論文　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

金 圭庸[*1]・金 武漢[*2]・金 榮善[*3]・朴 贊圭[*4]

要旨：コンクリート高温特性に関する実験研究は多数行っているが高温状態でコンクリートの高温特性を明確に評価することは非常に難しい。従って本研究では通常的に使用している⌀100×200㎜の試験体を採用し，安定的にコンクリートを加熱するため加熱治具を使用し熱を伝達する方式と熱伝達の効率を向上させるため熱伝達カーバーを使用しコンクリート試験体の温度分布状態を分析してコンクリートの高温特性評価方法を検討したものである。

キーワード：熱伝達加熱，コンクリートの高温特性，熱伝達カーバー，載荷加熱，耐火性能

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐火性能設計のため高温加熱されたコンクリートの力学的特性を評価する研究が行われて来た[1),2),3)]。

しかしながら，コンクリートの熱伝達率が少なくて均等に加熱するのが難しいので長時間が所要され，試験体の寸法による温度分布差が大きくて高温を受けたコンクリートの高温特性及び力学的性質を明確に評価することは非常に難しい[4),5)]。

本研究は通常的な寸法である⌀100×200mmの試験体でもコンクリートの高温特性を精密に評価するためにコンクリート試験体を安定的に加熱するための加熱治具と熱伝達効率を向上させるため熱伝達カーバーを使用した熱伝達加熱方式によって加熱温度分布を均等にしコンクリートの高温特性を評価する方法を提案したものである。

2. 載荷加熱試験装置の概要

2.1 加熱装置

図-1及び**図-2**は載荷加熱試験装置及び加熱装置の詳細図を示す。加熱装置は金属ヒーターを採用した電気加熱炉を使用し，加熱方法は加熱炉の上・下にある加力治具によってコンクリート試験体に熱を加える熱伝達加熱方式である。

電気加熱炉は⌀150mm×400mmの大きさで試験体の寸法は⌀100mm ×200mmまで可能である。加熱温度の範囲は20～800℃であり，温度調節は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・下の加熱ヒーターがそれぞれ独立的に制御される。

加熱治具は荷重2,000kN以上で高温に耐えられるよう熱処理した炭素鋼で作製した。加熱炉外部で熱が放出されることを防ぐため加熱炉の内部にはセラミックファイバーブランケット(ceramic fiber blanket)の断熱材を設けた。

2.2 温度測定・記録及び調節装置

図-3は高温特性評価用コンクリート試験体の型枠及び熱電対を埋め込む概要を示した。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。載荷加熱試験装置の温度調節は写真-1に示すように温度調節機器のプログラムによって自動制御されるようにした。

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10 mm，100 mm及び190 mmの位置①，②，③で約5～7 mmの深さで穴を置き熱電対を設置し試験体の温度を制御した。なお，試験体の温度測定は試験体の上部面から25 mm，100 mm及び175 mmの位置④，⑤，⑥で中心部温度を測った。

*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 建築学部 教授･工博 (正会員)
*3 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科，博士課程 (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 (正会員)

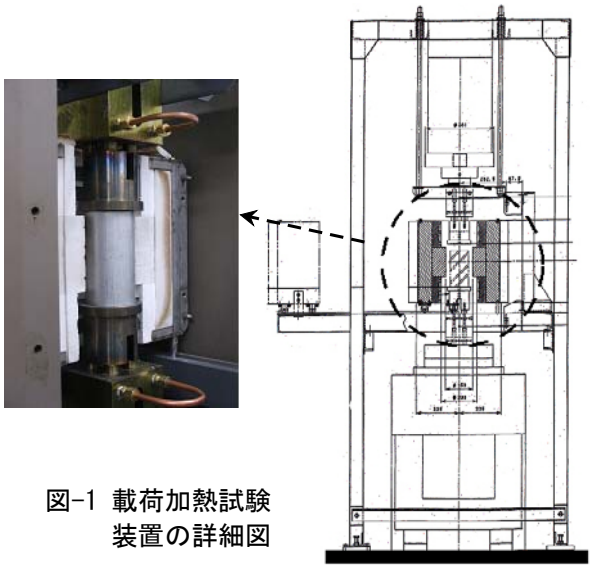


図-1 載荷加熱試験装置の詳細図

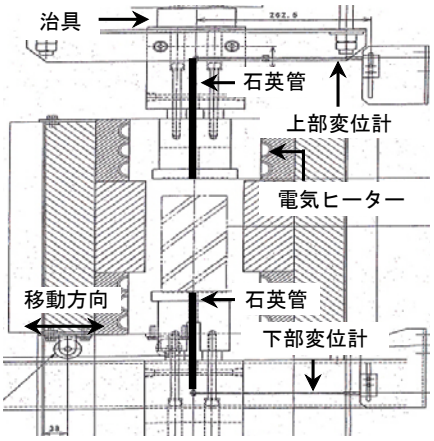


図-2 加熱炉の詳細図

2.3 加力装置及び変位計

加力装置は写真-2のような荷重容量4,600kNのインストロング型載荷加熱試験装置を使用した。載荷加熱治具の両端部の温度が50℃以上上昇しないように水冷式冷却機を設置し，載荷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。

試験体の変位は載荷加熱治具の両端部中心と冷却機の中心に⌀15mm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試験体の変位を測定した。**表-1**は載荷加熱治具と試験体の穴による誤差の有無を検証した実験結果として穿孔による実験誤差は認められなかった。

3. 実験計画及び方法

3.1. 実験計画

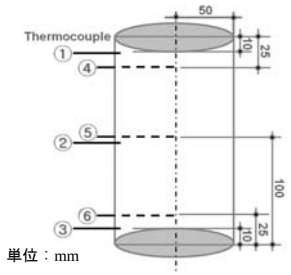


図-3 試験体型枠及び作製方法

写真-1 温度調節機器　写真-2 載荷加熱試験装置

表-1 圧縮強度試験の結果

試験装置 / 試験体	一般U.T.M（MPa）			載荷加熱試験装置（MPa）		
	1	2	平均	1	2	平均
上・中・下部穴有る試験体[1)]	43.8	42.7	43.3	42.5	43.3	42.9
一般試験体[2)]	43.3	44.4	43.9	43.1	42.5	42.8

注 1) 熱電対の設置のための約⌀1mm×5mmで穿孔。
2) 石英管の設置のための⌀15mmで穿孔。

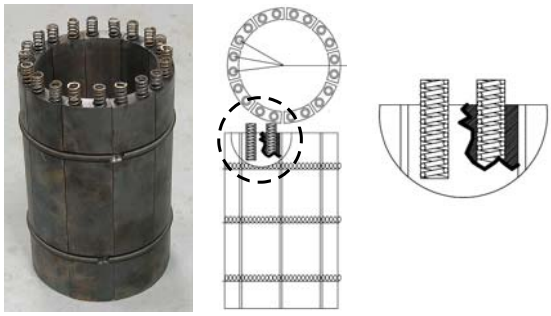
本研究は**表-2**のように載荷加熱試験に影響を及ぼす熱伝達カーバーの種類，加熱時間，加熱周期（heating cycle），断熱被覆材使用有・無などの実験要因と水準を設けて本研究を行った。

試験体加熱時に両端部で伝達される熱の効率を検討するため**写真-3**に示すような高さ187mm程度の鋼板ユニットで構成された1単-熱伝達カーバーと上下部が2つに分離された2単-熱伝達カーバー及びセラミックファイバー系の断熱被覆材の有・無を検討した。

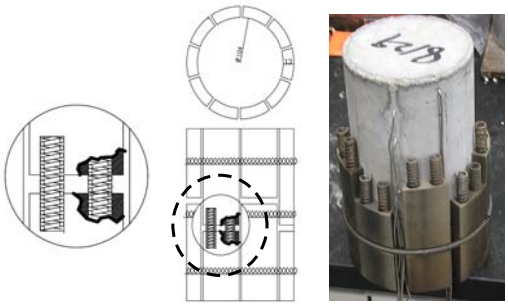
また，設計基準強度の25%荷重を載荷し30分間載荷を維持した後加熱を始めた。加熱方法として試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲは温度上昇速度0.67℃/min，50℃毎に30分間の温度維持時間，試験体Ⅳ，Ⅴは温度上昇速度0.77℃/min，50℃毎に30分間の温度

表-2 実験要因と水準

試験体No.	要因及び水準				
	目標温度(℃)	熱伝達カーバー	加熱速度(℃/min)	加熱周期[1)](℃/cycle)	断熱被覆材
Ⅰ	300	1単	0.67	50	有り
Ⅱ					無し
Ⅲ		2単			
Ⅳ		1単	0.77	50及び100	
Ⅴ				50	



(a) 1単-熱伝達カーバーの詳細図



(b) 2単-熱伝達カーバーの詳細図

写真-3 熱伝達カーバーの概要

維持時間を適用した。なお，試験体Ⅳは100～200℃の温度範囲では30分間の温度維持時間を適用した。

3.2 使用材料及び試験体の作製

本研究で用いた材料は**表-3**に示す。試験体を作製するためコンクリートの調合は**表-4**に示す。設計基準強度Fcは40MPaでW/Bを46%に決定した。混和材はフライアッシュを単位セメント量の10%を代替し，混和剤はナフタレンスルホン酸系高性能AE減水剤を目標スランプと空気量を満足するように添加量で決めた。

標準圧縮強度用試験体は作製後24時間で脱型し28日間標準養生を実施した。載荷加熱試験用の試験体は7日間の標準養生を実施した後20℃，60％R.H.の恒温恒湿室内で気乾養生した。また，圧縮

表-3 使用材料の物理的性質

使用材料	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（最大寸法：5mm，密度：2.64g/cm^3，吸水率 1.03%，F.M. ： 2.85）
粗骨材	花崗岩類砕石（最大寸法：25mm，密度：2.65g/cm^3，吸水率: 0.8，F.M.：6.91）
フライアッシュ	密度 2.2g/cm^3，粉末度 ： 3,090cm^2/g
混和剤	高性能AE減水剤（ナフタレンスルホン酸系）

表-4 コンクリートの調合

W/B (%)	Slump (cm)	Air cont. (%)	FA rep. (%)	S/a (%)	Water (kg/m^3)	Unit weight (kg/m^3)			
						C	FA	S	G
46	15±2	5±1	10	46.4	176	344	38	793	919

(a) 断熱被覆材使用　　(b) 断熱被覆材使用しない

写真-4 試験体を設置した加熱炉の全景

強度用試験体の上面処理はコンクリート用研磨機を使用した。

4. 実験結果及び考察

4.1 断熱被覆材による熱伝達効果

写真-4はコンクリート試験体に断熱被覆材の使用有・無による試験体の設置全景を示す。**図-4**及び**図-5**は断熱被覆材の使用有・無による試験体上・中・下部の温度曲線を示したもので，1単-熱伝達カーバーを使用し，温度上昇速度は0.67℃/min，50℃毎に30分間の温度維持時間を設定した。

実験結果は断熱被覆材を使用しない試験体が断熱被覆材を使用した場合より試験体の上・下部温度曲線が中心温度曲線と類似な傾向が現れた。

断熱被覆材を使用した場合は試験体の上・下部の加熱面と試験体中心温度差の平均値10.06℃，標準偏差7.73であるが，断熱被覆材を使用しない場合は平均値5.62℃，標準偏差5.42でありコンク

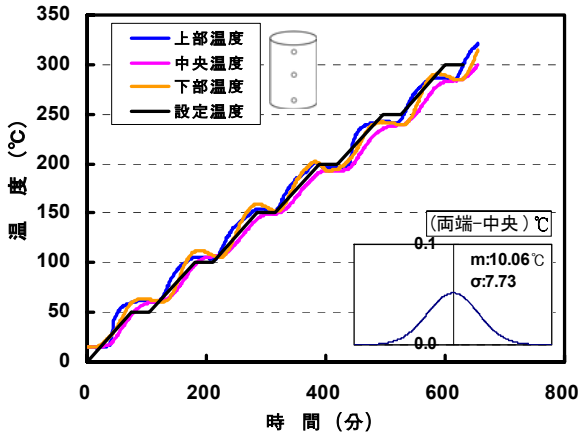


図-4 試験体Ⅰの温度曲線（1単-熱伝達カーバー，0.67℃/min，50℃/cycle，断熱材-有り）

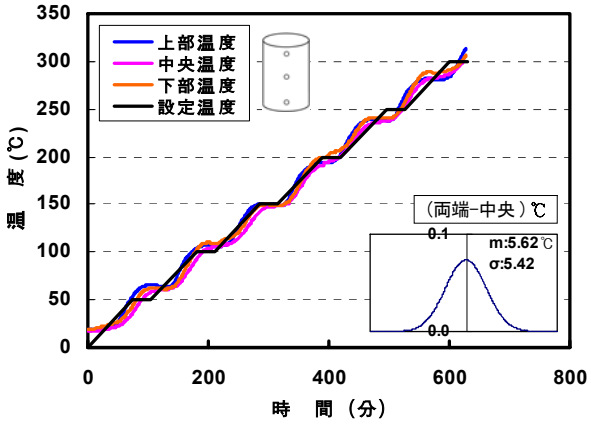


図-5 試験体Ⅱの温度曲線（1単-熱伝達カーバー，0.67℃/min，50℃/cycle，断熱材-無し）

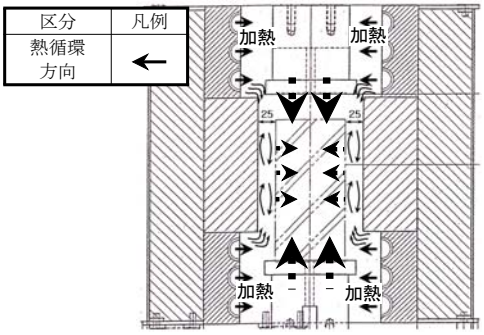


図-6 加熱炉内部の熱循環模式図

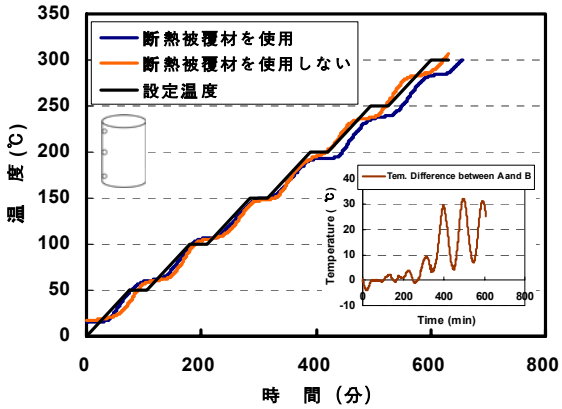
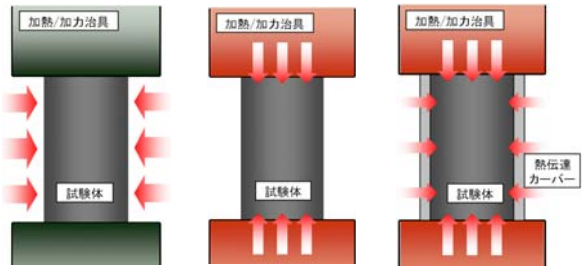


図-7 断熱材の使用による試験体の中心温度（1単-熱伝達カーバー，0.67℃/min，50℃/cycle）



(a) 直接加熱方法　(b) 間接加熱方法　(c) 本研究の方法

図-8 試験方法による熱伝達模式図[1),2),3)]

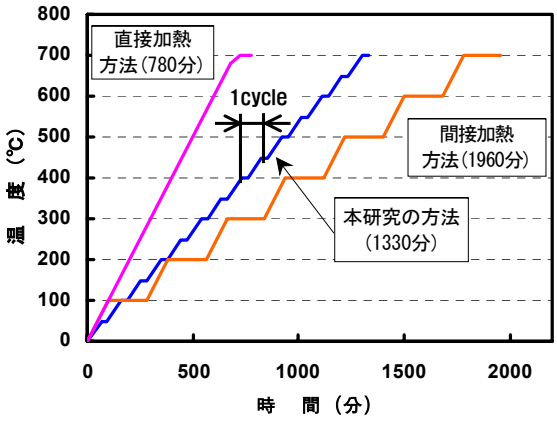


図-9 加熱方法による加熱曲線[1),2),3)]

リートの内部温度の偏差が小さかった。また，断熱被覆材を使用しない場合が約18～30分程度熱伝達時間が短縮された。

これは図-6及び図-7に示したように断熱被覆材を設置しない場合は両端部で発生する熱が加熱炉の内部で循環され試験体の温度伝達効率が高くなるためであると考えられる。

4.2 熱伝達カーバーによる熱伝達効果

図-8及び図-9は載荷加熱装置の熱伝達方式による熱伝達模式図で既往の研究[1),2)]及び本研究の加熱曲線を示したものである。本研究の加熱周期50℃/cycleは加熱温度300℃まで所定の加熱速度で50℃毎に30分間ずつ温度を維持しながら上昇させた。直接加熱方法は加熱速度が速いが，試験体の中心部より表面部が加熱しすぎので損傷を受ける恐れがある。また，間接加熱方法は直接加熱方法に比べて試験体の外部損傷が少なく，試験体全体に均等な熱伝達が可能である。従って，本研究では間接加熱方式の熱伝達効率を向上させるように熱伝達カーバーを考案した。

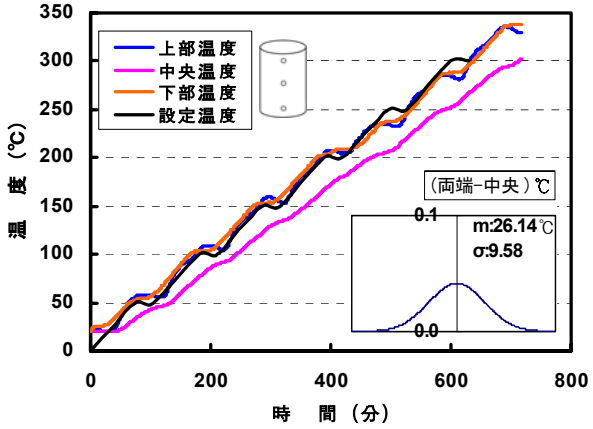


図-10 試験体Ⅲの温度曲線（2単-熱伝達カーバー，0.67℃/min，50℃/cycle，断熱材-無し）

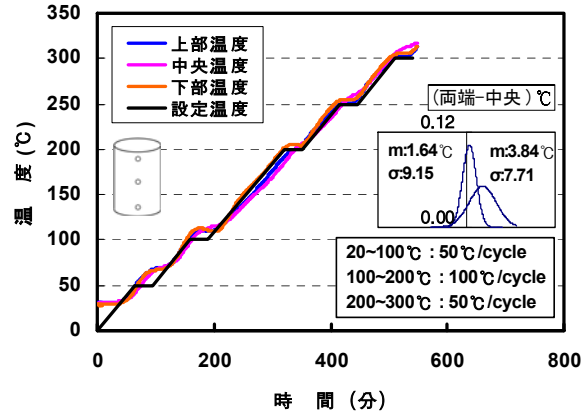


図-11 試験体Ⅳの温度曲線（1単-熱伝達カーバー，0.77℃/min，50及び100℃/cycle，断熱材-無し）

図-10は熱伝達カーバーの種類による試験体の上中下部の中心温度曲線を示したもので，2単-熱伝達カーバーを使用した試験体は両端部の温度上昇曲線が1単-熱伝達カーバーを使用した試験体より設定温度曲線に近づいが，中央部の温度曲線は約40～80分程度加熱時間が長かった。従って，1単-熱伝達カーバーの方が2単-熱伝達カーバーより熱伝達効率が良好であることか認められた。

4.3 加熱速度及び温度維持時間

図-11は加熱方法別試験体の温度上昇曲線を示したものである。20～100℃及び200～300℃温度範囲では温度上昇速度0.77℃/min，50℃毎に30分間の温度維持時間，100～200℃温度範囲では温度上昇速度0.77℃/min，100℃毎に30分間の温度維持時間を適用した。

実験結果，20～100℃及び200～300℃温度範囲で試験体の両端部から中央部の中心までの温度到達時間は100～200℃温度範囲の温度到達時間より

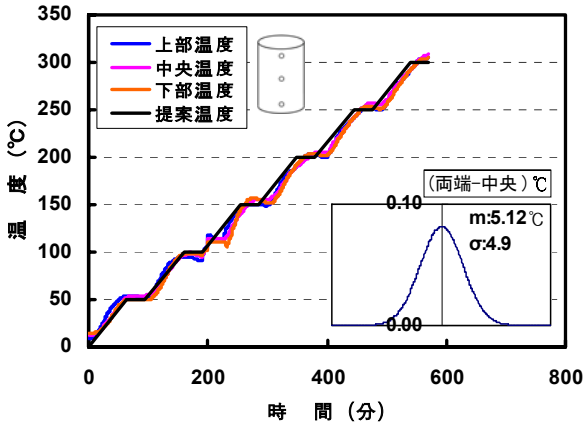


図-12 試験体Ⅴの温度曲線（1単-熱伝達カーバー，0.77℃/min，50℃/cycle，断熱材-無し）

約10～20分程度遅れた。また，温度上昇速度においては0.67℃/minの方より0.77℃/minの方が試験体の中央部の温度が両端部の温度まで到達する時間が短縮された。1cycle当り温度上昇量は100℃/cycleより50℃/cycleの方が両端部と中央部の中心温度差が小さかった。

4.4 載荷加熱試験の条件設定及び検証

図-12は1単-熱伝達カーバーで試験体を被って温度上昇速度0.77℃/min，50℃毎に30分間の温度維持時間を適用して最終的に評価した試験体の上中下部の中心温度曲線を示すもので加熱温度制御によって試験体の上中下部の中心温度の偏差が平均5.12℃以内で均等に加熱された。

本研究で提案した載荷加熱試験方法により得られた実験データを有限要素解析プログラム(DIANA)を利用し外部熱源の影響による非定常温度分布解析（Nonlinear transient heat flow analysis）を行った。温度分布解析は温度と時間に依存するコンクリート試験体の熱的特性を温度関数で置換して，解析方法の信頼性を確かめるため耐火試験データを利用して検証した。

図-13は試験体に対する有限要素(FE)モデリング概要を示した。図-14は解析結果を示したもので，温度と時間依存性による解析結果は実験結果とほとんど一致する傾向を見られ，解析結果でも熱伝達カーバーの熱伝達効率が良好であり，本研究で提案した載荷加熱試験方法の熱効率と精度が高いであることが確認された。

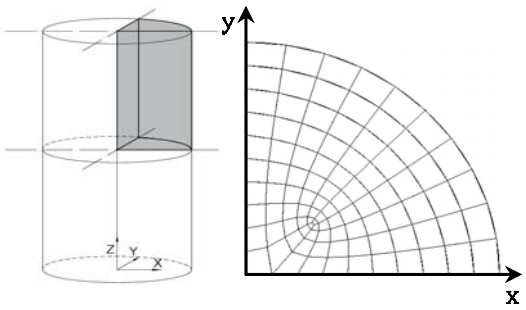
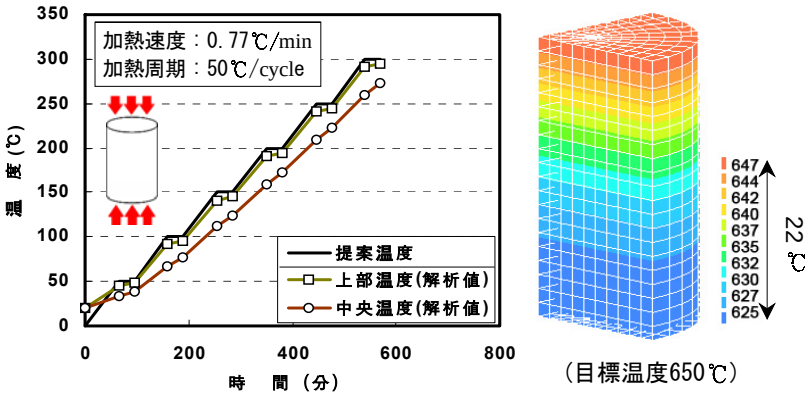
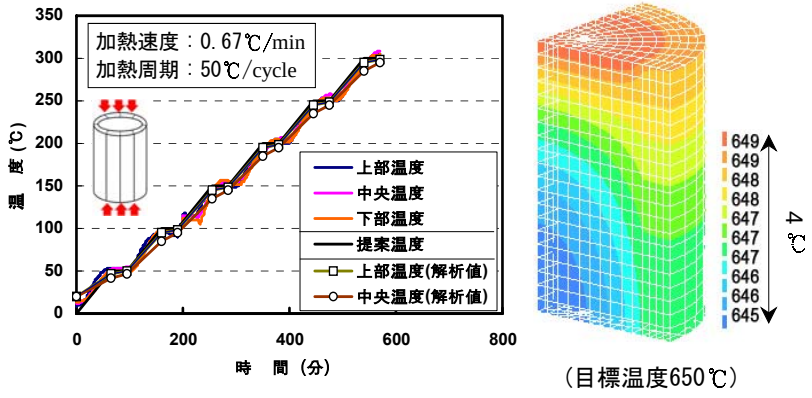


図-13 試験体のFEモデリングの概要



(a) 熱伝達カーバーを使用しない



(b) 熱伝達カーバーを使用

図-14 熱伝達カーバーの使用有・無による試験体の温度分布解析

5. まとめ

本研究でコンクリートの高温特性を評価するための熱伝達加熱方式を検討した結果は次のようである。

(1) 熱伝達治具と熱伝達カーバーを採用した熱伝達加熱方式によってコンクリート試験体の均等な熱伝達が可能である。

(2) コンクリート試験体⌀100 ×200 mm 寸法に対し加熱速度を0.77℃/min，温度上昇周期を50℃/cycleと設定によって試験体の内外部温度差は平均5.12℃，標準偏差4.9の範囲で均等に加熱されることが認められた。

(3) コンクリートの高温特性を評価する方法として非定常温度分布解析を通じて熱伝達加熱方式の熱効率と精度が高いであることが検証されてその有効性を確認した。

謝辞

本研究は三星建設と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有り、ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 平島岳夫，常世田昌寿，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

2) 宮本圭一， 安部武雄， 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研究，日本建築学会 構造系論文集，第574号，pp. 227～234，2003．12

3) 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集，Vol. 25，No. 1，pp.377～382，2003

4) 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，Journal of Structural Engineering，Vol.129，No. 2，2003

5) Carlos Castillo，A. J. Durrani，Effect of transient high temperature on high strength concrete，ACI Materials Journal，Vol. 87，No. 1，pp. 47～53，1990