

報告 高強度コンクリートの爆裂制御に関する検討結果

長尾覚博^{*1}・中根 淳^{*2}

要旨：近年コンクリートの高強度化が進むなかで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 80 N/mm^2 級の高強度コンクリートを想定し、小型の柱模擬部材を用いた耐火試験により高強度コンクリートの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、爆裂防止法として、・鋼板被覆、・耐火塗料塗布、・ビニロンファイバー混入、が有効であることを示した。

キーワード：高強度コンクリート、爆裂、鋼板、ビニロンファイバー、耐火塗料

1. はじめに

コンクリート部材においては、火災時における爆裂が部材性能の低下を招く要因として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]。

一方、近年実用化が進んでいる高強度コンクリート部材の性能を確保するためには、爆裂の防止が重要であり、適切な防止方法を検討するため筆者らは、設計基準強度 80 N/mm^2 級の高強度コンクリートの爆裂のメカニズムを模擬部材を用いて検討し、高温加熱時におけるコンクリート中の水分移動が爆裂の発生に大きな影響を与えることを示した[2]。

本報告は爆裂のメカニズムに関する検討結果に基づき、設計基準強度 80 N/mm^2 級の高強度コンクリートについて、小型柱模擬部材を用いた耐火試験により爆裂防止および低減に有効な方法を検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

使用材料は以下の通りである。

- セメント：早強ポルトランドセメント、・粗骨材：硬質砂岩碎石、・細骨材：砂岩系陸砂、
- 混和材：シリカフューム、ビニロンファイバー、・混和剤：高性能AE減水剤

2. 2 コンクリートの調合

設計基準強度 80 N/mm^2 級のコンクリートを想定し、表-1を基本調合とした。

表-1 コンクリートの基本調合
(kg/m³)

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 (C×%)
22	160	654	73	892	637	3.0

*1 株式会社大林組技術研究所 建築第2研究室主任研究員 工博（正会員）

*2 同 建築第2研究室室長 工修（同）

2. 3 爆裂防止の考え方

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影響を与えていたと考えられる[2]。すなわち、高温加熱された部材表層部の水分は、加熱面から蒸発するほか、低温側に移動し高含水率状態の滞留域を生じ、その存在のために表層部の温度勾配が急となり熱応力および蒸気圧の発生により爆裂すると考えられる。したがって、爆裂防止の基本的な考え方を下記の3項目とした。

- 表層部の温度勾配を緩やかにする。
- 蒸気圧を低減する。
- 爆裂により飛散するコンクリートを抑える。

前記a, b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し速やかに水分移動を生じさせる（考え方II）、cについては飛散するコンクリートを抑える（考え方III）の3つの考え方に基づいて具体的方法を予備実験により検討した。表-2にこれらの考え方と具体的方法を示す。

2. 4 柱模擬部材

柱模擬部材の基本仕様を図-1に示す。すなわち、柱模擬部材は $30 \times 30 \times 60$ cm とし、四面から加熱される条件とした。

また、耐火試験時の爆裂による崩壊を防止するため、両端部を鋼製の枠で固定し、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。

模擬柱の種類は、前項2. 3の爆裂防止の考え方からして仕様を決め、図-2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。さらに、断面内部には2. 5項に示す各測定項目に対応するセンサーを埋設した。

表-2 爆裂防止の考え方と具体的方法

[考え方]	[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	---・可溶（燃）性繊維 を生じさせる ・ベント管（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

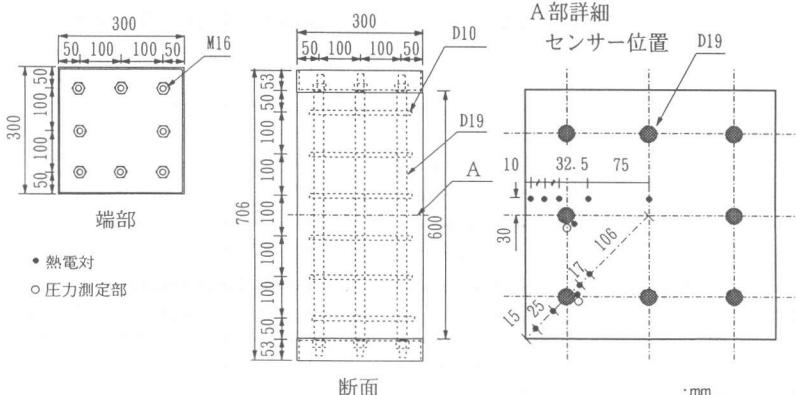


図-1 模擬部材の基本仕様

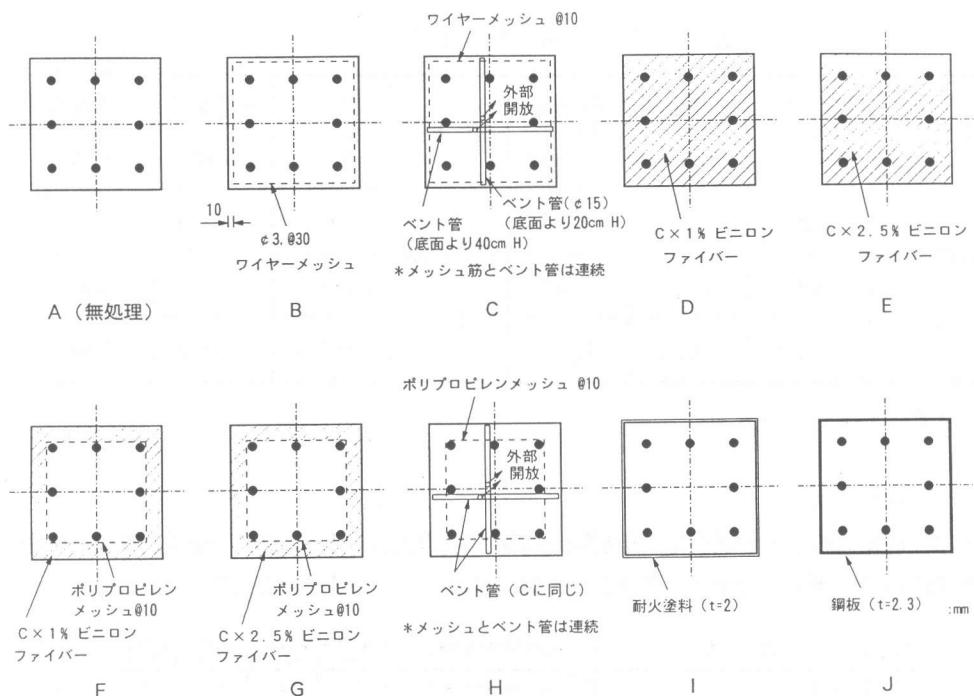


図-2 模擬部材の種類と爆裂防止方法（横断面）

2.5 測定項目

前項2.3に示したように、爆裂は熱応力および水蒸気圧の複合作用によると考えられ、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から、爆裂との関係を検討するため測定項目は以下の通りとした。

- ・温 度 ---- タイプK熱電対による。
- ・水分移動 ---- 電極法による[3]。なお、電極を構成している材料の耐熱温度は最大200°Cであるため、200°C以上の測定は実施していない。
- ・水蒸気圧 ---- コンクリート中に埋設した端部開放のパイプと外部圧力計による。

2.6 耐火試験の方法

耐火試験は小型の耐火炉にて模擬部材の4面をJIS A 1304（建築物の耐火構造部分の耐火試験方法）の標準加熱曲線により3時間加熱した。

3. 実験結果

3.1 強度試験結果

標準養生供試体および耐火試験用模擬部材同一条件で養生した、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ シリンダ供試体の圧縮強度・弾性係数の材齢28日における結果を表-3に示す。

これより、圧縮強度はビニロン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、爆裂制御方法の効果をほぼ同一強度レベルで比較できたものと考える。

表-3 強度試験結果

養生条件	ビニロン 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	ビニロン 混入の 有無 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ (N/mm ²)
標準水中 養生	無	98.3	3.76	現場封緘 養生	無	89.8	3.38
	C × 1	102.2	3.82		C × 1	96.6	3.40
	C × 2.5	101.6	3.77		C × 2.5	95.7	3.40

* C : セメント重量

3. 2 爆裂の状況

耐火試験開始後の爆裂の状況を、爆裂開始時期、爆裂継続時間、爆裂終了時期、質量損失率、爆裂面積の割合、爆裂平均深さ、および最大爆裂深さについて図-3に示す。

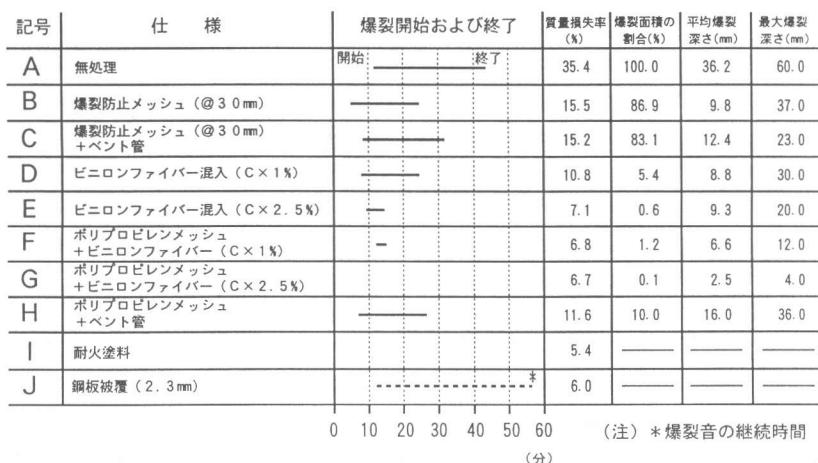


図-3 柱模擬部材の爆裂の状況

これより、爆裂は耐火試験開始後10分前後に発生し始め、爆裂制御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(かぶり部ビニロンファイバー混入)では爆裂がきわめて軽微であった。また、ビニロン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したが、コンクリートが飛散すること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、ビニロンファイバー混入、また、爆裂によるコンクリートの飛散防止に鋼板被覆が有効であることが確認できた。

3.3 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図-4に示す。

これより爆裂防止方法の有無あるいは違いによって、耐火試験後の温度分布に差が認められる。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(ビニロンファイバー混入)、FおよびG(かぶり部ビニロンファイバー混入)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抑えられている。

一方、爆裂による断面欠損が無処理のものと比較して少ない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、ベント管を配置した方が多少温度上昇が低い結果となっている。

(2) 爆裂と温度・含水状態および水蒸気圧

I、Jを除く模擬部材の爆裂の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図-5に示す。

これより、爆裂開始直前の表層部($t = 10\text{ mm}$)の温度は約 $130\sim 200^\circ\text{C}$ 程度で、ビニロン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、いずれも爆裂直前において 100°C 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。今回の実験では、爆裂と蒸気圧との因果関係を明確にすることはできなかったが、加熱面から 4 cm 深さでの最大圧力は爆裂深さが圧力測定位置に達しているA、B供試体で 0.04 N/mm^2 程度となっており、温度測定結果から想定される飽和水蒸気圧よりもかなり小さいことから、蒸気圧は熱応力によるひびわれなど空隙の増大により緩和されるものと推察される。

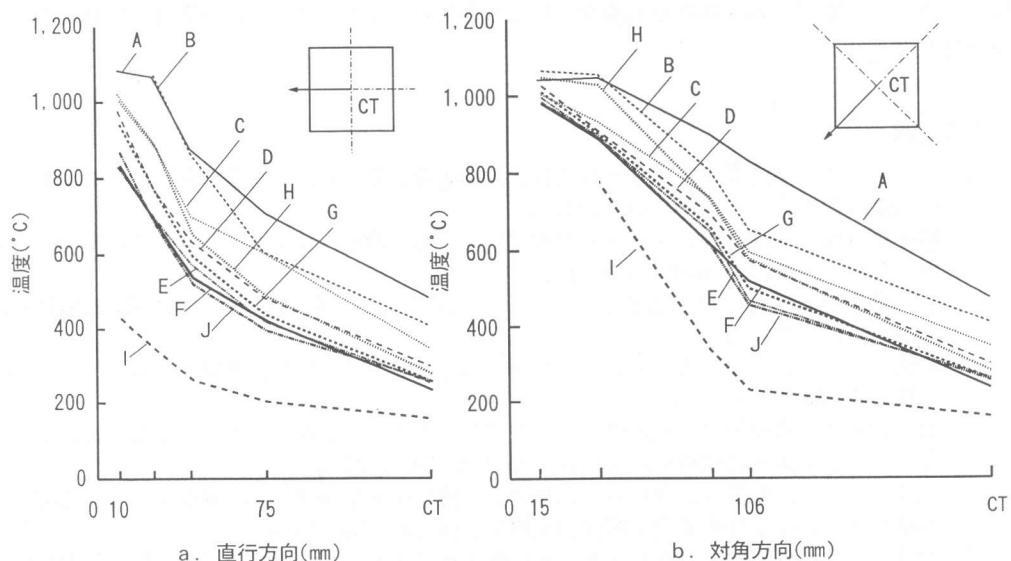


図-4 柱模擬部材の温度分布(3時間耐火試験後)

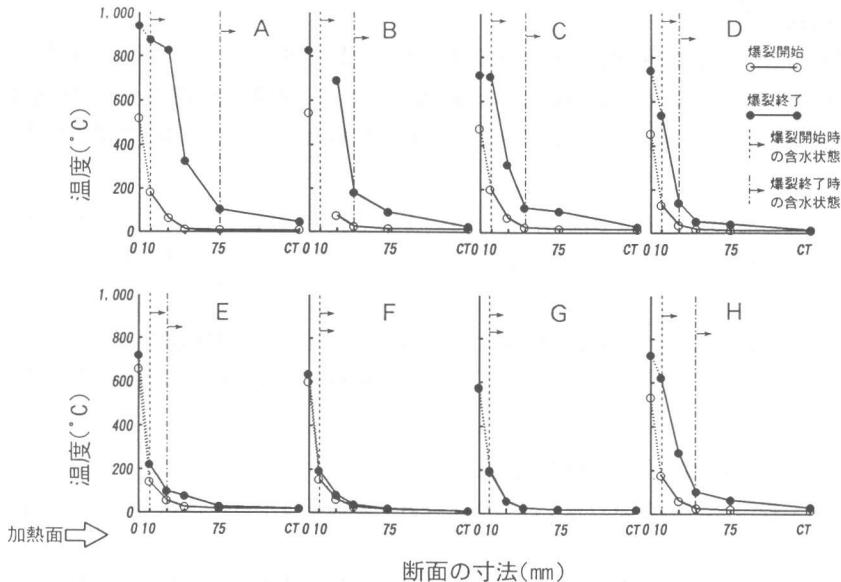


図-5 爆裂と温度・含水状態

4. まとめ

高強度コンクリートの爆裂防止方法を検討し、そ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ビニロン等の可溶（燃）性繊維の混入が有効であることが確認できた。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。合理的な爆裂制御方法の選択は高強度コンクリート部材の要求性能とも関連づけて行われるべきものであり、今後さらに詳細な検討が必要と考える。

参考文献

- [1] 井上明人他：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），日本建築学会学術講演梗概集，pp. 739-740，1991.9
- [2] 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，Vol.18, No.1, pp.657-662, 1996
- [3] 田畠雅幸他：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
- [4] 斎藤 光：プレストレスト・コンクリート部材の爆裂について，火災学会論文集，第16巻2号，pp.23-30, 1967.2
- [5] 南 和孝他：微視的温度応力によるコンクリートのマイクロクラックとその影響，土木学会第41回年次講演会梗概集，Vol.18, pp.129-130, 1987.11
- [6] 山崎庸行他：高強度コンクリート部材の耐火性に関する研究（その3.爆裂防止対策に関する実験的検討），日本建築学会学術講演梗概集，pp.233-234, 1996.9
- [7] 大角 昇他：高強度コンクリート部材の耐火性の評価に関する研究（第4報：耐火塗料による爆裂防止に関する実験），日本建築学会学術講演梗概集，pp.403-404, 1992.8