

報告 高強度コンクリートの爆裂に関する一考察

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。

このような爆裂を適切に制御するためにはそのメカニズムを明確にすることが重要となる。本報告では設計基準強度80 MPa級の高強度コンクリートを想定し、小型の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の特性およびメカニズムについて考察した。

キーワード：高強度コンクリート, 爆裂, 热応力, 水蒸気圧

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には、そのメカニズムを明らかにすることが必要と考える。

このような背景から、本報告では設計基準強度80 MPa級の高強度コンクリートについて、小型模擬部材を用いた耐火試験により爆裂のメカニズムについて考察したものである。

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：普通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、・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 MPa級のコンクリートを想定し、表-1に示す調合とした。

表-1 コンクリートの調合
(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×%)
2.2	160	654	73	892	637	3.0

*1 株式会社技術研究所 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 模擬部材

一面から加熱される条件とし、部材厚、養生条件（含水条件）を主な要因として表-2に示す9種類の模擬部材を用意した。また、耐火試験時までの養生条件はコンクリート打込後封かん養生（S-1～3）、材齢91日まで封かん養生後 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $65 \pm 5\%$ RH気中養生（A-1～3）、材齢91日まで封かん養生後 105°C 加熱により絶乾状態としたもの（D-1～3）の3種類とした。

各模擬部材の体積含水率は、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。模擬部材は、耐火試験時の爆裂による飛散を防止するため、図-1に示すように周囲をステンレス製の枠で固定し、内部にはかぶり厚を4cmとした異形鉄筋（D22）を配筋した。また、断面内部には2.4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 模擬部材の種類と数量

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	

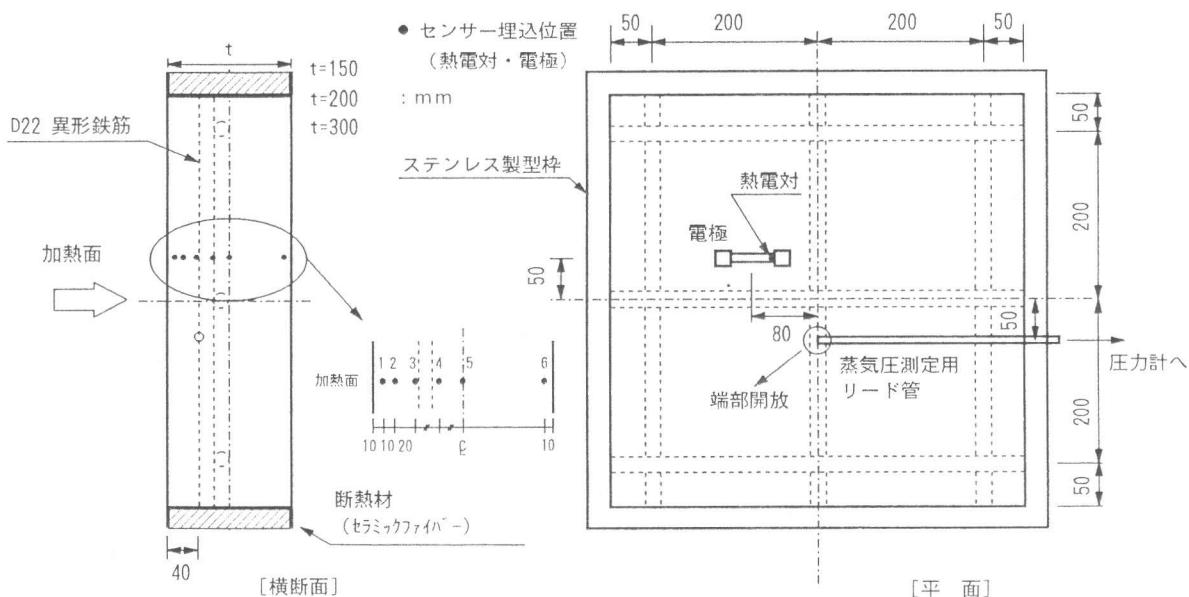


図-1 模擬部材の仕様

2.4 測定項目

既往の研究によると爆裂のメカニズムは、・熱応力あるいは・水蒸気圧、によるとする考え方がある〔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から、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〔5〕。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 以降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。

2.5 耐火試験の方法

耐火試験は小型の耐火炉にて、図-2に示す要領で行った。

すなわち、模擬部材の下面が加熱されるように設置し、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加熱し、爆裂が終了するまで加熱を持続した。

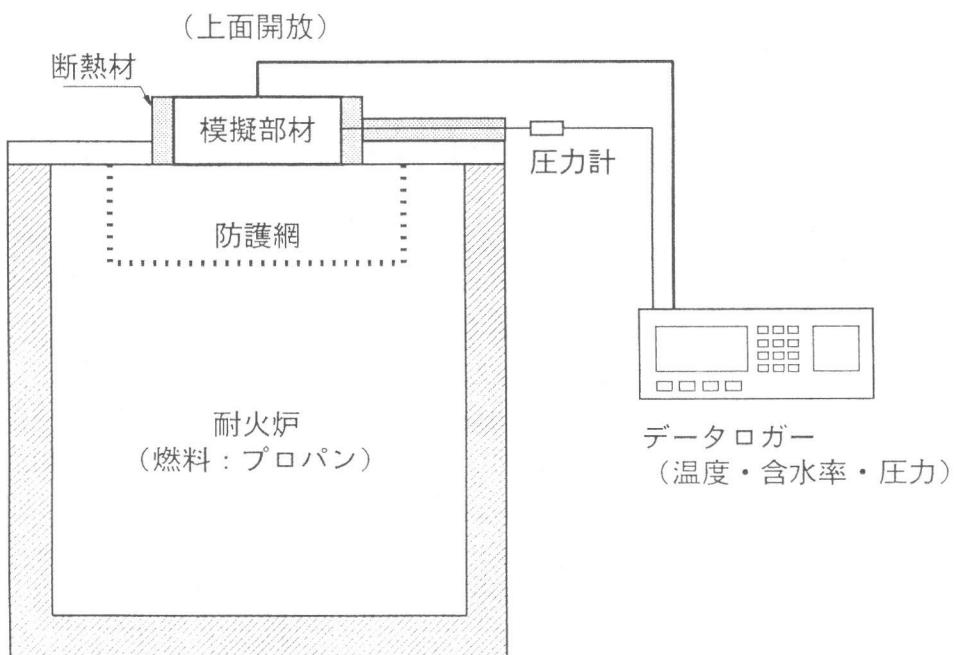


図-2 耐火試験の概要

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と同一条件で養生した、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ シリンダーフォーム供試体の圧縮強度・弾性係数・ポアソン比の結果を表-3に示す。

表-3 強度試験結果

供試体の種類	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 ($\times 10^4\text{MPa}$)	ポアソン比	備考
標準養生	99.0	—	—	材齢 28日
封かん養生	114.3	4.25	0.20	材齢 330日
気中養生	111.8	4.21	0.20	同上
絶乾	110.6	3.50	0.15	同上

これより、圧縮強度について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る。

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、および最大爆裂深さについて図-3に示す。

模擬部材 の種類	耐火試験開始後の経過時間(分)			最大爆裂深さ(mm)
	10	20	30	
S-1		■		29
S-2	■	■		30
S-3	■	■		47
A-1		■	■	28
A-2	■	■		45
A-3	■	■		43
D-1	(注) } 爆裂なし	■ : 爆裂の開始から 終了までの 継続時間		—
D-2				—
D-3				—

図-3 各模擬部材の爆裂の状況

これより、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、概略20分程度継続した後終了する結果となっている。部材厚による爆裂性状に大きな違いは認められないが、封かん養生のものが封かん養生に比べ爆裂の継続時間が長くなる傾向が認められる。また、最大爆裂深さは部材厚が大きい程大と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。

3. 3 温度および含水率測定結果

(1) 温度測定結果

含水状態の異なる模擬部材の温度分布を部材厚20cmの場合について図-4に示す。

これより加熱開始後断面内の温度は上昇し、加熱面近傍の温度分布はかなり急勾配かつ非線形となるため、表層部には過渡的に圧縮応力の発生が推察される。また、封かん養生、気中養生の模擬部材では表層部の爆裂による断面欠損により、絶乾のものに比べ鉄筋位置付近での温度上昇がかなり大となり、部材性能の低下が大きいと考えられる。

(2) 爆裂と温度・含水状態および水蒸気圧

爆裂が発生する直前の温度・含水状態および爆裂終了時の含水状態を図-5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($t = 10\text{ mm}$)の温度は約150~190°C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°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いることが判明し、この

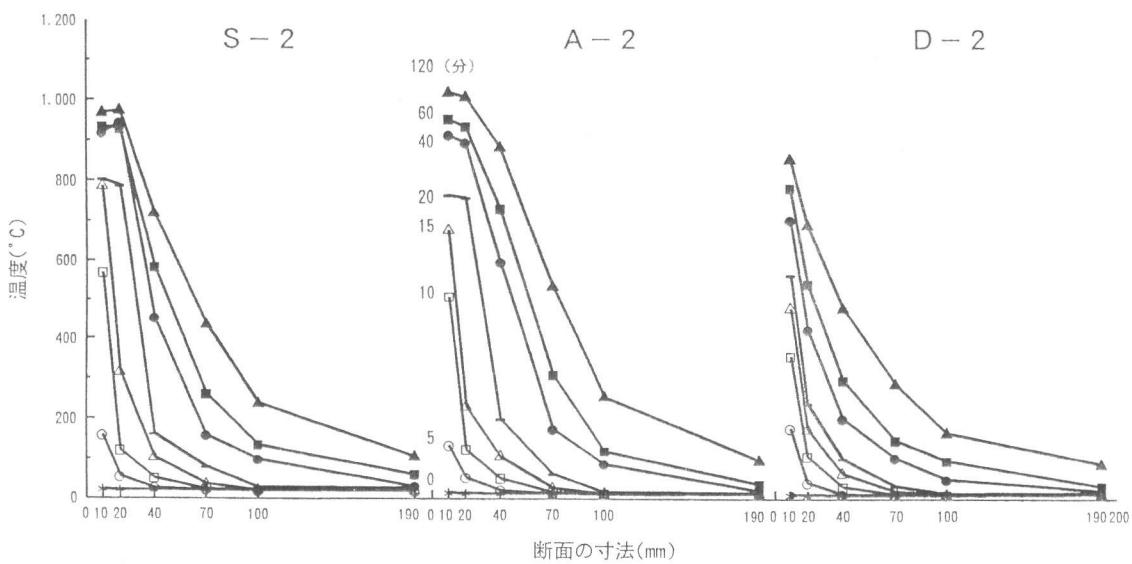


図-4 模擬部材の温度変化 ($t = 200 \text{ mm}$ の場合)

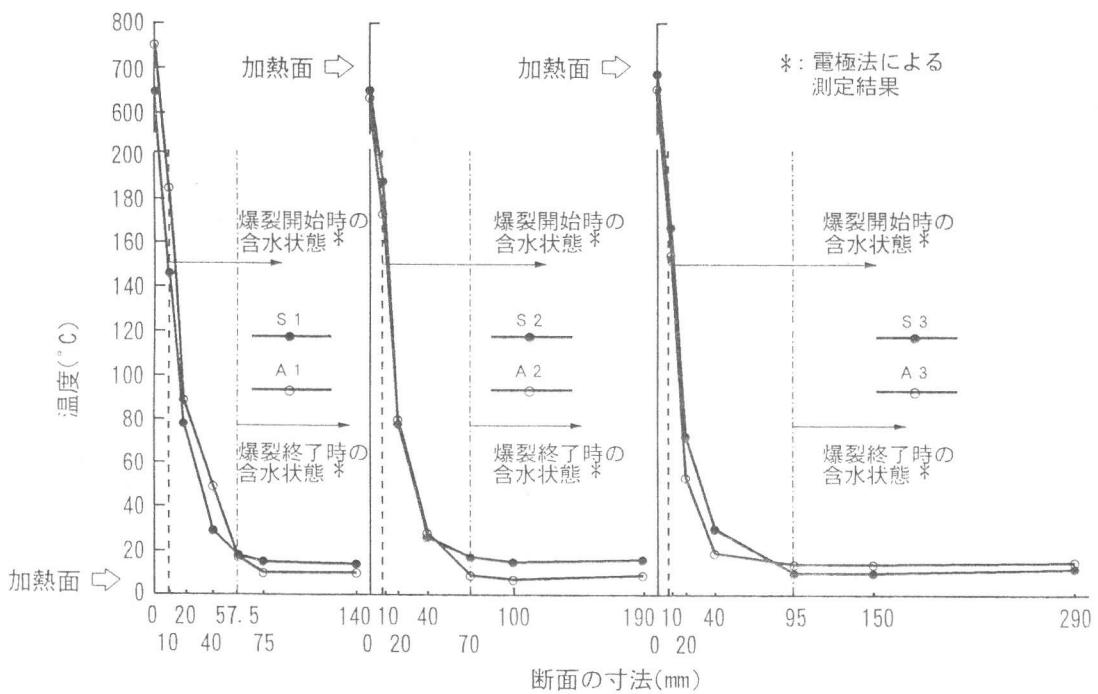


図-5 爆裂開始直前の温度・含水状態

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 $150 \sim 190^\circ\text{C}$ 時の飽和蒸気圧は約 $0.47 \sim 1.24 \text{ N/mm}^2$ 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 4 cm 深さでの最大圧力は 0.17 N/mm^2 程度との結果が得られており、実際には加熱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。

一方、爆裂開始直前の雰囲気温度は $630 \sim 750^\circ\text{C}$ 程度で表層部温度との差は約 $450 \sim 570^\circ\text{C}$ に達し、圧縮破壊による爆裂の可能性は明らかではないが、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。

また、爆裂の生じなかった絶乾状態の模擬部材においても、含水状態の模擬部材の爆裂発生時と同一加熱経過時間における表層部と雰囲気温度との差が、約350～450°Cで、100°C前後温度差が小となっているものの、その温度勾配はかなり大きい。しかし、表面から4cm深さの最大圧力は0.04N/mm²程度とほとんど認められない。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の範囲で推察すると、熱応力あるいは水蒸気圧いずれが卓越しているかについては明確にできないが、加熱表層部の急激な温度勾配による熱応力および100°C以上の温度域における水の存在によって生ずる水蒸気圧、これら両者の効果と考えるのが妥当と思われる。

すなわち、含水状態のコンクリートにおいては図-6に示したような、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、含水率が大である程顕著になり、爆裂が生じやすくなると考えられる。また、爆裂終了時においても断面内には100°Cを超える温度で含水状態を保持している部位が依然存在しているが、含水状態の部位における温度勾配は線形に近い分布を呈するようになることから、爆裂のメカニズムは熱応力および水蒸気圧の複合作用と考えるのが現象を合理的に説明し得るものと考える。

このような高強度コンクリートの爆裂のメカニズムをさらに詳細に解明するためには、使用材料による影響の他、高温下における高強度コンクリートの力学特性、熱物性などの各種物性および微細構造の変化を明らかにする必要があると考える。

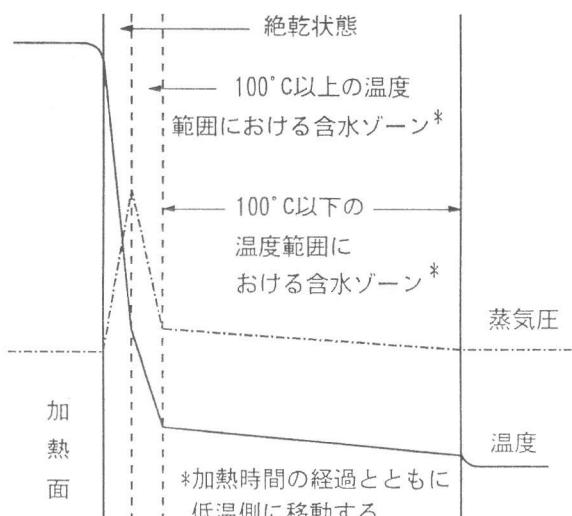


図-6 断面内の温度・含水率・圧力分布の模式図

4. まとめ

高強度コンクリートの爆裂は、含水状態のコンクリートにおける加熱面近傍の熱応力と水蒸気圧の複合作用によって生ずると推察されたが、爆裂の制御方法を確立する上で、高温下の物性評価も含め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] 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
- [3] 原田 有：建築耐火構法、工業調査会、pp.105-116、1973.8
- [4] Harmathy.T.Z : Effect of moisture on the fire endurance of building element, STP 385 , ASTM , Philadelphia, pp.74-95, 1965
- [5] 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