

# 論文 超高強度コンクリートの熱ひずみ挙動に及ぼす高温弾性係数の影響

尹 敏浩\*1・金 圭庸\*2・小澤 満津雄\*3・兪 在哲\*4

**要旨:** 高強度コンクリートは高温に曝されると爆裂が生じ耐力低下が大きいため、耐火性能を確認することが求められている。更に、高温が持続されると弾性係数が低下し、収縮ひずみが大きくなり構造物の安定性が低下すると報告されている。そこで、本研究では 80, 130, 180MPa 級高強度コンクリートに常温圧縮強度の 25%を載荷し、加熱試験を行い熱ひずみ挙動を評価した。その結果、80MPa は 500℃まで膨張領域で熱ひずみが生じたが、130 と 180MPa は 300℃から収縮ひずみが大きくなり、180MPa は 700℃でクリープ破壊した。以上より、高強度コンクリートほど弾性係数低下し、収縮ひずみが大きくなることが明らかとなった。

**キーワード:** 超高強度コンクリート, 火災, 耐火, 熱ひずみ, 弾性係数, 収縮ひずみ

## 1. はじめに

近年、建築構造物の大型化と高層化により圧縮強度が 60MPa を超える高強度コンクリートが使用されている。最近では、圧縮強度 100MPa を超える超高強度コンクリートも開発され、超高強度コンクリートの実用化に関する研究が進められてある<sup>1)</sup>。

高強度コンクリートの高温時の力学特性に関する多くの既存研究では普通強度コンクリートに比べて、高温時に力学的性能の低下が大きくなると報告されている<sup>2), 3), 4), 5)</sup>。

また、別の報告では火災で約 120~180 分間高温に曝されたコンクリート構造部材のクリープひずみは一般環境で約 20~30 年間に生じたクリープひずみに該当する大きいひずみが生じると報告されている<sup>6)</sup>。このように高温時のひずみ挙動、特に熱ひずみ特性は火災後の構造物の安定性を低下させる要因である<sup>7), 8)</sup>。従って、超高層建築物に使用される超高強度コンクリートについて高温での力学的性能の低下だけでなく、熱膨張ひずみ、載荷条件で生じる収縮ひずみなどの熱変形に関する研究が必要である<sup>9)</sup>。

そこで、本研究では高温時の超高強度コンクリートの力学的特性を検討した。すなわち、熱膨張ひずみ、荷重を載荷した条件での耐力による収縮ひずみと高温クリープひずみを比較・評価したものである。

## 2. 実験計画及び方法

### 2.1 実験計画及びコンクリートの調合

表 - 1, 2 に実験計画及びコンクリートの調合を示す。超高強度コンクリートの圧縮強度は 80, 130, 180MPa とした。また、超高強度コンクリートの熱ひずみ挙動と耐力低下を評価するため、載荷条件を非載荷と常温圧縮強

表 - 1 実験計画

試験体 ID	載荷量 (× $f_{cu}$ )	目標温度 (°C)	評価項目
80M	0.00 0.25	20, 100, 200,	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温圧縮強度</li> <li>高温弾性係数</li> <li>熱膨張, 全ひずみ</li> <li>過渡ひずみ</li> <li>高温クリープひずみ</li> <li>最終ひずみ</li> </ul>
130M		300, 500,	
180M		700	

表 - 2 コンクリートの調合

試験体 ID	W/B (%)	Slump-flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	単位重量 <sup>1)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )							
					W	C	GGBS	SF	FA	AG	S	G
80M	20.0	750 ± 100	2 ± 1	43 35	150	525	0	75	150	0	644	870
130M	14.5					652	207	124	0	52	448	848
180M	12.5					660	240	240	0	60	389	736

1) W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, SF: シリカフェーム, GGBS: 高炉スラグ微粉末, FA: フライアッシュ, AG: 無水石膏

度の 25%を載荷したものとした。目標加熱温度は常温 (20℃)と 100, 200, 300, 500, 700℃とした。検討項目は、熱膨張ひずみ、全ひずみ、過渡ひずみ、高温クリープひずみと最終ひずみとした。なお、高温圧縮強度と高温弾性係数は、所定の加熱温度に達した後、温度一定環境下において載荷試験を実施して求めた。

### 2.2 使用材料

本研究で用いた材料の物理的特性を表 - 3 に示す。超高強度コンクリートに要求されるワーカビリティを満

\*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

\*2 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 群馬大学 理工学研究院 環境創生部門 准教授 工博 (正会員)

\*4 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 教授 工博 (正会員)

表 - 3 使用材料の物理的性質

材 料	物 理 的 性 質
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：3,630cm <sup>2</sup> /g
練り混ぜ水	水道水 pH：7.0~7.5
細骨材	海砂 密度：2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：1.00%
粗骨材	花崗岩碎石 最大寸法：10mm, 密度：2.70g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：0.90%
シリカフューム	密度：2.50g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：200,000cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	密度：2.20g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：3,000cm <sup>2</sup> /g
高炉スラグ微粉末	密度：2.90g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：6,000cm <sup>2</sup> /g
無水石膏	密度：2.90g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：3,550cm <sup>2</sup> /g
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤

たすために、粗骨材は密度 2.70g/cm<sup>3</sup>、吸収率 0.90%と最大寸法 10mm の花崗岩碎石、細骨材は密度 2.65g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.00%の海砂を用いた。

### 2.3 試験体作製及び養生方法

超高強度コンクリートは各々調合別に練り混ぜた後、スランプフローと空気量を測った。その結果、全ての調合でスランプフローは 750±100mm、空気量は 2.0±1.0%を満した。各々調合別に ø100×200mm の円柱型試験体を 60 個ずつ作製後、24 時間後に脱型し、20±2℃の水中で 28 日間養生した。その後、相対湿度 50±5%、温度 20±2℃の恒温恒湿養生室で 300 日間気中養生し、KS 2405 と KS 2438 に準じて常温力学的特性実験を行った。

### 2.4 実験方法

#### (1) 加熱装置及び方法

図 - 1 に本研究で用いた実験装置の構成を示す。本試験装置は荷重と加熱を同時に行うため、2000kN 級荷重装置に電気加熱炉を設けた。加熱中の試験体のひずみ計測は上・下部加力治具の中心に設置した ø10mm の石英管と外部に設置した変位計を用いた。

本試験では、試験体中心と外部の温度が一樣なレベルに上昇するように上・下部の加力治具を加熱して試験体に熱を伝達する間接加熱方式を採用した。

加熱速度は RILEM で提案する 1℃/min. の速度で加熱した。特に、試験体の内・外部温度差を 5℃以内にするために加熱初期と目標温度の 50℃前の領域では加熱速度を 0.77℃/min. とした<sup>10)</sup>。目標温度で KS 2405 と KS 2438 に準じて高温力学的特性実験を行った。

#### (2) 熱ひずみ評価方法

図 - 2 に加熱・荷重時におけるコンクリートの熱ひずみ

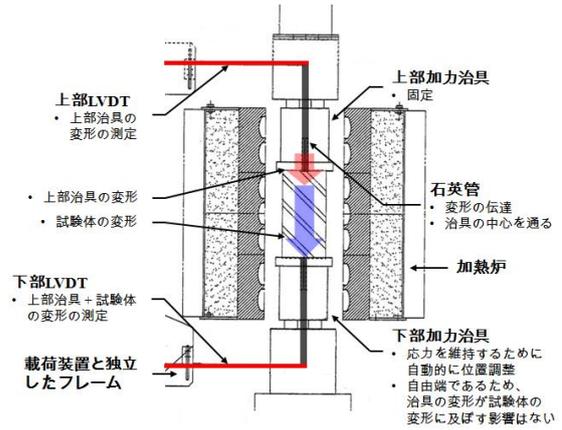


図 - 1 荷重及び加熱装置の構成

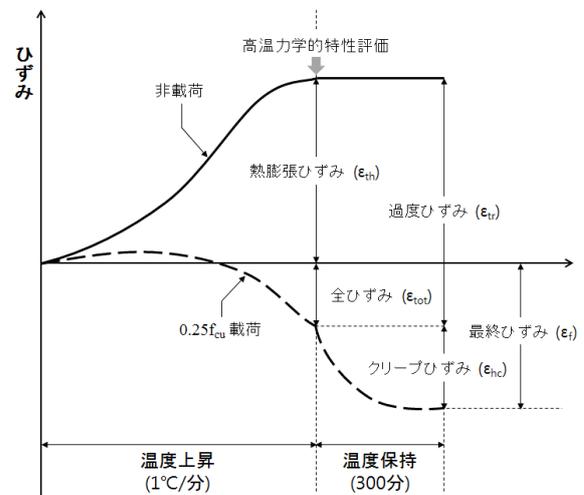


図 - 2 コンクリートのひずみ特性の評価方法

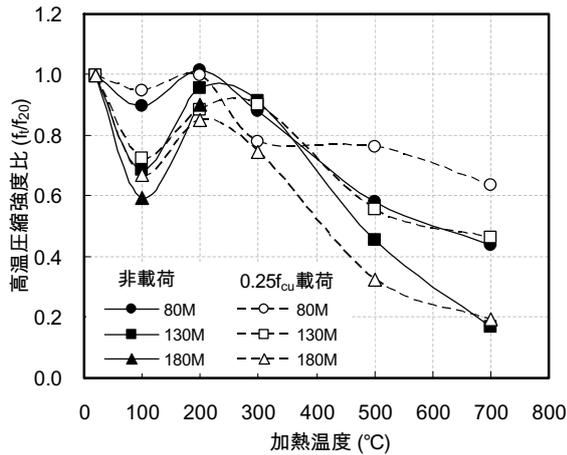
み挙動の概要図を示す。非荷重・加熱状態で計測したひずみを熱膨張ひずみとした。全ひずみは常温圧縮強度の 25%を荷重した状態で加熱する時に生じるひずみと定義した。過渡ひずみは熱膨張ひずみと全ひずみの差とした。また、常温圧縮強度の 25%を荷重後目標温度まで加熱し、目標温度到達時間から 300 分間のひずみ変化を高温クリープひずみとして定義した。最終ひずみは全ひずみ後の高温クリープひずみを考慮して最終的なひずみとした。

上記のひずみの定義を式(1)、式(2)に整理した。

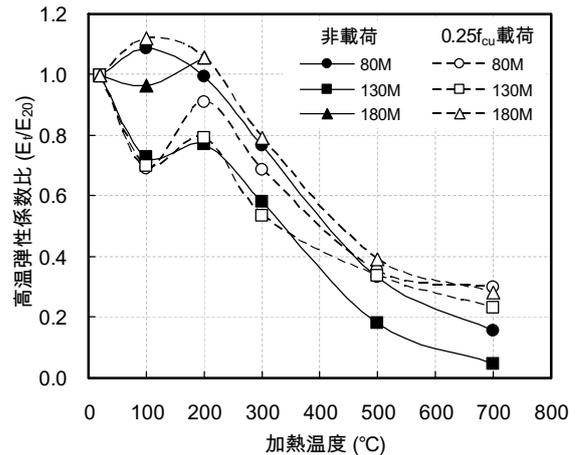
$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{th} + \epsilon_{tr} \quad \text{式(1)}$$

$$\epsilon_f = \epsilon_{tot} + \epsilon_{hc} \quad \text{式(2)}$$

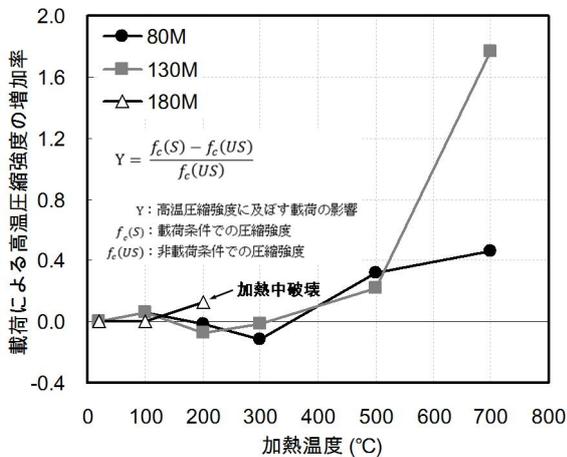
ここで、  
 $\epsilon_{tot}$  : 全ひずみ  
 $\epsilon_{th}$  : 熱膨張ひずみ  
 $\epsilon_{tr}$  : 過渡ひずみ  
 $\epsilon_f$  : 最終ひずみ  
 $\epsilon_{hc}$  : 高温クリープひずみ



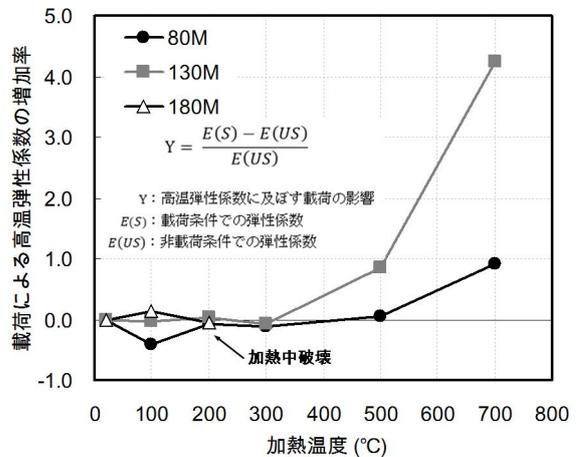
(a) 高温圧縮強度比



(a) 高温弾性係数比



(b) 高温圧縮強度増加率



(b) 高温弾性係数増加率

図 - 3 加熱温度と0.25 $f_{cu}$  載荷による  
高温圧縮強度比と高温圧縮強度増加率

図 - 4 加熱温度と0.25 $f_{cu}$  載荷による  
高温弾性係数比と高温弾性係数増加率

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 高温圧縮強度及び高温弾性係数

図 - 3(a) に加熱温度と載荷による高温圧縮強度比を示す。高温圧縮強度比は加熱温度での圧縮強度を常温圧縮強度で除して求めた。既存の研究結果と同様の傾向で、加熱温度 100°C で常温圧縮強度の約 60~70% 水準まで低下し、加熱温度 200~300°C の温度領域で常温圧縮強度の約 85~100% 水準まで近くなる傾向が現れる<sup>3)</sup>。

その後、加熱温度の増加による高温圧縮強度比が減り、非載荷条件の場合、加熱温度 700°C で 80M は約 0.42、130M は 0.18 の高温圧縮強度比を示し、圧縮強度が増やすほど高温圧縮強度が減る傾向が現れたが、180M は加熱温度約 300°C で破られ測定ができなかった。

図 - 3(b) に初期 0.25 $f_{cu}$  載荷による高温圧縮強度増加率を示す。80M と 130M は 300°C 以上の加熱温度で 0.25 $f_{cu}$

載荷条件の方が非載荷条件より圧縮強度が大きくなる傾向を示した。130M は加熱温度 700°C で初期載荷を行うことで非載荷に比べて高温圧縮強度が 1.7 倍となった。180M は加熱温度 300°C で爆裂が生じたため計測が出来なかった。

図 - 4(a) に加熱温度と載荷による高温弾性係数比を示す。高温弾性係数比は高温圧縮強度比と同様に加熱温度が高くなると小さくなり、300°C 以上の加熱温度では高強度コンクリートほど高温弾性係数比が減る傾向が見られた。また、図 - 4(b) に示すように 500°C 以上の加熱温度では圧縮強度に関係なく、非載荷条件より 0.25 $f_{cu}$  載荷条件で高温弾性係数比は大きくなった。これは加熱によりコンクリート内部に微細ひび割れを発生させる膨張ひずみが載荷荷重による収縮ひずみを相殺するためであると考えられる。

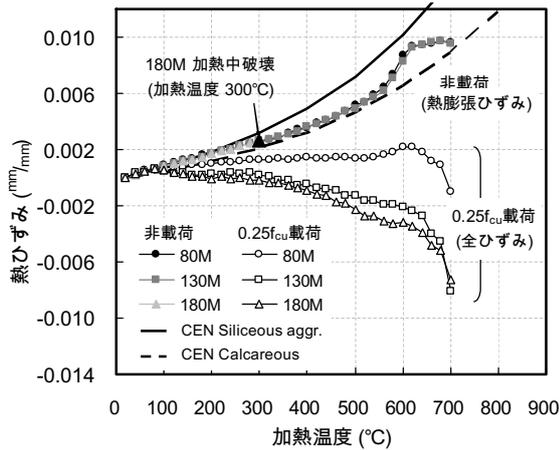


図 - 5 加熱温度と0.25 $f_{cu}$ 荷重による熱膨張ひずみと全ひずみ



写真 - 1 180Mの加熱中破壊 (加熱温度300°C)

### 3.2 コンクリートの熱膨張ひずみと全ひずみ

図 - 5 に熱膨張ひずみ及び全ひずみと加熱温度の関係を示す。熱膨張ひずみは圧縮強度に関わらず、加熱温度が高くなるほど大きくなった。また、加熱温度約 560°C で粗骨材中の石英の相変化ため、膨張ひずみが急激に増加し、加熱温度 600°C で 0.009、最終的に加熱温度 700°C で 0.01 のひずみ値を示した。一方、180M は加熱温度 300°C まで 80M、130M とほぼ同じ傾向に膨張したが、300°C 以上の加熱温度では写真 - 1 のように爆裂破壊が生じた。

0.25 $f_{cu}$  を荷重した条件で測った全ひずみの場合は荷重荷重によって熱膨張ひずみより小さいひずみ値を示した。また、全ひずみは圧縮強度に関わらず同様なひずみ値を示した熱膨張ひずみとは異なり、圧縮強度が大きくなるほど収縮ひずみが大きくなる傾向にあった。80M と 130M の全ひずみは加熱温度 700°C でそれぞれ -0.001 と、-0.008 となった。180M は非荷重条件において加熱温度

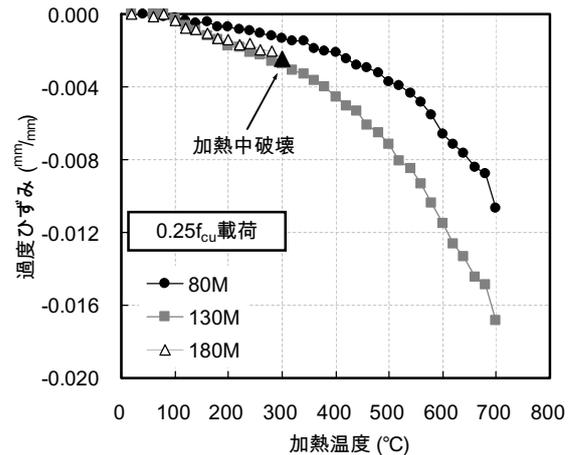


図 - 6 加熱温度と0.25 $f_{cu}$ 荷重による過渡ひずみ

300°C で爆裂が生じた。一方、0.25 $f_{cu}$  荷重した条件では爆裂が生じず、全ひずみは加熱温度 700°C で -0.008 の値を示した。

従って、加熱を受けた超高強度コンクリートの熱ひずみに及ぼす荷重の影響を評価するため、図 - 6 に加熱温度と 0.25 $f_{cu}$  荷重による超高強度コンクリートの過渡ひずみを示す。過渡ひずみは加熱を受けたコンクリートで荷重によって生じる収縮ひずみとして、温度上昇によるコンクリートの状態変化と耐力低下によって生じる。

80M の場合、100、200°C では収縮ひずみの増加速度が小さかったが、300°C 以上の加熱温度では荷重荷重の影響で収縮ひずみの増加速度が速くなり、非荷重条件で生じる熱膨張ひずみと同様な値である -0.011 のひずみが生じた。

一方、130M の過渡ひずみは 100°C まで 80M と同様な傾向であったが、その後、加熱温度が高くなるほど収縮ひずみ速度が速くなり、700°C での過渡ひずみは約 -0.017 であり、80M に比べ約 1.5 倍となった。

高強度コンクリートほど加熱時の収縮ひずみが大きくなるのは、セメント量が多く相対的に骨材量が少ない調合に起因したものであり、高温によるセメント水和物の熱分解による収縮量が多くなるため、過渡ひずみが大きくなると考えられる。また、既存研究でも 700°C 程度の高温条件で荷重荷重を受ける場合には収縮ひずみが大きくなり、収縮破壊の危険性が大きいと報告されている<sup>9)</sup>。

### 3.3 高温クリープひずみ

図 - 7 に加熱温度と 0.25 $f_{cu}$  荷重による高温クリープひずみの経時変化を示す。超高強度コンクリートの高温クリープひずみは加熱温度が高く、圧縮強度が大きくなるほど増加する傾向が現れた。

また、全ての試験体で加熱温度 500°C までは測定開始

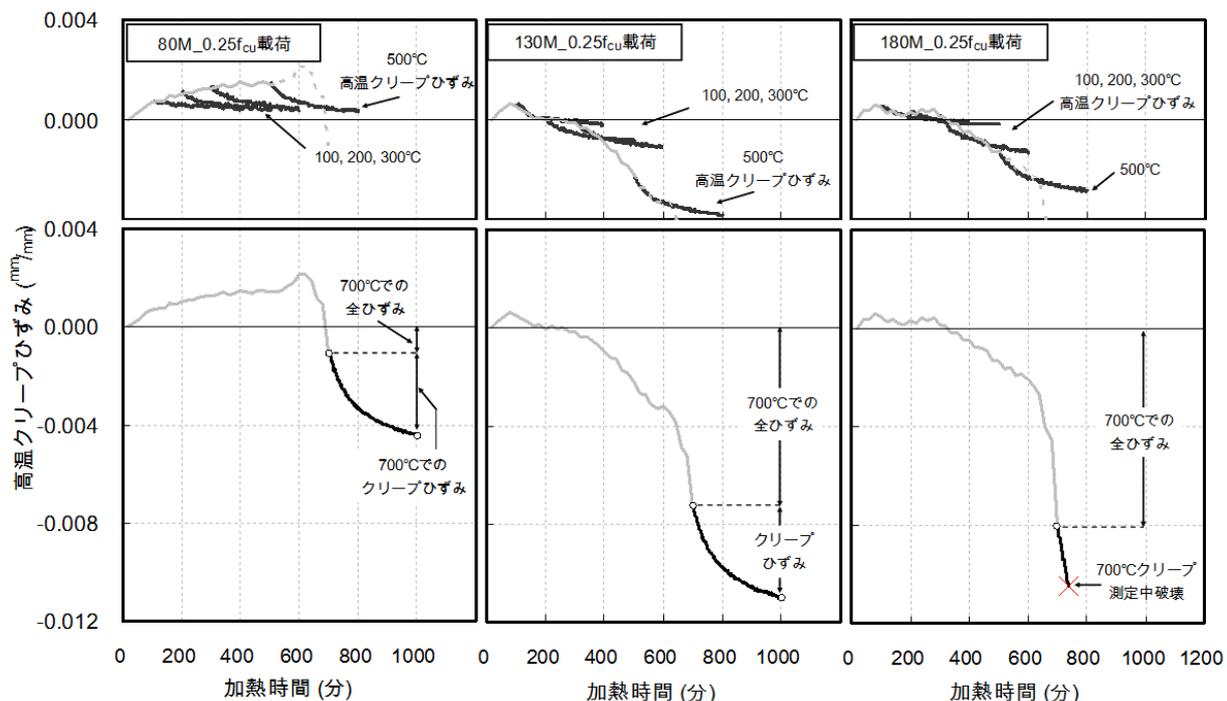


図 - 7 加熱温度と0.25 $f_{cu}$  載荷による高温クリープひずみ

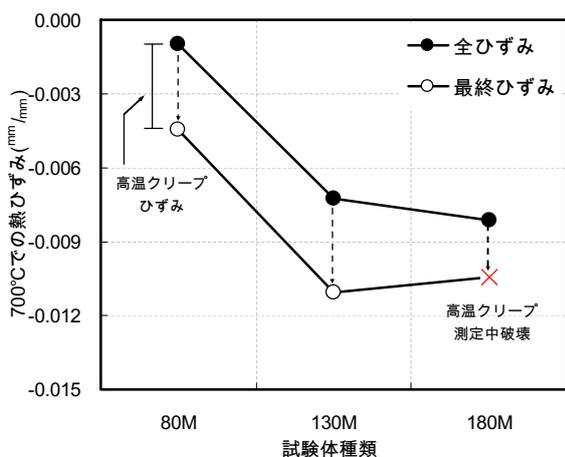


図 - 8 全ひずみと高温クリープひずみによる最終ひずみ

から 100 分間の高温クリープひずみが 300 分間の高温クリープひずみにに対し約 80%以上の収縮ひずみであり、100 分以降にはクリープひずみの増加速度が低下し、一定のひずみ値に収まる傾向を示した。

一方、加熱温度 700°C では初期 100 分の高温クリープひずみが 300 分間のクリープひずみの約 60%程度の値を示し、その後、増加速度は減るが、続けて収縮するひずみ挙動を見られた。特に、700°Cでの高温クリープひずみは 500°Cの値より約 3 倍程度大きいことが分かる。

図 - 8 に加熱温度 700°Cにおける試験体種類毎の全ひずみと高温クリープひずみによる最終ひずみを示す。最

終ひずみは 80M の場合、700°Cで約-0.004 であり、全ひずみより約 4 倍大きくなった。また、130M の最終ひずみは熱膨張ひずみ量と同程度の約-0.011 となり、80M より約 2.7 倍大きい値となった。従って、0.25 $f_{cu}$  載荷と加熱による最終的な収縮ひずみも圧縮強度が大きくなるほど増加した。

一方、180M では加熱初期に高温クリープひずみが急激に増加し-0.01 のひずみで試験体が破壊された。

### 3.4 高温弾性係数と高温クリープひずみの関係

図 - 3, 4 に示したとおり、300°C以上の加熱温度で圧縮強度と弾性係数が低下することが分かった。ここでは、高温クリープと高温時の弾性係数の低下について議論する。

図 - 9 に高温クリープひずみと高温弾性係数比の関係を示す。加熱温度が高くほど高温弾性係数が低下し、高温クリープひずみが大きくなる傾向を現れた。加熱温度 300°Cでは高温弾性係数比 0.6~0.8 の範囲で-0.0009~-0.0014 の高温クリープひずみが生じた。加熱温度 500°Cでは約 0.4 の高温弾性係数比で-0.0011~-0.0016 の高温クリープひずみが生じ、約 30%の弾性係数低下に対して高温クリープひずみは 0.0002 程度増加した。

しかし、加熱温度 700°Cでは高温弾性係数比が約 0.3 に対して高温クリープひずみは-0.0037 となり、加熱温度 500°Cに比べて約 10%弾性係数が減少した。これにより、高温クリープひずみは 0.0022 程度の増加し、500°C以上の加熱温度で収縮ひずみが急に増加した。

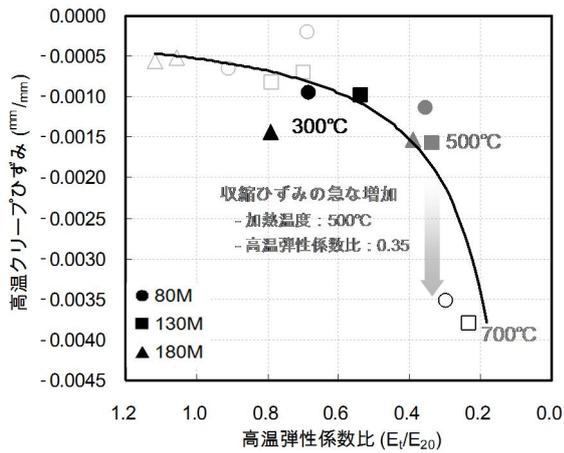


図 - 9 高温弾性係数と高温クリープひずみの関係

#### 4. まとめ

加熱を受けた超高強度コンクリートの力学的性能低下と熱ひずみ挙動を評価した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 超高強度コンクリートの高温力学的性能は加熱温度が高く、圧縮強度が大きくなるほど低下する傾向が現れた。また、 $0.25f_{cu}$  載荷によってコンクリート内部にひび割れ発生が抑制され、非載荷条件より高温圧縮強度と弾性係数が大きいことを確かめた。
- (2) 熱膨張ひずみは圧縮強度に関わらず同様な値を示したが、全ひずみは高強度コンクリートほど結合材量が多く、骨材量が少ないため、圧縮強度が高くなるほど耐力低下による収縮ひずみが大きくなると考えられる。
- (3) 全ひずみと高温クリープひずみによる最終ひずみは試験体の圧縮強度が大きくなるほど増加し、130Mは-0.011の収縮ひずみを示し、180Mは同様なひずみ値でクリープ破壊された。従って、この収縮ひずみ範囲はコンクリートの残存耐力がなくなる範囲であると判断される。
- (4) 高温弾性係数と高温クリープひずみの関係において500°C以後の加熱温度では弾性係数低下より高温クリープひずみの増加が大きくなった。従って、火災後の超高強度コンクリート構造部材の寸法安定性についてはこの熱ひずみ挙動を考慮すべきである。

#### 謝辞

本論文は2015年度政府(未来創造科学部)の財源に韓国研究財団の支援を受けて行われた基礎研究事業である(No.2015R1A5A1037548)。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) J. H. Lee, Y. S. Sohn, S. H. Lee, “Fire resistance of hybrid fibre-reinforced, ultra-high-strength concrete columns with compressive strength from 120 to 200MPa”, Magazine of Concrete Research, 2012, Vol. 64, 539-550.
- 2) G. Y. Kim, Y. S. Kim, T. G. Lee, “Mechanical properties of high-strength concrete subjected to high temperature by stressed test”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19, s128-s133.
- 3) 尹敏浩, 金圭庸, 小澤満津雄, 兪在哲, “粗骨材の種類によるコンクリートの高温力学的特性評価”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No.1, 2014, p p. 94-99.
- 4) 森田武, 山下平祐, 別府万寿博, 鈴木誠, “鉛直荷重を支持する鉄筋コンクリート造壁の火災時における変形挙動に関する検討”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No.1, 2015, pp. 1009-1014.
- 5) L. Y. Li, J. Purkiss, “Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures”. Fire Safety Journal, 2005, 40(7), 669-686.
- 6) B. Wu, E. S. S. Lam, Q. Liu, W. Y. M. Chung, I. F. Y. Ho, “Creep behavior of high-strength concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures”. 2010, ACI Materials Journal, 107(2).
- 7) U. Schneider, M. Schneider, J. M. Franssen, “Consideration of nonlinear creep strain of siliceous concrete on calculation of mechanical strain under transient temperatures as a function of load history”. In Fifth International Conference Structures in Fire, 2008, 463-476.
- 8) H. Sabeur, F. Meftah, “Dehydration creep of concrete at high temperatures”, 2008, Materials and Structures, 41(1), 17-30.
- 9) V. K. R. Kodur, T. C. Wang, F. P. Cheng, “Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns”, Cement and Concrete Composites, 2004, 26(2), 141-153.
- 10) RILEM, T. 129-MHT “Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, part 8: steady-state creep and creep recovery for service and accident conditions”. Mater Struct, 33(1), 6-13.