

# 論文 高強度コンクリートの高温時力学的特性に及ぼすポリプロピレン繊維および水分の影響

右田 周平\*1・平島 岳夫\*2・前田 孝一\*2

**要旨:** 鉄筋コンクリート構造は優れた耐火性能を有するが、高強度コンクリートを使用した場合、火災時に爆裂が生じるという問題がある。爆裂のメカニズムに関しては、熱応力説・水蒸気圧説・それらの複合説がある。また過去の実験から、含水率が高い場合に爆裂が生じやすいこと、爆裂を防止するためにはコンクリート内に有機繊維を混入する方法が有効であることが知られている。本研究では、ポリプロピレン繊維および水分がコンクリートの高温時力学的特性や熱応力に与える影響を、高温圧縮実験により検討した。

**キーワード:** 高強度コンクリート, 高温時力学的特性, ポリプロピレン繊維, 水分, 熱応力

## 1. はじめに

一般的に鉄筋コンクリート構造は優れた耐火性能を有するが、高強度コンクリートを使用した建物では火災時に爆裂が生じるという問題がある。コンクリートの爆裂に関する多数の研究結果を取りまとめた資料<sup>1)</sup>を参照すると、圧縮強度が高いコンクリートおよび含水率が高いコンクリートで爆裂が生じやすいことが明らかにされている。爆裂のメカニズムに関しては、表層コンクリートが急激に加熱された場合、内部側との温度差が大きくなるため、表層部の熱応力が大きくなり爆裂が引き起こされるという熱応力説や、加熱側のコンクリートの表面付近の細孔に大きな水蒸気圧が生じ、それが爆裂を引き起こすとする水蒸気圧説、またその両方より引き起こされるとする複合説がある。また、爆裂を防止するためにはコンクリート内に有機繊維を混入する方法が有効とされている。これは加熱時に繊維が溶けることによって、コンクリート内に空隙が生じ、爆裂の要因とされる熱応力や水蒸気圧が緩和されるためと考えられている。コンクリート内部の有機繊維や水分が爆裂と密接に関わっていることは実験結果より明らかである。しかしながら、爆裂発生と熱応力の関係を分析するための基礎資料となる、コンクリートの高温時力学的特性に及ぼす有機繊維および水分の影響を検討した資料は少ない。

そこで本研究では、ポリプロピレン繊維の有無および蒸発し得る水分の有無が高強度コンクリートの高温時力学的特性や加熱時に発生する熱応力に与える影響を見るために、高温圧縮実験および変位拘束実験を行った。その結果について報告する。

## 2. 高温圧縮実験の概要

コンクリートの試験体寸法は、直径 75mm, 高さ 150mm である。実験装置は図-1 に示す高温圧縮実験装置を用

いた。加熱方法、温度測定方法、加力方法、変位測定方法は、常世田らの研究<sup>2)</sup>で行った方法と同様である。コンクリートは2種類に大別され、ポリプロピレン繊維の有無について検討したコンクリートと蒸発し得る水分の有無について検討したコンクリートは異なる。これら2種類のコンクリートの調合・特性等は後で述べる。

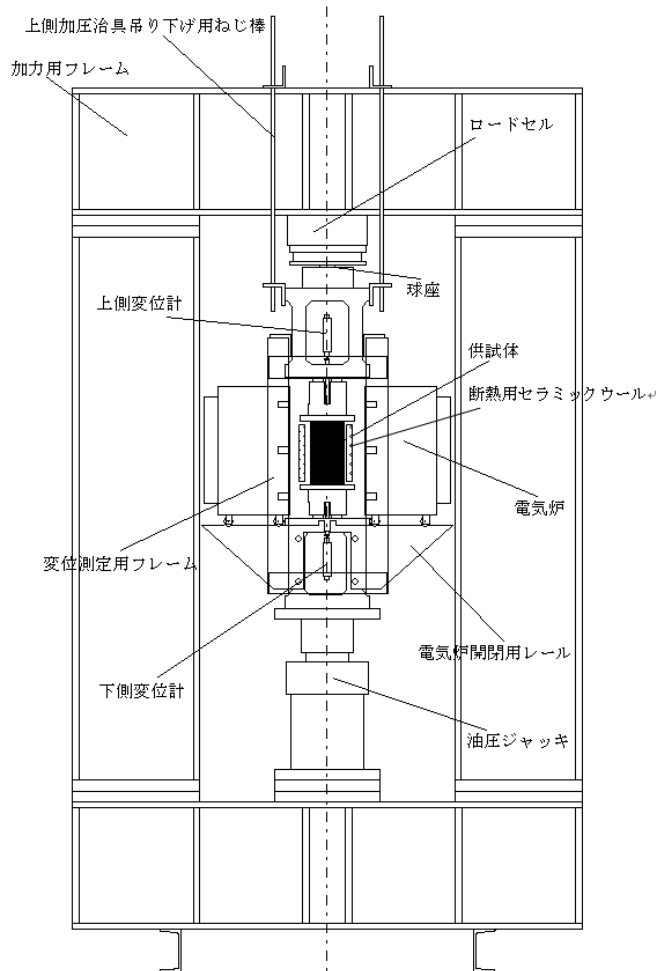


図-1 高温圧縮実験装置

\*1 戸田建設(株) 本社建築工事技術部 修士(工学) (正会員)

\*2 千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 博士(工学)

以下、本研究における3種類の実験概要を述べる。

### (1) 圧縮強度実験

試験体を無荷の状態にて1°C/分で各温度(100°C~800°C)まで加熱し、試験体内部の温度を均一にするため一定の温度保持時間を設けた。その後、各温度を保持したまま約10kN/分で荷重を与え、高温時の圧縮強度・弾性係数を得た。

### (2) 全体ひずみ実験

本報では、一定応力下で加熱を受けるコンクリートに生じるひずみを全体ひずみと称す。それぞれの応力レベル(常温圧縮強度に対する圧縮応力度の割合)に相当する荷重を一定に保持した状態で加熱し、試験体の上端と下端における変位を測定した。その相対変位を試験体長さで除して全体ひずみを得た。加熱速度は1°C/分とした。所定の荷重を保持できない状態、もしくは温度が800°Cに達した時点で実験を終了した。無荷状態で行った加熱実験では、材軸方向の熱膨張ひずみを測定した。

### (3) 変位拘束実験

試験体を常温~800°Cまで1°C/分の速度で加熱し、その際、手動の油圧ジャッキにより試験体の両端における相対変位がゼロになるよう制御した。即ち、加熱に伴う材軸方向の熱膨張ひずみを完全に拘束し、その拘束によって生じる圧縮応力度(以下、熱応力)を測定した。変位等の計測は30秒間隔で行った。その変位の応答値を見ながら手動の油圧ジャッキで荷重を増減させ、相対変位の値がゼロに近づくよう制御した。

## 3. ポリプロピレン繊維の影響

### 3.1 コンクリートの材料・調合・圧縮強度

ポリプロピレン繊維(以下、繊維)の影響を調べるための高強度コンクリートに関する、使用材料を表-1、調合を表-2、JIS A 1108による標準圧縮強度試験(円柱試験体寸法:直径10cm,高さ20cm)の結果を表-3に示す。本試験体では、繊維の有無による違いがより顕著に表れるように、基準強度60~80MPaのコンクリートの爆裂対策に用いられる一般的な混入量より若干多くの繊維量(2.4kg/m<sup>3</sup>)を混入した。常温時圧縮強度においては、繊維の有無による違いは見られない。試験体は、材齢28日まで水中養生し、材齢28日から91日では20°C・60%RHの恒温恒湿室で養生し、材齢91日以降は温度や湿度の管理を行っていない屋内での気中養生とした。高温実験時の材齢は3ヶ月~4ヶ月である。

### 3.2 圧縮強度実験の結果

繊維無し・繊維有りの試験体共に常温で3体、100°C~800°Cまで100°C毎に2体ずつ(一部3体)実験を行った。図-2に示す圧縮強度と温度の関係を見ると、繊維混入の影響は小さい。常温時強度に対する高温時強度の割合は、100°Cで7割、200°Cと300°Cで9割、500°Cで5割、

表-1 材料

セメント	中庸熟ポルトランドセメント(密度:3.21g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	青梅産砕砂(表乾密度:2.67g/cm <sup>3</sup> ) 君津産山砂(表乾密度:2.61g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材(硬質砂岩)	青梅5号(表乾密度:2.66g/cm <sup>3</sup> ) 青梅6号(表乾密度:2.64g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	混和剤1:高性能AE減水剤 混和剤2:AE剤・空気調整剤
繊維	ポリプロピレン繊維(φ18μm×L10mm) 融点:約160°C

表-2 調合

試験体	W/C (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )						
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤1	混和剤2	繊維
繊維無し	32.0	170	531	834	835	1.8	1.5	—
繊維有り	32.0	170	531	834	835	2.4	1.5	2.4

表-3 JIS 圧縮強度試験結果

材齢	28日	91日
繊維無し	79.3MPa	91.6MPa
繊維有り	78.4MPa	91.9MPa

800°Cで2割程度であり、他の実験報告<sup>1)</sup>と類似した結果である。本実験装置で得た常温時の圧縮強度は、繊維無しでは86.4MPa、繊維有りでは86.1MPaとなった。表-3に示されている91日の圧縮強度よりも低い値となっている理由の1つとしては、高温圧縮実験装置に用いた加力フレームの剛性がJIS試験に用いたアムスラー試験機の剛性よりも小さいことが考えられる。

図-3の弾性係数と温度の関係より、100°C~400°Cの弾性係数では、繊維無しに対して繊維有りの値が小さい傾向にある。繊維が溶けることにより生じた空隙が荷重に伴い減少し、弾性係数が減少した可能性が考えられる。

図-4の(a)と(b)に高温時における応力~ひずみ関係を示す。温度毎の結果の判別がしやすいように、ひずみの初期値を1000×10<sup>-6</sup>ずつ移動して示している。高温時では高精度の変位測定が難しく、繊維有り・200°Cの結果など、加力に伴い不自然な挙動を示したものがある。図-3に示す弾性係数は、図-4に示す応力~ひずみ関係における圧縮強度1/3までの傾きより得た。また、図-4の(b)において繊維有り500°Cと600°Cの実験では、2体中1体で初期における変位の計測値が不自然であったため、1体分の結果から弾性係数を算定した。

### 3.3 全体ひずみ実験の結果

繊維無し・繊維有りの試験体共に各応力レベル(0・0.1・0.3・0.5)で2体ずつ実験を行った。図-5に全体ひずみ~温度関係の比較を示す。熱膨張ひずみ(応力レベル0)は両方の試験体でほぼ同じ値を示している。500°C~700°Cで熱膨張ひずみが大き

く増加し、800℃で約16000 $\mu$ となった。全体ひずみ実験（応力レベル0.1・0.3・0.5）の結果では、100℃以降から繊維有りの方が収縮変形量は大きくなっている。繊維が溶けることにより生じた空隙が、高温になるにつれ減少していったためと考えられる。

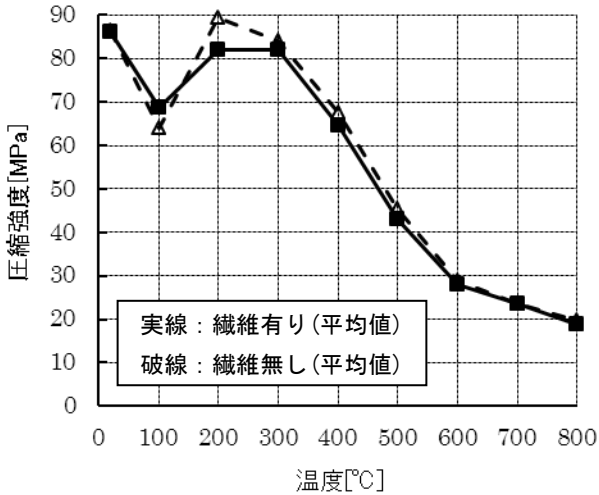


図-2 圧縮強度～温度関係

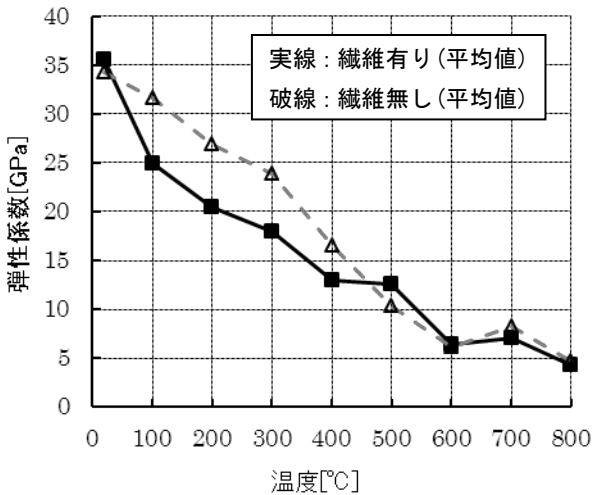


図-3 弾性係数～温度関係

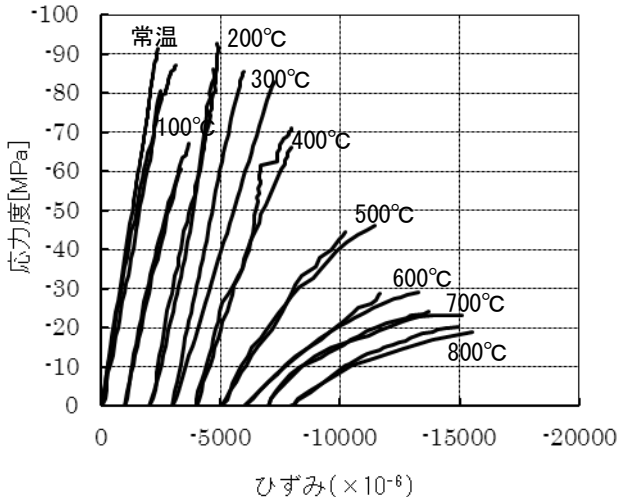


図-4(a) 応力～ひずみ関係(繊維無し)

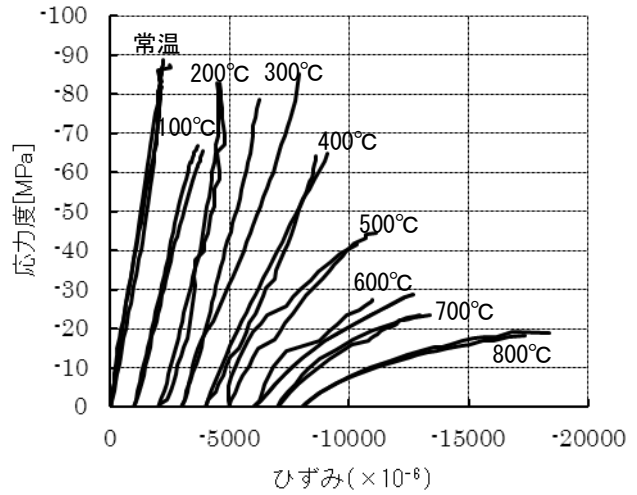


図-4(b) 応力～ひずみ関係(繊維有り)

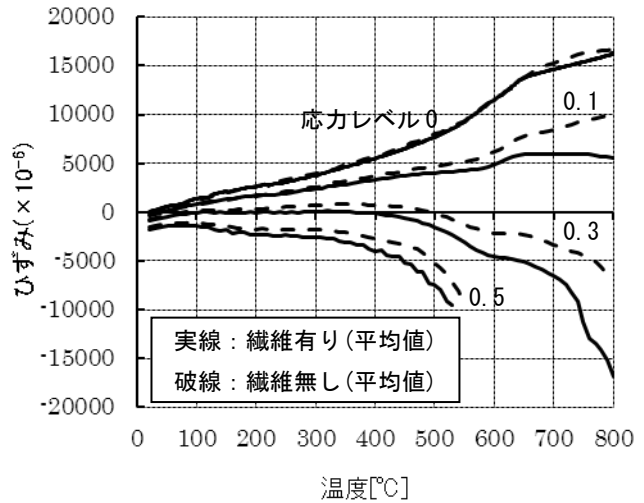


図-5 全体ひずみ～温度関係

### 3.4 変位拘束実験の結果

繊維無し・繊維有り試験体共に2体の実験を行った。2章(3)で述べたように変位の制御は手動で行い、この変位の増減に対して応答する圧縮応力度（熱応力）は大きく変動した。本報では、2体の結果のうち、応力度の変動の少ない方の実験結果のみを報告する。

図-6 に変位拘束実験により得られた熱応力～温度関係を示す。応力度の測定値に大きな変動が見られるが、熱応力～温度関係のおおまかな傾向を見ることができる。常温～100℃では、どちらの試験体でも温度上昇に伴い熱応力が增大している。繊維無しでは100℃以降も熱応力が増加し、300℃付近で熱応力が最大約35MPaとなった。それに対し、繊維有りは100℃～300℃で熱応力の増加は見られず、熱応力の最大値は繊維無しの8割程度である。繊維有りの場合に100℃以降の熱応力が減少するという傾向は、図-3に示した弾性係数の低下および図-5に示した全体ひずみ（収縮ひずみ）の増大と対応しており、繊維には熱応力を緩和する効果もあると考えられる。ど

これらの試験体も 300℃以降に熱応力が減少し、550℃～650℃で再び増加している。550℃～650℃で再び熱応力が増加する現象は、この温度領域で線膨張係数が増加すること（図-5 参照）に対応している。

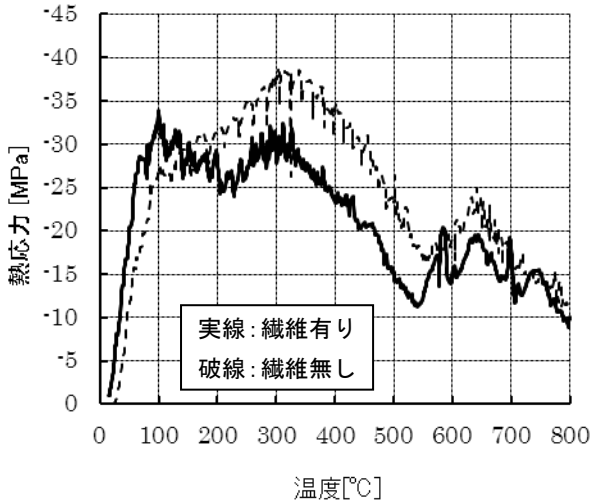


図-6 熱応力～温度関係

#### 4. 蒸発し得る水分の影響

##### 4.1 コンクリートの材料・調合・圧縮強度

蒸発し得る水分（以下、水分）の影響を調べるための高強度コンクリートに関する、使用材料を表-4 に、調合を表-5 に、JIS による圧縮強度試験（円柱試験体寸法：直径 10cm, 高さ 20cm）の結果を表-6 に示す。材齢 28 日まで水中養生し、その後材齢 6 ヶ月までは 20℃・60%R・H の恒温恒湿室で養生し、材齢 6 ヶ月以降は温度や湿度の管理を行っていない屋内での気中養生とした。試験体材齢は 6 ヶ月～35 ヶ月である。本実験では、水分有り試験体の実験を先行して実施し、その約 2 年後に水分無し試験体の実験を実施した。水分無しの試験体は内部温度が 105℃に保たれた電気炉内に 7 日～12 日間入れて水分を蒸発させた。この電気炉内に入れた時間と重量減少率の関係を図-7 に示す。重量含水率は 3.0～3.4% である。水分を蒸発させた試験体は、実験開始まで、シリカゲルを入れた発泡スチロール容器に移して保管した。また、実験は 6 月～9 月にかけて行った。

##### 4.2 圧縮強度実験の結果

水分有り・水分無しの試験体共に常温で 3 体、100℃～800℃まで 100℃毎で水分有りの試験体は 2 体ずつ、水分無しの試験体は 1 対ずつ実験を行った。水分無しの試験体を用いた 200℃の実験では、変位測定の不具合でひずみに関する結果を得られなかったため、圧縮強度のみの結果を示す。

図-8 に示す圧縮強度と温度関係を見ると 200℃までは両者の圧縮強度に差が見られるが、300℃以降ではほぼ

同じ強度を示している。また、水分有りでは 100℃で一時的に強度低下する現象が見られたのに対し、水分無しではこの現象は見られない。100℃における強度低下要因として挙げられている水分の蒸発に伴うセメント水和物の収縮現象<sup>3)</sup>が低減されたことが理由の 1 つと考えられる。本実験装置で得た常温時の圧縮強度は、水分有りでは 66.2MPa, 水分無しでは 59.2MPa となった。表-6 に示されている 6 ヶ月の圧縮強度よりも低い値となっている理由としては、高温圧縮実験装置に用いた加力フレームの剛性が JIS 試験に用いたアムスラー試験機の剛性よりも小さいことが考えられる。

図-9 に示す弾性係数と温度の関係を見ると、常温では両者ともほぼ同じ値を示している。100℃～300℃では水分有りより水分無しの方が大きな値を示し、600℃以上ではほぼ同じ値を示している。

表-4 材料

セメント	普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm <sup>3</sup> ）
細骨材	君津産砕砂（表乾密度：2.62g/cm <sup>3</sup> ）
粗骨材（硬質砂岩）	城山産碎石（表乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup> ）
混和剤	高性能AE減水剤標準形

表-5 調合

W/C (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
32.6	170	521	755	881	1.024

表-6 JIS 圧縮強度試験結果

材齢		
7日	28日	6カ月
60.7MPa	74.8MPa	79.7MPa

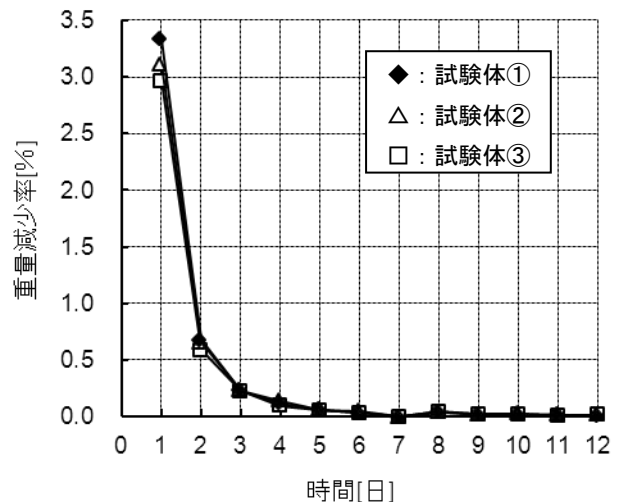


図-7 重量減少率～時間関係

図-10の(a)と(b)に高温時における応力～ひずみ関係を示す。図-9に示す弾性係数は図-10に示す応力～ひずみ関係における圧縮強度 1/3 までの傾きより得た。

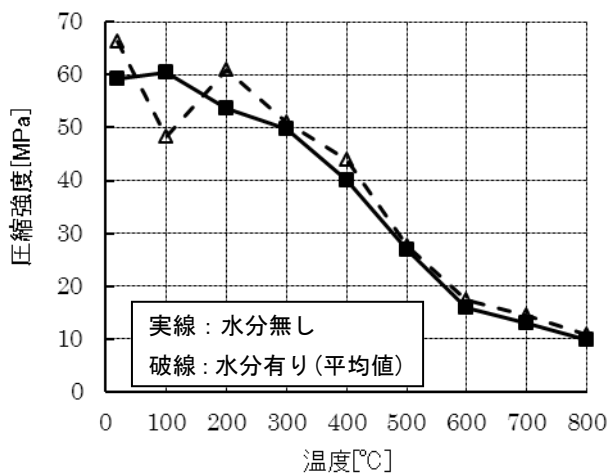


図-8 圧縮強度～温度関係

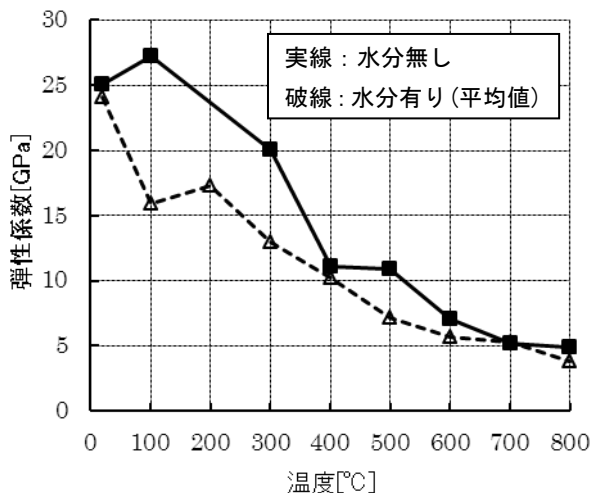


図-9 弾性係数～温度関係

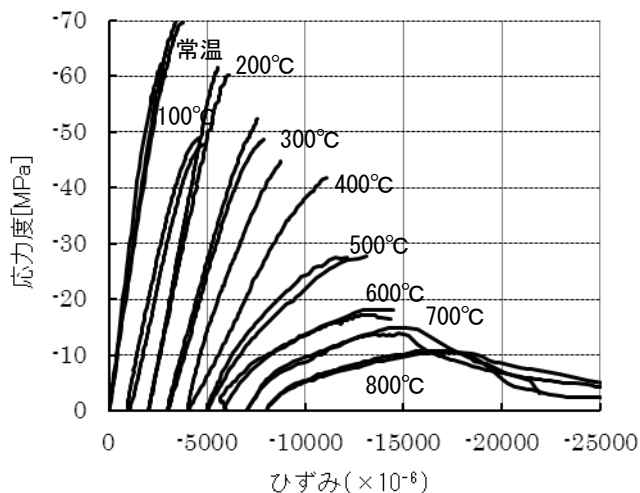


図-10(a) 応力～ひずみ関係(水分有り)

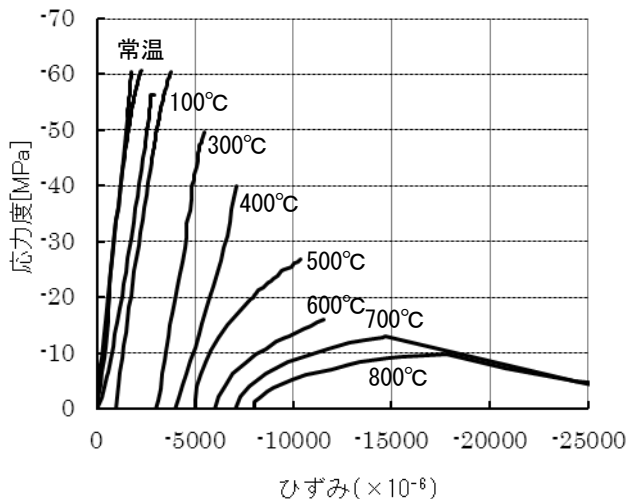


図-10(b) 応力～ひずみ関係(水分無し)

### 4.3 全体ひずみ実験の結果

各応力レベル (0・0.1・0.2・0.3・0.5) で水分有りの試験体は2体ずつ、水分無しの試験体では1体ずつ実験を行った。図-11に全体ひずみ～温度関係の比較を示す。応力レベル0は熱膨張ひずみである。

熱膨張ひずみ (応力レベル 0) は、100°C～300°Cの範囲で、水分有りに比べて、水分無しはより大きな増加が見られる。また、どちらの試験体とも550°C～650°Cの範囲で熱膨張ひずみが大きく増加している。800°Cでの熱膨張ひずみは、水分有りが約11000 $\mu$ 、水分無しが約13000 $\mu$ となった。水分有りに比べ、水分無しでは熱膨張ひずみが大きな値を示した。

全体ひずみ (応力レベル 0.1, 0.3, 0.5) は、水分有りでは100°C以降で収縮傾向が見られたのに対し、水分無しでは200°C程度まで膨張傾向が見られる。そのため、100°C以降では両者に生じる全体ひずみには大きな差が生じているが、400°C付近からは温度上昇に伴い、その差が減少している。水分無しのコンクリートで収縮ひずみが小さくなった理由は、高温時のセメント水和物の脱水に伴う収縮が、水分有り程には顕著に生じなかったためと考えられる。

### 4.4 変位拘束実験の結果

図-12に変位拘束実験により得られた熱応力～温度関係を示す。どちらの試験体でも常温からの温度上昇に伴い熱応力が增大している。水分有りは100°C～150°C付近で熱応力が最大約18MPaに達した後減少している。それに対し、水分無しは100°C以降も熱応力が増大し続け、200°C付近で最大約30MPaに達している。水分有りに対して、水分無しの熱応力は5割以上大きい。これは、全体ひずみ実験において、水分無しの試験体では100°C以降でも膨張傾向が見られたことと対応している。また、両者ともピークに達した後減少していた熱応力が、550°C

付近から再び増加している。この温度領域で線膨張係数が増加することに対応している。

コンクリートの含水率が大きいほど爆裂が生じやすくなるのが複数の既往実験で明らかにされているが、本実験では水分の影響で熱応力が緩和される結果となった。この結果のみで判断すると、コンクリートの爆裂の要因は、熱応力よりも水蒸気圧の方が支配的と考えられる。

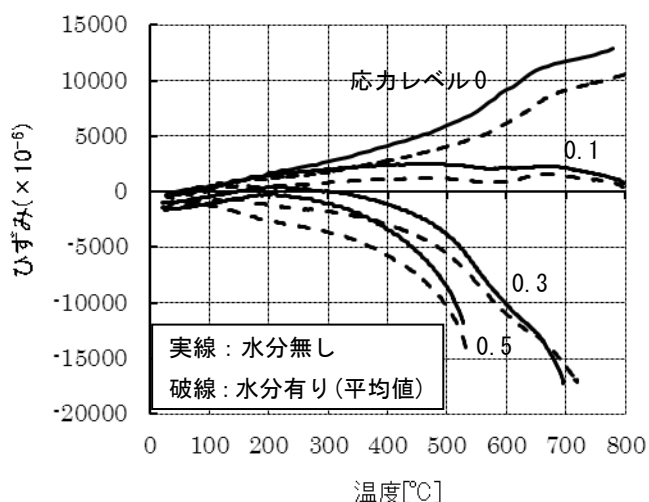


図-11 全体ひずみ～温度関係

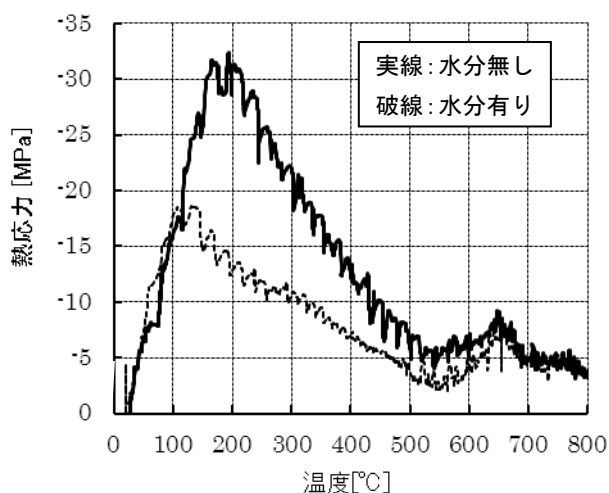


図-12 熱応力～温度関係

## 5. まとめ

ポリプロピレン繊維および蒸発し得る水分が高強度コンクリートの高温時力学的特性や加熱時に発生する熱応力に与える影響を、高温圧縮実験および変位拘束実験により確認した。その結果を以下に示す。

### 5.1 ポリプロピレン繊維の影響

- (1) 高温時圧縮強度に関して、繊維の有無による影響は見られなかった。
- (2) 100℃～400℃で、繊維有りでは繊維無しと比べ、弾性係数が小さくなる傾向にあった。

- (3) 全体ひずみ実験の結果、100℃以上の範囲で、繊維有りではより大きな収縮ひずみが生じた。
- (4) 変位拘束実験では、繊維無しでは 300℃付近まで熱応力が増加したのに対し、繊維有りでは 100℃以降で熱応力の増加は見られず、熱応力の最大値は繊維無しの 8 割程度となった。
- (5) 以上の結果より、ポリプロピレン繊維は、火災加熱を受けるコンクリート表面部における熱応力をも緩和し、爆裂の発生を抑制している可能性がある。

### 5.2 蒸発し得る水分の影響

- (1) 水分無しのコンクリートでは 100℃において圧縮強度が低下しなかった。200℃以降の圧縮強度は、水分の有無による違いは小さかった。
- (2) 熱膨張ひずみにに関して、水分有りと比べて、水分無しではより大きなひずみが生じた。全体ひずみ実験の結果でも水分無しの方が収縮ひずみは大きくなるが、400℃以上ではその差が小さくなった。
- (3) 変位拘束実験の結果、水分有りは 100℃以降に熱応力が低下したが、水分無しは 200℃付近まで熱応力が増加した。そして、水分有りに対して、水分無しでは 1.5 倍以上の熱応力が発生した。
- (4) 蒸発し得る水分の影響を見た実験結果からは、コンクリートの爆裂の要因は、熱応力よりも水蒸気圧の方が支配的と考えられる。

本報では、加熱を受けるコンクリートに生じる熱応力を分析するための基礎資料を示した。今後は、この熱応力と爆裂発生との関係を分析することが必要である。

### 謝辞

本実験に用いたコンクリート試験体の作成においては、大成建設・馬場重彰氏他およびフジタ・松戸正士氏他にご協力を頂きました。本実験の実施にあたっては、東亜理科・小川節夫氏にご支援を頂きました。実験の遂行においては、大浜貴史氏をはじめとする千葉大学火災工学研究室の諸兄にご協力をいただきました。関係者各位に感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2009. 3
- 2) 常世田昌寿，豊田康二，織茂俊泰，菊田繁美，高橋孝二，堀昭夫，松戸正士，中込昭，平島岳夫，上杉英樹：普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究，構造工学論文集 Vol. 48B，pp. 149-154，2002. 3
- 3) 安部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集第 515 号，pp. 163-168，1999 年 1 月