論文 荷重条件と高温における高強度軽量コンクリートの力学的特性評価

李 泰圭 *1· 金 圭庸 *2·金 榮善 *1·金 武漢 *3

要旨:本研究は普通骨材及び軽量骨材コンクリートの高温における力学的特性を比較検討するために,目標強度 60MPa 級コンクリートに対して高温による強度低下,熱膨張ひずみ,高温でのクリープひずみなどの性状を評価したもので ある。コンクリート試験体に載荷した状態で,高温下における熱膨張ひずみが小さい軽量骨材コンクリートは普通骨 材コンクリートに比べて耐力低下が相対的に緩慢となった。また,各載荷条件下における軽量骨材コンクリートの場 合,普通骨材コンクリートより高温クリープひずみが小さく,収縮速度が遅い傾向を示した。 キーワード: 軽量骨材,高強度コンクリート,荷重載荷,力学的特性,収縮速度

1. はじめに

軽量骨材を用いた高強度軽量コンクリートは強度が 高く耐久的に優れた構造材料で,構造体の重量減少と断 熱性能が優れた長所を生かして,構造用コンクリートと して普及させるために各分野で研究が進められてきた。

また,社会的に要求されている超高層構造物の建設時 の耐火性能設計において,高強度軽量コンクリートの 材料力学的高温特性の評価は構造物の安全性を確保す るために必要不可欠である¹⁾。

本研究では軽量骨材を使用した高強度軽量コンクリートに対し、荷重載荷の状態で高温加熱したコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、最大応力時のひずみ、熱膨張ひずみなどの力学的特性を評価した。また、普通骨材を使用した高強度コンクリートの高温力学特性と比べ、高温における高強度軽量コンクリートの高温力学特性を検討・分析したものてある。

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画

本研究の実験計画は表-1 に示す。普通骨材及び軽量 骨材を用いた高強度コンクリートの高温における力学 的特性を評価するため,目標強度 60MPa に対してW/B を 35,33%で設定した。また,各載荷条件での高温力学 特性に及ぼす影響を評価するため常温時の圧縮強度 (20℃)に対し 0.0, 0.2, 0.4fckを載荷し,各々の目標温度で の圧縮強度,ヤング係数及び熱膨張ひずみを評価した。

2.2 使用材料

本研究に使用した材料を表-2 に、粗骨材の化学組成 を 表-3 に示す。普通粗骨材は花崗岩砕石とし密度 2.65 g/cm³,吸水率 0.8%及び最大寸法 20mmであり、軽量粗 骨材は粘土と石炭灰を焼成したもので密度 1.68g/cm³,吸 水率 15.3%,最大寸法 13mm である。また、細骨材は密 度 2.64 g/cm³,吸水率 1.03%の海砂を使用した。

*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	副教授	工博	(正会員)
*3	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

試験体 ID	目標 強度 (MPa)	W/B (%)	載荷 条件 ¹⁾ (*· f _{ck})	目標温度 (℃)	骨材 種類	試験項目
NS60		35	0.0	20, 100	普通	圧縮強度 (MPa) ²⁾ ヤング係数(GPa)
LS60	60	33	0. 2 0. 4	200, 300 500, 700	軽量	応力 - ひずみ 熱膨張ひずみ

f_{ck}: 常温時の圧縮強度(20℃)に対する載荷

2) fc:目標温度での圧縮強度

表-2 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%)						
普通粗骨材	花崗岩砕石 (最大寸法:20mm,密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:0.8%)						
軽量粗骨材	clay + coal ash 系軽量骨材(最大寸法:13mm, 密度:1.68 g/cm ³ , 吸水率:15.3%)						
シリカフューム	密度:2.2 g/cm ³ , 比表面積: 200,000cm ² /g						
混和剤	高性能減水剤(ナフタレン系)						

表 -3 粗骨材の化学組成

種類	SiO ₂	A1202	Fe_2O_3	Ca0	MgO	Na ₂ 0	K_2O
普通粗骨材	72.80	13.60	3.10	1.50	0.70	1.50	1.20
軽量粗骨材	72.00	15.50	1.80	2.30	0.10	4.42	3.10







図-2 高温での力学的特性試験方法

表-4 コンクリートの調合

試験体	$f_{\rm ck}$	W/B s/a	Air	単位質量(kg/m ³)					
ID	(MPa)	(%)	(%)	(%)	W	С	SF	S	G
NS60 ¹⁾	60	35	46	4±2	176	344	-	793	929
LS60 ²⁾		33	40		155	432	38	687	1066

NS60:普通粗骨材を使用した f_{ck}60MPa コンクリート
LS60:軽量粗骨材を使用した f_{ck}60MPa コンクリート

2.3 コンクリートの調合及び試験体の作製方法

本研究に使用した調合を表-2 に示すように,普通と 軽量コンクリートの目標強度 60MPa の発現を考慮し,結 合材としてシリカフュームを用い,試し練りによって水 結合材比は骨材ごとに決定した。

高温時の力学的特性評価のための試験体を Ø100×200 mm の寸法で作製した。試験体の養生は作製後約 24 時間 で脱型し,7 日間標準水中養生を行なった後,温度 20℃,



図-3 NS 60 及び LS 60 試験体の材齢と圧縮強度の関係

60%R.H.の恒温恒湿室内で材齢 180 日間の気乾養生を行った²⁾。また,圧縮強度用試験体の上下面処理にはコンクリート用研磨機を使用した。



(a) NS 60 試験体の相対圧縮強度(f_C/f_{CK}(20°C))



(b) LS 60 試験体の相対圧縮強度(f_C/f_{CK}(20°C))



2.4 載荷・加熱方法の概要

図-1(a)に本研究で使用した 載荷·加熱試験装置の全景及び加 熱炉の詳細図を示す。加熱炉は W450×L450×H450mmの寸法と し, Ø100×200mmのコンクリー ト円柱型試験体を載荷しながら 加熱を行なった。

試験体の加熱方法は、加熱炉の 上下部に設置した加力治具に電 気ヒーターにより熱を伝達する 間接加熱方法とした。加熱速度は 図-1(b)に示すような加熱曲線 に従ってコンクリートの熱伝達 が均等になるように 1.0℃/min の速度で加熱し,試験体の内外部

 $0.0 f_{ck}$ 0.2f_{ck} $0.4 f_{ck}$ 1.2 1.0 -0 f_{ck} (20 ℃) 9.0 ℃) ر ۳ 0.4 - NS 60 0.2 -D--- LS 60 0.0 100 300 500 700 100 300 500 700 100 300 500 700 0 Temperature (℃)



の温度差が 5℃以内となるように制御した ^{3),4),5)}。

高温での力学的特性を評価するための試験方法を図 -2 に示す。試験体の載荷は常温時の圧縮強度(20℃)に 対して0.0,0.2,0.4f_{ck}の3水準とし,目標温度到達後 に荷重を載荷し,目標温度が維持した状態で圧縮強度試 験を行った。圧縮強度は KS 及び JIS 規格に準じて材齢 180 日まで測定し,図-3 のように力学的特性評価を行 って目標強度 60MPa が発現されたことを確認した。

また,高温でのコンクリート試験体の熱膨張クリープ ひずみ(transient creep)は下部の冷却器の中心に熱 膨張係数の小さい石英管を通して,LVDT 変位計を設置す ることで測定し,(1)式により計算した⁶。

$$\varepsilon_{tr} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{th} - \varepsilon_{el} \tag{1}$$

ここで、 ε_{tr} : 熱膨張クリープひずみ(transient creep)

- ε tot : 全体ひずみ (total strain)
- ε_{th}:熱膨張ひずみ (thermal strain)
- ε_{el} : 弾性ひずみ(elastic strain)

3. 実験結果及び考察

3.1 非載荷・加熱試験におけるコンクリートの圧縮強度

高温におけるNS60及びLS60試験体の圧縮強度変化を 図-4に示す。NS60及びLS60試験体に対して,高温下 での圧縮強度低下は 300℃以後の温度において一般的な CEB モデルとほぼ同様の傾向であった。CEB モデルは 普通コンクリートに対して規定されており,100~200℃ の温度範囲における高強度コンクリートの状態変化に よる圧縮強度の実験値と異なる傾向を示す^{7,8}。

また、圧縮強度の低下は300~700℃の温度範囲では、



図-6 荷重と高温におけるコンクリート試験体の応力 - ひずみ曲線

高温下における圧縮強度 CEB モデル式に比べて強度の 低下率が少し上回り,700℃における LS60 試験体は NS60 試験体に比べて約2倍高い60%の圧縮強度比を示した。 3.2 載荷・加熱試験におけるコンクリートの圧縮強度

載荷・加熱試験におけるコンクリートの圧縮強度の結 果を図-5に示す。載荷・加熱試験におけるコンクリー ト試験体の圧縮強度は、非載荷・加熱試験のコンクリー トの圧縮強度に比べて緩慢に低下する傾向が見られた。 これは、高温において目標強度に対し20,40%の載荷・ 加熱試験の試験体が熱膨張ひずみにより抑えられ、相対 圧縮強度が大きくなったためと考えられる。

いずれの載荷条件でも加熱温度 300℃で強度上昇が最 も高くなり、その後 NS60 の圧縮強度は LS60 より急激 に低下した。また、目標強度の40%で載荷した場合、700℃ では加熱中に圧縮破壊が生じて測定不能となったが、同 じ条件で LS60 は相対強度が約 90%であった。

3.3 載荷・加熱試験における応力-ひずみ挙動

高温下で載荷したコンクリートの応力-ひずみ曲線 を図-6 に示す。300℃までは 20℃常温の応力-ひずみ の挙動と同様であったが、500℃以上からは応力が急激 に低下し始め最大応力時のひずみが大きくなった。

一方、目標強度に対して載荷荷重が大きくなるほど加

(a) 破壊性状

(b) ひび割れパターン(×100)

写真-1LS 60 試験体の試験体の破壊状況

熱による熱膨張ひずみが抑えられ,その結果最大応力は 大きくなりひずみは小さくなる傾向が見られた。また, LS60 試験体の場合では 500~700℃の高温でも NS 60 試 験体に比べて耐力が急激に低下しなかった。

写真-1に700℃の高温でLS 60 試験体の圧縮破壊状況 を示す。高温におる NS60 試験体の耐力低下パターンと 異なり, LS60 試験体は骨材の破壊によって耐力が低下す る傾向を示した。

(b) LS 60 試験体の相対ヤング係数

3.4 高温でのヤング係数および最大応力でのひずみ

載荷・加熱試験における NS60 及び LS60 試験体のヤン グ係数を図-7 に示す。高温における NS60 試験 体のヤ ング係数の低下は CEB モデル式とほぼ同じ水準となっ たが、LS60 試験体のヤング係数は CEB モデル式に対し て下回る傾向を示した。これは LS60 試験体の高温によ る圧縮強度の性状とは異なり、LS60 の最大応力でのひず みが大きくなったことに起因すると考えられる。

載荷・加熱試験におけるコンクリートのヤング係数は, 骨材種類に関わらず載荷しなかった場合より上回る傾 向を示した。

高温下におけるコンクリート試験体の最大応力ひず みを 図-8に示す。 載荷・加熱試験の場合,500℃以上 の高温において、NS60 試験体は耐力低下し破壊が生じ たが,LS60 試験体は 図-8 に示したように耐力低下す ることなく最大応力でのひずみが大きくなった。

(b) 熱膨張クリープひずみ(transient creep)

図-9 荷重と高温におけるコンクリート試験体の ひずみ特性

3.5 高温での熱膨張ひずみ及び熱膨張クリープひずみ

図-9(a)に温度による LS60 及び NS60 試験体の熱膨張 ひずみ及び全体ひずみを示す。熱膨張ひずみは LS60 試 験体が NS60 試験体に比べて約 50%と小さく, コンクリ ートの熱膨張が軽量骨材によって抑えられたと考えら れる。

一方,載荷・加熱試験の場合,NS60 試験体は荷重に よって熱膨張ひずみが抑制され,500℃以上の高温にな るほど耐力低下による収縮ひずみが生じて最終的には 破壊に至った。

図-9(b)に載荷・加熱試験のコンクリート試験体の熱 膨張クリープひずみ(transient creep)を示す。500℃以後か らは、LS60 試験体が NS60 試験体より熱膨張クリープひ ずみが小さくなり、軽量コンクリートの熱膨張クリープ による耐力低下が相対的に緩慢になった。

4. まとめ

荷重条件と高温における高強度軽量コンクリートの 力学的特性を評価した結果をまとめると以下の通りで ある。

- (1) 目標強度 60MPa の普通及び軽量コンクリートにおい て,高温下での圧縮強度低下は CEB モデル式とほぼ 類似な傾向を示したが,荷重を載荷した軽量コンク リートの高温による強度低下は小さくなった。
- (2) 加熱温度が高くなるほどコンクリート試験体の最大応力でのひずみは大きくなり、また荷重を載荷した場合の最大応力でのひずみについては軽量骨材の方が普通骨材より大きくなった。
- (3) 普通コンクリートのヤング係数は CEB モデル式に比 べて全体的にほぼ同様の傾向を示したが,高温下に おける軽量コンクリートのヤング係数は圧縮強度の 傾向とは異なり, CEB モデル式に比べて低い値を示 した。
- (4) コンクリートの熱膨張ひずみと熱膨張クリープひずみは、軽量コンクリートの方が普通コンクリートより小さくなり、耐力低下が緩慢となった。これより高温下のクリープ応力により引き起こされる軽量コンクリートの破壊挙動は普通コンクリートと異なることを確認した。

謝辞

本研究は BK(Brain Korea)21-2 段階事業の支援を受け て得られた研究成果の一部であり,光亜科学工業(株)と 共同作製した加熱炉によって行なった研究としてここ に感謝の意を表します。 参考文献

- Gyuyong Kim, Youngsun Kim, Taegyu Lee : Compressive strength of Lightweight High-Strength Concrete Subjected to High Temperatures, Tenth ACI International conference on recent advances in concrete technology and sustainability issues, Seville, Spain, 2009.10
- RILEM Technical Committee : Compressive strength for service and accident conditions, Materials and Structures, pp.410-414, 1995
- 3) 金圭庸,金武漢,金榮善,李昇勳: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報告集 pp.55-60,2008.7
- 4) 平島岳夫,常世田昌壽,豊田康二,山下平祐,篠原 幸一,上杉英樹:高温加熱を受けるコンクリートの 力学的特性に関する実験結果の比較,日本建築会大 会学術講演梗概集,pp.135~137, 2003.9
- 5) 豊田康二,平島岳夫,上杉英樹:超高強度コンクリ ートの高温下における力学的特性に関する実験的 研究(その1,2),日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.169~172, 2003.9
- RILEM Technical Committee : Transient creep for service and accident conditions, Materials and Structures, pp.290-295, 1998
- Schneider U.. Behaviour of concrete at high tempera tures. Deutscher Ausschus für Stahlbeton, Heft 337, 1982.
- Anderberg G.Y., Thelanderson S.. Stress and deforma tion of concrete at high temperatures. 2 Experimenta 1 investigation and material behaviour: Bulletin 54, Lund: Lund Institute of Technolgy; 1976.
- Comites Euro-International Du Beton, Fire design of concrete structures-in accordance with CEB/FIP Model code 90 (Final Draft), CEB Bulletin D'Information No.208, July 1991, Lausanne, Switzerland
- Abrams, M. S. : Compressive strength of Concrete at Temperatures to1600F, American Concrete Institute (ACI) SP25, Temperature and Concrete, Detroit, Michigan, 1971
- Kalifa P. et. al.: Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and concrete Research,, pp.1915-1927, No.30, 2000
- 12) 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,No.515, 1999.1, pp.163~168