

# 論文 高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性に及ぼす加熱時間の影響

松沢 晃一<sup>\*1</sup>・橋高 義典<sup>\*2</sup>

**要旨**：本研究では、100℃から800℃の高温環境下に1時間から168時間曝されたコンクリートについて破壊靱性試験を行い、コンクリートの破壊特性に及ぼす加熱時間の影響について検討を行なった。その結果、初期結合応力と加熱時の最高温度保持時間の関係は、最高温度保持時間24時間までは加熱温度により異なるが、それ以降ではほぼ一定となることが示された。また、破壊エネルギーと最高温度保持時間の関係は、加熱温度400℃以下では最高温度保持時間1時間と比較して12時間で増加し、24時間で低下した後、再び増加すること、加熱温度500℃以上では、最高温度保持時間とともに低下することが明らかとなった。

**キーワード**：コンクリート、高温加熱、加熱時間、破壊特性

## 1. はじめに

コンクリート構造物は様々な用途に用いられているが、その供用期間中に多くの劣化因子の影響を受ける。熱の影響を受けると強度特性などの性質が変化するため、長期にわたり熱の影響を受ける焼却施設や発電所施設などでは、供用時のコンクリートに対して温度制限値が設けられる場合がある<sup>1)</sup>。また、火災時には、短期間ではあるがコンクリートは高温加熱の影響を受けて性質が変化する。そのため、熱の影響を受けたコンクリートに関しては多くの検討がなされており、報告書としてもまとめられている<sup>2)-4)</sup>。

それらの既往の研究では、強度特性に関する検討が多く、圧縮強度が加熱温度の上昇や、それにともなう含水状態によって変化し、高温になるほど低下すること、割裂引張試験による引張強度は高温になるほど低下し、圧縮強度の低下より大きいことなどが報告されている。このように、高温加熱の影響を受けたコンクリートは強度が低下するため、ひび割れも発生しやすくなることが予想される。しかし、高温加熱の影響を受けたコンクリートの、ひび割れに関する検討は少ない。

ひび割れは、主に引張破壊によって起こるため、ひび割れを検討する際には、引張変形による破壊進展の評価が必要となる。そのためには、コンクリートの引張変形時における最大荷重以降の軟化域を含め、安定した荷重-変位関係が得られる破壊靱性試験を応用し、間接的に引張軟化曲線を求める方法が有効であると考えられる。

本研究では、100℃から800℃までの高温環境下に1時間から168時間曝されたコンクリート供試体について、くさび割裂試験を行ない、引張軟化曲線の逆解析に基づき各種破壊パラメータを算出し、コンクリートの破壊特性に及ぼす加熱時間の影響について検討を行なった。

## 2. 破壊特性の評価

### 2.1 引張軟化曲線の推定方法

引張軟化曲線は、くさび割裂試験より得られる荷重-開口変位 (CMOD) 曲線の解析プログラムを作成し、実験結果を多直線近似法<sup>5),6)</sup>により逆解析して求めた。逆解析による多直線近似法は、実験により求められた荷重-開口変位 (CMOD) 曲線のデータを利用して結合応力-開口変位 (COD) の関係を非線形ひび割れ方程式の繰り返し演算により求める際に、計算により既に求めている一部の結合応力-開口変位 (COD) 関係を繰り返し演算の構成則として適用し、逐次解析をするという手法を採用している。

くさび割裂試験による引張軟化曲線の推定も、切欠き梁3点曲げ試験による方法と同様に求めることが可能であるが、応力拡大係数が切欠き梁3点曲げ試験の場合と異なっている。その応力拡大係数は、コンパクトテンション試験<sup>7)</sup>によっている。また、くさび割裂試験における形状関数は、既往の研究<sup>8)</sup>により求めている。

### 2.2 破壊パラメータ

破壊特性は、引張軟化曲線から得られる破壊パラメータである、初期結合応力および破壊エネルギー<sup>9)</sup>により評価した。

引張軟化曲線は、結合力モデルにより破壊進展をモデル化した場合の結合力とひび割れ開口変位の関係を示す指標となり、その初期結合応力は、材料の本質的な引張強度を反映するパラメータとなる。初期結合応力は、ひび割れ発生抵抗性の指標となり、この値が大きいほどひび割れが発生しにくいことを意味する。

引張軟化曲線で囲まれた面積が破壊エネルギーであり、ひび割れ進展抵抗性の指標となる。この値が大きいほど、ひび割れが進展しにくいことを意味する。

\*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 助教 修士 (工学) (正会員)

\*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 教授 工博 (正会員)

### 3. 実験概要

#### 3.1 供試体概要

表-1 に使用材料、表-2 に調合、表-3 に実験の要因と水準を示す。コンクリートは、レディーミクストコンクリート工場（神奈川県相模原市）の2軸強制練りミキサ（公称容量 1.7m<sup>3</sup>）を用いて製造された、呼び強度 27、目標スランプ 18cm、目標空気量 4.5%のものを用いた。なお、コンクリートの製造から打込みまでの時間は約 15 分である。

供試体は、各試験条件につき、破壊特性を評価するためのくさび割裂試験用供試体（100×100×120mm）3体、圧縮強度およびヤング係数測定用供試体（φ100×200mm）3体とした。供試体は打込み後 2 日で脱型し、材齢 13 週まで標準養生を行なった後、加熱および各試験を行なうこととした。表-4 にフレッシュ性状と材齢 4 週および 13 週標準養生後の強度試験結果を示す。

#### 3.2 試験方法

##### (1) 加熱方法

図-1 に加熱履歴例を示す。供試体加熱時の炉内最高温度（以下、加熱温度）は 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800℃とし、加熱時の最高温度保持時間（以下、加熱時間）は 1, 12, 24, 72, 168 時間とした。また、比較用として加熱なし（20℃）の試験も行った。

加熱は、プログラム調整器付きマッフル炉（炉内寸法 W310×D610×H310mm、左右 2 面加熱）を用いて行なった。炉内での均一加熱を行なうために、供試体は左右のヒーターからの距離が同一になるよう炉内の中央に設置した。また、炉内の昇温は、あらかじめ表面および中心部に K 型熱電対を設置した φ100×200mm 供試体を用いて昇温試験を実施し、供試体表面と内部中央との温度差が小さくなるように 0.5℃/min とした。炉内温度が目標温度に達した後は、その温度を所定の時間保持して加熱を終了した。そして、供試体の温度が外気温度と同程度になるまで炉内で自然除熱とし、各試験を行なうこととした。

##### (2) 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて行なった。また、同時にコンプレッソメーターを用いてヤング係数を測定した（JIS A 1149）。

##### (3) 破壊靱性試験方法

コンクリートの破壊特性を評価する方法として、モード I 型（引張型）の破壊が得られる切欠き梁による 3 点曲げ試験方法が示されているが、寸法の大きな供試体を用いて破壊特性の評価を行う場合は、供試体自体の自重による影響が無視できない。本研究のように高温加熱の影響を受けたコンクリートは脆性的となるため、自重が破壊特性に及ぼす影響が大きくなることが予想された。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通	C	密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
	ポルトランドセメント		
細骨材	砕砂（相模原産）	S1	表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 3.00
	砕砂（八王子産）	S2	表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 3.00
	陸砂（君津産）	S3	表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 1.80
粗骨材	砕石（相模原産）	G1	表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 実積率 60.0%
	砕石（八王子産）	G2	表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 実積率 60.0%
混和剤	高性能 AE 減水剤	Ad	ポリカルボン酸系化合物

表-2 調合（単位：kg/m<sup>3</sup>）

W/C (%)	s/a (%)	W	C	S1	S2	S3	G1	G2	Ad
57.2	49.9	175	306	356	312	222	455	455	3.06

表-3 実験の要因と水準

要因	水準
最高温度（℃）	100,200,300,400,500,600,700,800
最高温度保持時間（時間）	1, 12, 24, 72, 168

表-4 フレッシュ性状および強度試験結果

スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
		4 週	13 週	4 週	13 週
18.0	5.5	34.3	38.9	27.7	28.5

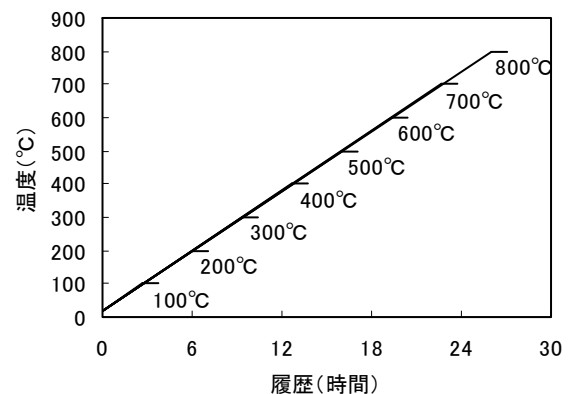


図-1 加熱履歴例（最高温度保持時間 1 時間）

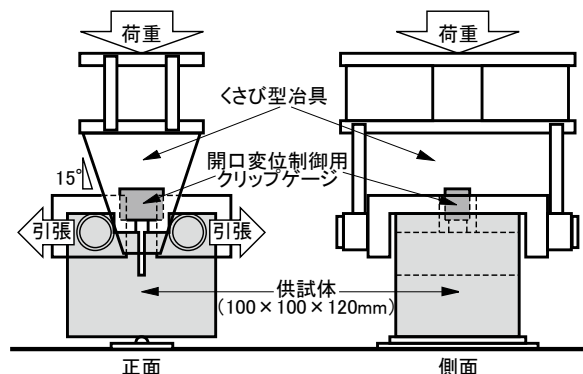


図-2 破壊靱性試験（くさび割裂試験）概要

また、炉内でコンクリートを均一に加熱するという観点からは、試験に用いる供試体寸法を可能な限り小さくする方がよい。そこで、本研究では、切欠き梁による3点曲げ試験と同様にモードI型（引張型）の破壊が小型供試体（100×100×120mm）で得られるくさび割裂試験（図-2）を採用した。なお、くさび割裂試験も、切欠き梁3点曲げ試験同様に引張軟化特性を評価できることが確認されている<sup>10)</sup>。

くさび割裂試験用供試体は、加熱前に供試体中央にダイヤモンドカッター（刃厚1mm）を用いてリガメント高さが50mmとなるように切欠きを入れ、くさびの挿入により引張破壊を生じさせることとした。

高温加熱の影響を受けたコンクリートは、加熱前と比較して脆性的となり、引張力に対する抵抗性が著しく低下することが予想された。したがって、安定した荷重-開口変位曲線を計測するためには、最大荷重以降の軟化域を精度良く検出する必要があった。そこで、試験には加力部、油圧装置およびフィードバック機能を有する制御装置からなるクローズドループシステム型（閉回路機構）のサーボ・コントロール式油圧試験機（MTS社製）を用いた。また、供試体の安定破壊が得られるように、切欠き端部の開口変位速度を0.02mm/minに設定した。なお、開口変位の計測には、変位制御用高感度クリップゲージを使用した。

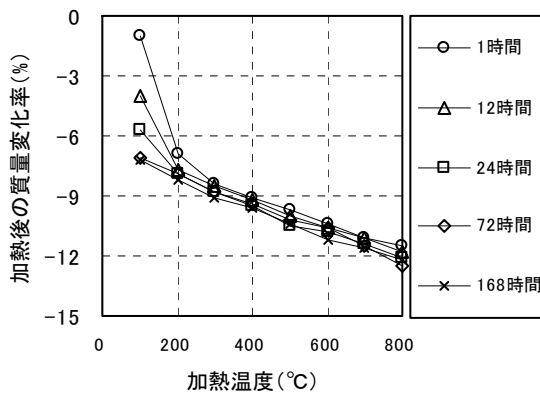


図-3 質量変化率と加熱温度の関係

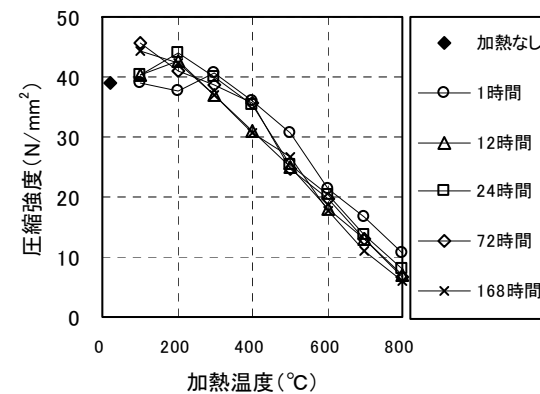


図-5 圧縮強度と加熱温度の関係

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 質量変化

図-3 に質量変化率と加熱温度の関係を示す。加熱時間1時間では加熱温度300℃まで、加熱時間12、24時間では加熱温度200℃までの質量変化が大きく、その後は、加熱時間に関係なく、加熱温度の上昇とともに緩やかな変化となっている。

図-4 に質量変化率と加熱時間の関係を示す。加熱温度100℃では加熱時間72時間、加熱温度200℃以上では加熱時間24時間までの質量変化が大きく、その後は、ほぼ一定である。

セメント中の各水和物は熱の影響により、性質が変化することは知られている<sup>11)</sup>。加熱温度が300℃、加熱時間が72時間程度までの質量変化が異なっているのは、加熱温度や加熱時間の違いにより、コンクリートからの自由水やCaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>Oの脱水速度に差があるためであると考えられる。

### 4.2 力学特性

図-5 に圧縮強度と加熱温度の関係を示す。本研究では、加熱時間1時間で加熱温度300℃、加熱時間12、24時間で加熱温度200℃、加熱時間72、168時間で加熱温度100℃における圧縮強度が最大となっている。そして、その後は、加熱温度の上昇とともに圧縮強度は直線的に低下している。

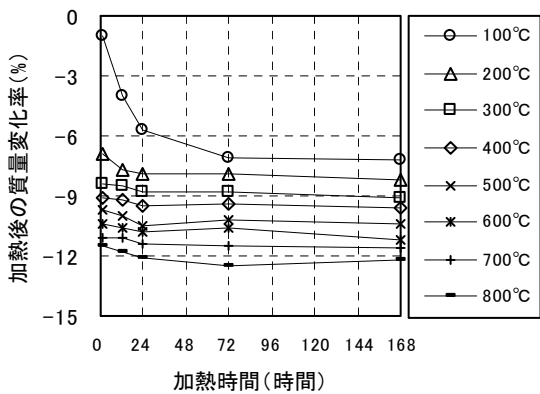


図-4 質量変化率と加熱時間の関係

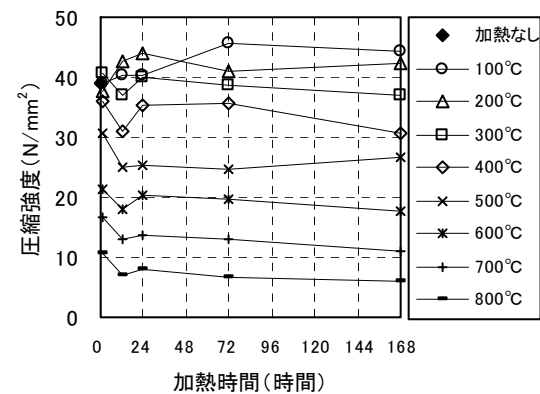


図-6 圧縮強度と加熱時間の関係

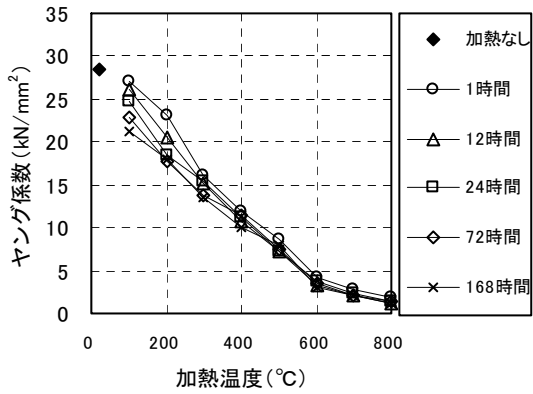


図-7 ヤング係数と加熱温度の関係

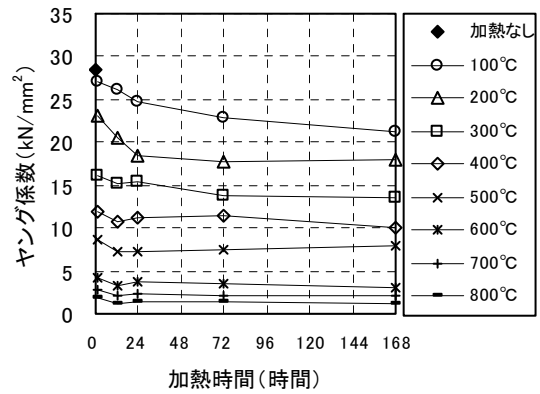


図-8 ヤング係数と加熱時間の関係

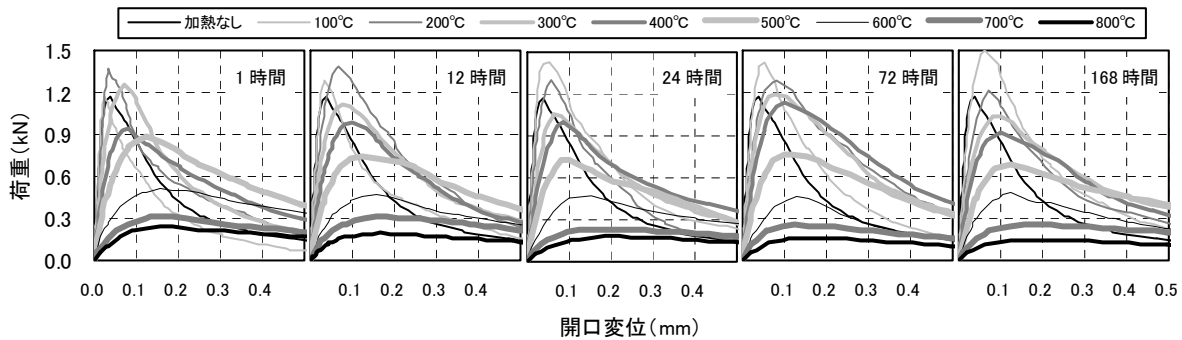


図-9 加熱温度が異なる場合の荷重-開口変位曲線

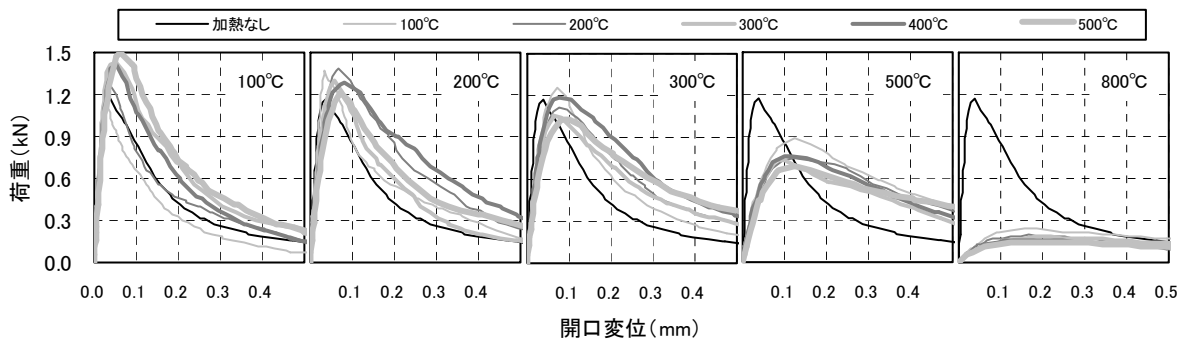


図-10 加熱時間が異なる場合の荷重-開口変位曲線

図-6 に圧縮強度と加熱時間の関係を示す。加熱時間 24 時間までは加熱温度により強度の増減が異なる。加熱温度 100°C では、加熱時間 24 時間以降も強度が増加するが、その他の加熱温度では、一定の値となる傾向にある。

質量変化率(図-3)を見ると、加熱時間 1 時間では加熱温度 300°C、加熱時間 12、24 時間では加熱温度 200°C、また、加熱時間 72、168 時間では加熱温度 100°C までの質量変化が大きいことから、供試体の乾燥により<sup>12)</sup>、強度が高くなっていると思われる。

図-7 にヤング係数と加熱温度の関係を示す。ヤング係数は、加熱温度の上昇とともに低下している。

図-8 にヤング係数と加熱時間の関係を示す。加熱温度 100°C では加熱時間とともに低下、加熱温度 200、300°C では加熱時間 24 時間、加熱温度 400°C 以上では加熱時間 1 時間で急激に低下し、その後は、ほぼ一定である。

#### 4.3 荷重-開口変位曲線

図-9 に加熱温度が異なる場合の荷重-開口変位曲線を示す。加熱時間 1、12 時間では加熱温度 200°C、加熱時間 24 時間以上では加熱温度 100°C の最大荷重が大きい。最大荷重以降の荷重低下は、加熱温度が低いと急勾配であるが、加熱温度が高くなると緩やかになっている。

図-10 に加熱時間が異なる場合の加熱温度 100、200、300、500、800°C の荷重-開口変位曲線を示す。最大荷重は、加熱温度 100°C で加熱時間とともに増加、加熱温度 200°C では加熱時間 12 時間まで、加熱温度 300°C ではばらつきがあるものの、加熱時間 1 時間で若干増加し、その後は低下している。なお、加熱温度 300°C 以上では、加熱温度の上昇とともに最大荷重は著しく低下している。最大荷重以降は、加熱時間とともに荷重低下が緩やかになっているが、300°C 以降のグラフ形状はほぼ同じである。

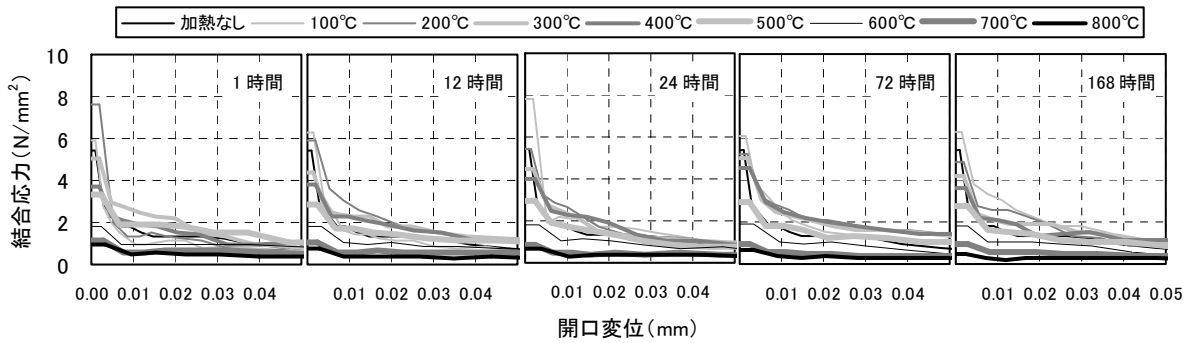


図-11 加熱温度が異なる場合の引張軟化曲線

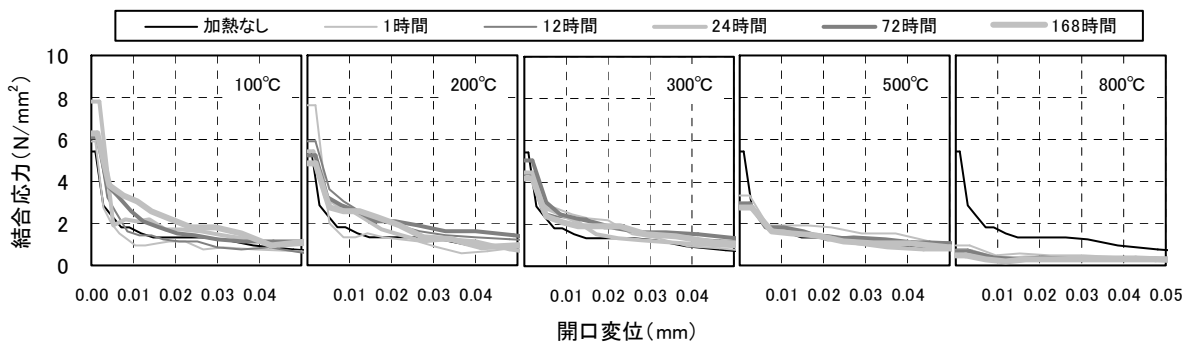


図-12 加熱時間が異なる場合の引張軟化曲線

#### 4.4 引張軟化曲線

図-11 に加熱温度が異なる場合の引張軟化曲線を示す。各加熱時間で初期結合応力に差がみられるが、結合応力は開口変位の増加にともない低下し、その低下は加熱温度の上昇とともに緩やかになっている。

図-12 に加熱時間が異なる場合の加熱温度 100, 200, 300, 500, 800°C の引張軟化曲線を示す。加熱温度 100, 200°C の初期結合応力は加熱時間により異なるが、加熱温度 300°C 以上では加熱なしより低下している。また、加熱温度が上昇すると、加熱時間による変化は小さい。

#### 4.5 破壊特性

##### (1) 初期結合応力

図-13 に初期結合応力と加熱温度の関係を示す。加熱時間 1, 12 時間の初期結合応力は、加熱温度 200°C まで増加している。また、加熱時間 24 時間以降では加熱温度 100°C で最大となり、その後は、加熱時間に関係なく加熱温度の上昇とともにほぼ直線的に低下している。

図-14 に初期結合応力と加熱時間の関係を示す。加熱時間 24 時間までは初期結合応力にばらつきがあるが、その後は、ほぼ同様の値となっている。

コンクリートは加熱されると、骨材は膨張し、セメント水和物は収縮するため、加熱温度上昇とともに骨材とセメント水和物の界面には微細ひび割れが発生する。その微細ひび割れの進展、増加により初期結合応力は低下する。しかし、その一方では、加熱による未水和セメントの水和反応促進、自由水や毛管水などの逸散にともな

う乾燥の影響により加熱 200°C 程度まででは初期結合応力にばらつきが生じていると考えられる。

##### (2) 破壊エネルギー

図-15 に破壊エネルギーと加熱温度の関係を示す。加熱時間 1 時間では加熱温度 500°C まで、加熱時間 12 時間以上では加熱温度 400°C まで破壊エネルギーは増加し、その後は、加熱温度の上昇とともに低下している。

図-16 に破壊エネルギーと加熱時間の関係を示す。加熱温度 400°C までの破壊エネルギーは、加熱時間 1 時間と比較して 12 時間で増加し、24 時間で一旦低下した後、再び加熱時間とともに増加する傾向にある。また、加熱温度 500°C 以上では、加熱時間とともに破壊エネルギーは低下する傾向にあり、加熱温度 700, 800°C では加熱時間 24 時間以降はほぼ一定となっている。

破壊エネルギーは引張軟化曲線で囲まれた面積であるが、開口変位の増加にともなう結合応力の低下が緩やかな場合に大きくなる。それには、加熱による微細ひび割れの発生が影響していると考えられる。コンクリートのひび割れが進展する際には、ひび割れ先端に破壊進行領域が形成されるが、その部分に欠陥が存在しなければ、ひび割れは骨材などの影響を受けるものの、ほぼ直線的に進展する。しかし、破壊進行領域に微細ひび割れなどの欠陥が存在すると、ひび割れは欠陥を介して進展するため蛇行し、破壊に要するエネルギーが大きくなる。そのため、加熱 400°C 程度までは破壊エネルギーが大きくなったと推測される。

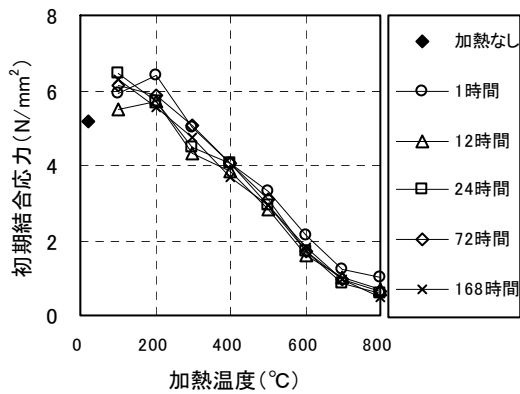


図-13 初期結合応力と加熱温度の関係

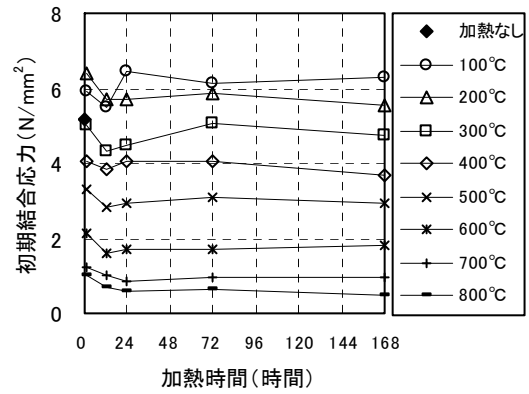


図-14 初期結合応力と加熱時間の関係

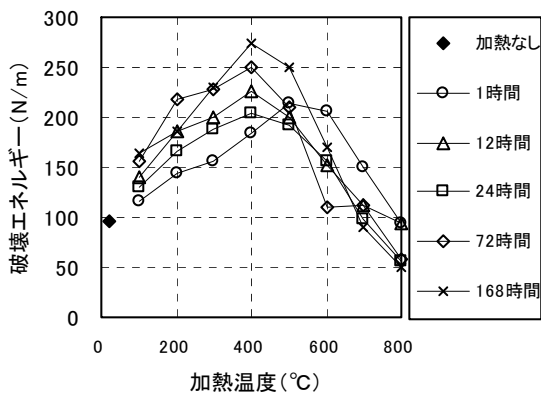


図-15 破壊エネルギーと加熱温度の関係

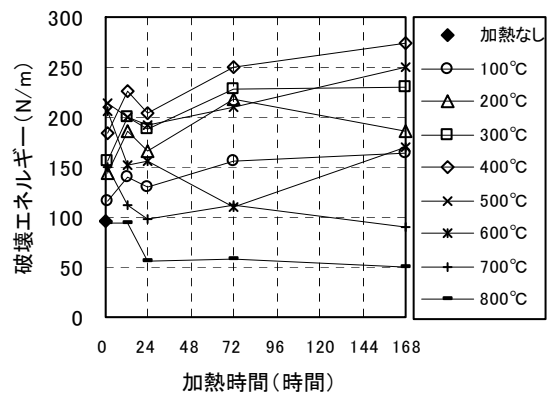


図-16 破壊エネルギーと加熱時間の関係

## 5. まとめ

本研究の範囲内で、以下のことが明らかとなった。

- (1) 初期結合応力と加熱温度の関係は、加熱時間 1、12 時間は加熱温度 200°C、24 時間以上は 100°C で最大となる。
- (2) 初期結合応力と加熱時間の関係は、加熱時間 24 時間まではばらつくが、それ以降ではほぼ一定となる。
- (3) 破壊エネルギーと加熱温度の関係は、加熱時間 1 時間では加熱温度 500°C、12 時間以上では 400°C まで増加する。
- (4) 破壊エネルギーと加熱時間の関係は、加熱温度 400°C 以下では加熱時間 1 時間と比較して 12 時間で増加し、24 時間で低下した後、再び増加する。また、500°C 以上では、加熱時間とともに低下する。

## 謝辞

本研究は、原子力規制委員会「高経年化技術評価高度化事業」の一部として行った成果である。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：原子炉建屋構造設計指針・同解説，1988
- 2) 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ No.63，2004
- 3) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2009
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書，2012
- 5) 橋高義典，上村克郎，中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析，日本建築学会構造系論文報告集，No.453，pp.15-25，1993.11
- 6) 橋高義典：引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価，日本建築学会構造系論文集，No.469，pp.17-24，1995.3
- 7) G. V. Guinea, M. Elices and J. Planas : Stress Intensity Factors for Wedge-splitting Geometry, Int. J. of Fract. 81, pp.113-124, 1996
- 8) 橋高義典，高橋仁智：破壊力学手法によるひび割れ分散を考慮した繊維補強軽量コンクリートパネルの曲げ破壊解析，日本建築学会構造系論文集，No.541，pp.37-42，2001.3
- 9) 切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法，JCI-S-001-2003
- 10) 神山力，橋高義典，田村雅紀：各種コンクリートの破壊特性の試験方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol23，No.3，pp.91-96，2001
- 11) 日本建築学会：火災とコンクリート，2001
- 12) 丸山一平：供試体の乾燥状態と強度の関係，セメント・コンクリート，No.775，pp.50-52，2011.9