

論文 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

尹敏浩*1・金圭庸*2・小澤満津雄*3・兪在哲*4

要旨: 火災時のコンクリート構造物はペーストの収縮と骨材の熱膨張によるひび割れによって高温力学特性が低下する。また、垂直部材は水平部材の膨張によるモーメント荷重を受けてせん断破壊が発生する。従って、粗骨材の熱的特性によるコンクリートのひずみが火災時の構造物の挙動に及ぼす影響が大きい。そこで、本研究では密度が異なる花崗岩系、クレール系、クレールアッシュ系の粗骨材を用いたコンクリートの高温力学特性を評価した。その結果、骨材内部の空隙が多い軽量骨材コンクリートが普通骨材コンクリートに比べて高温残存圧縮強度は大きく、熱膨張ひずみが小さかった。高温クリープひずみは載荷量によって骨材毎に相違であった。
キーワード: 人工軽量骨材, 骨材密度, 熱膨張ひずみ, 全ひずみ, 高温力学特性, 残存圧縮強度

1. はじめに

図-1 に火災時にコンクリート構造物の生じるモーメント発生挙動の模式図を示す。図のように、梁やスラブなどの水平部材の熱膨張により大きなモーメントが作用しせん断破壊の生じることが報告されている^{1,2)}。

加えて、コンクリート自体は加熱によりセメントマトリックスと粗骨材の熱膨張ひずみの差によって内部にひび割れが発生し強度低下を生ずると考えられる。特に、高温時の粗骨材のひずみ特性は火災時のコンクリート構造物の安定性に大きな影響を及ぼす³⁾。

これに対して既往の研究では花崗岩系粗骨材より熱膨張係数が小さい人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートの火災時の挙動について検討したものがあ⁴⁾。

本研究では密度の異なる3種類の粗骨材(花崗岩系、クレール系、クレールアッシュ系)を用いたコンクリートを対象として高温加熱載荷試験を実施しコンクリートの高温時力学特性を評価した。検討項目は応力-ひずみ、高温圧縮強度、熱膨張ひずみ、高温クリープとした。

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査

表-1, 2 に本研究の実験計画及びコンクリートの調査を示す。W/B は普通骨材コンクリートが 35%とし、軽量骨材コンクリートは 33%とした。設計強度 60MPa を目標として、加熱試験時の圧縮強度は普通骨材(NW)コンクリートが 68MPa, 軽量骨材(CL)コンクリートが 62MPa, 軽量骨材(CA)コンクリートが 69MPa を示した。

載荷条件は無載荷と常温圧縮応力の 20%及び 40%とした。加熱温度は 20, 100, 200, 300, 500 及び 700°C を目標とした。目標温度での応力-ひずみ関係と圧縮強度及

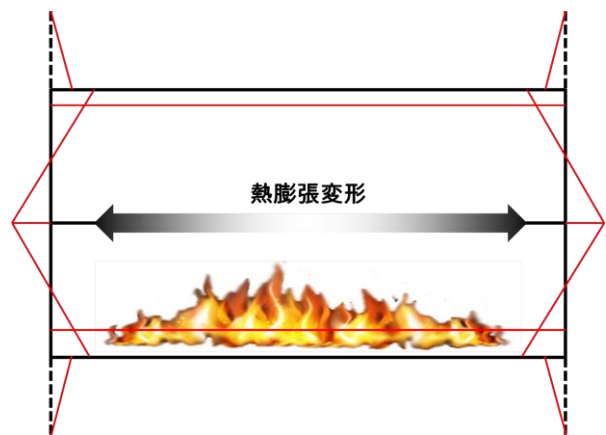


図-1 火災時の構造物のモーメント発生モード図

表-1 実験計画

ID	骨材種類	事前載荷 (xf _{cu})	目標温度 (°C)	評価項目
NW	花崗岩	0.0 0.2 0.4	20	<ul style="list-style-type: none"> • 応力-ひずみ関係 • 高温圧縮強度 • 熱膨張ひずみ • 全ひずみ • 高温クリープ
CL	クレール		100	
CA	クレールアッシュ		200	
			300	
			500	
			700	

表-2 コンクリートの調査







ID	W/B (%)	F _{cu} (MPa)	Air (%)	S/a (%)	単位重量 (kg/m ³)				
					W	C	SF	S	G
NW	35	68	4	40	165	470	—	692	1071
CL	33	62	±		155	432	38	687	720
CA	33	69	2		155	432	38	687	676

*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 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 ³ , 比表面積：3,630cm ² /g	
細骨材		海砂 密度：2.64g/cm ³ , 吸水率：1.03%	
粗骨材	普通	花崗岩碎石 最大寸法：20mm, 密度：2.65g/cm ³ , 吸水率：0.97%	
	軽量	クレール	クレール系人工軽量骨材 最大寸法：13mm, 密度：1.79g/cm ³ , 吸水率：17.42%
		クレールアッシュ	クレールアッシュ系人工軽量骨材 最大寸法：13mm, 密度：1.68g/cm ³ , 吸水率：15.27%
シリカフューム		密度：2.23g/cm ³ , 比表面積：200,000cm ² /g	
混和剤		ポリカルボン酸系高性能減水剤	

表-4 使用した粗骨材の断面形状

骨材種類	断面形状	
	骨材	コンクリート中
花崗岩		
クレール		
クレールアッシュ		

び弾性係数を測定した。また、加熱中の熱膨張ひずみと温度維持区間での高温クリープひずみを測定した。

2.2 使用材料

表-3 に本研究で使用した材料の物理的性質を示した。普通骨材(NW)は花崗岩碎石を用いて、軽量骨材はクレール

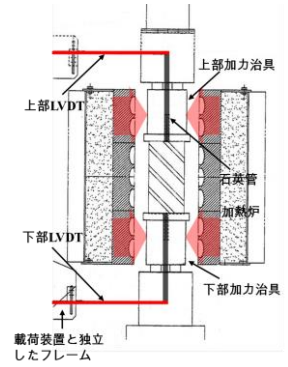


図-2 载荷及び加熱装置

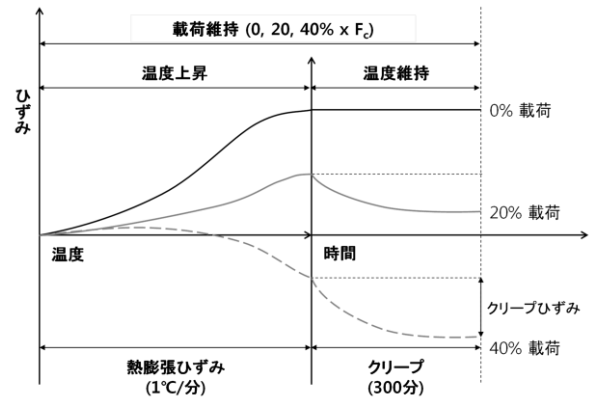


図-3 コンクリートのひずみ特性の評価方法

系とクレールアッシュ系を使用した。クレールアッシュ系はクレール系にコールアッシュ系を添加して強度と吸水率を改善したものである。軽量骨材は pre-wetting して用いた。表-4 に粗骨材の断面形状を示す。軽量骨材は焼成過程で形成された多数の気泡が骨材内部に分布していることが分かる。また、軽量骨材とマトリクス界面を観察すると軽量骨材の表面からある深さまでセメントペーストが浸透していることが分かる。これは軽量骨材の空隙率が大きいことに起因すると考えられる。

2.3 試験方法

(1) 加熱装置及び方法

本研究で使用した実験装置を図-2 に示す。本試験装置は载荷と加熱を同時に行うために 2000kN 級载荷装置に電気加熱炉を設けた。また、加熱中の試験体のひずみは上・下部加力治具の中心に設置したφ10mm の石英管と外部に設置した変位計を用いて測定した。養生は 28 日間標準養生した後 300 日間 20±2°C, R.H.50±5% の恒温恒湿条件で気中養生した。加熱前の含水率は 2.5~3.0% として測定された。

加熱は間接加熱方式を採用した。すなわち、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・下部の加力治具を加熱し試験体に熱を伝達する方法である。加熱速度は RILEM で提案する 1°C/min. で加熱した。

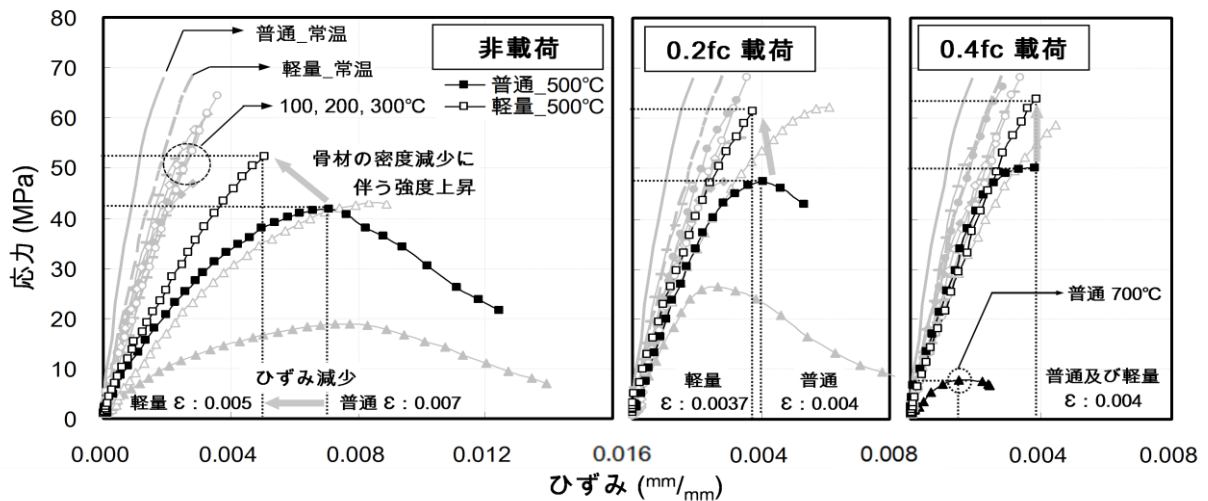


図-4 加熱温度 500°Cでの荷荷及び粗骨材種類に伴う応力-ひずみ関係曲線

特に、試験体の内・外部の温度差を 5°C 以内にするため加熱初期と目標温度に到達する 50°C 前の領域では加熱速度を 0.77°C/min. とした⁵⁾。

(2) ひずみ評価方法

図-3 に加熱・荷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。熱膨張ひずみは無荷荷・加熱状態で計測したひずみと定義し加熱中に生じるひずみを測定した。全ひずみは加熱・荷荷状態のひずみと定義した。荷荷応力は常温圧縮応力の 20% 及び 40% とした。高温クリープひずみの計測では常温圧縮応力の 20% 及び 40% を荷荷後目標温度まで加熱し、目標温度到達時間から 300 分間のひずみ変化を高温クリープひずみと定義した。

3. 実験結果及び考察

3.1 応力-ひずみ曲線

図-4 に各加熱温度で初期荷荷の有無が応力-ひずみ関係に与える影響を示す。骨材の種類は NW と CA である。ここでは 500°C と 700°C に注目して議論する。

加熱温度 500°C において普通骨材(NW)コンクリートと軽量骨材(CA)コンクリートの圧縮強度と最大ひずみはそれぞれ 43MPa と 7.0×10^{-3} 及び 52MPa と 5.0×10^{-3} であった。軽量骨材(CA)コンクリートは普通骨材(NW)コンクリートと比較して強度低下率及び最大ひずみ量の増加量も小さかった。

荷荷応力比 0.2 と 0.4 として初期荷荷した場合、荷荷により熱膨張ひずみが抑制されるため内部ひび割れ発生が低減され高温時の圧縮強度が上昇して最大ひずみが骨材種類に関係なく 3.7×10^{-3} ~ 4.0×10^{-3} で抑えられた。

特に、軽量骨材(CA)コンクリートは荷荷応力比 0.4 の場合でも高温時の圧縮強度が常温時の圧縮強度とほぼ同等であったが普通骨材(NW)コンクリートの場合、高温時の強度低下が相対的に大きくなった。特に、700°C 加熱では 10% 程度に強度が低下した。

3.2 高温圧縮強度

図-5 に骨材の種類を変えたコンクリートの残存圧縮強度比と加熱温度の関係を示す。普通骨材(NW)コンクリートの場合、100°C 加熱で残存強度比は約 65% に低下したが 300°C 加熱での残存強度比は約 90% となった⁶⁾。

300°C 以後加熱温度が高くなると圧縮強度は低下し 700°C で残存強度は 27% となった。一方、軽量骨材コンクリート(CL, CA)の場合、300°C までは普通骨材(NW)コンクリートと類似な傾向を示したが 700°C で軽量骨材(CL)コンクリートは平均 60%、軽量骨材(CA)コンクリートは平均 80% で普通骨材(NW)コンクリートよりも残存率が高い結果となった。

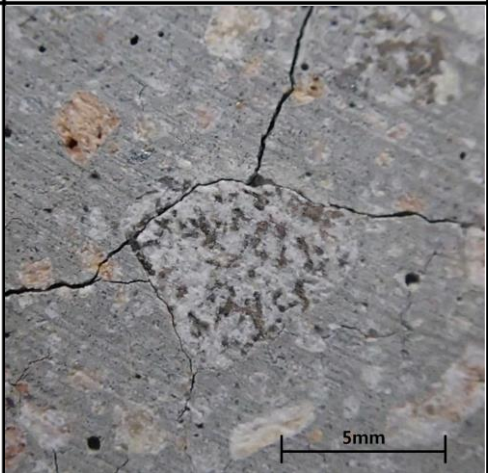
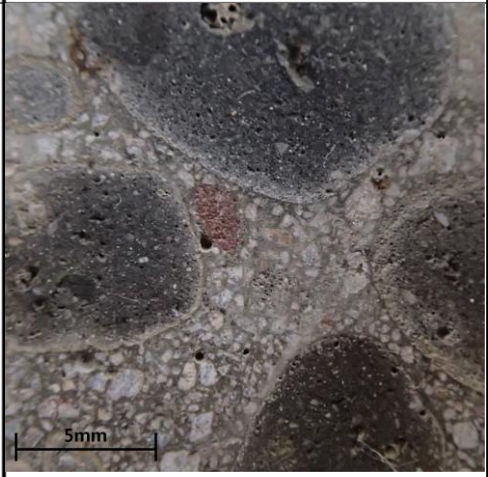
図-6 に 700°C の圧縮強度残存率と粗骨材密度の関係を示す。粗骨材密度が大きいほど残存率が小さくなり本研究範囲で残存圧縮強度と骨材密度に相関関係が認められた。なお、初期荷荷(荷荷応力比: 0.2, 0.4)を行った場合、軽量骨材(CL, CA)コンクリートは荷荷による収縮ひずみにより高温圧縮強度は大きくなった⁷⁾。

一方、普通骨材(NW)コンクリートは初期荷荷で荷荷応力比が 0.2 の時に圧縮強度がやや大きくなったが、荷荷応力比が 0.4 の場合、残存強度比は約 10% まで低下した。

表-5 に 700°C 加熱後の普通骨材(NW)コンクリートと軽量骨材(CL, CA)コンクリートの界面形状を示す。普通骨材(NW)コンクリートは骨材とマトリックスの間にひび割れが確認できる。一方、軽量骨材(CL, CA)コンクリートの場合、ひび割れは確認できなかった。

高温時にコンクリートが強度低下する原因は Interfacial Transition Zone (ITZ) のひび割れであることが報告されている⁸⁾。軽量骨材(CL, CA)コンクリートは骨材の空隙により熱膨張応力が小さく ITZ でひび割れが発生しないため圧縮強度低下率が小さかったと考えられる⁸⁾。普通骨材(NW)コンクリートは ITZ で多くのひび割れが生じたため圧縮強度低下率が大きかったと考えられる。

表-5 700°C加熱後骨材の種類による骨材界面形状

骨材種類	形状
普通	
軽量	

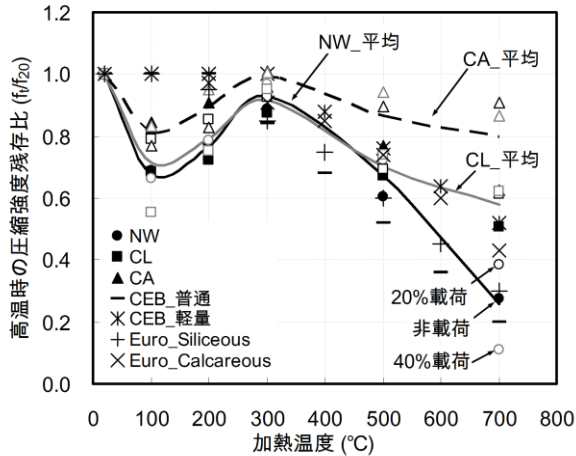


図-5 粗骨材種類別高温圧縮強度残存比

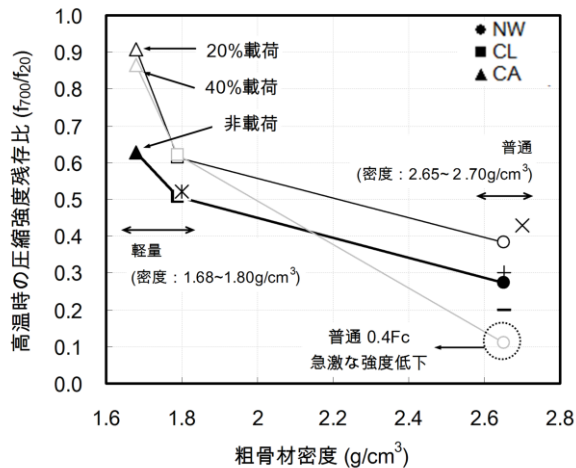


図-6 粗骨材密度と700°C高温圧縮強度残存比

3.3 熱膨張ひずみ及び全ひずみ

図-7 に骨材の種類を変えたコンクリートの熱膨張ひずみと加熱温度との関係を示す。無荷荷の場合、普通骨材(NW)コンクリートは温度が高くなるほど熱膨張ひずみが増加した。特に、500~600°Cの領域では熱膨張ひずみの増加量は顕著であった。軽量骨材(CL)コンクリートは普通骨材(NW)コンクリートより熱膨張ひずみは小さく、骨材の密度がより小さい軽量骨材(CA)コンクリートは熱膨張ひずみが最も小さかった。

また、初期荷荷で荷荷応力比が 0.4 の場合、高温によりコンクリートの耐力が低下し、熱膨張応力より荷荷による応力が大きいため、急激な収縮ひずみを示すと考えられる。

次に、図-8 に 700°Cにおける圧縮強度時のひずみと荷荷応力比との関係を示す。無荷荷の場合、粗骨材の密度が大きい普通骨材(NW)コンクリートの熱膨張ひずみが 1.1×10^{-2} と最も大きく、密度が小さい軽量骨材(CL, CA)コンクリートの熱膨張ひずみは 5.0×10^{-3} であり普通

骨材(NW)コンクリートの半分程度であった。

荷荷応力比が 0.2 の場合、骨材の種類に関わらず無荷荷の場合と比較し荷荷による熱膨張ひずみが拘束され $-3.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ の範囲で小さくなった。荷荷応力比が 0.4 の場合、荷荷応力比 0.2 の場合よりもさらにひずみが拘束され、普通骨材(NW)コンクリートは強度も著しく低下した。

無荷荷の場合、骨材の密度によって熱膨張ひずみに差が生じる結果となった。しかし、荷荷応力比が大きくなると熱膨張ひずみに対する骨材密度の影響は小さくなることがわかった。

3.4 短期高温クリープ

図-9 に普通骨材(NW)コンクリートと軽量骨材(CA)コンクリートにおける各温度のクリープひずみと荷荷応力比との関係を示す。普通骨材(NW)コンクリートにおいて荷荷応力比が 0.2 の場合、温度が 100~300°Cの範囲のクリープひずみは -3.5×10^{-4} となった。一方、加熱温度が 500 と 700°C の場合のクリープひずみは -1.4×10^{-3} となり約 4.2 倍程度大きくなった。

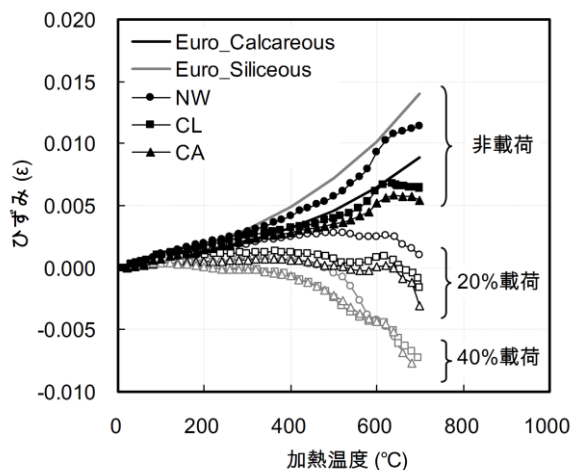


図-7 粗骨材種類別コンクリートの熱膨張ひずみ

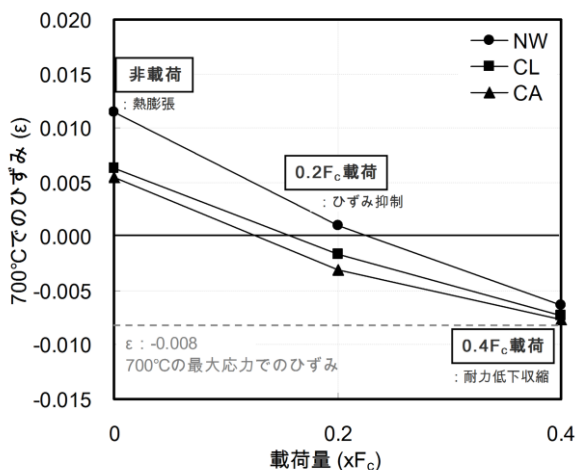
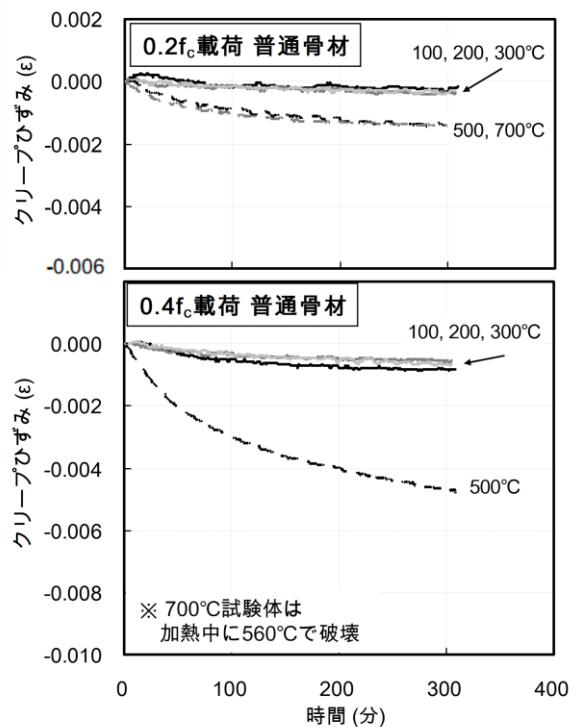


図-8 700°Cにおける高温ひずみと荷重比

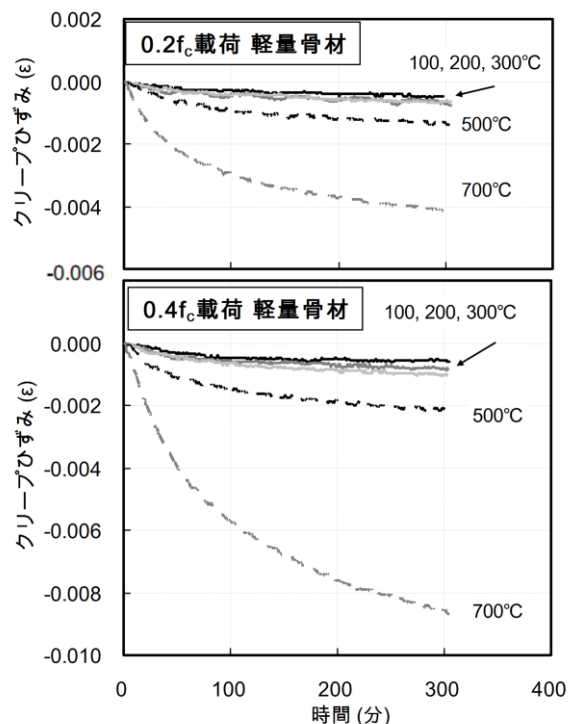
軽量骨材(CA)コンクリートは 500°Cまで普通骨材(NW)コンクリートと類似の結果となった。しかし、700°Cでは軽量骨材(CA)コンクリートの短期高温クリープひずみが普通骨材(NW)コンクリートの約2.9倍位大きくなった。

次に、荷重応力比が 0.4 の場合、普通骨材(NW)コンクリート、軽量骨材(CA)コンクリートともに骨材種類に関わらず 100~300°Cでのクリープひずみは荷重応力比 0.2 の場合よりも同等またはやや大きくなった。しかし 500°C以上ではクリープひずみは大幅に増加した。

すなわち、普通骨材(NW)コンクリートと軽量骨材(CA)コンクリートはそれぞれ 4.8×10^{-3} と 2.1×10^{-3} となり普通骨材(NW)コンクリートは軽量骨材(CA)コンクリートの約 2.3 倍位大きくなった。また、普通骨材(NW)コンクリートにおいて 700°C加熱試験体は加熱温度が約 560°Cで崩壊したためクリープひずみ測定が出来なかったが軽量骨材(CA)コンクリートは -8.6×10^{-3} の値を示した。



(a) 普通骨材コンクリート



(b) 軽量骨材コンクリート

図-9 粗骨材種類別高温クリープひずみ

既往の知見では骨材の密度が小さい軽量骨材(CA)コンクリートの方が普通骨材(NW)コンクリートよりクリープひずみは大きくなるとされている⁹⁾。しかし、今回の試験では荷重応力比が 0.4 の場合、500 と 700°C加熱

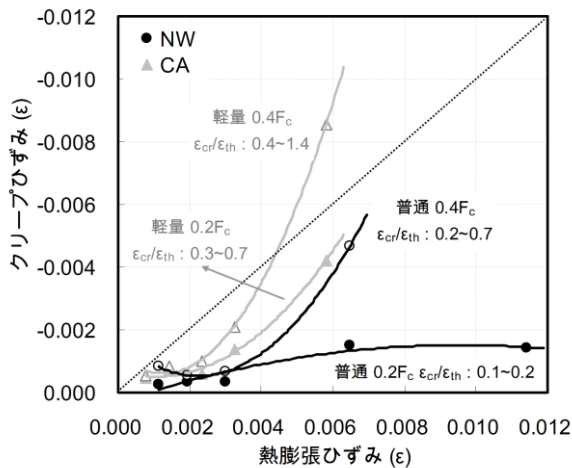


図-10 粗骨材種類別高温クリープひずみと熱膨張ひずみの関係

では普通骨材(NW)コンクリートの耐力が急な低下するため軽量骨材(CA)コンクリートよりクリープひずみが大きくなったと考えられる。

図-10 に普通骨材(NW)コンクリートと軽量骨材(CA)コンクリートのクリープひずみと熱膨張ひずみとの関係を示す。載荷応力比が0.2の場合、普通骨材(NW)コンクリートは熱膨張ひずみよりクリープひずみが小さくなりクリープひずみと熱膨張ひずみの比($\epsilon_{cr}/\epsilon_{th}$)は0.1~0.2を示した。しかし、軽量骨材(CA)コンクリートの $\epsilon_{cr}/\epsilon_{th}$ は0.3~0.7であり普通骨材(NW)コンクリートと比較して同じ熱膨張ひずみでもクリープひずみが大きくなる傾向を示した。

4. まとめ

粗骨材の種類を変えたコンクリートを対象に高温時の力学的特性を評価した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 軽量骨材(CL, CA)コンクリートは骨材内部の空隙のためにコンクリートの熱膨張応力が緩和され普通骨材(NW)コンクリートよりも高温時の圧縮強度低下が小さかった。普通骨材(NW)コンクリートは高温時に骨材の膨張ひび割れが主な原因となり力学特性が大幅に低下した。
- (2) コンクリートの残存圧縮強度比と加熱温度の関係について軽量骨材(CL, CA)コンクリートの方が普通骨材(NW)コンクリートよりも強度低下率が小さかった。
- (3) 圧縮強度残存率と粗骨材密度の関係について700℃で粗骨材の密度が大きいほど残存率が小さくなり、本研究の範囲で残存強度と骨材密度に相関関係が認められた。

- (4) 軽量骨材(CL, CA)コンクリートは普通骨材(NW)コンクリートより高温時の圧縮強度低下率と熱膨張ひずみが小さく火災時に安全性が高いと考えられる。

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。

参考文献

- 1) Charles G Culver and Robert A Crist, Fire Performance of Military Record Center, ACI Journal, 1975.4
- 2) 吳昌熙, “鉄筋コンクリート造火災建物の火害とその補修に関する研究”, 博士論文(東京工業大学), 1985, 7
- 3) “Light Concrete LLC”, High-Strength Structural Light Weight Concrete, 2003
- 4) A. Al-Sibahy, R. Edwards, Thermal behaviour of novel lightweight concrete at ambient and elevated temperatures: Experimental, modelling and parametric studies, Construction and Building Materials, 31, 2012, pp.174~187
- 5) RILEM TC 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,” Materials and Structures, Vol. 33, 2000, pp.6~13.
- 6) Harada T., Takeda J., Yamane S. and Furumura F. Strength, elasticity and Thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. ACI Special Publication, 1972, pp.377~406.
- 7) Hertz, K. D., “Concrete Strength for Fire Safety Design,” Magazine of Concrete Research, Vol. 57, No. 8, 2005, pp.445~453.
- 8) O. Andic-Cakir, S. Hizal, Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete, Construction and Building Materials, 34, 2012, pp.575~583
- 9) M. Lopez, Lawrence F. K., Kimberly E. K., Characterization of elastic and time-dependent deformations in high performance lightweight concrete by image analysis, Cement and Concrete Research, 39, 2009, pp.610~619