

論文 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

崔 景喆 *1・金 圭庸 *2・ Nenad Gucunski *3・金 武漢 *4

要旨: 骨材量が少なくセメントペースト量が多い超高強度コンクリートは高温で脆性破壊が発生する特性がある。超高強度コンクリートの調合で圧縮強度の発現とペースト/骨材比は密接な関連があり、このような観点からコンクリートの高温特性を理解することが必要である。本研究では、超高強度コンクリートに対して非荷重と圧縮強度(f_c)の 0.25 倍の荷重荷重条件を設定し、高温時の応力-ひずみ、圧縮強度、弾性係数、熱膨張ひずみを評価した結果、調合においてペースト・骨材比が大きいほど高温加熱と荷重荷重により収縮ひずみが大きくなり、特に非荷重時の 180MPa コンクリートでは加熱中に破壊された。

キーワード: 超高強度コンクリート, 応力-ひずみ, 圧縮強度, 弾性係数, 熱膨張ひずみ

1. はじめに

加熱速度と圧縮強度によるコンクリートの爆裂性状を示した図-1 のように、高強度コンクリートは、火災時の急速加熱条件下では爆裂が発生するが、1°C/min. の低速加熱条件下では爆裂が発生しないという研究報告がある¹⁾。また、100MPa 以上の超高強度コンクリートでは、爆発的に破壊される爆裂が発生する場合もある。このような現象は図-2 に示すように、コンクリート構成材料の熱的挙動が異なるためであると考えられる。特に、セメントペースト量が非常に多い超高強度コンクリートでは、このような脆性破壊現象が発生する可能性が高いと報告される^{2,3)}。

従って、超高強度コンクリートを用いた建築構造物の火災安全性を確保するためにはコンクリートの高温力学的特性を理解することが非常に重要である。本研究では、W/B 20.0, 14.5, 12.5%の超高強コンクリートに対して、高温加熱と荷重条件による応力-ひずみ、圧縮強度、弾性係数、熱膨張ひずみ等を実験により分析・検討した。

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 に、コンクリートの調合を表-2 に示す。コンクリートは W/B 20.0, 14.5, 12.5%の超高強度コンクリートを使用し、加熱時における荷重荷重条件は非荷重と圧縮強度(f_c)の 0.25 倍の 2 種類に設定した。加熱温度は 20, 100, 200, 300, 500, 700°C の 6 種類に設定した。評価項目は、応力-ひずみ関係、圧縮強度時のひずみ、圧縮強度、弾性係数、熱膨張ひずみ等で、加熱と荷重を同時に行った状態で測定した。また、本研究に使用した材料の物理的特性を表-3 に示す。

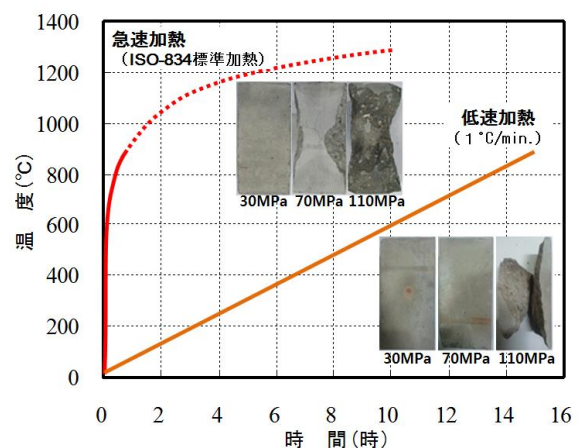


図-1 加熱速度と圧縮強度によるコンクリートの爆裂

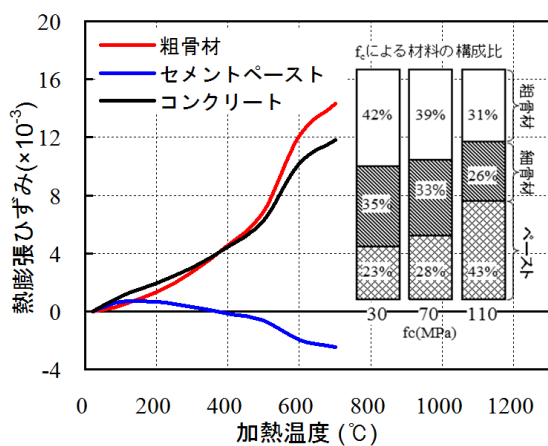


図-2 コンクリート構成材料の熱膨張挙動

2.2 試験体の作製及び養生方法

高温時の力学的特性を評価する試験体は、「KS F 240

*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 副教授 工博 (正会員)

*3 Professor of Civil and Environmental Engineering at Rutgers, The State of University of New Jersey

*4 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 名誉教授 工博 (正会員)

表-1 実験計画

f_c (MPa)	載荷荷重	加熱温度 (°C)	評価項目
80	0	20	<ul style="list-style-type: none"> 応力-ひずみ 圧縮強度
130		100	
180		200	
	0.25 f_c	300	<ul style="list-style-type: none"> 圧縮強度時のひずみ 弾性係数 熱膨張ひずみ
		500	
		700	

表-2 コンクリートの調合

f_c	W/B	Slum Flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	単位重量 (kg/m ³)							
					W	C	BFS	FA	SF	Gy	S	G
80	20.0	750 ±100	2±1	43.0	150	525	0	150	75	0	644	870
130	14.5			35.0	150	652	207	0	124	52	448	848
180	12.5			35.0	150	660	240	0	240	60	389	736

表-3 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
シリカフェューム(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)	花崗岩碎石 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)

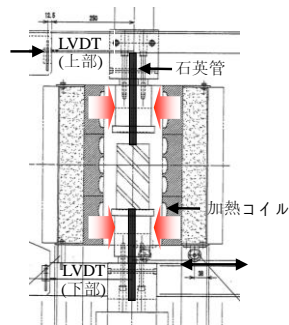


図-3 加熱及び変形測定装置

3「コンクリートの強度試験用試験体作製方法」に準じ、 $\phi 100 \times 200$ mmの円柱試験体とした。

試験体の養生方法は、作製した後24時間で脱型し、28日間標準水中養生を行なった後、温度20°C、60%R.H.の恒温恒湿室で材齢300日まで気乾養生を行った。

2.3 コンクリートの加熱とひずみ評価方法

図-3に載荷及び加熱装置の概要を示す。2000kN級UTM載荷装置に電気炉を設置しており、荷重を載荷した状態で試験体の加熱が可能な装置である。また、高温時にコンクリート試験体の変形を測定するため、電気炉上

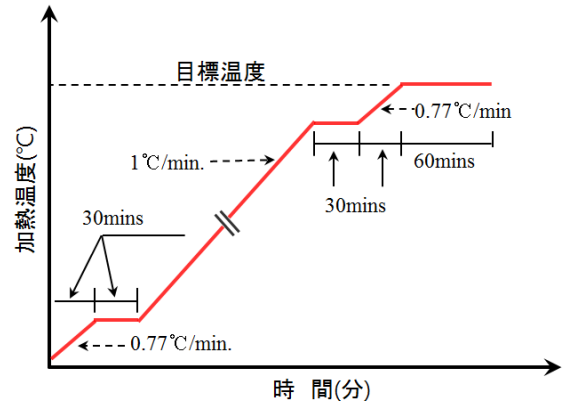
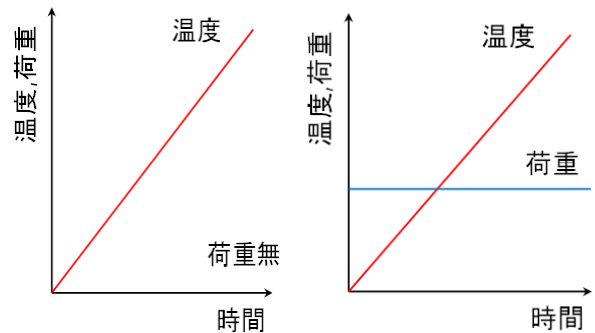


図-4 加熱方法



a) 熱膨張ひずみ b) 全ひずみ

図-5 熱膨張と全ひずみ特性の評価方法

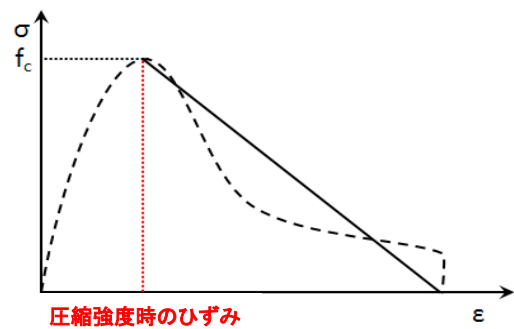


図-6 圧縮強度時のひずみ評価方法

下部に石英管とキャンチレバー形LVDT変位計を設置した。

コンクリート試験体は、図-4に示すように、常温(20°C)~50°C区間と目標温度の50°C前区間は0.77°C/min., その他の区間は1°C/min.の速度で加熱された。

コンクリートの熱膨張ひずみは、図-5に示すRILEM TC 129-MHT「Part 6 - Thermal strain」の評価方法に準じて測定した。また、コンクリートの力学的特性評価は、目標温度でKS F 2405「コンクリート圧縮強度試験方法」とKS F 2438「コンクリート円柱試験体の弾性係数ポアソン比試験方法」に準じ、圧縮強度時のひずみは図-6に示すようにEN 1992-1-2:2004(E)に準じて測定した⁴⁾。

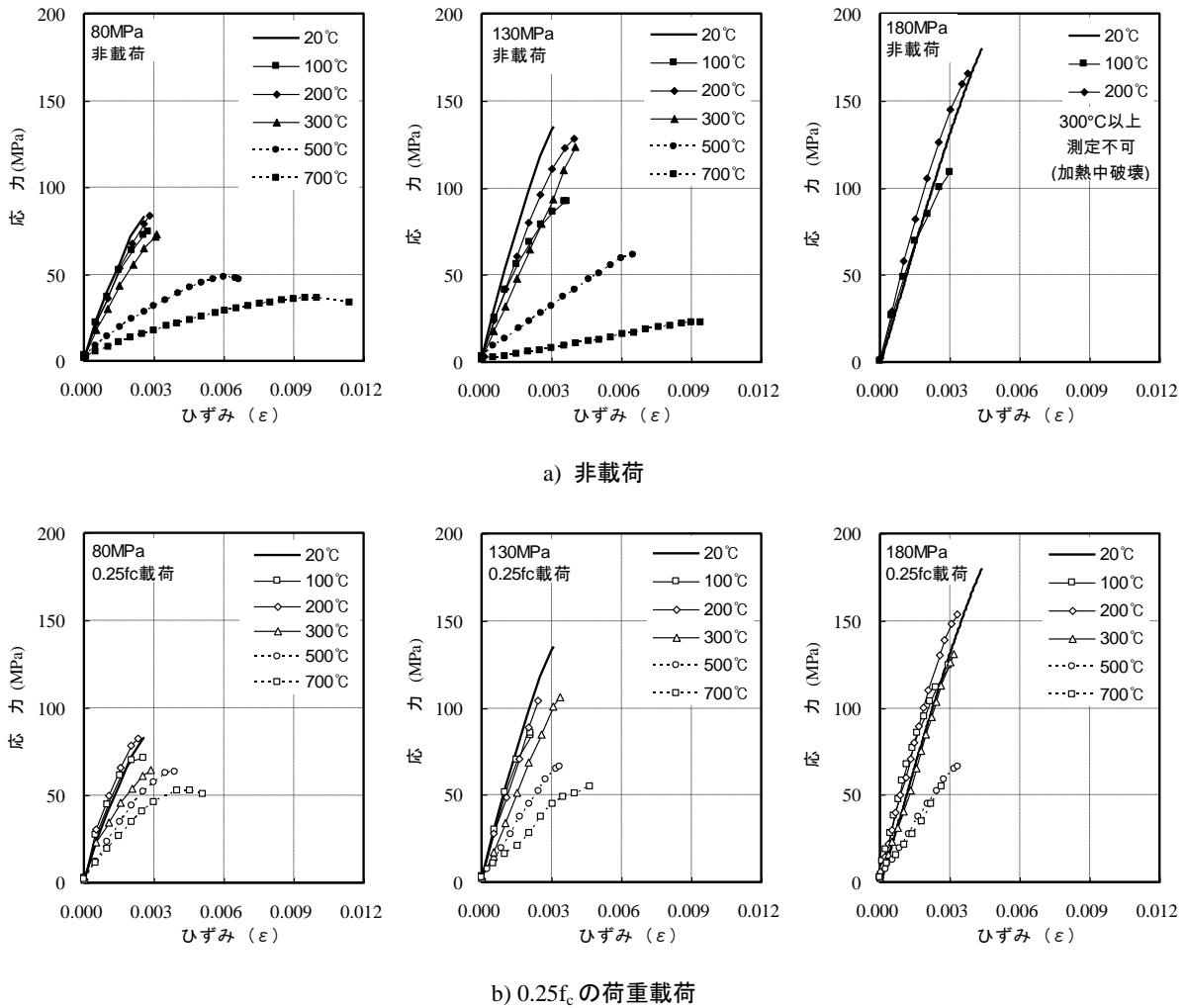


図-7 高温加熱と荷重条件による応力-ひずみ曲線

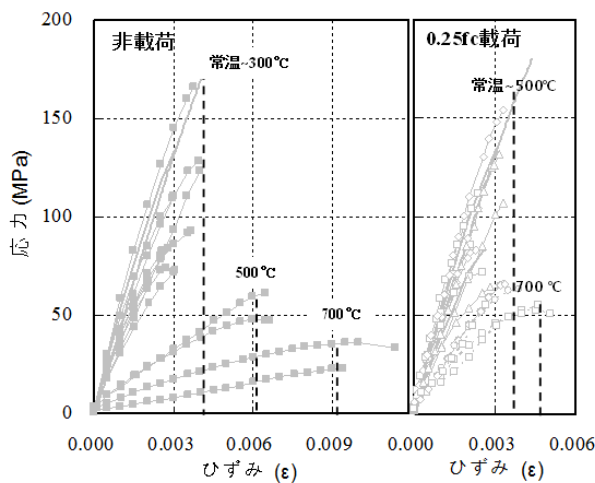


図-8 応力-ひずみ曲線と圧縮強度時のひずみ

3. 実験結果及び考察

3.1 応力-ひずみ関係

高温と荷重条件による応力-ひずみ曲線を図-7 と 図-8 に示す。非載荷の場合、80 と 130MPa 超高強度コン

クリート試験体は、常温~300°Cの温度範囲では 0.004 以下のひずみで破壊し、応力-ひずみ曲線は 500°Cから傾き小さくなり、700°Cでの破壊時のひずみは 0.01 位にまで大きくなった。一方、180MPa 超高強度コンクリート試験体は、200°C以下の温度範囲では常温の応力-ひずみ関係に近い挙動を示したが、加熱中に 280°Cで破壊したため、300°C以上の温度で圧縮強度を測定することが出来なかった。

0.25 f_c の荷重載荷では、常温~300°Cの温度範囲で非載荷と類似な応力-ひずみ挙動を示し、500°Cと 700°Cでは破壊時のひずみが非載荷より小さくなり、全ての試験体で脆性破壊した。なお、0.25 f_c の荷重載荷下では、180MPa 超高強度コンクリート試験体が 700°Cまでの加熱において破壊しなかった。

本研究の範囲で高温を受ける超高強度コンクリートの応力-ひずみ挙動は、常温~300°C、500°C、700°Cの3つの領域で分けられる。非載荷の場合、常温~300°Cでひずみは 0.0025~0.004、500°Cでひずみは 0.007、700°Cでひずみは 0.01 で破壊され、加熱温度が高くなるほどコンク

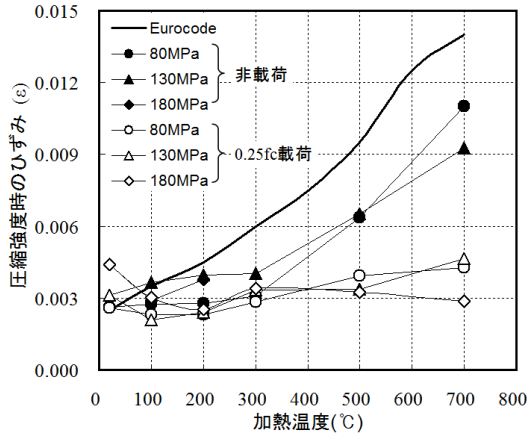


図-9 圧縮強度時のひずみ

リートの破壊ひずみが大きくなることを確かめた。また、 $0.25f_c$ の荷重載荷の場合では、常温~500℃まではひずみ0.0025~0.004、700℃ではひずみが0.005で破壊し、加熱温度が高くなっても破壊ひずみは大きくなかった。これより、荷重載荷時には、熱膨張が抑制され、高温で脆性的な破壊が起こりやすいと考えられる。

圧縮強度時のひずみをEurocodeと比較して図-9に示す。非載荷の場合は、加熱温度が高くなるほど圧縮強度時のひずみが大きくなるが、Eurocodeより0.03~0.04程度小さくなった。一方、荷重載荷の場合は、全温度範囲で圧縮強度時のひずみが0.005以下になった。

3.2 高温圧縮強度及び高温弾性係数

図-10に常温に対する高温での圧縮強度比 (f_t/f_{20}) をCEB codeと比較し示す。全ての試験体ではCEB codeとは異なり、100℃で約10~40%の範囲で圧縮強度が小さくなる傾向を示した。コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど100℃での圧縮強度比が小さくなるのが分かった。また、200℃では圧縮強度が上昇し、試験体が破壊された180MPa試験体を除いた80、130MPa試験体では300℃以上で圧縮強度が小さくなり、700℃で80MPa試験体は44%、130MPa試験体は17%の圧縮強度比を示した。

図-11に超高強度コンクリートの高温圧縮強度に及ぼす荷重載荷の影響を示した。300℃以下の温度範囲では荷重載荷による高温圧縮強度の増加が小さかったが、500℃以上の温度範囲では荷重載荷による圧縮強度の増加率が高かった。特に、130MPa試験体の700℃では、非載荷状態に比べて2.8倍の圧縮強度増加を示した。180MPa試験体では、非載荷の場合は280℃で破壊したが、 $0.25f_c$ の荷重載荷では700℃まで破壊しなかった。

図-12に常温時に対する高温時の弾性係数比をCEB codeと比較し示す。加熱温度が高くなるほど弾性係数は減少する傾向を示した。非載荷の場合、80MPa試験体は300℃以下の温度でCEB codeより弾性係数が大きくなり500℃以上の温度では類似な傾向を示し、130MPa試験

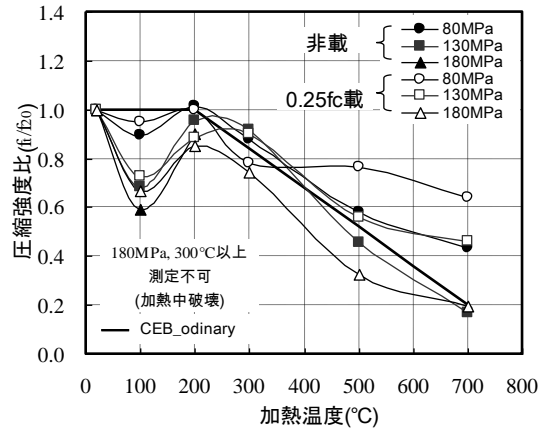


図-10 常温での高温での圧縮強度比

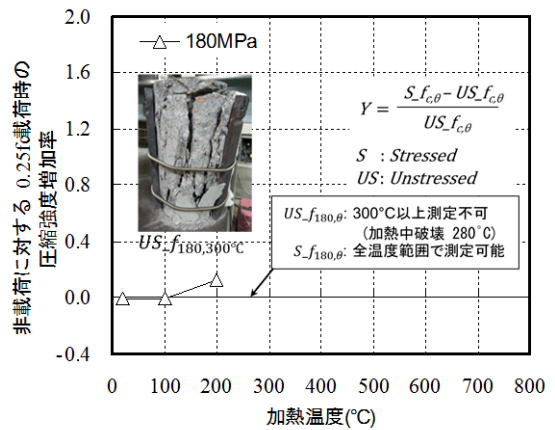
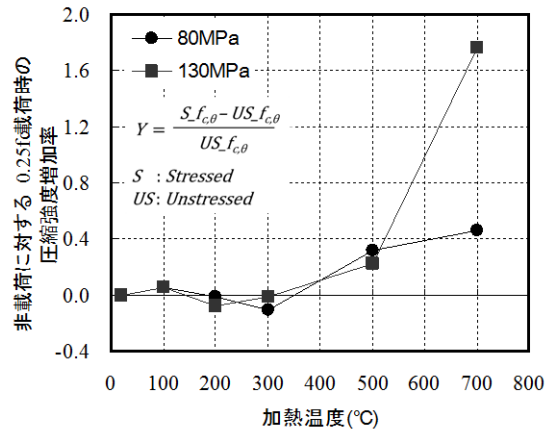


図-11 高温圧縮強度に及ぼす荷重載荷の影響

体は全ての温度範囲でCEB codeより低く評価された。

しかし $0.25f_c$ の荷重載荷の場合、300℃以上の温度で類似な傾向を示した。

図-13に超高強度コンクリートの高温弾性係数に及ぼす荷重載荷の影響を示す。超高強度コンクリートの高温弾性係数は500℃以下の温度では荷重載荷による弾性係数の増加がなかったが、500℃以上からは破壊ひずみが小さくなり弾性係数が大きくなった。

$0.25\sim 0.30f_c$ の載荷荷重を受ける場合、圧縮強度が約25%上昇するというHertzの研究報告⁵⁾のように本研究

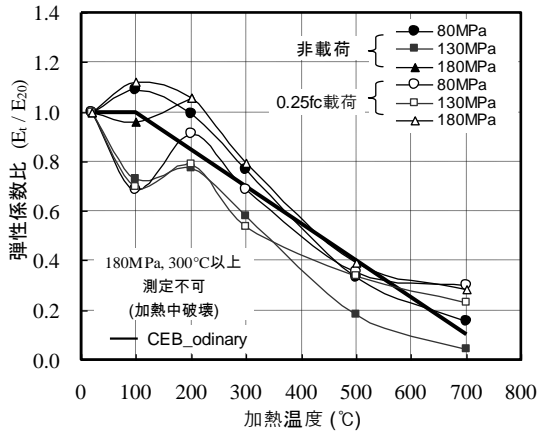


図-12 常温での高温での弾性係数比

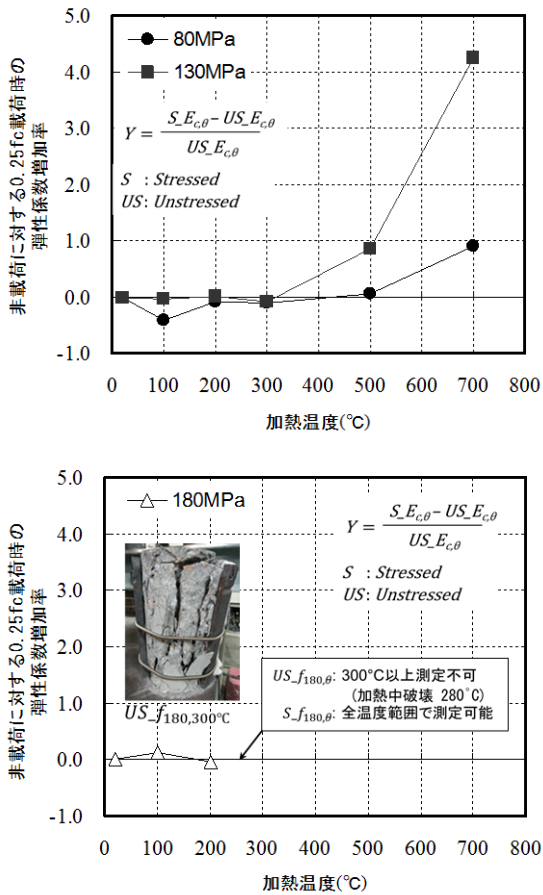


図-13 高温弾性係数に及ぼす荷重荷の影響

でも類似の傾向が見られた。

3.3 熱膨張ひずみ

高温加熱と荷重条件による超高強度コンクリートの熱膨張ひずみと全ひずみを図-14に示す。非荷重の場合、コンクリートの圧縮強度に関わらず、600℃までは加熱温度が高くなるほど線膨張係数が増加する傾向を示した。加熱温度600℃以上では線膨張係数が低下し、700℃での熱膨張ひずみは0.01となった。180MPaコンクリート試験体では、280℃で破壊したため、熱膨張ひずみを測定することができなかった。

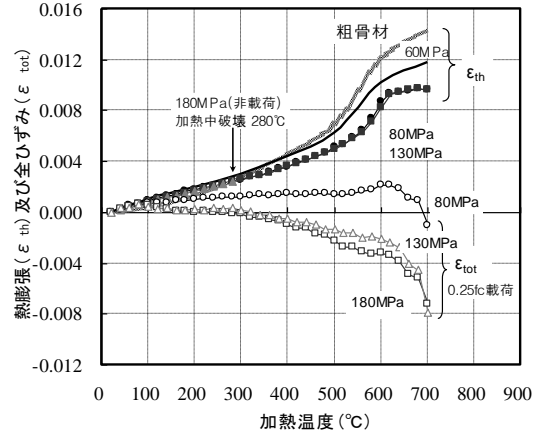


図-14 高温加熱によるコンクリートの熱膨張ひずみと全ひずみ

0.25fcの荷重荷の場合、非荷重時に発生するコンクリートの熱膨張ひずみが荷重による収縮で相殺され、ひずみが小さくなる傾向が見られた。80MPa超高強度コンクリートは、荷重荷による熱膨張ひずみが抑制されたが比較的骨材量が多く、ひずみが0.001に一定になった後、600℃以上からは耐力低下による収縮が生じた。

130と180MPa超高強度コンクリートの場合、セメントペーストの熱膨張が生じる約100℃まで類似に膨張するが、300℃以上から耐力低下による収縮が発生して、700℃では全ひずみが-0.008程度となった。

3.4 ペースト・骨材比によるコンクリートの高温特性

コンクリートの高温特性とペースト・骨材比に関する先行研究⁶⁾の実験結果を採用して検討した結果として、図-15にペースト・骨材比と熱膨張ひずみの関係を、図-16と図-17にペースト・骨材比による圧縮強度と弾性係数を示す。

コンクリートの熱膨張ひずみは常温～300℃までペースト/骨材比に関わらず類似な傾向を示した。しかし、加熱温度500℃以上では熱膨張ひずみが非常に大きくなって、ペースト・骨材比が大きくなると共に熱膨張ひずみが小さくなる傾向が明らかになった。

圧縮強度の場合、常温～300℃までペースト・骨材比が大きくなるほど圧縮強度が大きくなり、500℃以上でペースト・骨材比が0.55以上からは圧縮強度が小さくなる傾向が見られた。これより、高温加熱時にセメントペーストが収縮して骨材が膨張する挙動によって、比較的セメントペースト量が多い超高強度コンクリートでは熱膨張ひずみが小さく、骨材の熱膨張が急に発生する500℃以上で圧縮強度が小さくなると考えられる。

また、ペースト・骨材比と弾性係数の関係は圧縮強度と類似な傾向が見られた。

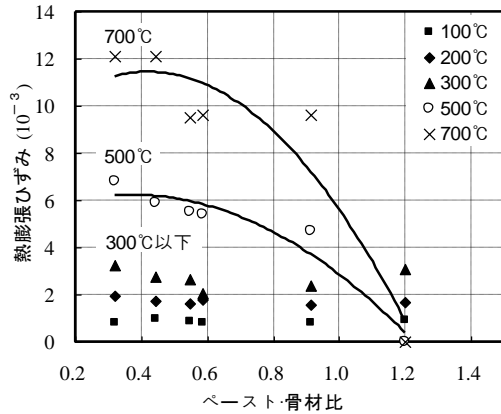


図-15 ペースト・骨材比と熱膨張ひずみの関係

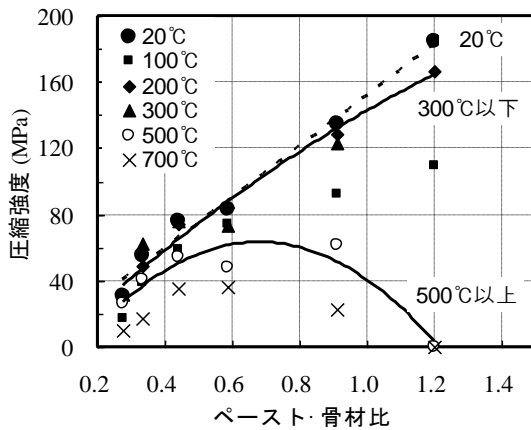


図-16 ペースト・骨材比と圧縮強度の関係

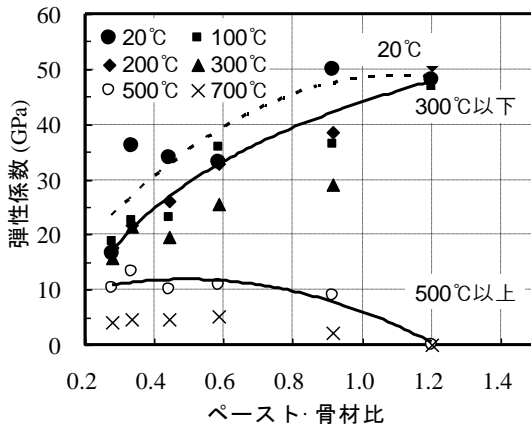


図-17 ペースト・骨材比と弾性係数の関係

4. まとめ

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を検討した結果は以下の通りである。

- 1) 本研究の範囲ではコンクリートの圧縮強度発現とペースト・骨材比との関係から 500°C以上になるとペースト・骨材比が大きくなるほど強度低下が明確になる現象を確認し、特に 180MPa 超高強度コンクリートでは 1°C/min. の低速加熱でも 300°C程度で破壊が生じた。

- 2) 80MPa の場合、加熱温度が高くなるほど耐力が徐々に低下する軟性破壊の傾向が見られたが、130,180MPa で脆性破壊現象が現れた。
- 3) 圧縮強度が大きくなるほど 500°C以上で圧縮強度が低下する割合が大きくなるが、0.25 f_c の荷重が載荷された場合には熱膨張拘束による圧縮強度と弾性係数の低下割合が小さくなった。
- 4) コンクリートの熱力学的性質は骨材の膨張とペーストの収縮挙動による影響が重要な要因と考えられ、特骨材よりセメントペースト量の多い超高強度コンクリートの場合は、熱による収縮が大きくなってコンクリートの力学特性が比較的急に低下する傾向が見られた。

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。また、千葉大学の平島岳夫先生のご指導に感謝いたします。

参考文献

- 1) 崔景喆, 金圭庸, 朴奎衍, 金武漢: 急速と低速加熱によるコンクリートの内部水蒸気圧力及び爆裂特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp. 1165~1170, 2013
- 2) Kalifa P and Menneteau FD and Quenard D.: Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1915~1927, 2000
- 3) Phan, L. T. and Carino, N. J.: Code Provisions for High Strength Concrete Strength-Temperature Relationships at Elevated Temperatures, Materials and Structures, Vol. 36, No. 256, pp. 91~98, 2003
- 4) Comite Europeen de Normalisation (CEN): Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: Structural Fire Design, CEN/TC 250/SC 2, pp. 59~62, 1993
- 5) KD.Hertz: Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, Vol. 38, pp. 103~116, 2003
- 6) 金武漢, 金圭庸, 金榮善, 設計荷重事前載荷及び熱伝達加熱方式による高強度コンクリートの高温特性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp. 55~60, 2008