論文 超高強度コンクリートの高温ひずみ特性を考慮した提案式の検討

崔 景喆*1·金 圭庸*2·崔 亨吉*3·金 武漢*4

要旨:超高強度コンクリートを用いた部材の耐火性能を検討するためには実大断面試験による評価が要求されている。しかし、実大断面実験のためには載荷能力が大きい試験装置が必要である、材料モデルを用いた 解析的な研究を通じて耐火性能を評価している。本研究では 80,130 及び 180MPa の超高強度コンクリートを 対象として高温加熱時のひずみ特性を実験的に評価し、既存のひずみモデルと比較して超高強度コンクリー トに対した適用性を検討した。その後、最小二乗法により実験値と既存のひずみモデルを適用した計算値の 累積誤差が最も小さい定数値を導出し、超高強度コンクリートに適用できるひずみモデルを提示した。 キーワード:超高強度コンクリート、熱膨張ひずみ、応力-ひずみ、クリープひずみ、過度ひずみ、ひずみモデル

1. はじめに

超高強度コンクリートは結合材量が非常に多く、コン クリート内部の組織構造が緻密であり、火災時に爆裂と 急な耐力低下が生じる可能性が高い。従って、超高強度 コンクリートを用いたコンクリート部材は、実大断面実 験を行い、耐火性能を確認すべきである^{1),2)}。

しかし,超高強度コンクリートを用いた部材実験では 載荷能力が大きい実験装置が必要であるため,これらに 関する研究報告が非常に少ないのが現状である。従って, 先行研究者は縮小模型による実験結果を用い,超高強度 コンクリートの耐火性能を解析的に評価している³⁾。

特に, Anderberg らは四つのひずみ構成因子モデルを式 (1)のように提示しており, 今まで最も理想的なモデル として考えられている⁴。

$\varepsilon_{tot} = \varepsilon$	$t_{th} + \varepsilon_{c}$	$\sigma_{\sigma} + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{tr}$	式(1)
ここで,	ε_{tot}	: 全ひずみ	
	ε_{th}	: 熱膨張ひずみ	
	ε_{σ}	: 応力ひずみ	
	€ _{cr}	: クリープひずみ	
	ε_{tr}	: 過度ひずみ	

一方、このモデルは Anderberg と Thelandersson の理論
 的研究と Lin, Ellingwood 及び Piet の実験結果を適用したものであり^{4),5)},現段階で使用量が増加している 100M
 Pa 以上の超高強度コンクリートの高温ひずみ特性への
 適用可能性について検討する必要がある^{6),7)}。

そこで、本実験では圧縮強度 80, 130 及び 180MPa の 超高強度コンクリートに対して、Anderberg のモデルで 提案されている四つのひずみ特性を実験的に評価した。 また、この実験値を用い、各々のひずみモデルを検討

表-1 実験計画

f _{ck} (MPa)	載荷荷重	加熱温度 (°C)	評価項目
80 130 180	0 0.25f _{cu} 0.40f _{cu}	20 100 200 300 500 700	 ・熱膨張ひずみ ・応力-ひずみ関係 ・クリープひずみ ・全ひずみ ・過度ひずみ

表-2 使用材料の物理的性質

材 料	物理的性質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm ³ ,比表面積:3,200cm ² /g
高炉スラグ(BFS)	密度:2.97g/cm ³ ,比表面積:6,000cm ² /g
シリカフューム(SF)	密度:2.57g/cm ³ ,比表面積:200,000cm ² /g
フライアッシュ(FA)	密度:2.20g/cm ³ ,比表面積:3,000cm ² /g
無水石膏(Gy)	密度:2.90g/cm ³ ,比表面積:3,550cm ² /g
粗骨材(S)	花崗岩砕石 最大寸法:13mm, 密度:2.7g/cm ³ , 吸水率:0.9%
細骨材(G)	海砂, 密度: 2.65g/cm ³ , 吸水率: 1.0%
混和剤	高性能減水剤(ポリカルボン酸系)

表-3 コンクリートの調合

\mathbf{f}_{ck}	\mathbf{f}_{cu}	W/B	Slump	Air	S/a			単位	江重	量 (kg	g/m ³))	
(MPa)	(MPa)	(%)	(mm)	(%)	(%)	W	С	BFS	FA	SF	Gy	s	G
80	83	20.0	750		43	150	525	0	150	75	0	644	870
130	132	14.5	/50 ±	2±1	35	150	652	207	0	124	52	448	848
180	180	12.5	100		35	150	660	240	0	240	60	389	736

し,超高強度コンクリートを用いた構造部材のひずみ解 析に使用できる基礎資料を提示することを目的とした。

*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 博士 (工学)(正会員)
*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域 助教 博士 (工学)(正会員)
*4 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 名誉教授 博士 (工学)(正会員)



図-2 コンクリートのひずみ特性の評価方法

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

本研究の実験計画を表-1,使用材料の物理的特性を 表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。実験は、 W/B20.0、14.5、12.5%の超高強度コンクリートを用い、 加熱時の荷重載荷条件は、非載荷及びコンクリートの最 大圧縮応力の 0.25 倍(以下 0.25fcu)と最大圧縮応力の 0. 40 倍(以下 0.40fcu)の3種類と設定した。加熱温度は 2 0、100、200、300、500、700℃の6種類とした。

評価項目は、熱膨張ひずみ、応カーひずみ関係、クリ ープひずみ、過度ひずみ及び全ひずみを測定した後、表 -4のコンクリートひずみモデルと比較・検討した。

2.3 試験体の作製及び養生方法

高温ひずみ特性を評価する試験体は「KS F 2403 コン クリートの強度試験用試験体作製方法」に準じ、Ø100×2 00mmの円柱試験体とした。試験体の養生は、コンクリ ートを材齢 24 時間で脱型し、28 日間標準水中養生を行 った後、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室で 材齢 300 日まで気乾養生を行った。加熱前のコンクリー ト試験体の含水率は、2.5~3.0%であった。

2.4 試験方法

(1) 加熱装置及び方法

本実験で用いた試験装置を図-1に示す。試験装置は 載荷と加熱を同時に行うために 2000kN 級の載荷装置に

衣一4 コンクリートのひりみモナル

熱膨	$\varepsilon_{\rm th} = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3$	20≤T<650	式(2)
張ひず	$\varepsilon_{\rm th} = {\rm e}$	650≤T	20(2)
み	a, b, c, d, e : 定数		
구	$\sigma = \sigma_{u,T} \cdot \frac{\varepsilon_{\sigma}}{\varepsilon_{cl}} \cdot \frac{n}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_{\sigma}}{\varepsilon_{cl}}\right)^n}$		式(3)
心力ひ	σ : 応力(N/mm ²)		
びずひ	<i>σ_{u,}</i> : 温度 T℃における圧縮引	鱼度(N/mm ²)	
#	<i>ε_{cl}</i> : 温度 T℃における 圧縮	強度時ひずみ	
	n : 応力ひずみ曲線の曲が	り具合を決定す	トる定数
クリ	$\varepsilon_{cr} = a \cdot \left(\frac{t}{180}\right)^b$		式(4)
ープ	a : 180 分時のクリープ	ひずみ	
ひず	b : 定数		
み	t : 時間(分)		
過由	$\varepsilon_{\rm tr} = -k \cdot \frac{\sigma}{\sigma_{u.20^{\circ}{\rm C}}} \cdot \varepsilon_{th}$		式(5)
反ひ	,		
ヂ	σ : 応力(N/mm ²)		
ずみ	σ : 応力(N/mm ²) σ _{u,20℃} : 常温圧縮強度(1	N/mm ²)	

電気加熱炉を設けた。また,加熱中の試験体のひずみは 上・下部加力冶具の中心で設置した φ 10mm の石英管と 外部に設置した変位計を用い測定した。加熱は試験体内 ・外部の温度が同一なレベルに上昇するように上・下部 の加力冶具を RILEM で提案している 1℃/min.の速度で 加熱し,試験体に熱を伝達する間接加熱方式を採用した⁸⁾。

(2) ひずみ評価方法

図-2 に加熱・載荷時におけるコンクリートのひずみ 挙動の概要図を示す。熱膨張ひずみは非載荷・加熱状態 で発生するひずみ,全ひずみは載荷・加熱状態で発生す るひずみ,クリープひずみは荷重載荷後目標温度まで加 熱し,目標温度到達時間から300分間のひずみと評価し た。

3. 実験結果及び考察

3.1 熱膨張ひずみ

図-3 に超高強度コンクリートの熱膨張ひずみを示す。 コンクリートの圧縮強度に関わらず、650℃まで加熱温 度が高くなるほど熱膨張ひずみが増加する傾向が現れ た。加熱温度 650℃以上ではひずみが膨張する傾向が小 さくなり、700℃での熱膨張ひずみは 0.0097 となった。 このような傾向は ECCS⁹の結果と類似な傾向であるが、 本実験で得られた値は、ECCS の 700℃で 0.014 の値に比





表-5 熱膨張ひずみモデルに用いた定数値

定数	а	b	с	d	е
本実験	7×10 ⁻¹¹	-5×10 ⁻⁸	2×10-5	6×10 ⁻⁴	97×10 ⁻⁴
ECCS	2.3×10 ⁻¹¹	0	9×10 ⁻⁶	-1.8×10 ⁻⁴	14×10 ⁻³

ベ小さい結果であった。これは,超高強度コンクリート は,高温時に収縮する結合材の量が非常に多いため,熱 膨張ひずみが小さく生じることと考えられる。

また、本実験で検討した超高強度コンクリートの場合、 圧縮強度に関わらず、同じ熱膨張ひずみ挙動を示すこと は、コンクリートの熱膨張ひずみに最も大きな影響を及 ぼす粗骨材をすべて同じものを使用したことが原因と して考えられる。一方、180MPaの超高強度コンクリー トは加熱温度 280℃以上で試験体が爆裂破壊され、熱膨 張ひずみを測ることができなかった。

熱膨張ひずみモデルは ECCS の普通強度コンクリート のモデルの式(2)を用い,超高強度コンクリートの熱膨 張ひずみ挙動を反映し,定数を修正した。ECCS モデル の定数と本実験から修正された定数を表-5に示す。

3.2 応カーひずみ関係

超高強度コンクリートの応力-ひずみ関係を図-4 に 示す。80,130MPaの超高強度コンクリート試験体は,常 温~300℃の温度範囲において,応力-ひずみ曲線の傾 きが大きく,破壊時に脆性的な挙動を示した。また,50 0℃からの傾きは小さくなり,700℃では破壊時のひずみ が大幅に増加していることが確認できた。

180MPaの超高強度コンクリート試験体は、200℃以下 の温度範囲で常温の応力-ひずみ関係と類似な挙動を 示したが、280℃で爆裂破壊され、300℃以上の温度の範 囲では応力-ひずみ関係の評価ができなかった。

一方, Castillo の研究では¹⁰, 高強度コンクリートの応 カーひずみ関係は普通強度コンクリートに比べ, 急に最 大応力に到達した後, 脆性的な破壊挙動を現れると報













告している。特に,普通強度コンクリートの場合,100℃ までは弾性材料特性を,200℃では塑性材料特性を見せ るが,高強度コンクリートの場合,200℃まで弾性材料特 性を示すと報告している。

これに対し本実験の範囲で検討した超高強度コンク





表-6 応カーひずみモデルに用いた定数値

$f_{ck} \\$	温度 (℃)	${}_c \sigma_{u,T}/{}_c \sigma_{u,20} \circ$	_c e _{cl} (×10 ⁻⁶)	n
	20	1.00	0.0026	5.45
	100	0.90	0.0027	3.48
00	200	1.01	0.0028	6.75
80	300	0.88	0.0031	5.43
	500	0.58	0.0064	2.89
	700	0.44	0.0110	2.19
	20	1.00	0.0031	7.46
130	100	0.69	0.0036	2.71
	200	0.95	0.0040	5.07
	300	0.92	0.0040	46.95
	500	0.46	0.0065	8.97
	700	0.17	0.0093	15.10
	20	1.00	0.0043	13.82
	100	0.59	0.0029	4.82
100	200	0.90	0.0038	4.83
160	300	-	-	-
	500	-	-	-
	700	-	-	-

表-7 クリープひずみモデルに用いた定数値

£	温度	荷重載荷条件				
(MPa)		0.25	i f _{cu}	0.40fcu		
	(0)	а	b	а	b	
	100	0.00025	0.46	0.00045	0.46	
	200	0.00051	0.46	0.00087	0.46	
80	300	0.00071	0.60	0.00134	0.38	
	500	0.00093	0.46	0.00093	0.46	
	700	0.00290	0.45	0.00556	0.46	
130	100	0.00060	0.46	0.00140	0.46	
	200	0.00067	0.46	0.00092	0.46	
	300	0.00082	0.60	0.00151	0.60	
	500	0.00132	0.41	-	-	
	700	0.00324	0.45	-	-	
	100	0.00051	0.46	0.00102	0.46	
	200	0.00041	0.46	0.00102	0.46	
180	300	0.00123	0.46	0.00165	0.60	
	500	0.00128	0.46	-	-	
	700	-	-	-	-	

リートでは,300℃まで弾性材料特性を示すことが確認 できた。本実験での超高強度コンクリートの応力-ひず み関係のモデルは,Eurocode でも採用されている Popov ics の式(3)を適用した^{11),12)}。応力-ひずみ関係での 最大応力値を圧縮強度とし、常温に対する高温圧縮強度 比及び圧縮強度実験時のひずみ値を用い計算した。実験 値と計算値の累積誤差が最も小さくなるようにn値を導 出し、**表-6**に示した。



図-6 超高強度コンクリートの全ひずみ

3.3 クリープひずみ

図-5 に超高強度コンクリートのクリープひずみを示 す。超高強度コンクリートのクリープひずみは、圧縮強 度に関わらず、加熱温度が高くなるほど増加する傾向を 示した。

加熱温度 500℃までのクリープひずみは 0.002 以下の 値を示したが、700℃では大幅に増加し、500℃でのクリ ープひずみの3倍以上の値を示した。クリープひずみの 挙動は、荷重載荷量が大きくなるほど比例的に増加する 傾向を示した。

一方,130MPaの超高強度コンクリート試験体の場合 は、0.40fcu,加熱温度500℃以上、180MPaの超高強度コ ンクリート試験体の場合は、0.25fcu,加熱温度500℃以上 の範囲でクリープ試験中に破壊が生じた。従って、超高 強度コンクリートの場合、高温と持続荷重による破壊現 象についての検討が必要であると判断される。

超高強度コンクリートのクリープひずみモデルは本 実験で得られたクリープひずみ値と時間による硬化法 則を適用した式(4)を用いた。定数 a, bの値は表-7 に 示した。

3.4 過度ひずみ

圧縮応力下で温度が上昇する時に生じるコンクリートのひずみは、熱膨張ひずみ及び応力による弾性ひずみ、 クリープひずみに大別される。しかし、実際に荷重と高 温を同時に受けたコンクリートのひずみは、前述したひ ずみ成分より大きいひずみを示し、これを過度ひずみと 定義する。図-6の全ひずみで熱膨張ひずみ、応力-ひ ずみ関係、クリープひずみを差し引いた式(6)を用い、 過度ひずみを算出し、その結果を図-7に示す。

$\varepsilon_{tr} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{th} - \varepsilon_{\sigma} - \varepsilon_{cr}$ $\vec{\mathbf{x}}(6)$

超高強度コンクリートの過度ひずみは,クリープひず みと類似な傾向で,加熱温度が高くなるほど大きくなっ









た。また,同じ圧縮強度レベルでは,載荷荷重量が大き くなるほど過度ひずみ大きくなり,同じ載荷荷重レベル では,圧縮強度が大きくなるほど過度ひずみが大きくな る傾向を見られた。

一般的に、コンクリートの過渡ひずみは、500℃以上の

£	k				
I _{ck} (MPa)	荷重載荷条件				
	0.25 fcu	0.40 fcu			
80	6.47	8.35			
130	8.85	7.70			
180	8.59	9.93			

表-8 過度ひずみモデルに用いた定数値

温度の範囲で急に増加する。これは、Ca(OH)2の分解に よりセメントペーストの崩壊と粗骨材の膨張ひずみに よってコンクリート内部にひび割れが生じるためであ る。従って、700℃以上の温度条件において、載荷荷重を 受けるコンクリートの場合は骨材種類に関わらず、破壊 の危険性が大きいと報告されている¹³。

本実験の範囲で検討した超高強度コンクリートは,普 通強度及び高強度コンクリートに比べ,比較的低い温度 である 300℃以上でも収縮破壊現象が見られた。これは, 粗骨材の最大寸法が小さく,結合材量が多い超高強度コ ンクリートが載荷荷重と高温を同時に受ける場合,コン クリートマトリックスの結束力が弱くなり,収縮ひずみ が急に増加するためであると考えられる。

超高強度コンクリートの過度ひずみモデルは, Anderbergから提案された式(5)を用い,コンクリートの圧縮強度と荷重載荷条件による定数k値を表-8に示した。

4. まとめ

本研究では,超高強度コンクリートの高温ひずみ特性 評価とひずみモデルの検討した結果,以下の知見が得ら れた。

 高温を受けた超高強度コンクリートの熱膨張ひずみ、 応力-ひずみ関係、クリープひずみ及び過度ひずみを評価した結果、普通強度コンクリートと異なるひずみ特性 が現れることを確かめた。

2) 超高強度コンクリートは、低速加熱条件でも、爆裂に よる破壊現象が生じるため、耐火性能の確保に関する対 策が必要であると考えられる。

3) 超高強度コンクリートのひずみ値と従来のひずみモ デルから提案された値を比較し、累積誤差が最も小さい 定数値を導出し、超高強度コンクリートを用いた部材の ひずみ解析に必要な高温ひずみ特性モデルの定数値を 提示した。

謝辞

本論文は,教育科学技術部と韓国研究財団の地域革新 人力養成事業(2012H1B8A2025606)の支援を受けて遂行 された研究です。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- Kalifa P, Menneteau FD, Quenard D., Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp. 1915-1927,
- 2) 崔景喆,金圭庸, Nenad Gucunski,金武漢:高温加熱 と荷重条件による超高強度コンクリートの力学的 特性、コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp. 1324-1329, 2014
- 菊田繁美,平島岳夫,占田止友,上杉英樹:超高強 度鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する解析的研 究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 187-192, 2003
- Anderberg, Y. and Thelandersson, S., Stress and Deformation Characteristics of Concrete, 2-Experimental Investigation and Material Behavior Model, Bulletin 54, University of Lund, Sweden, 1976
- T. D. Lin, B. Ellingwood, and O. Piet, Flexural and shear Behavior of Reinforced Concrete Beams during Fire Tests, PCA R&D Serial No. 1879, 1988
- 6) Hideki Kimura, Yuji Ishikawa, Atsushi Kambayashi and Hiroto Takatsu, Seismic behavior of 200MPa ultra high strength steel fiber reinforced concrete columns under varying axial load, Journal of advanced concrete technology, vol. 5, No. 2, pp.193-200.
- K. Yamamoto, T. Nakajima, S. Watanabe, Y. Shimizu, High-rise building operations using ultra strength concrete with a design strength of 200MPa, concrete journal, vol. 49, No. 8, pp.37-42
- RILEM TC 129-MHT 「Part 3 Compressive strength for service and accident conditions」, Material and structures, vol.28, 1995, pp. 410-414
- ECCS-Technical Committee 3, Model Code on Fire Engineering, European Convention for Constructional Steel Work, First Edition, p.47, 2001
- Castillo, C., and Durrani, A. J., Effect of transient high temperature on high-strength concrete, ACI Materials Journal, vol.81, no.1, pp.47-53, 1990
- Eurocode2, Design of Concrete Structures, Part 1-2, General rules-structural fire design, The European Standard EN1992-1-2, 2004
- 12) 豊田康二,平島岳夫,菊田繁美:火災時における鉄 筋コンクリート柱の軸変形挙動に及ぼすコンクリ ートの過渡ひずみの影響,コンクリート工学年次論 文集, Vol.32, No.1, pp. 1127-1132, 2010
- J. Tao, X. Liu, Y. Yuan, L. Taerwe, Transient strain of selfcompacting concrete loaded in compression heated to 700°C, Materials and Structures, pp.191-201, 2013