

論文 高温加熱によるコンクリートの爆裂現象に関する実験的検討

小澤 満津雄*1・王 若平*2・坂 昇*3・森本 博昭*4

要旨：本研究では、コンクリートの爆裂に対する含水状態の影響を検討するため、高強度コンクリートを対象として養生条件の異なる湿潤・気中乾燥・強制乾燥の3種類の供試体について加熱試験を実施し、加熱供試体に生じる爆裂現象と温度と蒸気圧の計測を試みた。その結果、含水状態によって発生蒸気圧と爆裂の規模が大きく変わることが明らかとなった。含水状態が比較的低いものは爆裂が生じず、加熱面に亀甲状のひび割れが生じた。

キーワード：火災, 爆裂, 蒸気圧, 温度応力, 高強度コンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性の観点から耐火性は重要な検討項目となる。従来、コンクリートは耐火性の比較的高い材料として用いられてきた。しかし、構造物の大型化・高強度化に伴い、火災時の高温条件下において激しい爆裂現象を起こしやすいという報告が種々の研究において明らかにされている^{1)~6)}。爆裂は、火災時の急速高温加熱による部材温度の急上昇に伴うコンクリート内水分の蒸気圧応力の増大、および熱応力に起因し、これらの応力の複合作用により爆裂が発生するものと考えられている。しかし、熱応力と蒸気圧応力による爆裂メカニズ

ムについては確たる結論が得られていないのが現状である。特に蒸気圧の爆裂に対する影響は十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、コンクリートの爆裂現象のメカニズムを解明するための基礎的資料を得る目的で、高強度コンクリートを対象とし、含水状態の影響を検討するために湿潤・気中乾燥・強制乾燥の3種類の供試体について加熱試験を実施し、加熱供試体中に生じる温度と蒸気圧の計測を試みた。そして、これらの計測値と供試体に生じるひび割れ、ならびに爆裂の発生との関連について考察を行った。

表-1 供試体の種類

コンクリート	供試体の種類	供試体寸法(mm)	供試体数
高強度コンクリート	湿潤	400×400×100	2
	気中乾燥		
	強制乾燥		

表-2 示方配合

Gmax	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				
(mm)	(%)	(%)	W	C	S	G	Ad
25	30	44.1	132	440	840	1060	22

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 学生 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 学生 (非会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

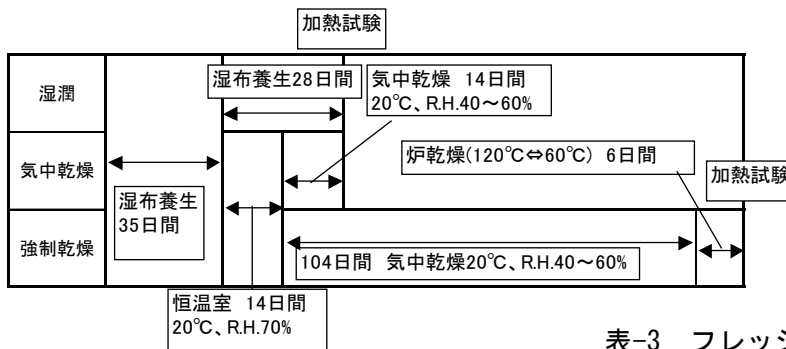


図-1 養生条件

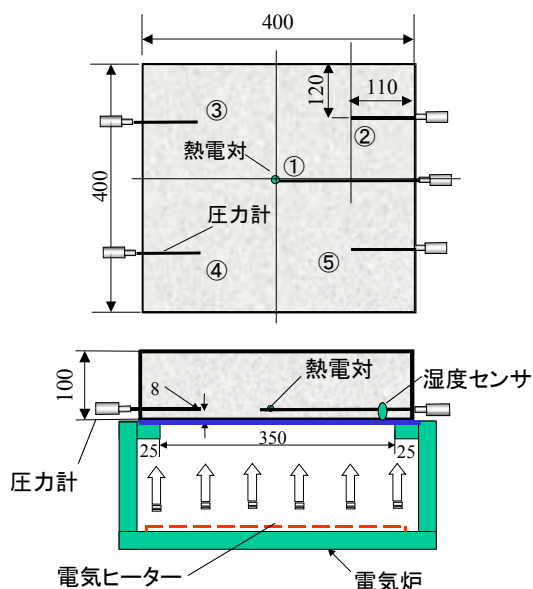


図-2 実験装置の概要(単位: mm)

2. 実験概要

表-1 に供試体の種類を示す。供試体の種類は加熱面付近の水分量が爆裂に及ぼす影響を検討するために、湿潤供試体と気乾供試体および強制乾燥供試体の 3 種類とした。供試体数は各 2 体ずつ合計 6 体とした。供試体寸法は、400×400×100mm とした。コンクリートの示方配合を表-2 に示す。コンクリートの種類は、既往の研究¹⁾において、高温加熱による爆裂現象が発生しやすいとされる高強度コンクリートとした。W/C は 30% とし、セメントは早強セメントを使用した。粗骨材の最大寸法は 25mm とした。図-1 に養生条件を示す。全ての供試体は、脱型後、35 日間の湿布養生を行った。その後、湿潤供試体は引き続き、28 日間湿布養生を行った。気中乾燥供試体と強制乾燥供試体は恒温室内（温度 20℃、湿度 70%）で 14 日間乾燥させた。その

表-3 フレッシュコンクリートの性状

温度 (°C)	スラブ (cm)	空気量 (%)
30	19.5	1.8

表-4 圧縮強度と弾性係数試験結果 (28 日)

	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
湿潤	83.5	41

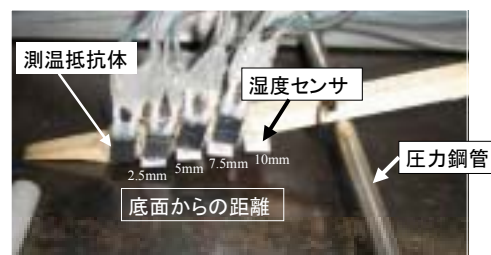


写真-1 センサの配置状況

後、14 日間温度 20℃、湿度約 40～60%の室外に放置した。強制乾燥供試体は、その後更に 3 ヶ月温度 20℃、湿度約 40～60%の室外に放置した。その後、6 日間乾燥炉内で 60℃から 100℃まで温度を変化させて強制的に乾燥させた。表-3、4 にフレッシュコンクリートの性状および湿潤養生材齢 28 日の圧縮強度と弾性係数試験結果を示す。図-2 に実験装置を示す。図より、供試体中の加熱面から 8mm の位置に蒸気圧計測用鋼管(外径 5mm, 内径 2mm, 長さ 200mm と 110mm の 2 種類)を配置した。湿潤供試体と気中乾燥供試体は鋼管を 5 本配置し、強制乾燥供試体は 1 本配置した。鋼管は管内部の温度を均一に上昇させるために加熱面に対して平行に埋設した。また、鋼管内には、コンクリートの蒸気圧の計測精度の向上を期待して圧力媒体として油圧ジャッキ用油を充填した。蒸気圧は鋼管他端に取り付けた圧力計(K 社製: 計測許容値:

2MPa および 5MPa の 2 種類)により計測した。供試体内部の温度は K 熱電対により計測した。温度計測位置は蒸気圧計測位置と同じく加熱面(下底面)から 8mm とした。

コンクリート内部の含水状態が爆裂に大きく影響することが既往の研究^{1)~6)}より明らかとなっている。そこで、加熱試験開始時の供試体内部の含水状態を相対湿度として計測することを試みた。計測には気中計測用湿度センサを埋め込んだ。本研究で使用した湿度センサ(N 社製)は非加熱型セラミック湿度センサである。本来、気中の湿度計測に用いられているものである。気中における測定範囲は 20~90%の範囲である。供試体加熱面から 10mm までの湿度センサの配置状況の一例を写真-1 に示す。湿度センサの配置位置は湿潤供試体が供試体底面から高さ方向に 10mm と 50mm とした。気中乾燥供試体は湿度センサを加熱面から 10mm の間に 2.5mm ピッチで 4 つ配置し、50mm の位置に 1 つ配置した。強制乾燥供試体は加熱面から 50mm の位置にセンサを配置した。供試体の加熱には電気炉を用いた。電気炉は容量電圧 200V, 最大電流 28A の鉄クロム線を 9 本用いた装置である。加熱面は下底面 350×350mm の範囲とした。加熱条件は、1200°C/hr とした。1200°C に達した後はヒーター電源を遮断して除冷するものとした。ただし、加熱段階で爆裂により鋼管内の蒸気圧が抜けるか、大きな爆裂が発生し試験継続が危険と判断された時点で加熱を中断して除冷を行った。

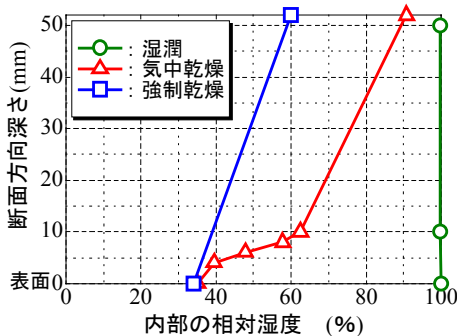


図-3 内部の相対湿度分布

3. 実験結果

湿潤と気中乾燥および強制乾燥供試体それぞれ 2 体ずつ試験を行った。蒸気圧計測値については 2 体の間にバラツキが見られたが、温度および爆裂に至る過程についてはほぼ同様であった。ここでは 2 体のうちの 1 体について説明する。

3.1 供試体中の湿度分布

図-3 に湿潤供試体、気中乾燥供試体および強制乾燥供試体それぞれの加熱試験前の湿度分布の一計測例を示す。湿潤供試体は実験直前まで湿布養生をしたため、湿度はほぼ 100%を示した。一方、気中乾燥供試体は 28 日間の湿布養生後に乾燥期間 28 日とした。図より、供試体表面付近では、相対湿度は 37%程度まで低下し、深さ 10mm 程度では 62%程度である。断面中心 50mm の位置では、90%を示した。強制乾燥供試体は、表面付近が相対湿度 37%程度まで乾燥し、断面中心は相対湿度が 60%まで低下した。

3.2 蒸気圧計測の校正曲線

コンクリートの加熱試験に先立ち、鋼管内部の媒体 (オイル) の蒸気圧計測に及ぼす影響を検討するために、鋼管内にオイルを充填し鋼管の直接加熱試験を実施して、加熱によるオイルの体積膨張により発生する圧力を計測した。図-4 に鋼管内部の圧力と炉内温度との関係を示す。加熱により発生する媒体の圧力は、温度と二次曲線の関係にあり、約 250°C で 0.1MPa となった。この結果に基づいて、計測蒸気圧の補正を行った。

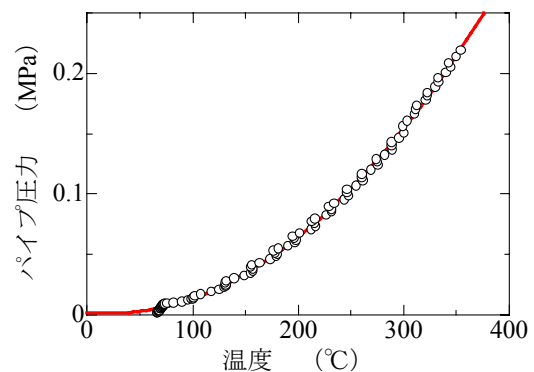


図-4 蒸気圧計測の校正曲線

3.3 加熱試験結果

図-5 に湿潤供試体の内部温度と内部蒸気圧の経時変化を示す。図より、内部温度は、加熱開始から 30 分で約 100℃に達した。その後、40 分で 220℃程度を示した。次に、内部の蒸気圧について、加熱後 30 分程度までは蒸気圧の上昇は確認できなかった。内部温度が 100℃に達する 30 分を過ぎた頃から蒸気圧が上昇し始める傾向を示した。5 箇所の計測箇所のうち NO.5 の位置以外は蒸気圧の上昇がみられた。蒸気圧最大値は No.3 で 3.2MPa を示した。蒸気圧の上昇とともに加熱後 44 分と 47 分および 49 分に断続的な爆裂現象が生じた。内部蒸気圧は、加熱により単調に増大するのではなく、爆裂に至る過程で一時的な減少を何度か繰り返しながら上昇していくことがわかる。これは、周辺に発生した爆裂およびひび割れの影響によるものと考えられる。図-6 に気中乾燥供試体の内部温度と内部蒸気圧の経時変化を示す。図より、内部温度は、湿潤供試体と同様に加熱開始から 30 分で約 100℃に達し、その後、40 分で 220℃程度を示した。次に、内部の蒸気圧について加熱後 35 分程度までは蒸気圧の上昇は確認できなかった。内部温度が 150℃に達する 35 分程度から蒸気圧も上昇し始める傾向を示し、蒸気圧計測位置 No.1 が蒸気圧は、最大値で 3.4MPa に達した。5 箇所の計測箇所のうち NO.3 の位置以外は蒸気圧の上昇がみられた。蒸気圧計測位置 No.1 の蒸気圧が 3.0MPa を示す 43 分に最初の爆裂が生じ、蒸気圧のわずかな低下があったが、その後再び上昇した。その後、蒸気圧は 3.4MPa を示し、44 分に再度大きな爆裂が生じた。

図-7 に強制乾燥供試体の内部温度と内部蒸気圧の経時変化を示す。図より、内部温度は、湿潤供試体と同様に加熱開始から 30 分で約 100℃に達し、その後、40 分で 220℃程度を示した。次に、内部蒸気圧について加熱後 37 分までは蒸気圧の上昇は確認できなかった。内部温度が 150℃に達する 37 分程度から蒸気圧も上昇し始めたが、最大値は 0.2MPa 程度であった。強

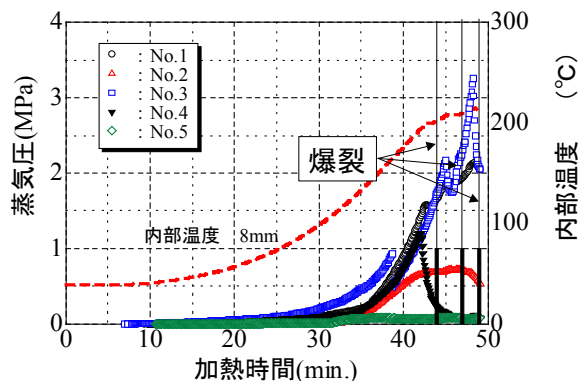


図-5 内部温度と内部蒸気圧の経時変化 (湿潤供試体)

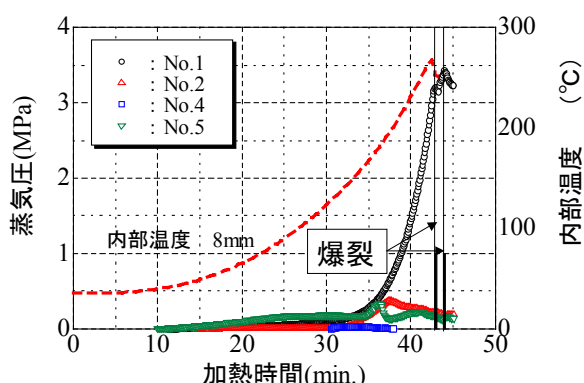


図-6 内部温度と内部蒸気圧の経時変化 (気中乾燥供試体)

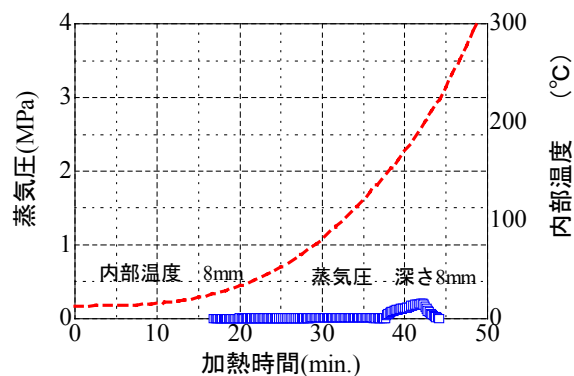


図-7 内部温度と内部蒸気圧の経時変化 (強制乾燥供試体)

表-5 各供試体の蒸気圧の最大値

計測位置	湿潤 (MPa)	気中乾燥 (MPa)	強制乾燥 (MPa)
No.1	2.10	3.40	0.20
No.2	0.78	0.36	/
No.3	3.20	/	/
No.4	1.20	0.03	/
No.5	0.08	0.33	/



写真-2 加熱面の剥離状況
(湿潤供試体)



写真-3 加熱面の剥離状況
(気中乾燥供試体)



写真-4 加熱面の状況
(強制乾燥供試体)

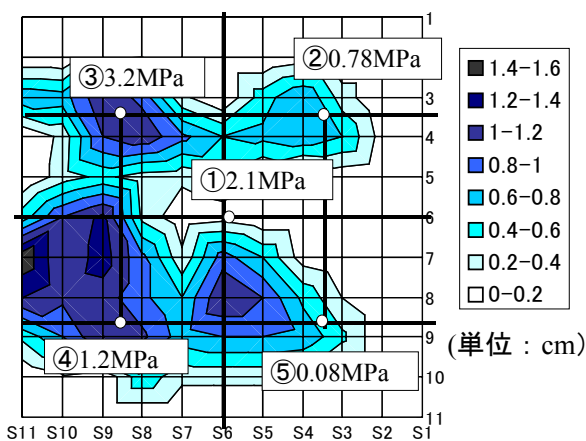


図-8 剥離深さのコンター図と蒸気圧計測位置での最大値 (湿潤供試体)

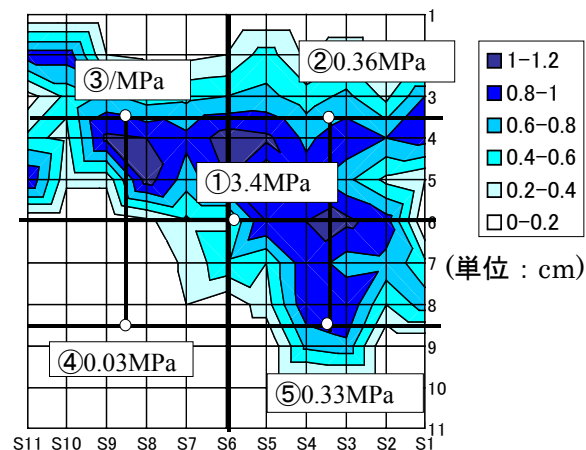


図-9 剥離深さのコンター図と蒸気圧計測位置での最大値 (気中乾燥供試体)

強制乾燥供試体は、側面に温度に起因すると考えられるひび割れが確認されたが、爆裂現象は確認できなかった。乾燥前の炉乾燥による加熱による内部ひび割れの発生の可能性もあるが、全体的に含水量が少ないために蒸気圧の上昇は他の2種類に比べて低いものとなった。

3.3 蒸気圧最大値の比較

表-5に各供試体の蒸気圧の最大値を示す。表より、湿潤供試体はNo.1,3,4の計測位置でそれぞれ、2.1MPa, 3.2MPa, 1.2MPaの値を示した。次に、気中乾燥供試体はNo.1が3.4MPaと大きな値を示したが、その他は0.3MPa程度と小さい値となった。強制乾燥供試体は1箇所のみで計測だが、0.2MPaを示した。湿潤供試体は内部の含水率が高いために、加熱面の全体で他の種

類に比べて蒸気圧は高い値を示した。気中乾燥供試体はNo.1のみ蒸気圧は高い値を示したが、その他は低めの値を示した。強制乾燥供試体は含水状態が低いために、蒸気圧の値が低いものになったと考えられる。以上のように、供試体の含水状態が発生する内部蒸気圧の大きさに大きな影響を与えることが実験的に明らかとなった。

3.4 爆裂による加熱面の剥離深さ

写真-2~4に加熱面の剥離状況の一例を示す。写真-2, 3より湿潤供試体と気中乾燥供試体は爆裂が加熱面全面に発生していた。写真-4より、強制乾燥供試体は加熱面に爆裂は生じておらず、全面にわたって亀甲状のひび割れが生じていた。亀甲状のひび割れについてはその発生機構を現

在検討中であるが、高温加熱時のコンクリート熱膨張係数の変化が要因の一つである可能性が考えられる。この亀甲状のひび割れが、爆裂が生じなかったことに関連している可能性がある。

図-8~9 に湿潤供試体と気中乾燥供試体の爆裂による剥離深さのコンター図(平面分割 5cm ピッチ)と蒸気圧計測位置での最大値を示す。湿潤供試体の最大剥離深さは 1.5cm, 気中乾燥供試体では 1.2cm であった。湿潤供試体において供試体中央の蒸気圧計測位置 No.1 付近の剥離深さは 0.2cm であるが、蒸気圧の最大値が 2.1MPa と高い値を示した。しかし、蒸気圧計測位置 No.3 付近の剥離深さは 1.2cm であり、蒸気圧の最大値が 3.2 MPa を示した。蒸気圧計測位置 No.4 付近の剥離深さは 1.2cm であり、蒸気圧の最大値が 1.2 MPa を示した。気中乾燥供試体の蒸気圧計測位置 No.1 の蒸気圧の最大値が 3.4MPa と高い値を示したが、その付近で 1.2cm 以上の剥離深さが生じ、大きな爆裂を起こした。以上のように、湿潤供試体と気中乾燥供試体ともに蒸気圧が高い領域で爆裂深さも大きくなる傾向にあることが分かる。

4. まとめ

本研究では、以下のような知見が得られた。

- 1) 湿潤供試体は加熱面全体で大きな蒸気圧が発生することが明らかとなった。最大で 3.2MPa 程度の蒸気圧を計測した。
- 2) 内部蒸気圧は、加熱により単調に増大するのではなく、爆裂に至る過程で一時的な減少を何度か繰り返しながら上昇していく。これは、周辺に発生した爆裂およびひび割れの影響によるものと考えられる。
- 3) 強制乾燥供試体は加熱面に爆裂は生じず、加熱面全体に亀甲状のひび割れが生じた。
- 4) 加熱の過程で発生するひび割れが爆裂の発生の有無、および発生の規模に大きく関わっていると推定される。
- 5) 湿潤供試体と気中乾燥供試体ともに蒸気圧が高い領域で爆裂深さも大きくなる傾向が認

められた。

今後の課題として、爆裂メカニズムの解明に向けて更なる実験の蓄積が必要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、日本インシュレーション(株)小川晴久氏から多大なご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の耐火性技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，土木学会，コンクリート技術シリーズ，No.63，2004
- 2) L.T.Phan: High-Strength Concrete at High Temperature An Overview, Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 6th International Symposium. Proceedings. Leipzig, Germany, Konig, G; Dehn, F; Faust, T., Editor(s), Vol.1, pp.501-518, 2002
- 3) 一瀬賢一，丹羽博則，長尾覚博：火災時の鉄筋コンクリート柱内部の熱・水分移動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 553 号，pp.7-12，2002，3
- 4) S.Dal Pont, H.Colina, A.Dupas and A.Ehrlacher : An experimental relationship between complete liquid saturation and violent damage in concrete submitted to high temperature, Magazine of Concrete Research, 57,No.8,pp.455-461,Oct. 2005
- 5) 王 若平，川上 寛正，小澤 満津雄，森本 博昭：コンクリートの爆裂現象に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28,No.1,pp.1703-1708,2006
- 6) 高 正遠，柳 東佑，兼松学，野口貴文：火災加熱環境下におけるコンクリート中の熱・水分移動および爆裂に関する研究，日本建築学会構造系論文集，pp.23-30，2006