

## 論文 高温時におけるコンクリートの内部応力解析

宋 勲<sup>\*1</sup>・菅原 進一<sup>\*2</sup>・田村 政道<sup>\*3</sup>・望月 秀敏<sup>\*4</sup>

要旨：コンクリート構造物が火災を受けた場合、火災温度が上昇するにつれて強度およびヤング係数が低下し、それに関連して亀裂、ポップアウト、爆裂などの劣化現象が起り易くなる。コンクリートの高温下における劣化現象メカニズムについてはさまざまな報告があるが、解明すべき点も少なくない。本研究は、高温時のコンクリート部材の内部応力を伝熱解析および連成解析法を用いて計算し、実験的にも検討を加えた。解析の結果、加熱によりコンクリート部材の内部は非定常状態の温度・応力分布を示し、特に、加熱初期の温度および熱応力の急激な変化が爆裂を誘起する可能性があることを明らかにした。

キーワード：爆裂，熱応力，連成解析，伝熱解析，熱的性質

## 1. はじめに

コンクリートの耐火性能に関する数多くの研究より、鉄筋コンクリート造の建物は所定のかぶり厚さがあれば耐火構造であると認められている<sup>1)</sup>。しかし、コンクリート部材が火災を受けた場合、火災温度の上昇につれ、強度およびヤング係数が低下するなどの劣化現象が起こる。また、コンクリート部材は高温に長時間曝されることによりコンクリート中のセメント水和物が脱水し、水和物の変化および時には表面から内部に至る大きな亀裂が発生する場合もある<sup>2)</sup>。特に、高強度コンクリートはその傾向が強く、爆裂などによる断面欠損の発生、鉄筋の温度上昇などの危険がある。このような背景により、耐火性能の新たな検討および爆裂のメカニズムの解明が注目を浴びている<sup>3),4)</sup>。コンクリート部材の熱的性質はコンクリートの調合、使用骨材の種類によっても大きく左右される<sup>1),2),4),7)</sup>。コンクリート部材が熱を受けた場合、コンクリートには不均一な温度分布が生じ、熱的特性の異なる隣接部分では、伸縮が拘束されることになり、熱応力が生じる。本研究では、実験的検討も

合わせて異なる熱的物性を持つコンクリートの内部温度を求め、その結果から連成解析を利用してコンクリート内部に発生する熱応力を計算するものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料および調合

使用材料を表-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。モルタルの調合は、実際のコンクリートの調合から粗骨材のみを除いたものである。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g/cm}^3$ )を、細骨材は大井川水系陸砂(表乾密度 $2.60\text{g/cm}^3$ )を粗骨材は青梅産硬質砕石(表乾密度 $2.65\text{g/cm}^3$ )を用いた。コンクリートの調合は単位水量を $170\text{kg/m}^3$ 、W/Cを25,35,45,55%と変化させた。スランブ $18 \pm 3\text{cm}$ 、空気量 $4 \pm 1\%$ を目安に高性能AE減水剤の量を調整した。コンクリートの練り混ぜは100Lの強制式ミキサを用い、セメントと細骨材を投入して空練り後練混ぜ水と混和剤、粗骨材の順番に投入して各90秒間練り混ぜた。試験体は所定の材齢まで気中養生を行った。

\* 1 東京大学大学院生 工学系研究科 建築学専攻 工修 (正会員)

\* 2 東京大学教授 工学系研究科 工博 (正会員)

\* 3 東京大学技術官 工学系研究科

\* 4 東京大学大学院生 工学系研究科 建築学専攻

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	青梅産硬質砕岩砕石(表乾密度2.65g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	大井川水系陸砂(表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤

2.2 試験体寸法および測定

高温時の強度および物性測定は、モルタル試験体(φ50×100mm)を用い、電気炉で2時間(加熱速度13.2℃/min)加熱後常温に戻し、2軸ひずみゲージを利用して測定した。図-1に物性測定用モルタル試験体の加熱方法および加熱時間を示す。耐火性能測定は、ISO 834の標準加熱曲線によりコンクリート試験体(φ100×200mm, 500×500×120mm)を用いて測定した。図-2, 3に試験体の寸法・形状および壁式加熱炉および温度測定点を示す。試験体は鉄筋(D10)までのかぶり厚さ40mm, 加熱面から20mm間隔で20, 40, 60, 80mmに熱電対を埋め込みコンクリートおよび鉄筋の温度を測定した。耐火試験時の材齢は85日のものであり、測定時の含水率は2.6～3.0%であった。

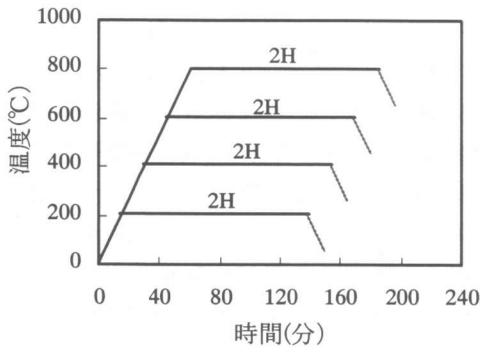


図-1 加熱方法および加熱時間

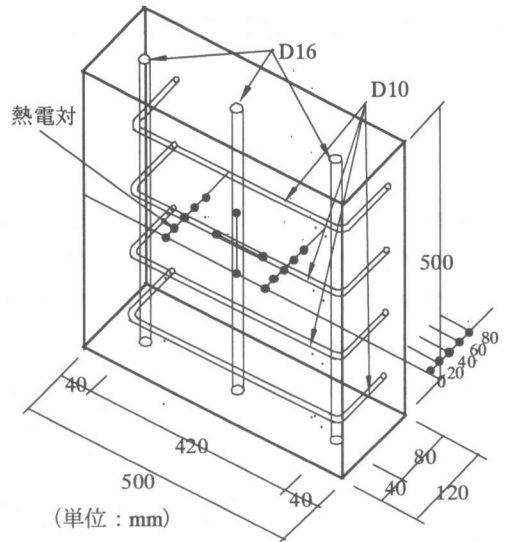


図-2 試験体の寸法・形状

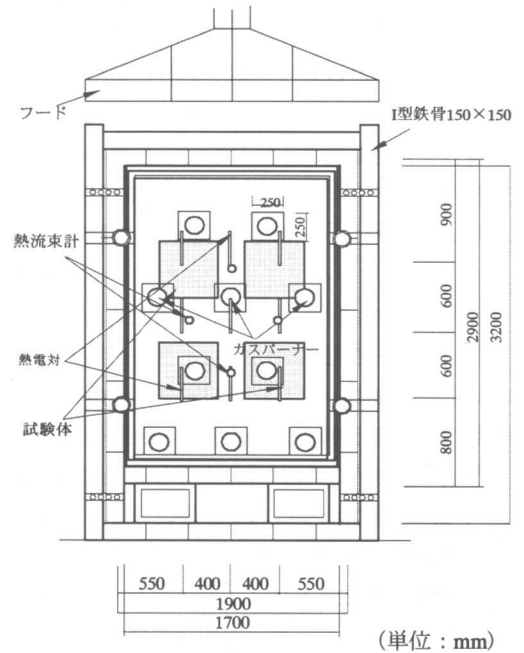


図-3 一面壁式加熱炉および温度測定点

表-2 コンクリートの調査

Series	W/C (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )				SP (%)	Air (%)	Slump (cm)
			W	C	S	G			
C-25	25	45	170	680.0	672.5	837.8	1.0	4.6	18
C-35	35	45	170	485.7	744.5	927.4	0.7	3.5	16
C-45	45	47	170	377.8	819.3	941.6	0.7	3.0	20
C-55	55	47	170	309.1	845.9	972.2	0.6	3.8	17

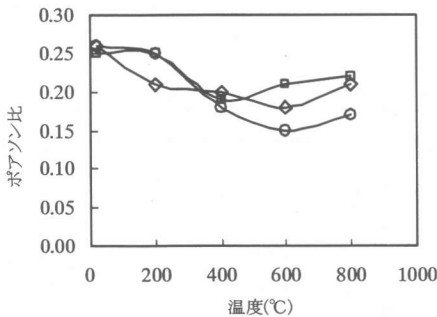
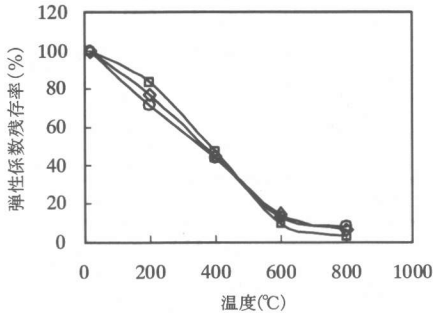
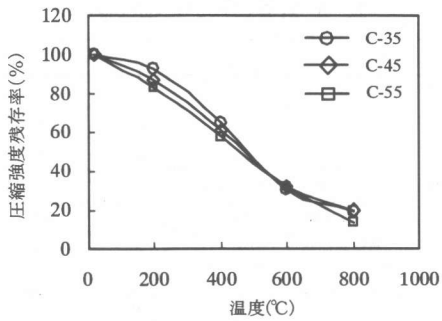


図-4 加熱温度によるモルタルの物性変化

### 2.3 加熱による物性の変化

#### 2.3.1 圧縮強度および弾性係数

図-4にモルタル試験体の加熱温度による圧縮強度残存率およびヤング係数残存率を示す。いずれの試験体も水セメント比に関係なく加熱温度の上昇により圧縮強度およびヤング係数が減少した。

#### 2.3.2 高温時の応力とひずみ

図-5にモルタル試験体の加熱温度による応力とひずみの関係を示す。いずれの試験体においても加熱温度の上昇により、単位応力に対するひずみが増加した。また、加熱温度が高いほどひずみは大きくなる。W/Cに関係なく、いずれの試験体も類似の傾向を示した。

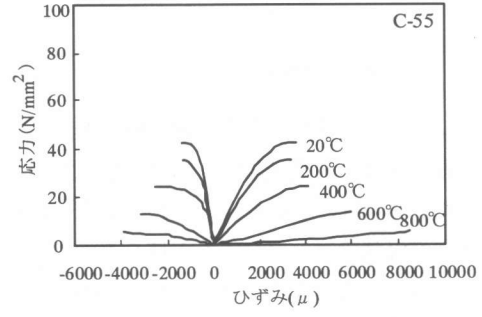
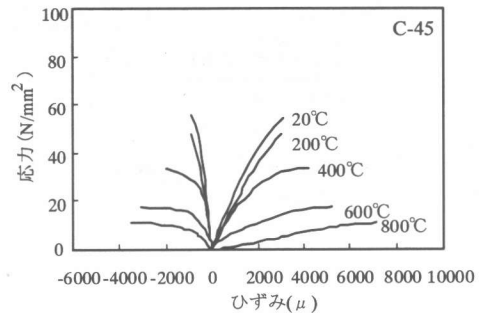
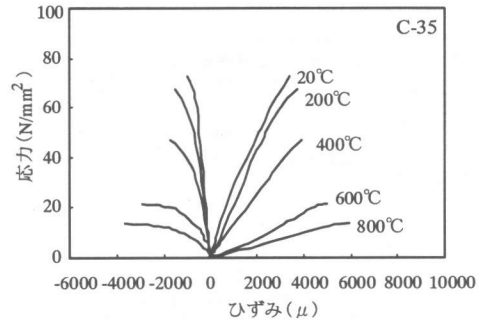


図-5 応力-ひずみ曲線(モルタル)

### 2.4 耐火性能評価

ISO 標準加熱曲線により加熱した試験体はほとんど同様の温度分布を示した。爆裂は見られないが、大きな亀裂や骨材の周辺にはポップアウトが発生した。そして、亀裂およびポップアウトは、強度が高いほど顕著であった。いずれの試験体も鉄筋温度は500°C以下であった。

## 3. 計算方法および仮定

### 3.1 計算の流れ

図-6に計算方法のフローチャートを示す。内部熱応力はFEMによる熱伝導および熱応力解析プログラムを用いて、加熱面からの2次元非定常伝熱解析を行った。各条件の加熱時間によ

表-3 計算に用いた物性値

コンクリート		単位	C-25	C-55
物性値	強度	N/mm <sup>2</sup>	87	37
	熱伝導率	W/m·K	1.2	1.2
	密度	kg/m <sup>3</sup>	2340	2300
	定圧比熱	J/kg·K	1200	1300
	ヤング係数	N/mm <sup>2</sup>	36000	26000
	熱膨張係数	1/K	9×10 <sup>-6</sup>	9×10 <sup>-6</sup>
	ポアソン比		0.2	0.2
熱物性値	熱伝導率	ヤング係数		
		C-25	C-55	
	20℃	1.2	36000	26000
	200℃	1.0	27800	20100
	400℃	0.9	16300	11800
600℃	0.7	4500	3250	
800℃	0.5	2160	1560	
加熱条件		ISO 834		
境界条件				

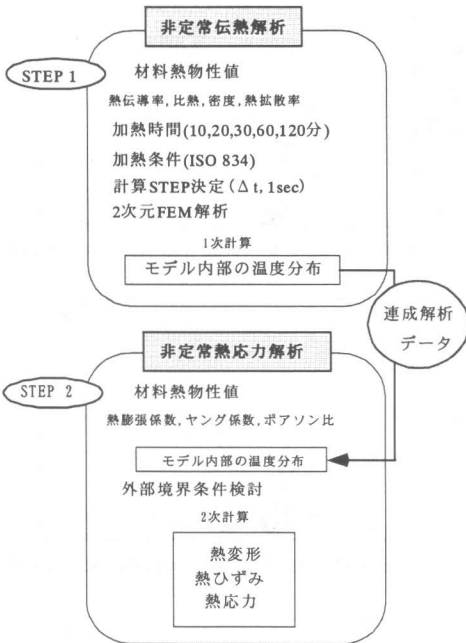


図-6 連成解析のフローチャート

るコンクリート部材モデルの内部温度を計算しその結果をもとに連成解析を行い、熱応力を計算した。常温時の圧縮強度およびヤング係数をもとに高温時のコンクリートの値を実験的検討も加え算定した。また、コンクリート内部の骨材の影響は考慮せず、加熱面および加熱面から20, 40, 60, 80mmの距離における、加熱時間による内部温度分布を計算した。

### 3.2 加熱条件および物性値

コンクリート部材モデルの加熱条件はISO 834に従った。

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0$$

ここで、 $T_0$ ：初期温度、時間 $t$ の単位は(分)である。表面温度はISO 834の標準加熱曲線により10, 20, 30, 60, 120分の間隔でモデルの表面温度を計算し、伝熱解析を行った。計算に用いた物性値を表-3に示す。また、コンクリートの計算モデルに用いた物性値は既往の文献および実験的検討をもとに設定した<sup>1),2),5),6),8),9)</sup>。図-7, 8に測定した物性値としての在齢と圧縮強度および耐火試験時に試験体に入射した熱流束を示す。

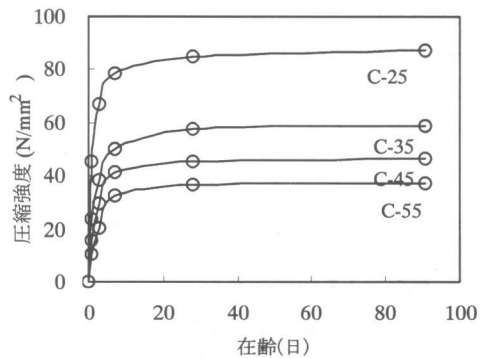


図-7 材齢と圧縮強度の関係

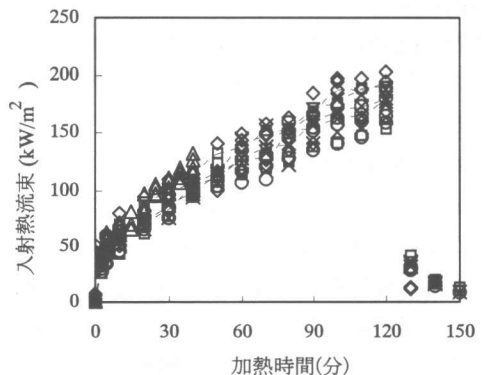


図-8 耐火試験時の入射熱流束

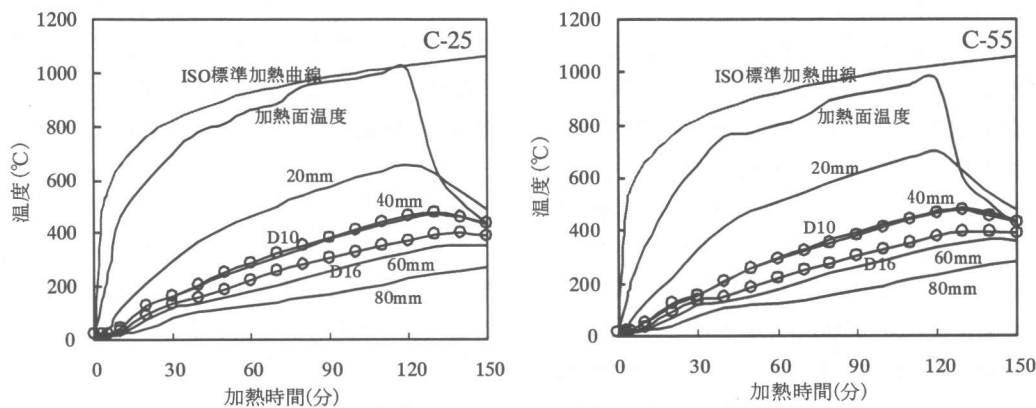


図-9 コンクリート部材の内部温度分布 (2時間耐火試験時)

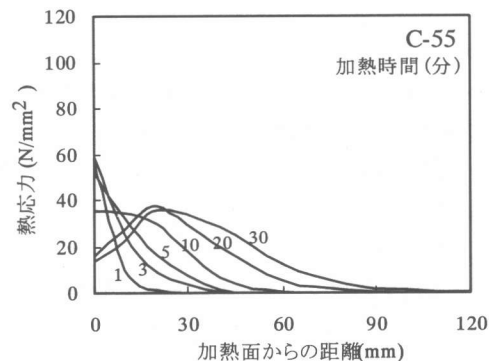
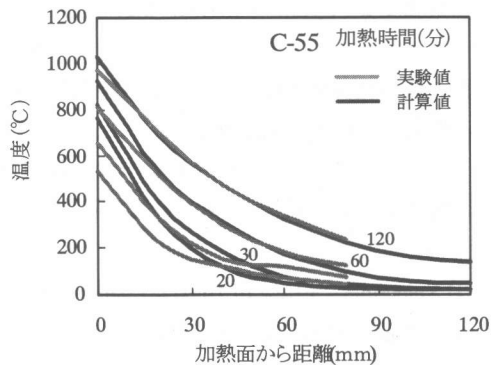
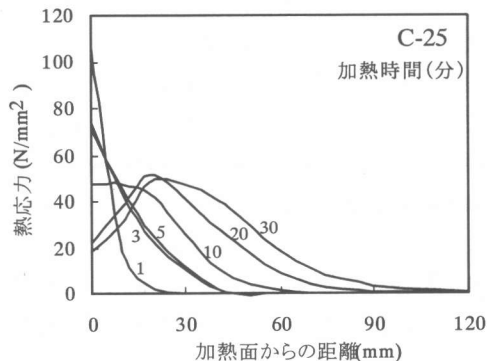
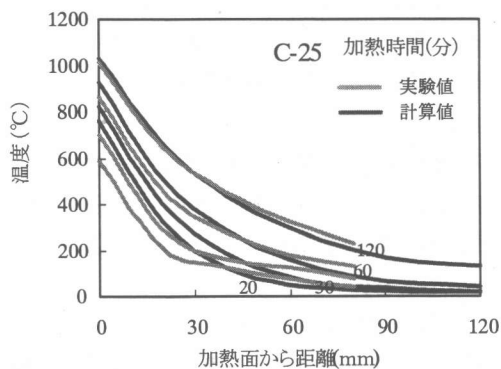


図-10 加熱時間による内部温度分布

図-11 熱応力予測(計算値)

#### 4. 計算結果および考察

##### 4.1 モデル内部の温度分布

図-9に2時間加熱耐火試験時の内部温度分布を示す。いずれも内部温度に大きな差は見られないが、C-55のほうがC-25より内部温度が高い。また、加熱面から同一距離にあるコンクリートと鉄筋の温度差はほとんど見られない。

図-10に加熱時間による内部温度分布の変化を示す。実験値と伝熱解析による計算値はほぼ一致している。しかし、加熱面からの距離が近いほど実験値と計算値の差は大きくなる。その理由は、試験体内部の水分の蒸発によるエントロピー変化の影響および加熱面の温度測定の精度に起因するものと考えられる。

## 4.2 熱応力

図-11に加熱面からの距離と熱応力変化との関係を示す。熱応力は温度およびヤング係数に依存するため、両端に拘束を受けた部材の熱応力は加熱時間の経過とともに増加する。また、C-25はC-55よりヤング係数が高いため、熱応力も高い結果を示した。特に、加熱初期では加熱時間の経過に伴い最大熱応力差は大きくなる。加熱初期に急激な温度変化を受けたコンクリート部材の加熱面は熱応力が集中する傾向を示した。そのような加熱初期に発生する非正常状態の熱応力は、部分的な表面爆裂の原因となる可能性がある。また、加熱面の熱応力は加熱開始後20分までは急激な増減の傾向が見られ、その後、加熱温度の増加に伴い漸減する。しかし、内部では加熱温度の増加により漸増する傾向が見られる。上記の結果より、加熱温度の増加に伴い徐々に内部まで部材の劣化が進行するものと考えられる。本モデルは、高温域における材料の熱的特性を一部考慮したものであり、今後はより正確な熱物性値を検討し解析を進める必要がある。

## 5. まとめ

本研究はコンクリートの加熱初期における爆裂発生に関する研究の一部として検討したものである。加熱初期のコンクリート部材モデルの温度変化および内部熱応力の連成解析結果から次のような知見が得られた。

- (1) 加熱によるコンクリート内部温度分布は、同一距離にある部分の温度差は大きくないが、加熱面から距離が近いほど実験値と計算値の差が大きくなる傾向がある。
- (2) 加熱初期の温度および熱応力の急激な変化により、部分的な爆裂を誘起する可能性がある。
- (3) 加熱温度の増加により、内部では熱応力が漸増し、徐々に内部まで熱による部材の劣化が進む。

本解析に用いたコンクリート部材モデルは、上下両端に拘束を受けた場合のみに限定したも

のであり、加熱による熱変形、水分の蒸発によるエントロピー変化、水蒸気圧の発生および高温下の物性変化を明らかにして爆裂現象との関連をさらに検討する必要がある。

## 感謝

本研究にあたり、(株)フジタ技術センターの青木治雄氏、中村正博氏にご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) U. シュナイダー, “コンクリートの熱的性質”, 技報道出版, 1983
- 2) 森 実, “建築材料の火災時における高温性状に関する研究” 博士学位論文, 東京大学, 1975
- 3) 長尾覚博他, “高温を受けるコンクリート部材の水分移動と圧力形成に関する模型実験” 日本建築学会構造系論文集, pp1 ~ 10, No.452, 1993
- 4) 原田和典他, “コンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響” 日本建築学会構造系論文集, pp145 ~ 151, No.481, 1996
- 5) 宋 勲他, “火災時におけるコンクリート部材の爆裂に関する研究” 日本建築学会学術講演概要集, pp81 ~ 82, 2000
- 6) 野口貴文, “高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する研究”, 博士論文, 東京大学, 1995
- 7) U Schneider, “Effect of Biaxial Loading on the High Temperature Behaviour of Concrete” Fire Safety Science, Proceedings of the First International Symposium, pp281 ~ 290, 1986
- 8) C Castillo, “Effect of Transient High Temperature on High Strength Concrete” ACI Materials Journal, pp47 ~ 53, 1990
- 9) S D Venecanin “Thermal Incompatibility of Concrete Components and Thermal Properties of Carbonate Rocks” ACI Materials Journal, pp602 ~ 607, 1990