

論文 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

金圭庸*¹・金榮善*²・金武漢*³・李昇勳*⁴

要旨: 本研究は 高強度コンクリートにおいて熱伝達方式と載荷条件による高温特性に関する研究の一環として、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の試験体に対し 20 及び 100 から 700°C まで 100°C 間隔で各々の加熱温度を上昇しながら 40, 60, 80MPa 級高強度コンクリートの材料力学的高温特性を評価したものである。加熱前に試験体の極限強度の 25%まで事前載荷後加熱を実施し、加熱中に荷重を維持しながら目標温度に到達した後高温状態で設計荷重事前載荷試験及び常温で 24 時間冷却した状態で設計荷重事前載荷残存強度試験を実施した。

キーワード: 高強度コンクリート, 高温特性, 設計荷重事前載荷試験, 残存強度試験, 熱伝達加熱方式

1. はじめに

従来は実物大実験により耐火性能を評価したが、この場合には時間と経費を費やしている。これに対して数値的な解析ではこれらを節約出来るが、数値的解析の際には構造設計条件を反映した高温特性の材料力学的データが必要である^{1),4),5)}。

コンクリートの高温特性の評価方法は常温下で設計荷重を載荷した後目標加熱温度まで加熱した状態で力学的特性を評価する設計荷重事前載荷試験、非載荷状態で目標加熱温度まで加熱した状態で力学的特性を評価する非載荷試験、設計荷重事前載荷試験と同じ方法で載荷と加熱を行った後常温まで自然冷却した状態で力学的特性を評価する設計荷重事前載荷残存強度試験のような 3 種類の方法がある^{1),2),7)}。

本研究では高強度コンクリートの力学的高温特性を評価するためにコンクリートの設計基準強度として 40, 60, 80MPa 、加熱方法として間接加熱方式において設定温度は常温の 20 及び 100 から 700°C までの間で 100°C 間隔、試験方法として設計荷重事前載荷試験及び残存強度試験によって圧縮強度及びヤング係数試験を行ってその結果を検討・分析したものである。

2. 載荷・加熱試験装置の概要

2.1 加熱装置(加熱炉)

本研究で使用した載荷・加熱試験装置全景及び加熱炉の詳細図を図-1 に示す。加熱装置は金属ヒーターを採用した電気加熱方式として加熱炉の上部と下部に位置した載荷治具を加熱し試験体まで熱を伝達する間接加熱方式を使用した。

加熱炉はコンクリート圧縮強度試験用寸法の $\phi 100 \times$

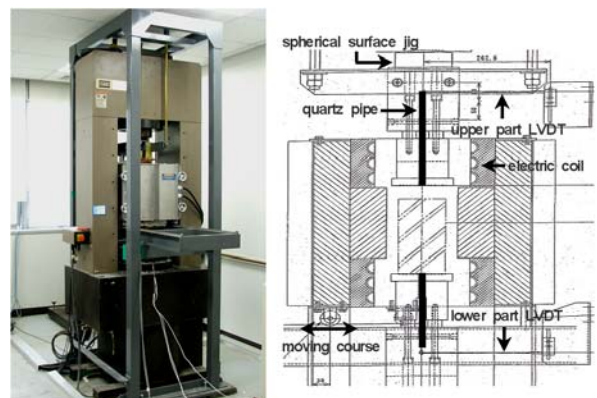


図-1 載荷・加熱試験装置全景及び詳細図

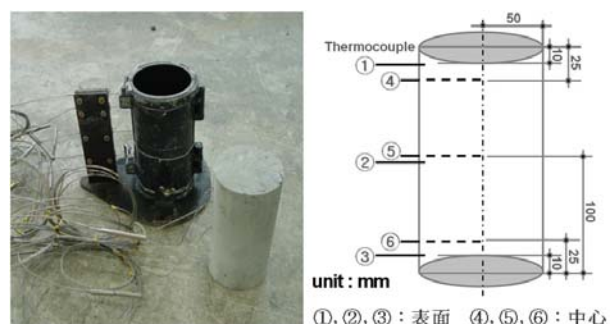


図-2 試験体型枠と作製方法

200mm まで加熱試験が出来るように作製し、電圧フィードバック型サイリスタレギュレーター(thyristor regulator)によって上下部の電気ヒーターが各々独立的に制御されるようにした。

2.2 温度測定・記録及び調節装置

高温特性評価用コンクリート試験体の型枠及び熱電対の埋込み位置を図-2 に示す。熱電対は試験体型枠の上中下に予め設置した後コンクリートを打設した。試験

*1 大韓民国 忠南大学校 建築学部 助教授 工博 (正会員)

*2 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

*3 大韓民国 忠南大学校 建築学部 教授 工博 (正会員)

*4 大韓民国 三星物産(株)建設部門 技術研究所, 首席研究員

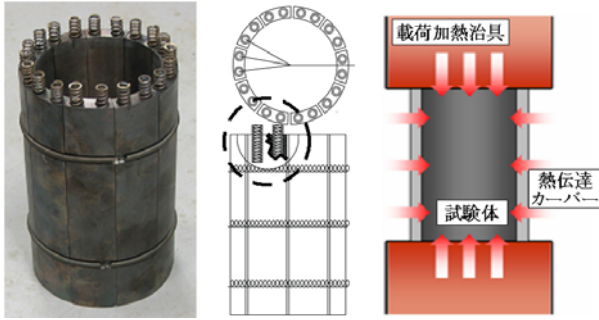


図-3 熱伝達カバー

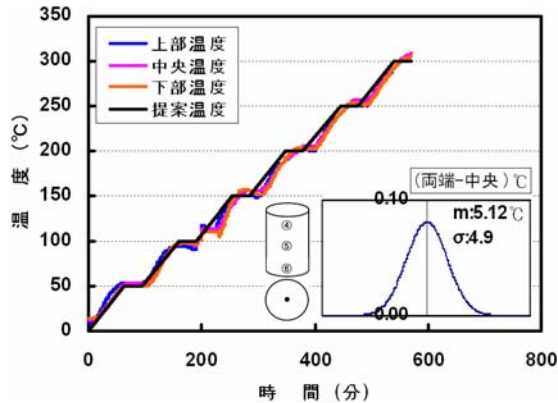


図-4 本研究の試験方法

(加熱速度:0.77°C/min, 加熱周期:50°C/cycle)

体の温度測定は試験体の上部面から 25mm, 100mm 及び 175mm の位置④, ⑤, ⑥で中心部温度を測った。また、コンクリート試験体の温度制御は試験体の上部面から 10mm, 100mm 及び 190mm の位置①, ②, ③で約 5~7mm の深さで穴をあけ熱電対を設置し試験体の温度を制御した。なお、試験体に設置したすべての熱電対の温度はデータロガーを使用して 1 秒毎に記録した。

2.3 荷重装置及び変位計

試験体の荷重は図-1 のように荷重容量 4,600kN の MTS 型荷重試験機を使用した。試験体の上部には加熱・荷重治具と水冷式冷却器を設置し、MTS 型試験機と加熱炉装置の連結部には試験体の偏心を防止するため球座を直線上に設けた。

試験体の変位は加熱・荷重治具の上下部及び冷却器中心にφ15mm の貫通穴を通じて LVDT 変位計に熱膨張係数が小さい石英管を設置して測定した。

2.4 熱伝達カバー

図-3 に荷重・加熱試験時上下部で伝達される熱効率を高めるために本研究で使用した熱伝達カバーを示す。熱伝達カバーは熱伝導係数が高い鋼材を採用して試験体の上下部に伝達される熱が試験体側面でも伝達できるようにして試験体全体に熱を均一に加熱するための装置である。

図-4 は本研究で使用した荷重・加熱試験装置の熱伝

表-1 実験計画

試験体 No.	W/B (%)	目標温度 (°C)	事前荷重	試験項目
R40	46	20, 100, 200, 300,	常温で最大圧縮強度の 25%	(残存)圧縮強度 (残存)ヤング係数 熱膨張ひずみ 加熱前後の長さ(R40) SEM 写真
S40		400, 500,		
S60	32	600, 700		
S80	25			

- 1) R40 : stressed residual strength test, 設計荷重事前荷重残存強度試験方法, f_{c_40} MPa
- 2) S : stressed test, 設計荷重事前荷重試験方法

表-2 使用な材料の物理的性質

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)
細骨材	海砂(密度: 2.61g/cm ³ , 吸水率: 0.97%)
粗骨材 (W/B46,32%)	花崗岩碎石(最大寸法:25mm, 密度:2.67g/cm ³ , 吸水率: 0.9%)
粗骨材 (W/B 25%)	花崗岩碎石(最大寸法:20mm, 密度:2.64g/cm ³ , 吸水率: 0.9%)
フライアッシュ	密度:2.2g/cm ³ , 比表面積: 3,090cm ² /g
シリカフューム	密度:2.2g/cm ³ , 比表面積: 230,000cm ² /g

達性能を評価した結果である。試験体の上中下部の温度曲線が中心部温度曲線と類似な傾向で現れ、試験体の上下部の温度と中心部の温度差は平均 5.12°C, 標準偏差 4.9 である¹⁾。

3. 実験計画及び方法

3.1 実験概要

高温を受ける高強度コンクリートの力学的特性変化を実験的に評価するための実験計画を表-1 に示す。高強度コンクリートの W/B は 46%, 32%, 25% の 3 水準と設定し、初期荷重水準は設計基準強度(f_c)の 25% に設定して表-1 に示す目標温度における温度別圧縮強度及びヤング係数試験を行い、W/B 46% の場合は残存圧縮強度及びヤング係数試験を追加して行った。

3.2 使用材料

本研究に使用した材料は表-2 に示したようにセメントは普通ポルトランドセメント、混和材は密度 2.20g/cm³ のフライアッシュ及びシリカヒュームを使用した。また、粗骨材は W/B46% と 32% の場合には最大寸法 25mm, W/B25% の場合には 20mm の花崗岩類碎石を使用し、細骨材は海砂を使用した。

3.3 コンクリートの調合

本実験に使用したコンクリートの調合は表-3 に示したように 40, 60, 80MPa の強度を目標し W/B 46, 32, 25% と設定し、W/B25% の場合にはシリカヒュームを単位セメント量の 7% を代替した。

表-3 コンクリートの調合設計

f_c (MPa)	W/B (%)	FA rep.(%)	SF rep.(%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	Unit weight (kg/m ³)					高性能 減水剤 (B×%)
						C	FA	SF	S	G	
40	46	10	-	46.4	176	344	38	-	793	919	0.6
60	32	15	-	40.0	170	452	80	-	634	955	1.4
80	25	15	7	36.0	165	515	99	46	537	972	2.0

表-4 圧縮強度と含水率

W/B (%)	養生 日数 (日)	平均圧縮強度 (MPa)				含水 率 (%)
		200ton 級 U.T.M		載荷加熱 試験装置		
		標準養生	気乾 養生	気乾養生		
46	113~125	40.5 (28d)	49.3	42.0	41.0	2.0
32	139~148	68.4 (28d)	81.2	78.8	76.0	2.1
25	140~150	82.2 (28d)	98.7	99.3	93.9	2.0

3.4 試験体の作製

各温度水準において W/B 別に圧縮強度及びヤング係数試験用の試験体は KS F 2403「コンクリートの強度試験用試験体の作製方法」に準じて $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の試験体を作製した。

また、試験体は、翌日脱型し、標準圧縮強度の測定用試験体は約 20℃ の水中で 28 日間標準養生を行い、荷重・加熱実験をするための試験体は 7 日間標準養生した後温度 20℃、60%R.H.の恒温恒湿室内で気乾養生を行った。なお、荷重・加熱試験は材齢 113~150 日で行い、圧縮強度用試験体の上下面処理はコンクリート用研磨機を使用した。

3.5 試験方法

(1) 高温での圧縮強度

常温の 20℃~700℃の目標温度による圧縮強度試験は高温荷重実験用試験体と同じ条件で作製した数個の試験体の常温圧縮強度試験を行って表-4 のように算出した。試験体 20 本の平均圧縮強度値の 25%を荷重した後、図-5 に示した方法のように加熱速度 0.77℃/min、50℃毎に 30 分間の温度維持時間を設定して目標温度まで加熱を実施し、目標温度に到達後 90 分間温度を維持した。

最終的な高温で圧縮強度試験は図-6 のように設計荷重事前荷重試験方法の場合、目標温度到達後に荷重を除去しなくて目標温度が維持した状態で圧縮強度試験を行い、設計荷重事前荷重残存強度試験方法の場合初期荷重を除去し 24 時間常温で自然冷却した後圧縮強度試験を行った。圧縮強度試験方法は KS F 2405「コンクリートの圧縮強度試験方法」によって行った。

(2) 高温でのヤング係数

高温下でヤング係数試験は「(1) 高温での圧縮強度」に

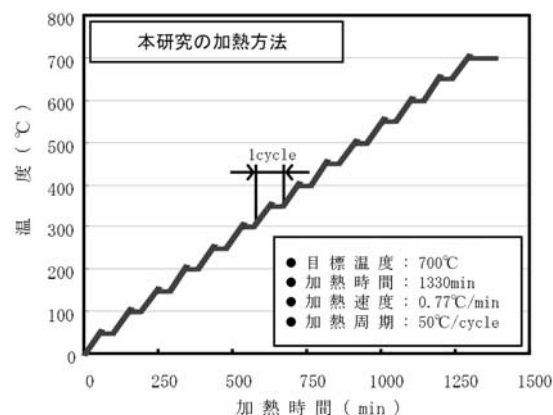
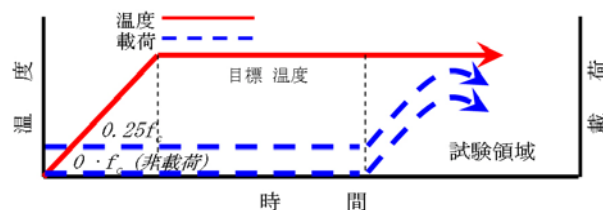
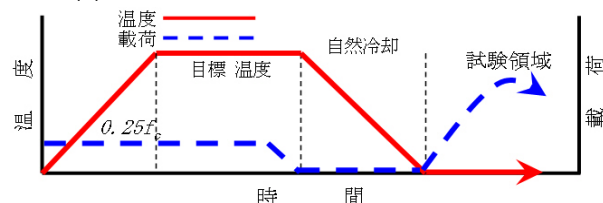


図-5 加熱時間と温度による加熱曲線



(a) 設計荷重事前荷重試験と非荷重試験方法



(b) 設計荷重事前荷重残存強度試験方法

図-6 圧縮強度の試験方法

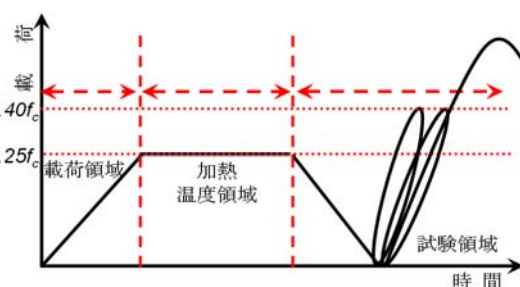


図-7 ヤング係数の試験方法

提示した試験方法のように設計荷重事前荷重試験方法及び設計荷重事前荷重残存強度方法によって試験体を荷重・加熱した後ヤング係数評価は図-7 に示したよう

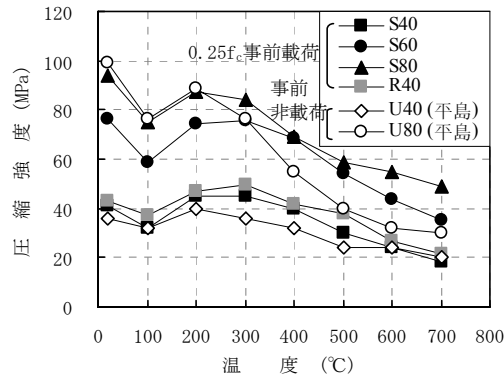


図-8 加熱温度による圧縮強度の変化

に KS F 2438 「コンクリート円周型試験体のヤング係数及びポアソン比の試験方法」 に準じて常温の平均圧縮強度値の 40% を 2 回繰り返し載荷した後、試験体破壊時まで載荷を行った。ヤング係数は式 (1) によって算出した。

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (1)$$

ここに、E：ヤング係数 [MPa]

S_1 ：軸ひずみ 0.00005cm による応力 [MPa]

S_2 ：最大荷重による応力 [MPa]

ε_2 ：応力 S_2 による軸ひずみ

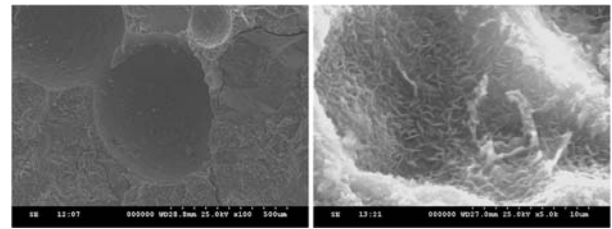
4. 実験結果及び考察

実験結果の分析は本研究で実施した設計荷重事前載荷試験 (S, stressed test) 及び設計荷重事前載荷残存強度試験 (R, stressed residual strength test) 以外に非載荷試験 (U, unstressed test) 結果データを用いて比較した。非載荷試験結果データは平島岳夫の研究論文を引用した 2),3),4)。

4.1 加熱温度による圧縮強度

加熱温度と圧縮強度の関係を図-8 に示す。全ての試験体は温度 100°C で強度が低下した後 200~300°C の範囲で強度が増加する傾向を示した。これは 100°C で試験体内部の水分が気化して発生する蒸気圧及び骨材とセメントペーストとの熱膨張係数差によって図-9(a) のようにひび割れが発生して圧縮強度が低下し、200~300°C では図-9(b) に示したように 100°C 以上で発生した高温・高圧の蒸気によってコンクリート内部の未水和物が反応し強度が増加すると考えられる⁹⁾。

常温に対する高温時の圧縮強度比を図-10 に示す。全ての試験体の高温時／常温時の圧縮強度比は 100°C で約 0.8~0.85 の比で減少した後、200°C では常温圧縮強度の 0.9~1.1 の比で上昇した。その後事前載荷を実施した S40, S60, R40 (W/B 46% 及び 32%) 試験体は 300°C まで圧縮強度が上昇した後、400°C から減っているが、S80



(a) 100°C (b) 200~300°C
図-9 W/B46%試験体の SEM 写真

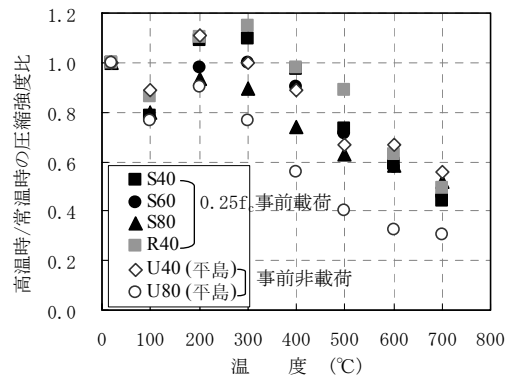


図-10 高温時／常温時の圧縮強度比

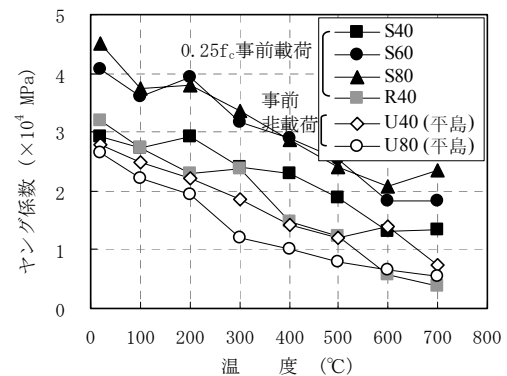


図-11 加熱温度によるヤング係数の変化

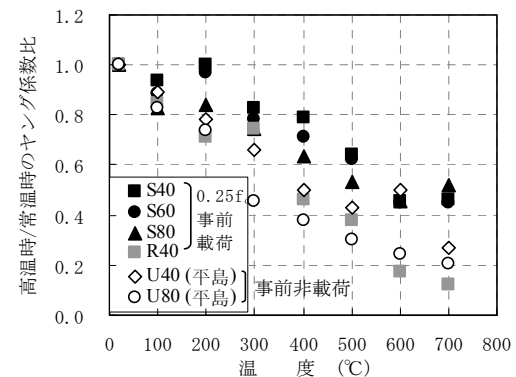


図-12 高温時／常温時のヤング係数比

(W/B25%) 超高強度領域の試験体は 300°C から圧縮強度が減少する傾向が現れた。また、U80 試験体の場合は類

似た強度範囲の S80 試験体に比べて 200℃以後強度減少率が約 20%以上高く見られた。

4.2 加熱温度によるヤング係数

加熱温度によるヤング係数及び高温時／常温時ヤング係数比を図-11 及び図-12 に示す。圧縮強度の 25% を事前载荷した S40, S60 及び S80 試験体の高温でのヤング係数は、100℃で低下し、200℃でヤング係数が上昇し、300℃以上の高温になるほどヤング係数が低下し、700℃での高温時／常温時ヤング係数比は圧縮強度に関わらず全ての試験体が約 0.5 程度となった。

また、S60, S80 試験体の常温ヤング係数は大きい値であるが、高温になるほど S40 の試験体との差が小さくなる。すなわち、本研究の範囲では圧縮強度が大きくなるほど高温時／常温時ヤング係数比が小さくなる傾向が見られた。

設計荷重事前载荷 (0.25 f_c) 後の常温冷却においての残存強度試験 R40, 非载荷 (0.0 f_c) 試験 U40 及び U80 試験体のヤング係数は 100℃から 700℃まで続く低下している。設計荷重事前载荷試験方法の場合、全ての試験体が高温になるほどヤング係数が一定な減少率で低下しているが、設計荷重事前载荷残存強度試験及び非载荷試験の場合は加熱温度 200~400℃範囲でヤング係数減少率が大きくなって加熱温度 700℃では高温時／常温時ヤング比が 0.1~0.3 となった。

従って、R 及び U 試験体は類似な圧縮強度の範囲の S 試験体に比べて加熱温度 700℃でヤング係数が約 20~40%程度大きく低下することを確認した。これは、最終的な圧縮強度の試験時設計荷重事前载荷による応力ひずみ、加熱による熱膨張ひずみ、クリープひずみ及び過渡ひずみなどの差に起因すると考えられる。

4.3 最大荷重でのひずみと熱膨張ひずみ

図-13 及び図-14 に加熱温度による最大荷重でのひずみ及び高温時／常温時の最大荷重でのひずみ比を示す。S 試験方法の場合、加熱温度 100 及び 200℃では常温圧縮強度でのひずみと類似な最大荷重でのひずみ値を示しているが、以後の温度範囲においてはひずみはばらついている。

しかし、R40, U40 及び U80 試験体の場合既往研究結果^{3),4)}のように加熱温度が高温になるほど最大荷重でのひずみは増加した。これは、図-15 に示したように非载荷試験方法の場合 eurocode 及び kodur&sultan が提示するモデル式⁸⁾と似たようにひずみが増加したが、加熱前に载荷を実施した設計荷重事前载荷試験体の場合は図-16 のように非载荷試験の試験体に比べて膨張ひずみが拘束され加熱温度が高くなるほど収縮ひずみが大きく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が見られた。

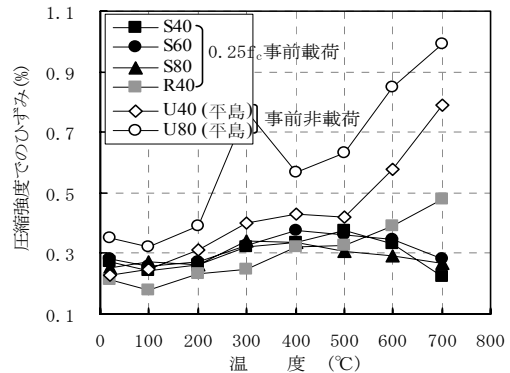


図-13 加熱温度による圧縮強度でのひずみ

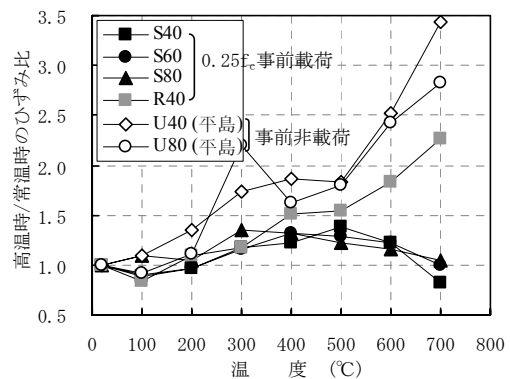


図-14 高温時／常温時の圧縮強度でのひずみ比

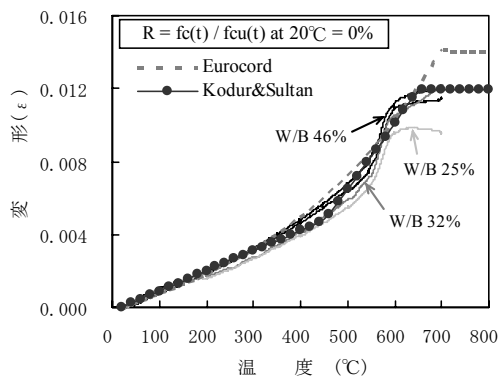


図-15 W/B による熱膨張ひずみ (R=0% f_c)

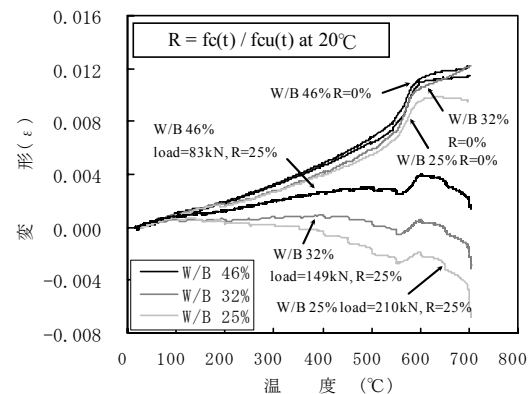


図-16 W/B による熱膨張ひずみ (R=0% f_c , 25% f_c)

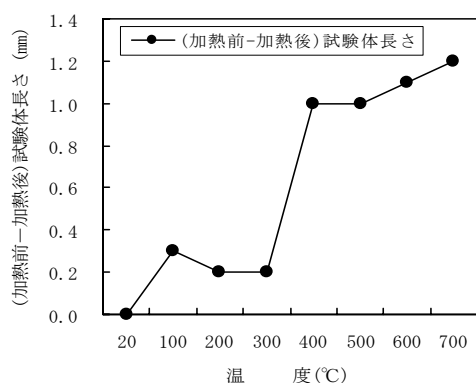


図-17 温度による試験体の長さ変化 (R40 試験体)

図-17 は設計荷重事前載荷残存強度試験時における試験前試験体の長さ目標温度まで加熱した後 24 時間常温まで冷却した試験体の長さを比較したものである。加熱温度 100°C では約 0.3mm 収縮し、200~300°C では約 0.2mm しか収縮していないので 100°C に比べて膨張する傾向が見られる。

それから 300°C から 400°C までは急に収縮した後 500°C から温度が高温になるほど収縮値が緩慢に増加している。300°C から 400°C までの急激な収縮は R40 試験体のヤング係数値が 400°C で急激に低下する要因の一つであると考えられる。加熱温度 700°C で圧縮強度試験直前の試験体のひずみ状態は R40 試験体の場合常温に比べて収縮した状態であるが、S40 試験体の場合図-16 に示したように常温に比べて膨張した状態と現れた。従って、加熱及び載荷によって発生するひずみは高温時コンクリートの力学的特性と相関関係があると考えられる。

5. まとめ

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を評価した結果をまとめると次のようである。

- (1) 設計荷重事前載荷及び設計荷重事前載荷残存強度試験方法において高温で圧縮強度を評価した結果、試験方法によっては力学的高温特性が異なるが 100°C で常温に比べて約 0.8~0.85 低下した後 200°C で 0.9~1.1 の比と再上昇し 300°C 以後からは低下する傾向が現れた。
- (2) ヤング係数は高温になるほど直線的に低下する傾向が見られるが、試験方法によって減少率の差があり、設計荷重事前載荷試験方法の場合 700°C での残存ヤング係数比は 0.5、設計荷重事前載荷残存強度試験及び非載荷試験の場合には 700°C での残存ヤング係数比は約 0.1~0.3 で現れる。

- (3) 最大荷重でのひずみは設計荷重事前載荷及び加熱による熱膨張ひずみと関係があり、熱膨張ひずみは圧縮強度が大きくなるほど耐力低下の収縮ひずみが大きくなる傾向である。
- (4) 設計荷重事前載荷及び非載荷加熱においての高温特性はヤング係数、最大荷重ひずみ、熱膨張ひずみなどがそれぞれ異なることから設計荷重を載荷した状態でも高温特性を把握する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は三星物産(株)建設部門と BK (Brain Korea) 21-2 段階事業の支援を受け取って行った研究成果の一部であり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金圭庸, 金武漢, 金榮善, 朴贊圭: 熱伝達加熱方式によるコンクリートの高温特性の評価方法, コンクリート工学年次論文報告集, pp.759-764, 2007.7
- 2) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.135-137, 2003.9
- 3) 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
- 4) 山下平祐, 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 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.75-76, 2004.8
- 5) 河辺伸二, 一瀬賢一, 川口 徹, 長尾覚博: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.377-382, 2003.7
- 6) 宮本圭一, 安部武雄: 高温下における高強度コンクリートの力学的特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.574, pp.227-234, 2003.12
- 7) Potha Raju, M., Srinicasa Rao, K. and Raju, P. S. N.: Compressive strength of heated high-strength concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 59, No.2, pp.79-85, mar.2007
- 8) Kodur, V.K.R., Cheng, F.P., Wang, T.C and Sultan, M.A.: Effect of strength and fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns, NRCC-45005, National Research Council, Canada, 200