

論文

[2097] 高温を受けた高強度コンクリート部材の力学的特性

正会員○熊谷 仁志 (清水建設技術研究所)

齋藤 秀人 (同 上)

森田 武 (同 上)

1. はじめに

最近、鉄筋コンクリート造 (RC) 建物に高強度コンクリートを用いる機運が高まっており、設計基準強度 600kgf/cm^2 のコンクリートを施工した例も報告されている。これまでRC造は多くの実験データから耐火構造として認められているが、構造物に高強度コンクリートを用いるのは、部材に従来よりも大きな応力が作用すると想定される場合であるため、火災を受けた構造物を再利用するには、強度・剛性の低下などについて十分な検討が必要である。しかしながら高温を受けた高強度コンクリート部材の力学的特性については、未だ不明な点が多い。

そこで本研究では調査強度 $200\sim 750\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートを用いたRC部材に図1に示すような温度履歴を与え、加熱の有無による力学的特性の変化について検討した。図1の加熱曲線はJIS A1304の標準加熱曲線に比べて緩やかなものである。これは比較的軽微な火災を前提としていること、および温度の上昇勾配を急にすると爆裂が生じ加熱後の載荷実験が困難になることなどから、予備加熱を行って定めたものであり、検討の余地が残るところである。加熱後の載荷実験については、梁の曲げ実験を行い主筋周辺のコンクリートの引張特性の変化を見る実験 (引張特性実験) と、柱の中心圧縮実験を行いコンクリートの圧縮特性の変化を見る実験 (圧縮特性実験) の2シリーズを実施した。なお加熱時の試験体の外部からの拘束については今回考慮しない。

2. 材料試験

表1は引張特性実験および圧縮特性実験に用いたコンクリートの調査ならびに $10\phi \times 20$ のシリンダーを用いた常温圧縮試験・含水率試験の結果である。これに加えて、加熱後のシリンダーの圧縮試験も行った。図2~4はその結果である。シリンダーは電気炉において加熱し、1分間に 1°C の割合で温度を上昇させ、1時間所定の温度を保持した後、冷却し

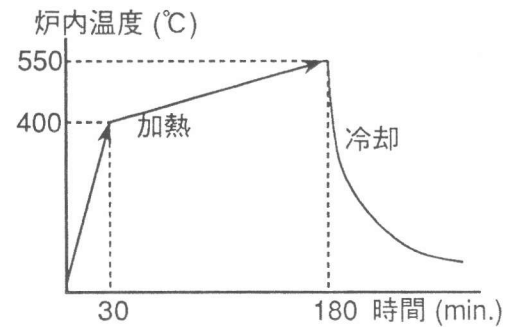


図1 本実験の加熱曲線

表1 コンクリートの調査および材料試験結果

実験シリーズ	調査強度 (kgf/cm ²)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	材令 (週)	含水率 (%)
			W	C	S	G				
引張特性	210	61.5	165	269	910	972	325	2.95×10^5	22	5.77
	420	40.0	164	410	736	1035	533	3.47×10^5	17	4.81
	750	28.0	165	589	631	971	988	4.34×10^5	21	4.33
圧縮特性	200	69.0	175	254	857	1001	262	2.34×10^5	19	4.80
	400	44.5	175	394	708	1034	430	2.76×10^5	18	4.62
	600	35.0	175	500	651	1030	578	3.62×10^5	21	3.66

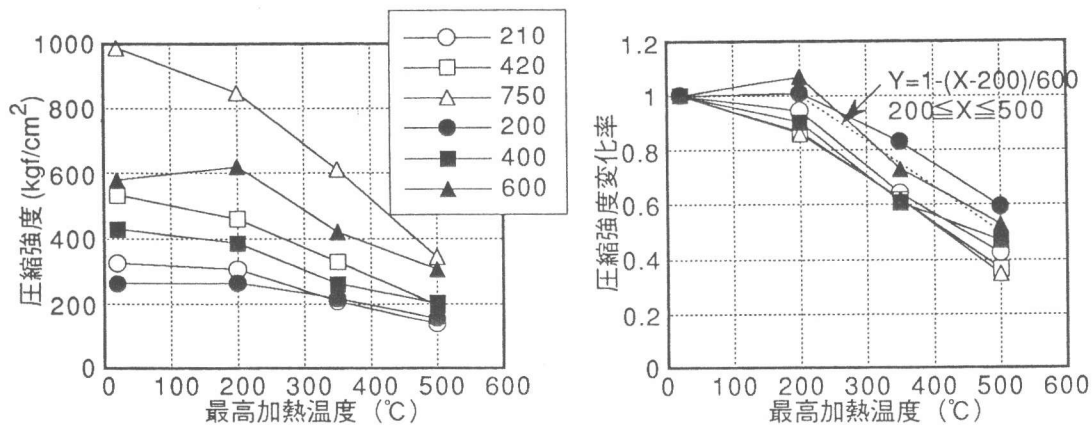


図2 圧縮強度と最高加熱温度の関係

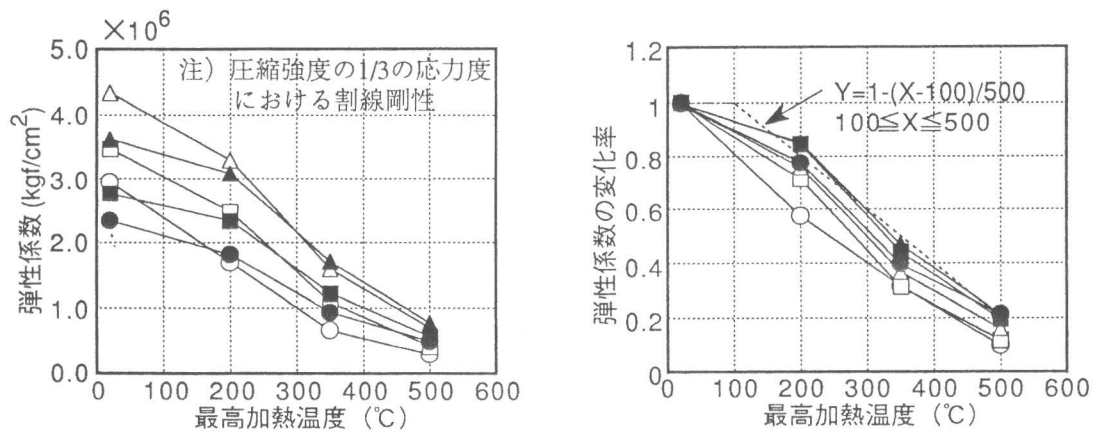


図3 弾性係数と最高加熱温度の関係

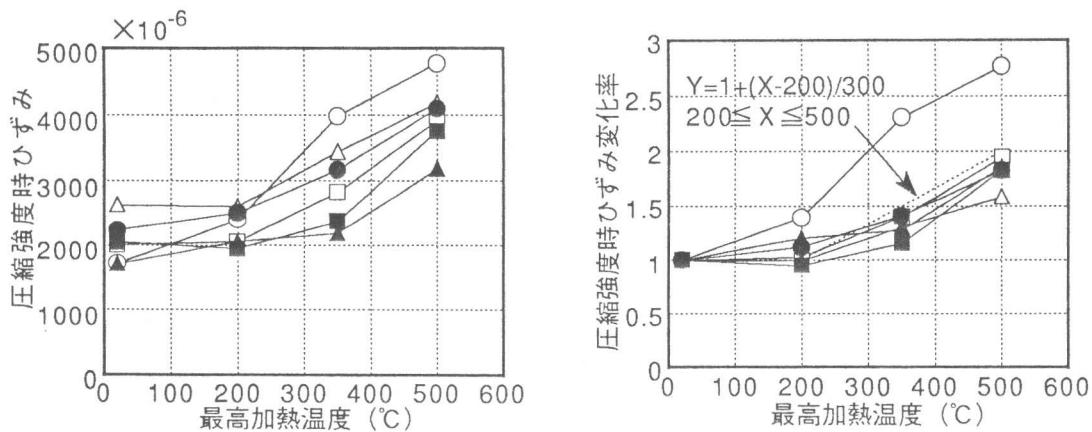


図4 圧縮強度時ひずみと最高加熱温度の関係

た。圧縮強度は加熱温度 200℃までは低下せず、500℃で約50%となった。弾性係数は加熱温度が高くなるとほぼ直線的に低下し、500℃で約20%となった。圧縮強度時のひずみは加熱温度 200℃までは変化せず、500℃で約2倍となった。これらの傾向についてはコンクリートの強度による差異はあまり見られなかった。図5は同様に行った鉄筋の引張試験の一例である。試験した鉄筋は圧縮特性実験に用いた D13(SD 345)とU6(SBPD 1275/1420)であるが、熱調質によって強度を高めた鉄筋は 450℃以上の高温を受けると、その降伏強度は57%に低下している。図6は引張特性実験に用いた主筋の付着性状を調べるために行った引抜試験の結果である。試験体には

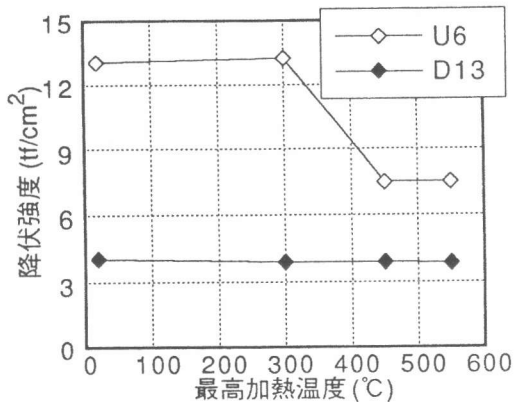


図5 降伏強度と最高加熱温度の関係

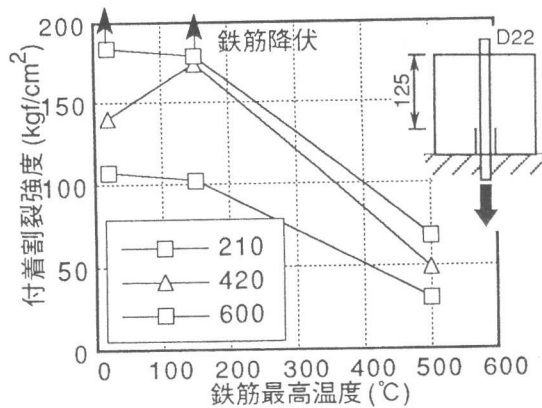


図6 引き抜き試験結果

一辺 15cm の立方体のコンクリート塊を用いている。鉄筋温度で 500°C の高温を受けると付着割裂強度は約30%に低下している。

3. 引張特性実験

図7は引張特性実験に用いたRC梁の試験体である。試験体は表1に示すようにコンクリート強度が3種類で、それぞれ加熱していないものと図1の加熱曲線で加熱をしたものの2種類があり、計6体である。試験体断面は30cm×50cmで、3等分点において単調に載荷した。主筋はSD345クラスの鉄筋で、上端2-D22 中段2-D22 下端4-D22である。あばら筋はD10@100でせん断補強筋比にして0.47%である。試験体には図にあるような切り欠きを設け、下端主筋の伸び・抜け出しを測定した。なお、切り欠き部には直接火炎が当たらないように被覆を施した。

試験体の底面および側面の3面に加熱を受けるようにした。試験体の中央部の下端鉄筋の温度は最高およそ 350°C となっており、コンクリート強度が異なってもこの温度に差異は見られなかった。図8は加熱後の載荷実験による荷重（せん断力）と等曲げ区間の伸び、荷重端・自由端の抜け出しの関係である。図中の実線は加熱をしていない試験体、破線は加熱後の試験体である。

また、コンクリートを弾性として計算した剛性、ならびにコンクリートの引張側には応力度が生じないと仮定して計算した剛性を併せて示している。加熱していない試験体では初期の剛性は弾性剛性にほぼ一致しているが、加熱した試験体では初期の剛性は弾性剛性よりもかなり小さく、引張応力度を無視した剛

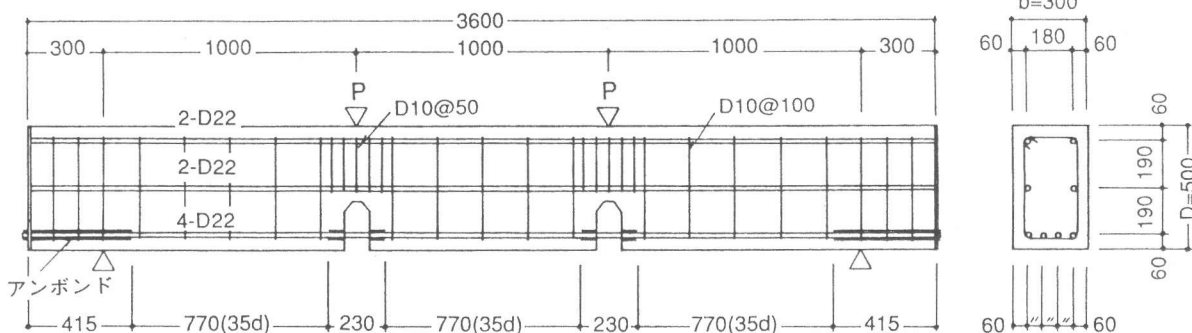
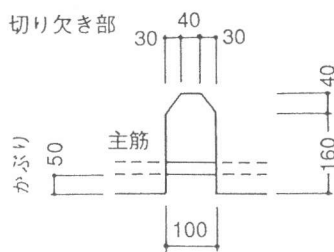


図7 引張特性実験の試験体

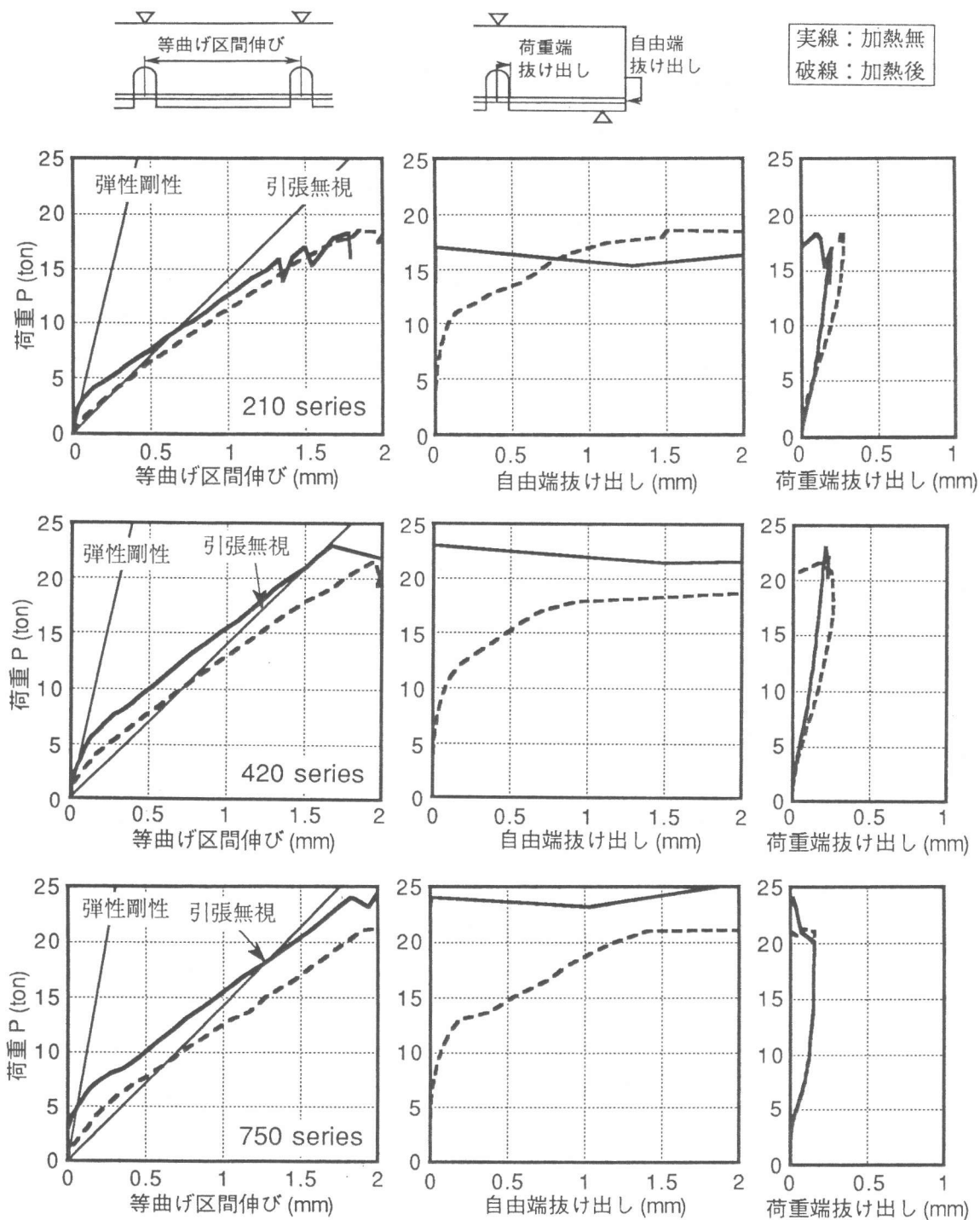


図8 引張特性実験結果

性に近くなっている。これは加熱によって試験体表面に無数の亀甲状のひびわれが生じていた影響である。また本実験の試験体では主筋を折り曲げ定着していないため、自由端にひびわれ（せん断ひびわれ）が発生すると自由端の抜け出しが進み、破壊に至っている。この時荷重端の抜け出しはむしろ減少しており、本実験の荷重レベルでは付着破壊に至っていないと言える。また加熱によるひびわれは自由端の抜け出しには影響するようであるが、荷重端の抜け出しに与える影響は少ない。

表2 圧縮特性実験結果一覧

調合強度 kgf/cm ²	配筋	無加熱最大応力度 kgf/cm ²	加熱後最大応力度 kgf/cm ²
200	無筋	236	194
	RC (U6)	522	562
400	無筋	392	344
	RC (D6)	501	513
	RC (U6)	578	639
600	無筋	487	447
	RC (U6)	727	870

注) 試験体は各3体で最大応力度(鉄筋含む)はその平均である

4. 圧縮特性実験

図9は圧縮特性実験に用いた柱の試験体である。試験体は表1に示すようにコンクリート強度は3種類で、試験体の一覧は表2に示すとおりである。試験体の断面は25cm×25cmで、高さは75cmであるが、両端は完全拘束になるように鋼管で補強している。鉄筋コンクリートの試験体の主筋はSD345クラスの鉄筋12-D13で、横補強筋(高強度鉄筋U6あるいは普通強度鉄筋D6)を50mmピッチに外周および中子に配している。試験体の側面の4面が加熱を受けるようにした。図10に圧縮特性試験の結果の一例を平均圧縮応力度(鉄筋を含む)と平均ひずみの関係で示す。図中の実線は加熱をしていない試験体、破線は加熱後の試験体である。圧縮強度については、無筋コンクリートでは加熱を受けることにより若干低下しているが、鉄筋コンクリートではむしろ増加する傾向が見られ、その原因は明らかでない。剛性については加熱を受けることによりいずれの場合も低下している。この関係を求めるために、以下のような簡便な解析をこころみた。まず試験体断面

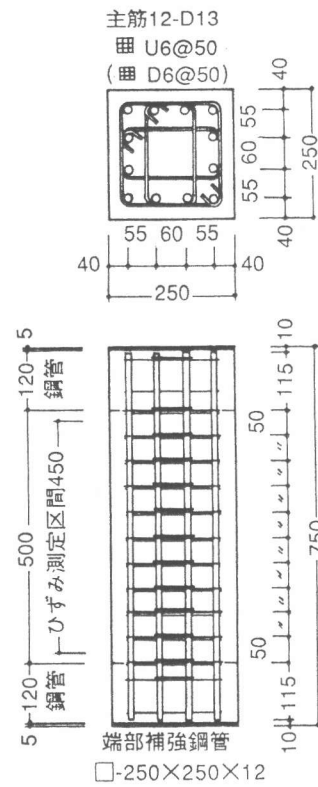


図9 圧縮特性実験の試験体

示す。図中の実線は加熱をしていない試験体、破線は加熱後の試験体である。圧縮強度については、無筋コンクリートでは加熱を受けることにより若干低下しているが、鉄筋コンクリートではむしろ増加する傾向が見られ、その原因は明らかでない。剛性については加熱を受けることによりいずれの場合も低下している。この関係を求めるために、以下のような簡便な解析をこころみた。まず試験体断面

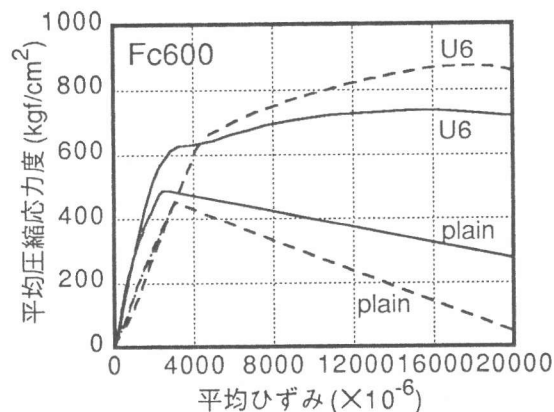
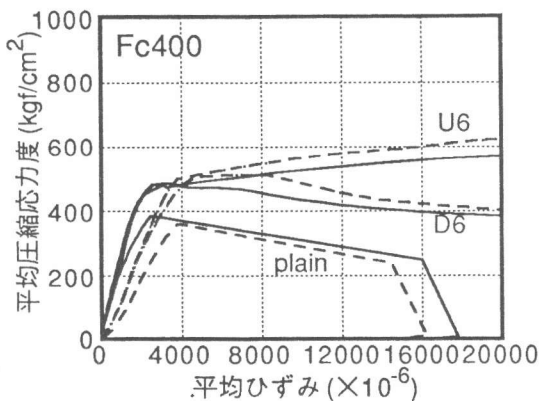
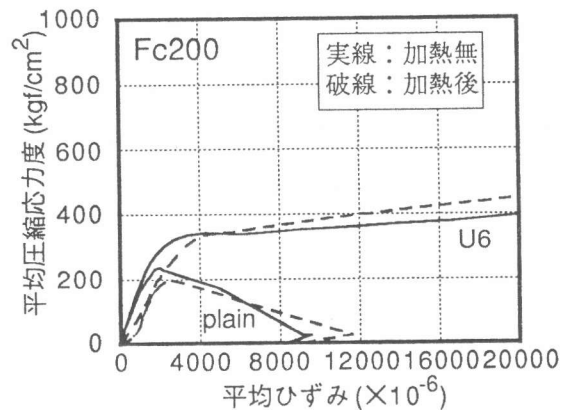


図10 圧縮特性実験結果

を図11中に示すように要素分割し、部材内部温度解析を行う。コンクリートの諸定数は文献1の普通コンクリートの値を引用し、また試験炉と試験体の合成輻射率は試験炉の性質より0.1と定めている。図11に部材内部温度解析の結果を破線で示し、また試験体中央断面で熱電対によって測定された結果を実線で示している。こうして各要素の経験した最高温度を求め、これを材料試験から求めた(図2~4の点線で示した)回帰式に代入して各要素の圧縮強度、弾性係数、圧縮強度時のひずみを求める。これらの値を六車モデル(文献2)を用いて表したのが、図12および図13である。縦軸の実験結果からは主筋の応力を差し引いている。無筋コンクリートについては、こうした簡便な方法を用いても、高温を受けたことによる圧縮特性の変化を評価できるようである。

5. まとめ

炉内温度で550℃までの高温を与えた、調合強度200~750kgf/cm²のコンクリートを用いたRC部材の力学的特性について実験を行い、以下のような知見が得られた。

- ①加熱後の力学的特性の傾向について、コンクリート強度による差異は認められない。
- ②加熱によるひびわれのため、引張側コンクリートはほとんど応力を負担しない。
- ③加熱を受けたコンクリートの圧縮特性については、強度の低下も見られるが、剛性の低下の方が顕著である。
- ④部材の外部拘束がそれほど無い場合に、熱伝達解析により部材内部の経験最大温度を求めることにより、部材の力学的特性を評価することができる見通しが得られた。

〔参考文献〕

- 1) 国土技術開発センター編：建築物の総合防火設計法、第4巻 耐火設計法、日本建築センター、1989
- 2) 六車 照ほか：横補強による高強度コンクリートのじん性改善に関する研究、コンクリート工学年次講演会講演論文集、Vol.5、pp.317-320、1983

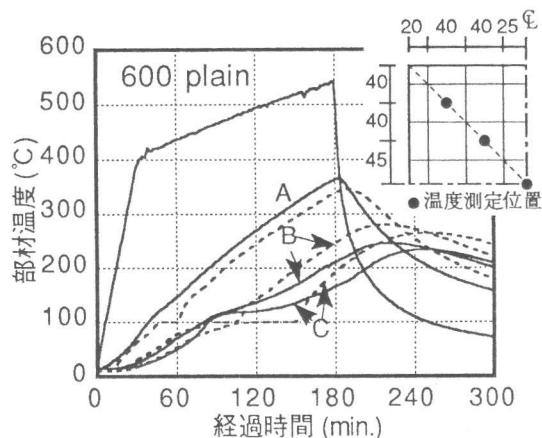


図11 部材内部の温度履歴と温度解析結果

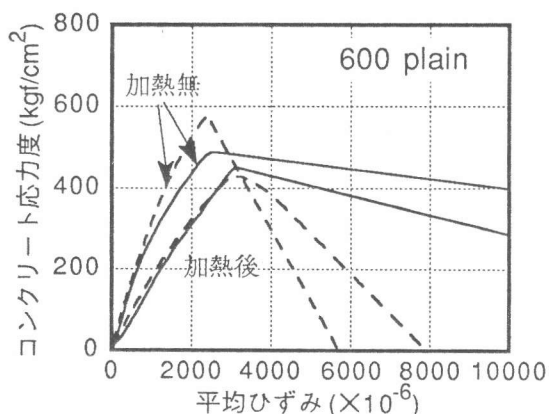


図12 応力度~ひずみ関係 (plain)

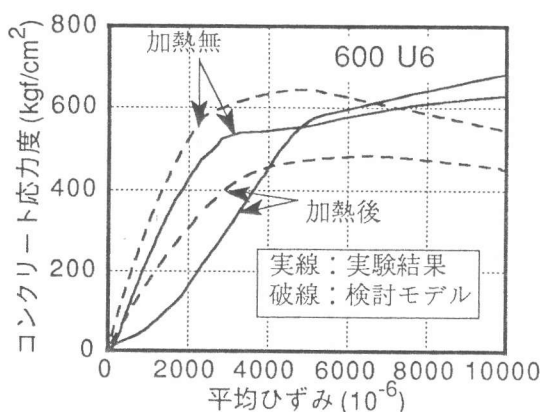


図13 応力度~ひずみ関係 (confined)