には 700℃ を超えても爆裂しないものがあり、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明らかになった。これより、爆裂防止性能は、被覆材料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、コンクリート表面の温度上昇を抑えているけい酸カルシウム板（以下ケイカル板とする）：厚さ 25 mm、同 15 mm および軽量モルタル：厚さ 35 mm を

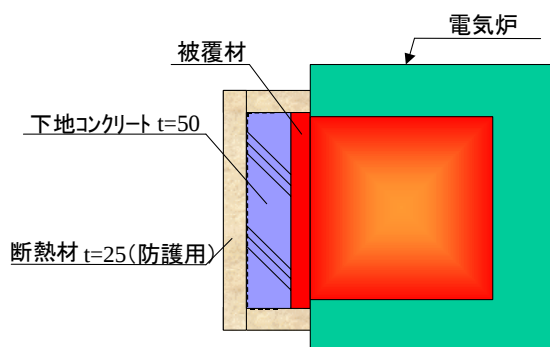


図-1 試験体（要素実験 1）

表-1 試験体コンクリートの調合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	B*	S	G
20.0	42.4	155	775	637	875

※ B: セメント+シリカヒューム

要素実験 2 の適用材料として抽出した。

表-2 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)	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

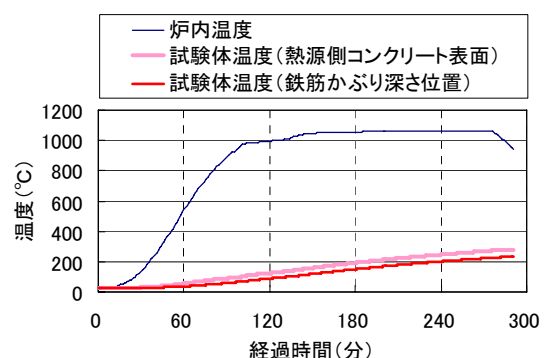


図-2 試験体温度履歴（ケイカル板：厚さ 25）

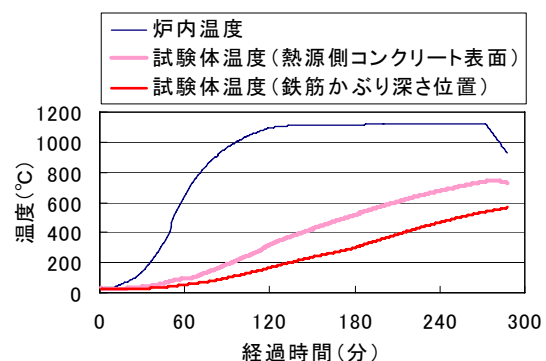


図-3 試験体温度履歴（軽量モルタル：厚さ 20）

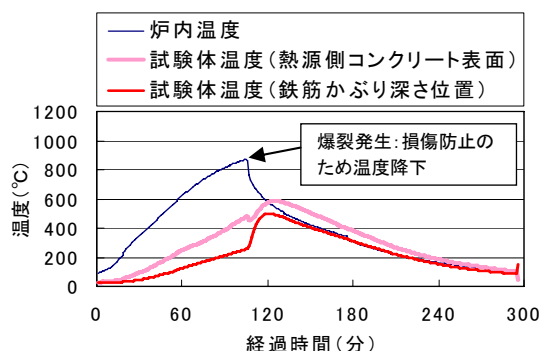


図-4 試験体温度履歴（繊維モルタル：厚さ 10）

4. 要素実験 2

4.1 試験方法

加熱試験は、写真－１に示す小型耐火炉を用いて行い、要素実験 2 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℃）となるように手動で調整し、3 時間加熱とした。

試験体は、550×550×50 mm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。試験対象の被覆材料を表－４に、試験体例（ケイカル板：厚さ 15 mm）を写真－２に示す。要素実験 1 の結果から、普通モルタルと軽量モルタルの性能は近似しているものとみなし、要素実験 2 では普通モルタル：厚さ 30 mm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－５に示す。また、試験体の各温度と爆裂の有無・程度の評価を表－５に示す。

ケイカル板で被覆した試験体は、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、普通モルタルで被覆した試験体は、加熱開始 120 分の時点で要素実験 1 で明らかになった爆裂発生の温度域に達したため、加熱を停止した。これらより、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：厚さ 15 mmを載荷加熱試験における試験体の被覆材料として選定した。

表－３ 実験結果（要素実験 1）

適用材料	爆裂	時間 (分)	温度(℃)		評価
			表面	内部*	
ケイカル板：厚さ 25	無	—	272	224	◎
ケイカル板：厚さ 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：厚さ 35	無	—	363	253	○
軽量モルタル：厚さ 20	無	—	740	538	△
繊維モルタル：厚さ 10	有	106	479	257	×

注]*鉄筋かぶり深さ位置(表面から 50 mm)

5. 模擬柱載荷加熱試験

5.1 試験方法

試験体は、設計基準強度 $F_c=100\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートにより製造した模擬柱に対して、無被覆の場合と厚さ 25 mm、または厚さ 15 mmのケイカル板で表面を被覆した場合の計 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－６に示す。



写真－１ 小型耐火炉



写真－２ 試験体（ケイカル板 t=15 mm）

表－４ 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

表－５ 実験結果（要素実験 2）

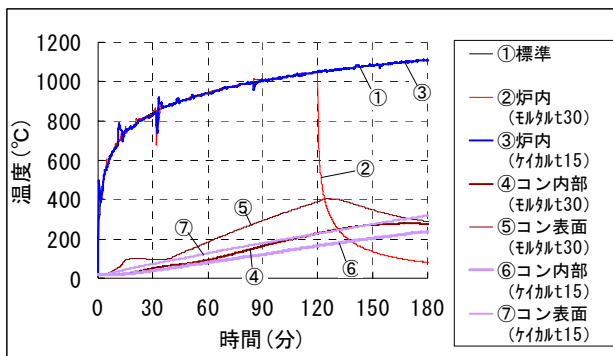
適用材料	爆裂 有無	時間 (分)	温度(℃)		評価
			表面	内部*	
ケイカル板	無	180	320	239	○
普通モルタル	有	120	389	229	×

注]*鉄筋かぶり深さ位置(表面から 50 mm)

加熱炉の熱源には都市ガス（燃焼能力：46,090kJ/m³）を用い、加熱温度の管理は、試験体から 10 cm離れた位置での測定値により行った。また、荷重軸力は 9,000kN（荷重軸力比：0.25）とした。荷重加熱試験の条件を表－6に、試験体諸元および爆裂対策の仕様を表－7に示す。

5.2 解析による温度予測

要素実験 1 における加熱温度は、装置の能力から ISO834 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、隅角部分の温度履歴も再現されていない。そこで、要素実験時の温度計測結果から逆解析によって試験体の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、得られた値によりFEM解析を行い、荷重加熱試験に用いる模擬柱試験体における温度履歴をあらかじめ推定した。解析は、柱水平断面の1/4を切断し、コンクリート（30×30要素）の表面に各種被覆材料（厚さ方向3要素）を組み合わせたモデルで行った。解析時の各種定数は、逆解析に



図－5 試験体温度履歴（要素実験 2）

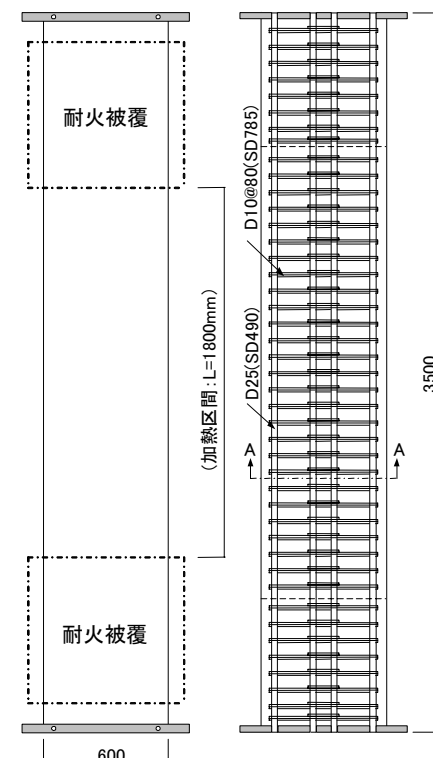
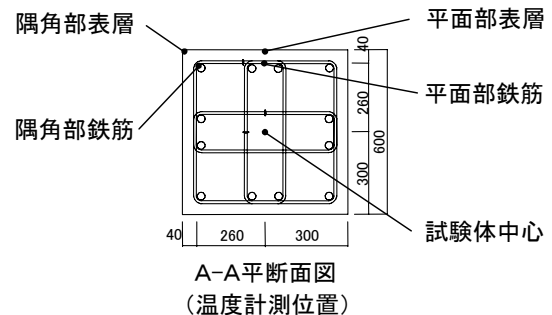
表－6 加熱試験条件

加熱試験条件	荷重軸力比	$F_c \times 0.25$ (荷重軸力 9,000kN)
	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

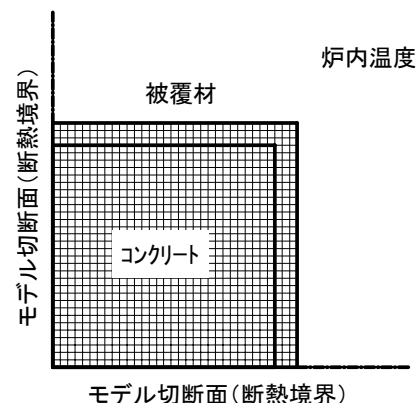
表－7 柱試験体諸元および爆裂対策仕様

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 ²
		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

よる算出値固定とし、入力温度は、要素実験 1 での炉内温度と ISO 加熱曲線から直線補間して与え、加熱開始から 180 分まで 1 分間隔で計算させた。解析モデルのメッシュを図－7に示す。



図－6 荷重加熱試験体（無被覆）



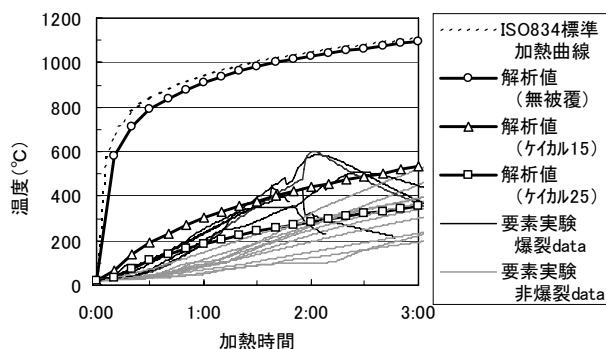
図－7 FEM 解析モデル（模擬柱）

載荷加熱試験における模擬柱試験体の形状・条件で解析した試験体コンクリートの隅角部表面の温度履歴と要素実験における板状試験体コンクリートの表面の温度履歴を比較したものを図－８に示す。解析による推定温度は、厚さ 25 mmのケイカル板で被覆した場合を除き、要素実験 1 で爆裂を生じた試験体の温度勾配を上回る結果を示していることから、これらの試験体については、載荷加熱試験による爆裂発生の可能性があることが予測された。

5.3 載荷加熱試験結果

載荷加熱試験の結果を表－８に示す。被覆の有無・種類、または爆裂の有無に関わらず、いずれの試験体でも試験中の収縮計測値は ISO834 の規定値内にあり、軸力は加熱開始から試験終了までの 12 時間の間保持されていた。

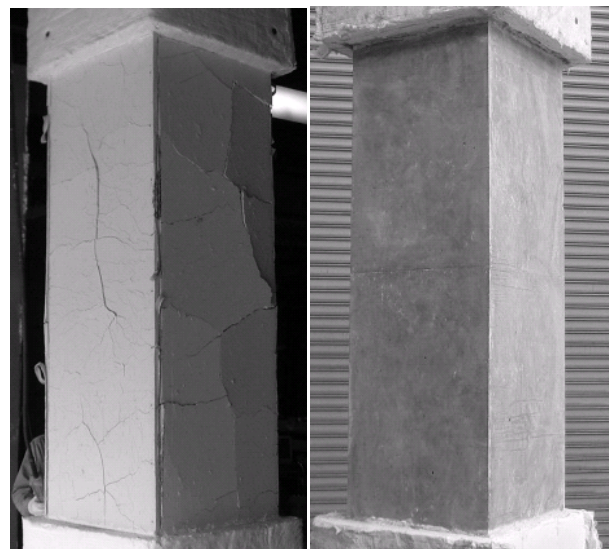
無被覆の試験体では、コンクリートの表面温度は試験開始直後から急激に上昇し、加熱開始から約 6 分後には爆裂が始まった。最高温度は主筋位置で発生し、800℃を上回った。試験後、試験体はかぶりコンクリートがほとんど剥落し、全面で帯筋や四隅の主筋、および中子筋に拘束されている外周部の主筋の一部が露出していた。



図－８ 温度履歴比較（解析－要素実験）

厚さ 25 mmのケイカル板で被覆した試験体では、加熱試験中盤以降にケイカル板表面で亀裂が発生し、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、爆裂には到らなかった。同試験体の加熱試験後の被覆材料およびコンクリートの表面状態を写真－３に示す。ケイカル板の亀裂は、加熱終了後に試験体の冷却に伴い大きくなったが、その内側のコンクリート表面は健全であることが確認された。

厚さ 15 mm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発生し、その影響で被覆材が浮き上がったため、試験体全体にわたり爆裂が進行した。加熱試験後の同試験体は、無被覆の場合と同様に、帯筋や主筋が露出した状態であった。



ケイカル板表面 コンクリート表面

写真－３ 載荷加熱試験後の試験体状態
(ケイカル板：t = 25 mm)

表－８ 載荷加熱試験結果 [爆裂の有無と試験体の最高温度]

試験体種類	爆裂有無 [発生時間 (分)]	最高温度(°C) [発生時間(分)]				
		表 層		主 筋		中心部
		中央部	隅角部	中央部	隅角部	
標準試験体(無被覆)	爆裂[7]	216*[11]	203*[7]	871[181]	991[181]	261[675]
ケイカル板 25	なし	157[184]	336[185]	111[454]	166[249]	103[720]
ケイカル板 15	爆裂[112]	189*[122]	450*[112]	592[189]	1038[182]	195[720]

* 爆裂時温度

5.4 試験実測値と温度解析値の比較

載荷加熱試験における実測値と FEM 解析による試験体コンクリート隅角部表面、平面部表面および柱中心部における温度履歴を各試験体ごとに図-9~11 に示す。

解析による温度履歴は、爆裂が発生しなかったケイカル 25 mm の試験体は、いずれの位置においても載荷試験における実測値とよく近似していた。一方、爆裂が発生した試験体は、被覆の有無に関わらず、いずれもコンクリートの爆裂が始まるまでの実測値の温度履歴によく近似していたことから、本研究における解析手法により実大規模の部材の温度予測が精度良く行えることが確認できた。

6. まとめ

高強度コンクリートの火災時における爆裂防止対策として、表面に保護層を設ける方法について検討するために、適用材料を選定する 2 段階の要素実験および被覆材料による爆裂防止対策を施した実大規模の高強度コンクリート柱の載荷加熱試験を行ったところ、以下のことが明らかになった。

- (1) 高強度コンクリートの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、爆裂発生時の温度域は 400℃ 前後であった。
- (2) 爆裂防止に有効な被覆材料として、2 段階の要素実験において爆裂の発生がなく、コンクリート温度の上昇を抑えられたケイカル板：厚さ 25 mm および同 15 mm が選定された。
- (3) 載荷加熱試験に用いた実大規模の柱試験体は、本実験の緒元においては、被覆の有無に関わらず、耐火 3 時間性能を満足する。
- (4) 被覆材料にケイカル板を用いることにより、厚さ 25 mm では 3 時間、厚さ 15 mm では 2 時間弱の間、爆裂を防止することができた。
- (5) 要素実験結果に基づいて FEM 温度解析を行うことにより、実大規模の部材における爆裂発生の有無を予測することが可能である。

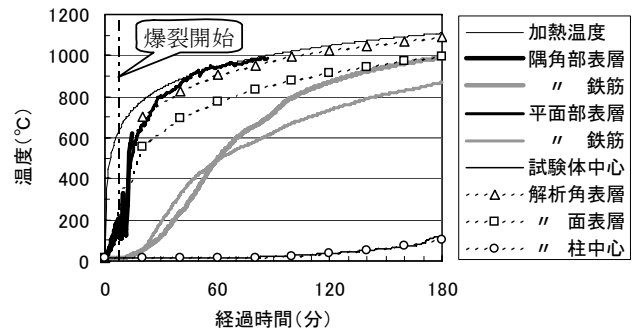


図-9 温度履歴の比較（無被覆）

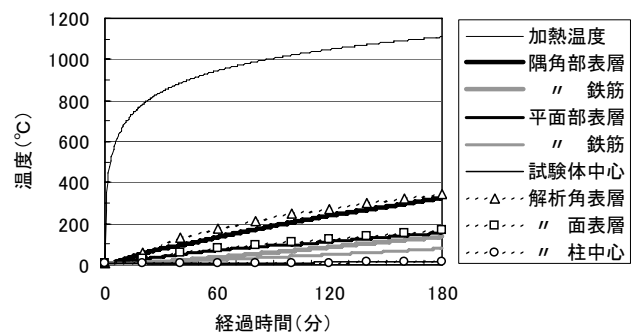


図-10 温度履歴の比較（ケイカル板 25 mm）

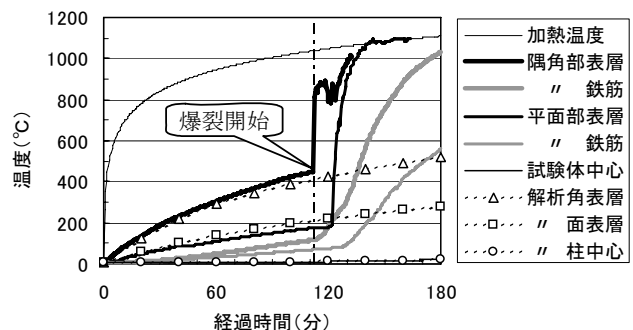


図-11 温度履歴の比較（ケイカル板 15 mm）

本研究は、五洋建設（株）と（株）奥村組との共同研究「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) 森達哉，竹内博幸他：被覆による高強度コンクリート爆裂防止法の研究（その 1，その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.405-408，2005.9