

火災時における高強度コンクリートの爆裂防止に関する研究

長尾 覚 博 丹羽 博 則 江戸 宏 彰
川 地 武 中 根 淳

Method of Controlling Spalling of High strength Concrete Subjected to Fire

Kakuhiro Nagao Hironori Niwa Hiroaki Eto
Takeshi Kawachi Sunao Nakane

Abstract

Recently, demand for high-rise buildings exceed 30 stories is growing. However, the spalling of high strength concrete subjected to fire is significantly spoils the properties of the structure. This report describes the mechanisms of spalling of high strength concrete (Specific strength is 80 N/mm² class) and a method of controlling spalling by fire tests and analysis using mock-up specimens. As a result, it is confirmed that spalling is caused by compound effects such as vapor pressure and thermal stress. Based on the study of the mechanisms of spalling, covering steel plate, painting fire-resistant paint and mixing PVA fiber are effective methods of controlling the spalling of high strength concrete members. The method of covering members with steel is practical because of the increased stickiness of members.

概 要

近年、30階を超えるRC超高層建物の需要が増えてきており、それに使用する高強度コンクリートの火災時における爆裂が部材の性能低下をもたらす問題として取り上げられている。このような課題に対処するため、設計基準強度80N/mm²級の高強度コンクリートを想定し、模擬部材による耐火試験および解析により爆裂のメカニズムを検討し、爆裂は水蒸気圧と熱応力の複合によることを示した。メカニズムの検討結果に基づき、柱模擬部材を用いた耐火試験により爆裂防止あるいは低減に有効な方法について検討した。その結果、鋼板被覆、耐火塗料塗布、PVAファイバー混入する方法などが爆裂防止法として有効であることを示し、中でも部材の靱性付与という点で、鋼板被覆が実用的なことを述べた。

1. はじめに

近年、30階を超えるRC造高層建物の需要が増大し、それに使用する高強度コンクリートの火災時における爆裂が部材性能の低下を招く問題となる場合がある。爆裂に関する既往の文献によると、コンクリート強度が高いほど、また含水状態が高いほど爆裂が生じやすいことが指摘されている¹⁾。また、爆裂のメカニズムは熱応力あるいは水蒸気圧とする考えが主流である^{2),3),4)}。いずれも加熱時のコンクリート中の水分移動および温度変化に関連することが既往の研究からうかがわれる。このような問題に対処するため、本報告では設計基準強度80N/mm²級の高強度コンクリートについて、模擬部材を用いた耐火試験および解析により、火災時における爆裂のメカニズムを考察し、爆裂防止に有効な方法を実験的に検討した。

2. 爆裂のメカニズムに関する検討

爆裂のメカニズムに関する検討では爆裂に関する既往の情報を踏まえ実験計画を立案した。

2.1 模擬部材

部材厚さは3種類および養生方法(含水状態)は3種類を選定してTable 1に示す9種類の模擬部材を用いた。耐火試験時までの養生方法はコンクリート打込み後封かん養生(S-1~3)、材齢91日まで封かん養生後20±3℃、65±5%RHの気中養生(A-1~3)、材齢91日まで封かん養生後105℃加熱により絶乾状態としたもの(D-1~3)の3種類とした。模擬部材の仕様をFig. 1に示す。模擬部材の内部にはかぶり厚さ4cmの位置に異形鉄筋(D22)を配筋し、断面内部には2.3項に示す各測定項目

に対応するセンサーを埋設した。各模擬部材の耐火試験時における体積含水率は、封かん養生が約5.4%、気中養生で5%、絶乾状態では0%となっている。また、加熱はFig. 1に示すように一面加熱とし、耐火試験時の材齢は330日とした。

2.2 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料は以下の通りである。

- ①セメント：普通ポルトランドセメント
- ②粗骨材：硬質砂岩砕石
- ③細骨材：砂岩系陸砂
- ④混和材：シリカフューム
- ⑤混和剤：高性能AE減水剤

コンクリートの調合は、設計基準強度80N/mm²級のコンクリートを想定し、Table 2に示す仕様とした。

2.3 測定項目および方法

爆裂は加熱時のコンクリート中の水分移動および温度変化に関連することから、測定項目は以下の通りとした。

- 1) 温度：タイプK熱電対による。
- 2) 含水率：電極法による³⁾。なお、電極の構成材料の耐熱温度が最大200℃であるため、200℃以降の測定は実施していない。
- 3) 水蒸気圧：コンクリート中に埋設した端部解放のパイプと外部取付型圧力計による。

2.4 耐火試験方法

小型の耐火炉を用い、JIS A 1304（建築物の耐火構造部分の耐火試験方法）の標準加熱曲線に準じ、爆裂終了まで加熱を持続した。

2.5 実験結果および考察

2.5.1 強度試験結果

模擬部材と同一条件で養生したφ10×20cm供試体の強度をTable 3に示す。これより、圧縮強度は各養生条件間で顕著な差がない結果となっており、含水状態の違いが爆裂に及ぼす影響をほぼ同一強度レベルで比較できたものと考えられる。

2.5.2 耐火試験結果

(1) 模擬部材の爆裂の状況

耐火試験開始後の爆裂の状況を、爆裂開始時間、爆裂終了時間、爆裂継続時間、および爆裂深さについてTable 4に示す。含水状態の模擬部材(S-1~3, A-1~3)では爆裂が生じ、絶乾状態の模擬部材(D-1~3)では爆裂が発生しなかった。爆裂は、耐火試験開始後約10分前後に発生し始め、最長20分程度継続した後、終了する結果となっている。また、最大爆裂深さは部材厚が大きい程大きくなる傾向が見受けられるが、ほぼ鉄筋のかぶり厚に相当するものとなっている。なお、加熱前封かん養生と気中養生で爆裂性状に顕著な差は認められなかった。これは高強度コンクリートでは乾燥が進みにくく封かん養生と気中養生で含水率に顕著な差がなかったことによると考えられる。

Table 1 模擬部材の種類
Kind of Mock-up Specimens

部材寸法(cm)	養生条件		
	封かん	気中	絶乾
□50×50×15	S-1	A-1	D-1
□50×50×20	S-2	A-2	D-2
□50×50×30	S-3	A-3	D-3

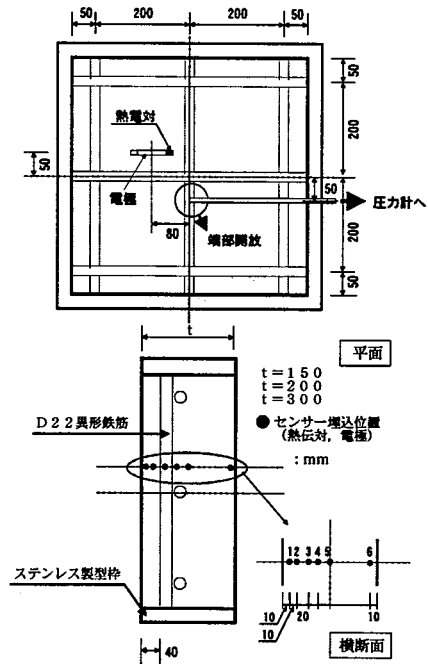


Fig. 1 模擬部材の仕様

Apparatus of Mock-up Specimens

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

水結合材比 (%)	水	セメント	シリカフューム	粗骨材	細骨材	混和剤 (×%)
22	160	654	73	892	637	3

Table 3 強度試験結果
Result of Compressive Strength

供試体の種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	ポアソン比	備考
標準養生	99	—	—	材齢 28日
封かん養生	114.3	4.25	0.2	材齢 330日
気中養生	111.8	4.21	0.2	同上
絶乾	110.6	3.5	0.15	同上

(2) 爆裂と温度・含水状態および水蒸気圧

爆裂発生直前および爆裂終了時の温度・含水状態をFig. 2に示す。これより、封かん養生、気中養生とも爆裂開始直前の表層部(t=10mm)の温度は150~190℃程度で、部材厚による特徴的な差異はあまり認められない。しかし、爆裂直前において100℃を超える温度範囲の部位においても含水状態を保持していることが判明し、このような部位では水蒸気圧が生じていると推察された。ちなみに150

Table 4 爆裂の状況
Condition of Spalling

供試体 No.	爆裂開始 (分, 秒)	爆裂終了 (分, 秒)	爆裂継続時間 (分, 秒)	最大爆裂深さ (mm)	平均爆裂深さ (mm)
S-1	12, 00	34, 00	22, 00	28	11.8
S-2	7, 30	26, 39	19, 09	45	23.3
S-3	5, 59	23, 50	17, 51	43	15.5
A-1	10, 00	23, 00	13, 00	29	12.5
A-2	6, 14	18, 36	12, 22	30	13.6
A-3	10, 06	28, 03	17, 57	47	21.1

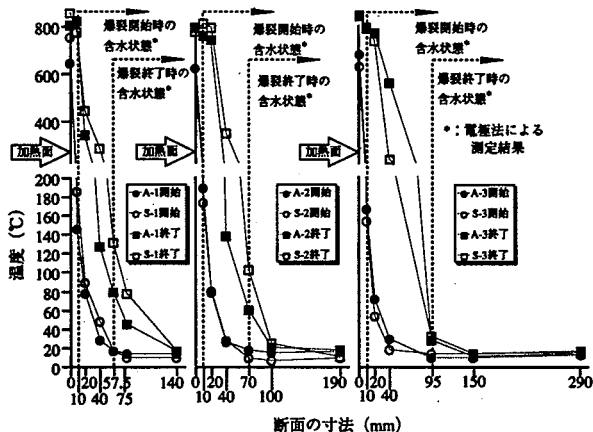


Fig. 2 爆裂開始および終了時の温度, 含水状態
Temperature Distribution and Moisture Content at Start and End of Spalling

~190℃時の飽和水蒸気圧は約0.47~1.24N/mm²であり, 水蒸気圧が完全に拘束される条件では蒸気圧の開放に伴う爆裂の可能性があることがうかがわれる。しかし, 最大爆裂深さにほぼ相当する加熱面から40mm深さでの水蒸気圧は今回の測定法によると最大でも0.17N/mm²程度(A-1模擬部材, Fig. 3との結果が得られており, 実際には高温による空隙の増大あるいはひび割れの発生により圧力が緩和されていると考えられる。なお, 絶乾状態では最大0.04N/mm²程度と水蒸気圧の発生はほとんど認められていない。一方, 爆裂開始直前の雰囲気温度は630~750℃程度で表層部温度との差は約450~570℃に達し, 高温により弾性係数が低下しても表層部に生ずる熱応力は無視し得ないレベルとなることが予想される。そこでどの程度の熱応力が発生する可能性があるかを文献⁷⁾に示された解析方法に準じ, S-3模擬部材について解析した例をFig. 4に示す。これより, 最大表層部熱応力は加熱初期において30N/mm²を超えており, 無視できないレベルに達することが推察され, 表層部コンクリートが高温による熱劣化を生じた場合には圧縮破壊を生ずる可能性も考えられる。さらに, 表層部の最大熱応力と実際の爆裂の発生時期はほぼ符合しており, 熱応力が爆裂に少なからず寄与していることが推察される。一方, 爆裂の生じなかった絶乾状態の模擬部材表層部の熱応力を, 含水状態の模

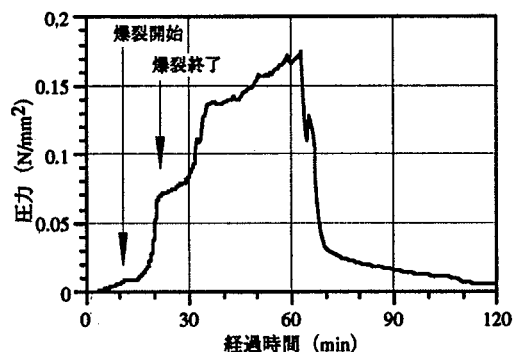


Fig. 3 蒸気圧の測定結果

Measurement Result of Pore Pressure

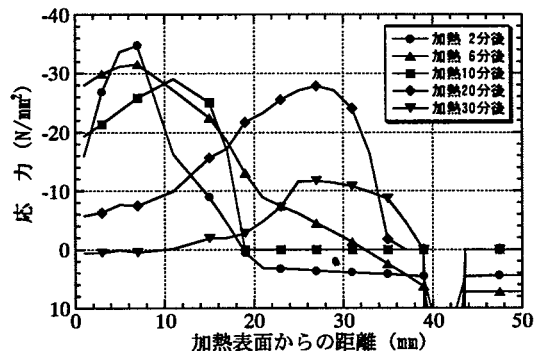


Fig. 4 表層部熱応力の解析結果例(S-3)
Thermal Stress of Surface Layer

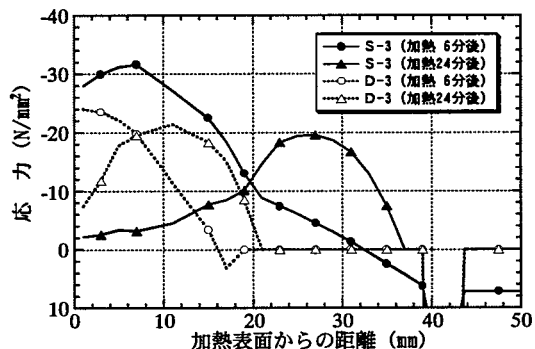


Fig. 5 加熱前含水率の異なる模擬部材表層部熱応力(S-3, D-3)

Thermal Stress of Surface Layer of Mock-up Specimens Concerned with Different Moisture Content before Heating

擬部材の爆裂発生・終了時と同一加熱経過時間について, S-3とD-3との比較で示すとFig. 5となる。これより絶乾状態では加熱初期の表層部熱応力が含水状態の場合に比べて小となることがわかる。これは主としてコンクリート中の水分移動に大きな影響を受ける表層部の温度勾配の違いによると考えられる。すなわち, 高温加熱を受ける含水状態のコンクリート内部においてはFig. 6の模式図に示すような水分移動が経時的に生じており, 加熱面近傍の水蒸気圧および急激な温度勾配による圧縮応力が, 含水率が大きである程, またコンクリートが高強度で緻密になる程顕著になる。言い換えると高強度コンクリートは, 100℃を超える温度で含水状態を保持している部位(滞留域)の, 高温側から低温側への移動が緩慢であるため, 表層部の熱応力および水蒸気圧が大となることが, 普

通強度のコンクリートに比べ爆裂を生じやすい理由と考えることが出来る。

これらのことから、高強度コンクリートの爆裂のメカニズムを今回の実験結果および解析例の範囲で考察すると、熱応力あるいは水蒸気圧と爆裂との関わりについては未だ定量的に明確には出来ないが両者が複合的に発生しており、高温下におけるコンクリート中の水分移動性状が爆裂の発生に大きな影響を与えているといえる。

3. 爆裂防止方法に関する検討

3.1 爆裂防止の考え方および具体的方法

前節2.の爆裂のメカニズムに関する検討の結果、コンクリートの火災時における爆裂は高温加熱時におけるコンクリート表層部の熱応力および蒸気圧の複合作用によると推論され、高温時におけるコンクリート中の水分移動が大きな要因となっていることを考慮し、爆裂防止方法を設定するための基本的な方針を下記の3項目とした。

- 1) 部材表層部の温度勾配を緩やかにする（熱応力の低減）。
- 2) 水分移動を速やかに生じさせる（蒸気圧の低減）。
- 3) 爆裂によるコンクリートの飛散を拘束する。

前記方針1), 2)については部材の温度上昇を抑える(考え方I)、水分移動による滞留域を極力低減する(考え方II)、3)については飛散コンクリートを抑える(考え方III)、等の考え方に基づいて具体的方法をTable 5に示すように設定し、柱模擬部材による耐火試験によりその効果を検討した。

3.2 柱模擬部材

柱模擬部材は30×30×60cmとし、四面から加熱される条件とした。その基本仕様をFig. 7に示す。また、内部にはかぶり厚を4cmとした異形鉄筋(D19)を鉄筋比2.55%で配筋した。柱模擬部材の種類は、前項3.1の爆裂防止の考え方に従って仕様を決め、Fig. 8に示す10種類とした。なお、耐火試験時までの養生条件は爆裂が生じやすい条件とし、コンクリート打込後封かん養生とした。耐火試験時のテストピースでの体積含水率は約8.5%となっている。また、断面内部には3.4項の各測定項目に対応するセンサーを埋設した。

3.3 使用材料およびコンクリートの調査

早強ポルトランドセメントを用い、基本調査は前述のTable 1と同じとした。

3.4 測定項目

爆裂防止の効果を検討するため、前項2.3の測定項目により、温度変化および水分移動に関連するものとした。

3.5 耐火試験の方法

小型の耐火炉にて模擬部材の4面をJIS A 1304 (建築物

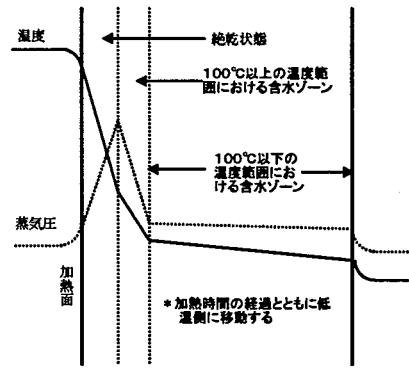


Fig. 6 断面内の温度、含水率、圧力分布の模式図
Modified Figure Related to the Distribution of Temperature, Moisture Content and Pore Pressure

Table 5 爆裂防止方法
Controlling Method of Spalling

爆裂防止の考え方	具体的方法
I. 温度上昇を抑える	・耐火塗料の塗布
II. 速やかに水分移動を生じさせる	・可溶(燃)性ポリビニルアルコール繊維(以下PVAファイバーと称す)の混入 ・ペント管(蒸気放出管)の配置
III. コンクリートの飛散を抑える	・鋼板被覆 ・表層部へのメッシュ筋の配置

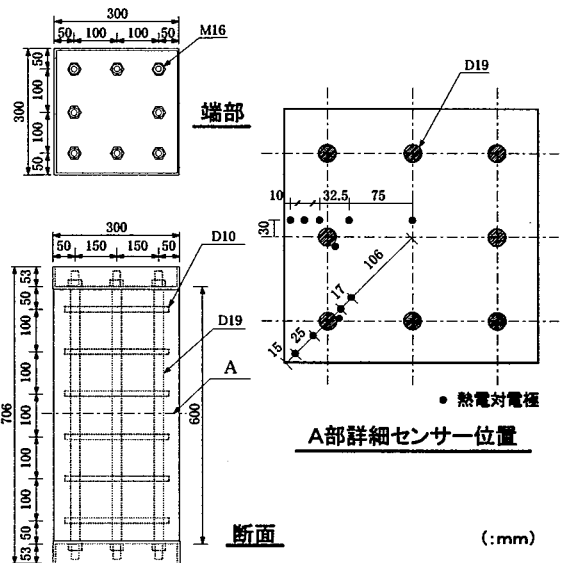


Fig. 7 柱模擬部材の仕様
Apparatus of Mock-up Specimens

の耐火構造部分の耐火試験方法)の標準加熱曲線により3時間加熱した。

3.6 実験結果

3.6.1 強度試験結果

φ10×20cm 供試体の材齢28日における結果をTable 6に示す。これより、圧縮強度はPVAファイバー混入の有無で顕著な差がない結果となっており、爆裂防止方法の

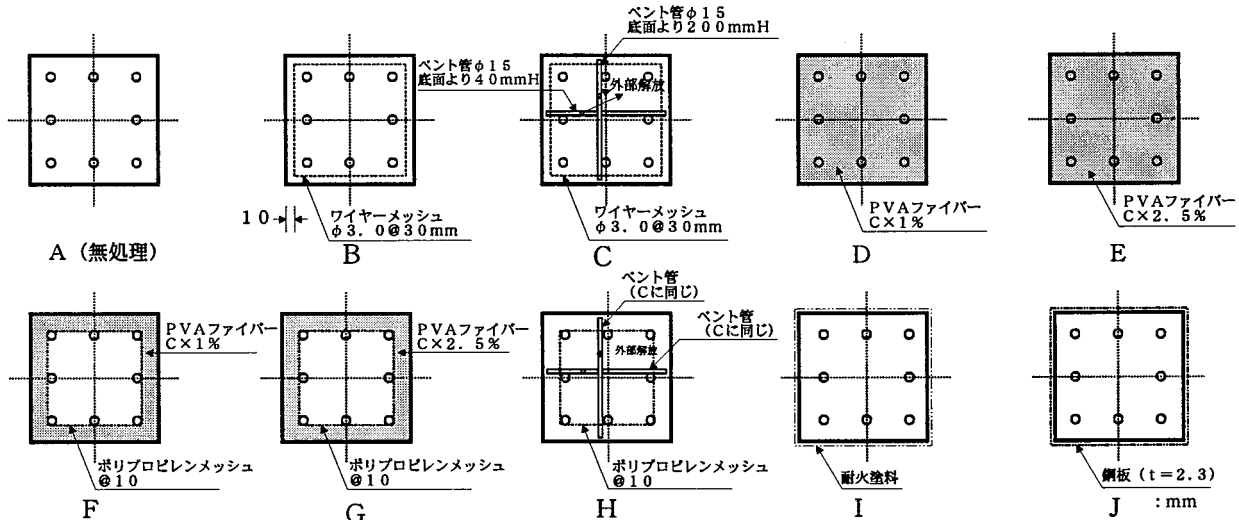


Fig. 8 爆裂防止方法
Controlling Method of Spalling

効果をほぼ同一強度レベルで比較できたといえる。

3.6.2 爆裂の状況

耐火試験開始後の爆裂の状況を Table 7 に、耐火試験後の模擬部材の様子を Photo 1 に示す。これより、爆裂は耐火試験開始後 10 分前後に発生し始め、爆裂防止方法の違いによってその継続時間および爆裂の程度は異なるものとなっている。I (耐火塗料塗布) ではまったく爆裂が発生せず、F、G (かぶり部 PVA ファイバー混入) では爆裂がきわめて軽微であった。また、PVA ファイバーを混入したものは混入量の多い E の方が D よりも爆裂による質量損失が少なかった。J (鋼板被覆) では耐火試験時に爆裂音があったが、コンクリートが飛散することはなく、耐火試験終了時に鋼板面の膨らみが若干認められた程度であった。かぶり部にメッシュ筋を配した B およびメッシュ筋とベント管を配した C では、爆裂はメッシュ部で止まり、ベント管を配したものは爆裂面積がベント管のないものよりいくぶん少ない結果となっている。これらの結果から、爆裂防止方法として耐火塗料塗布、PVA ファイバー混入、爆裂によるコンクリートの飛散防止に鋼板被覆が有効なことが確認できた。

3.6.3 温度および含水状態測定結果

(1) 耐火試験後の温度

各模擬部材の 3 時間加熱後の温度分布を直行方向および対角方向について Fig. 9 に示す。これより爆裂による断面欠損の認められなかった I (耐火塗料塗布)、J (鋼板被覆) の模擬部材および欠損が軽微な E (PVA ファイバー混入)、F および G (かぶり部 PVA ファイバー混入) では無処理のものに比較して部材内部温度の上昇が低い。なかでも、耐火塗料を塗布した I では発泡した耐火塗料が断熱効果を持つため、3 時間耐火試験後でも部材温度はかなり低く押えられている。一方、爆裂による断面欠損が無処理のものに比較して少ない B (爆裂防止メッシュ)、C (爆裂防止メッシュ+ベント管) を比較すると、ベント管を配

Table 6 強度試験結果
Result of Compressive Strength

養生条件	PVAファイバー混入の有無(%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	養生条件	PVAファイバー混入の有無(%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
	無	98.3	3.76		無	89.8	3.38
	C×1	102.2	3.82		C×1	96.6	3.4
	C×2.5	101.6	3.77		C×2.5	95.7	3.4

Table 7 爆裂の状況
Condition of Spalling

柱模擬部材 No.	爆裂開始及び終了時間		質量損失率 (%)	爆裂面積の割合 (%)	平均爆裂深さ (mm)	最大爆裂深さ (mm)
	開始	終了				
A	10	7	35.4	100.0	36.2	60.0
B	10	7	15.5	86.9	9.8	37.0
C	10	7	15.2	83.1	12.4	23.0
D	10	7	10.8	5.4	8.8	30.0
E	10	7	7.1	0.6	9.3	20.0
F	10	7	6.8	1.2	6.6	12.0
G	10	7	6.7	0.1	2.5	4.0
H	10	7	11.6	10.0	16.0	36.0
I	10	7	5.4	-----	-----	-----
J	10	7	6.0	-----	-----	-----

(分) 0 10 20 30 40 50 60 (注) *爆裂音の継続時間

置した方が多少温度上昇が低い結果となっている。これらのことから、爆裂の程度が部材温度の上昇に大きな影響を与えることがわかる。

(2) 爆裂と温度・含水状態

I、Jを除く模擬部材の爆裂発生直前および終了時の温度・含水状態を直行方向について Fig. 10 に示す。これより、爆裂開始直前の表層部 (t=10mm) の温度は約 130 ~ 200℃程度で、PVA ファイバーを混入した D ~ G ではその温度が低い傾向が見受けられ、かつ爆裂終了時においても表層部の乾燥域が他の部材に比べて少ない。しかし、前節 2. の実験結果と同様、いずれも爆裂直前において 100℃ を超える温度範囲の部位は含水状態を保持しており、このような部位では蒸気圧が生じていると推察された。

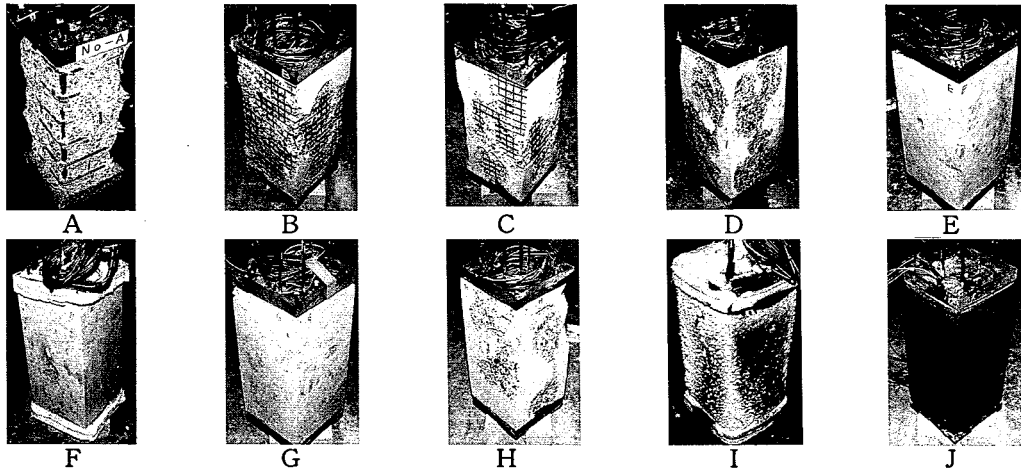


Photo 1 耐火試験後の柱模擬部材の様子
Appearance of Mock-up Specimens after Fire Test

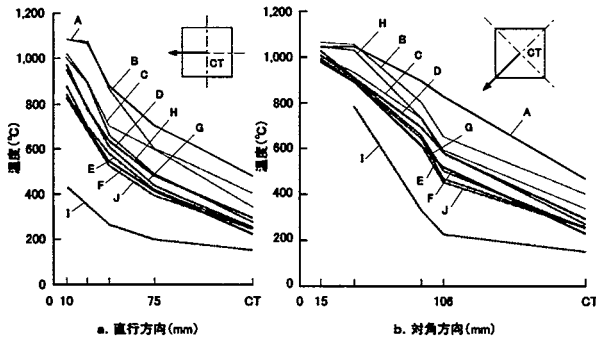


Fig. 9 柱模擬部材の温度分布(3時間耐火試験後)
Temperature Distribution of Mock-up Specimens
after Fire Test

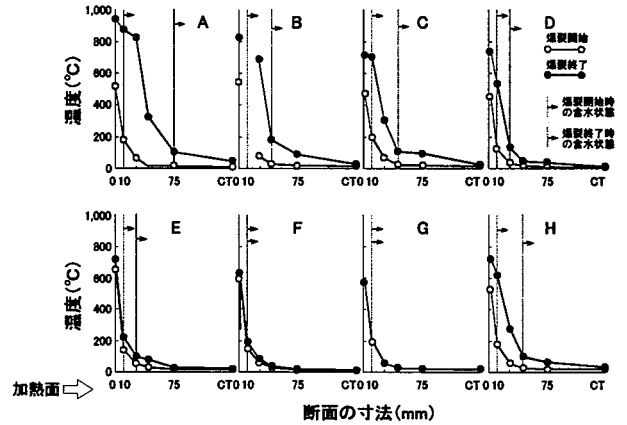


Fig. 10 爆裂と温度, 含水状態
Relation between Spalling and Temperature,
Moisture Content

4. まとめ

火災時における高強度コンクリートの爆裂は、100℃を超える温度範囲で水分を保持している滞留域の存在により水蒸気圧および表層部熱応力が増大し、両者の複合作用により、爆裂が生ずるものと推論される。このようなメカニズムの検討結果に基づき爆裂防止方法の効果を確認した結果、爆裂によるコンクリートの欠落を機械的に抑える方法として鋼板被覆、温度上昇を抑えて防止する方法として耐火塗料の塗布、水分移動を速やかに生じさせ熱応力および蒸気圧の低減を図り爆裂を防止する方法としてPVA等の可溶(燃)性繊維の混入が有効であることが確認できた。なかでも高強度コンクリートの靱性を付与し、同時に爆裂による部材性能の低下を制御する鋼板被覆が実用的と考えられる。また、爆裂深さを低減する方法として、メッシュ筋の配置も有用と考えられる。

参考文献

1) 井上明人: 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), 日本建築学会学術講演梗概集, PP.

739-740, 1991. 9

2) 斉藤 光: プレストレスト・コンクリートの部材の爆裂について, 火災学会論文集, 第16巻2号, PP23-30, 1967. 2
3) 原田有: 建築耐火構法, 工業調査会, PP. 105-16, 1973. 8
4) Harmathy. T. Z: Effect of moisture on the fire endurance of building element, STP385, ASTM Philadelphia, PP. 74-95, 1965
5) 田畑雅幸他: 電極法によるコンクリート含水率の測定, 日本建築学会学術講演梗概集, PP. 117-118, 1976. 10
6) 長尾覚博他: 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, Vo1. 18, No. 1, PP. 657-662, 1996
7) 上杉英樹他: 火災時におけるコンクリート充填鋼管柱の荷重支持能力に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vo1. 42B, PP. 379-386, 1996. 3