

# 鋼板拘束鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究

丹羽 博 則      小林      讓  
長尾 覚 博      吉岡 研 三

## Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns Confined by Steel Plates

Hironori Niwa      Yuzuru Kobayashi  
Kakuhiro Nagao      Kenzo Yoshioka

### Abstract

A reinforced concrete column confined by steel plates has higher seismic resistance under high axial compression. This structural system has better fire resistance than RC columns, because the steel plates protect the covered concrete from spalling in a fire. Under the present regulations, fire protection is required for steel plates, but this may be omitted if their performance without fire protection can be verified.

This paper describes an experimental and analytical studies on the fire resistance of reinforced concrete columns confined by steel plates without fire protection. We carried out a fire resistance test under constant axial load, and this test showed that all specimens had fire endurance beyond three hours.

### 概 要

鋼板拘束鉄筋コンクリート柱は、帯筋の代替として柱の周囲を鋼板で覆いコンクリートと主筋を拘束することによって、高軸力下において優れた耐震性能を有する。また、火災時には拘束鋼板が爆裂によるかぶりコンクリートの剥落を防ぐことにより、従来の帯筋構法に比較して耐火性能の向上が期待される。本構法の柱は、外周の拘束鋼板が主要構造部材であるため、現段階では耐火被覆を要求されているが、無耐火被覆でも優れた耐火性能を有することが確認されれば耐火被覆の省略が可能になると考えられる。

耐火被覆の無い鋼板拘束鉄筋コンクリート柱の耐火性能を確認するため、実験および数値解析を実施した。中心圧縮による載荷加熱実験を実施した結果、本実験条件の範囲内であれば3時間以上の耐火性能を有していることが確認された。また、解析結果は火災時の軸耐力を全体として高めに評価する傾向であった。

## 1. はじめに

鋼板拘束鉄筋コンクリート柱（以下、鋼板拘束柱）は、内部に帯筋を配置するかわりに外周に鋼板を巻いてせん断補強を行うことを意図した構造部材であり、鋼板によるコンクリートと主筋の拘束が大きいため、高軸力下においても優れた耐震性能を有することが確認されている<sup>1)</sup>。一方、RC構造物に火災が発生した場合、特に高強度コンクリートにおいては爆裂が生じる可能性が大きい。このとき、爆裂によるかぶりコンクリートの剥落に伴う柱断面の欠損および鉄筋と内部コンクリートの急激な温度上昇によって軸方向支持力が低下し、架構の倒壊を招くおそれがある。鋼板拘束柱においては、火災時における爆裂によるかぶりコンクリートの剥落を表面鋼板が防ぐことにより、内部の急激な温度上昇が抑えられるため、通常のRC柱に比べて火災時における荷重支持能力、即ち耐火性能が大きいと考えられる。

ところが、拘束鋼板は主要構造部材となるため、現

段階では耐火被覆が要求される。しかし、無耐火被覆でも優れた耐火性能を有することが確認されれば、耐火被覆の省略が可能になると考えられる。すでに、縮小モデル試験体を用いた電気炉加熱による耐火試験を行い<sup>2)</sup>、優れた耐火性能を示す基礎データを収集している。

本研究では、無耐火被覆の鋼板拘束柱の耐火性能をより詳細に把握するため、実大断面に近い試験体を用いて載荷加熱試験を実施した。また、数値解析による熱応力変形性状の解明を試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

中心圧縮を受ける無耐火被覆の鋼板拘束柱の耐火性能を検討するために、Table 1に示す7体の試験体について載荷加熱実験を実施した。試験体は、所定のかぶり厚さの位置に主筋を配し、柱の周囲をせん断補強筋に替わる板厚3.2mmの拘束鋼板により覆うものとした。Fig.1に試

験体形状の例を示す。柱試験体の加熱区間の上下端には、鋼板が圧縮力を直接負担しないようにするため、鋼板に各20mmのクリアランスを設けた。主な実験パラメータは、コンクリート強度・軸力比 ( $N/bD\sigma_B$ ) および鋼板による拘束方法とし、断面寸法は載荷装置の能力より□-300~500mmとした。

2.2 使用材料

使用するコンクリートは、設計基準強度  $F_c 24, 42, 60(N/mm^2)$  の3種類とした。コンクリートの調合をTable 2, 強度試験の結果をTable 3, 使用材料をTable 4に示す。コンクリートの強度管理には、φ100mm×高さ200mmのシリンダー供試体を用い、試験体と同条件下で封緘養生とした。また、実験時における柱試験体のコンクリートの含水率を推定するため、シリンダー供試体を105℃で重量が恒量となるまで乾燥させ、重量変化から含水率を求めた。Table 5に含水率の測定結果を示す。

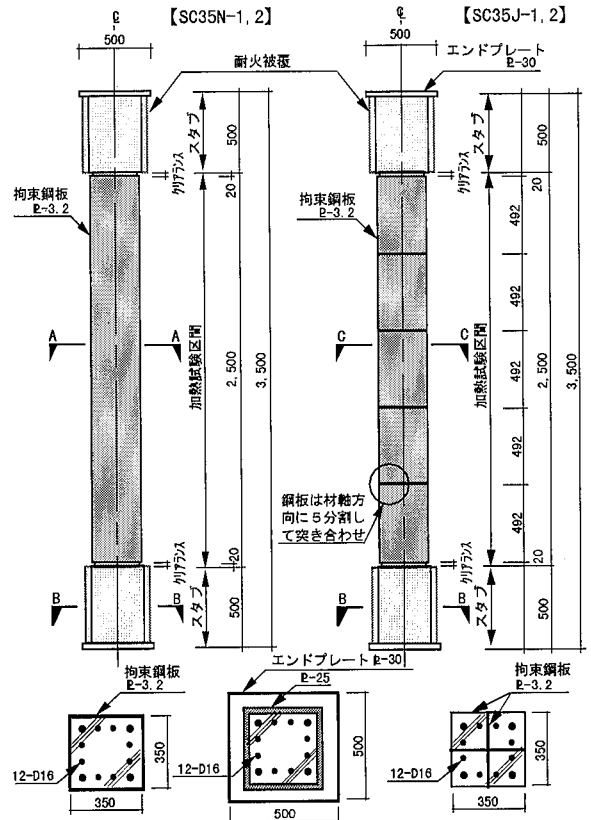
鋼材は、拘束鋼板にSS400 (板厚3.2mm), 鉄筋にはSD345 (D16,D22), SD490 (D19) を使用した。鋼材の機械的性質をTable 6に示す。

2.3 実験方法

実験は、(財)日本建築総合試験所の柱用耐火炉(Fig.2)で実施した。試験体の支持条件は、柱頭・柱脚とも球座によるピン支持とし、非加熱区間である上下スタブ部分には、セラミックファイバープランケット(厚さ:50mm)により十分な耐火被覆を施した。実験方法は、柱試験体に所定の軸力を与えた状態で加熱を開始し、定荷重を維持しつつ柱の軸力支持能力が喪失する(崩壊)まで加熱を続けるものとした。加熱は、JIS A 1304に規定されている標準加熱曲線に準拠して行った。SC50N-1,2およびSC35J-2の3体は、加熱終了時点においてまだ荷重支持能力を保持していたが、耐火炉および載荷試験装置の保護のため、それぞれ270, 240, 240分で実験を終了した。

2.4 測定方法

温度は、炉内および試験体中央断面の鋼板・内部コンクリート・鉄筋に対して1分間隔で測定した。Fig.3に断面内部の温度測定位置の例を示す。なお試験体の温度測



A-A 断面(試験部) B-B 断面(スタブ) C-C 断面(試験部)

Fig.1 試験体形状【SC35N-1,2, SC35J-1,2】  
Test Specimens

Table 2 コンクリートの調合  
Mix Proportions of Concrete

Fc (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			C	W	S	G	混和剤 (C×%)
24	67.0	51.7	279	187	922	879	0.35 (AE減水剤)
42	43.9	51.2	387	170	910	886	1.4(高性能減水剤)
60	32.9	48.1	516	170	803	886	1.3(高性能減水剤)

Table 3 コンクリートの強度試験結果  
Mechanical Properties of Concrete

Fc (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1/3割線係数 ( $\times 10^4 N/mm^2$ )	材齢 (日)
24	24.1	2.2	2.51	61
42	45.5	3.6	3.00	104
60	57.7	4.0	3.37	56

Table 4 コンクリートの使用材料  
Materials of Concrete

	産地	岩質	質量比(%)
細骨材	千葉県佐原	陸砂	40
	秩父市影森	石灰岩 砕砂	35
	栃木県岩舟	硬質砂岩 砕砂	25
粗骨材	秩父郡武甲	石灰岩 砕石	70
	栃木県岩舟	硬質砂岩 砕石	30
セメント	普通ポルトランドセメント		

Table 5 含水率測定結果  
Moisture Contents Ratio

供試体	Fc24	Fc42	Fc60
含水率(%)	6.74	5.50	5.69
材齢(日)	61	104	56

Table 1 試験体諸元  
List of Test Specimens

試験体名	SC50N-1	SC50N-2	SC35N-1	SC35N-2	SC35J-1	SC35J-2	SC30J
断面寸法	500×500		350×350		350×350		300×300
長さ (加熱区間)	3,500 (2,500)		3,500 (2,500)		3,500 (2,500)		3,500 (2,000)
Fc(N/mm <sup>2</sup> )	24		42		42		60
主筋	12-D22 (SD345)		12-D16 (SD345)		12-D16 (SD345)		8-D19 (SD490)
Pg(%)	1.86		1.95		1.95		2.55
かぶり厚	40.8 mm		43.8 mm		43.8 mm		42.3 mm
拘束鋼板	PL-3.2 (SS400)						
Pw(%)	1.3		1.8		2.7		3.2
N/bD $\sigma_B$	0.40		0.36		0.30 0.36		0.30
鋼板形状	□形(全長通し)				田形(材軸方向5分割)		

定には、素線径φ0.65mmのCA熱電対を用いた。

変形は、Fig.2に示すように試験体の柱脚部においてラムスラー式圧縮試験機の載荷板下側に変位計を設置し、軸方向変位を1分間隔で測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 加熱時の状況

試験体は、鋼板で覆われているために目視によるコンクリートの爆裂現象は捉えられなかったが、爆音が認められた。爆音の発生状況は、コンクリート強度および断面寸法の違いによる影響はみられず、拘束方法の違いによる差異のみが認められた。□形鋼板により拘束した試験体(Nタイプ)では、加熱開始後10分から30分にかけて激しく爆音が発生したが、拘束鋼板を田形とした試験体(Jタイプ)では加熱初期段階にわずかに爆音が確認できた程度で、ほとんど爆音は発生しなかった。実験終了後に、試験体の表面鋼板を剥がして内部コンクリートの状況を観察した結果、各試験体とも表面積の半分程度にき裂および剥落がみられた。また、コンクリートの表面は薄茶色に変色しており、剥落した表層部コンクリートは粉末状となっていた。かぶりコンクリートの剥落の及んだ深さは表層部にとどまっておらず、わずかに主筋が露出した箇所が見受けられたが、主筋より内部のコンクリートには達していなかった。

#### 3.2 試験体温度の経時変化

3.2.1 試験体温度 試験体温度の経時変化の一例として、SC50N-1の結果をFig.4に示す。鋼板表面温度は、加熱の開始とともに急激に上昇するが、炉内温度に比べて約100℃程度低い値を示している。コンクリート内部温度は、断面の中心に向かうに従い温度および温度上昇の勾配が緩やかになる。図の例では、加熱表面より112mm以上の深さでは加熱開始3時間後においても100℃程度の温度に停滞している。

3.2.2 炉内温度および鋼板温度 各試験体の炉内温度および鋼板表面の温度履歴をFig.5に示す。炉内温度は標準加熱温度曲線とほぼ一致しており、全試験体について加熱制御は良好に行われた。各試験体の鋼板表面温度は、加熱開始60分後には全て800℃を超える高温となっているが、別途実施した鋼板の熱間素材試験結果より、800℃においては降伏点・引張強度ともに常温時の10%程度に低下するため、表面鋼板による拘束効果はこの時点でほとんど期待できないものと推定される。断面寸法による熱容量の差が鋼板温度に与える影響は明確には認められず、50℃程度のばらつきの範囲に収まっている。また、実験終了後の鋼板表面には薄い黒色の酸化鉄の膜が生じて膨れ上がり、一部剥がれ落ちていた。

3.2.3 鉄筋温度 SC50N-1,2およびSC35N-1,2の鉄筋温度の履歴をFig.6に示す。断面寸法およびコンクリート強度の違いが鉄筋温度に与える影響は明確にはみられず、各試験体の鉄筋温度の上昇はほぼ等しいものとなってお

Table 6 鋼材の機械的特性  
Mechanical Properties of Steel Bar

供試体	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 ×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	使用部位
t=3.2 (SS400)	270	20.8	436	拘束鋼板
D16 (SD345)	394	20.8	582	主筋
D19 (SD490)	500	19.1	695	主筋
D22 (SD345)	380	20.5	558	主筋

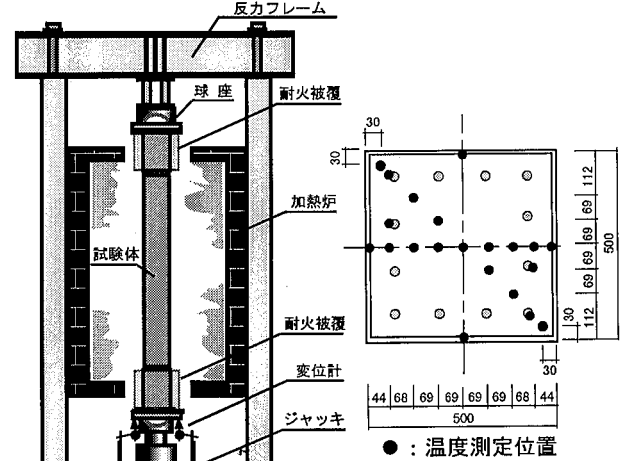


Fig.2 実験装置  
Experimental Apparatus

Fig.3 熱電対配置図  
[SC50N-1]  
Arrangement of Thermo Couples

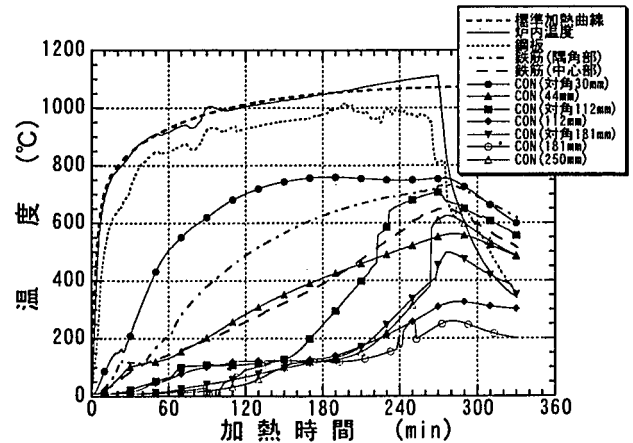


Fig.4 試験体温度の経時変化 (SC50N-1)  
Temperature in SC50N-1 During the Test

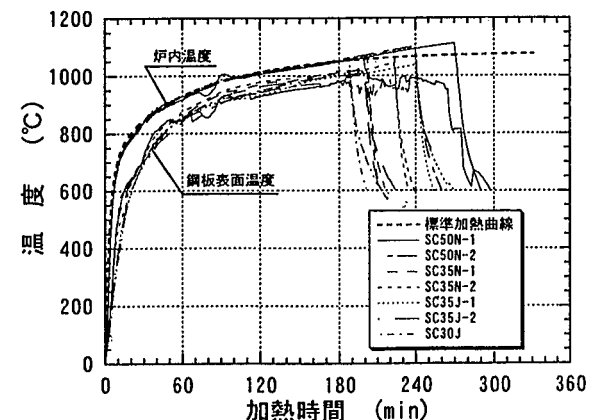


Fig.5 炉内温度および鋼板表面温度  
Heating Temperature and Steel Temperatures

り、コンクリートのかぶり厚さが支配的要因と思われる。隅角部に配された鉄筋は中央部に配された鉄筋に比べて高い温度を示しているが、これは隅角部においては2方向より加熱を受けることにより熱の流入量が多いためと考えられる。

**3.2.4 コンクリート温度** コンクリートの温度履歴は、加熱開始とともにまず表層部のコンクリートから温度上昇してゆくが、コンクリート温度が100℃に達するとコンクリート中に含まれる水分の蒸発潜熱の影響により、温度上昇が一時停滞する。その層の水分の蒸発が完了すると再び温度は上昇し始め、さらに内部のコンクリートへと熱が伝わり、最終的に断面中心部に達する。断面中心部の水分が蒸発すると断面全体が絶乾状態となり、加熱の継続に従いさらに温度が上昇する。各試験体の断面中心部におけるコンクリート温度の履歴をFig.7に示す。Jタイプの試験体は断面内に配された十字鋼板のヒートブリッジ効果により、Nタイプの試験体に比べて内部温度の上昇が早い。また、断面寸法の小さな試験体ほど早い時間に中心部温度が100℃に達しており、SC30Jは加熱開始70分後には絶乾状態となっているが、SC50N-1,2は加熱開始180分後においても100℃程度の温度に停滞しているため、未だ水分の蒸発が完了していない。加熱開始3時間後における各試験体の断面内部の温度分布状況をFig.8に示す。

**3.3 耐火時間**

軸力比と耐火時間の関係をFig.9に示す。軸力比を0.36としたSC35Nは、軸力比0.40のSC50Nに比べ耐火時間が1時間程度短く、また、等しい軸力比を与えたSC35J-1とSC30Jにおいては、SC30Jの方が1時間以上も耐火時間が短い。これは、スケール効果およびコンクリート強度が耐火時間に大きな影響を与えることを示している。軸力比が等しく拘束鋼板形状のみが違うSC35N-1と2ならびにSC35J-2においては、その耐火時間に明確な差異はみられなかった。また、Nタイプの試験体は主筋の座屈およびコンクリートの圧壊により崩壊に至っているが、Jタイプの試験体は拘束鋼板の突き合わせ部にき裂が入り、全体座屈を生じて崩壊に至った。

**4. 数値解析**

**4.1 解析手法**

解析は、平面保持の仮定のもとで内力と外力の釣合いから繰り返し計算により各時間段階の変形を算定し、高温時の応力-ひずみ関係より部材の剛性と材端力を求める手法<sup>3,4)</sup>とした。解析モデルは、Fig.10に示すように柱部材を材軸方向に9分割し、各小部材の断面は対称性等を考慮して実際の断面の半分を解析対象として、Fig.11に示すように矩形の小要素に分割した。解析における断面内の温度分布は、実験時の測定箇所において点对称となる位置の温度データを平均化し、それを平面補間して与えるものとした。また、本解析においては拘束鋼板は

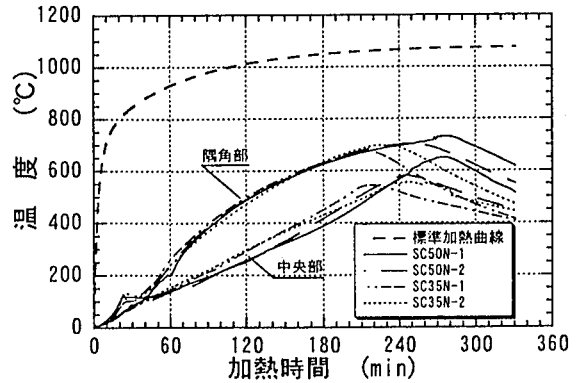


Fig.6 鉄筋温度 (Nタイプ)  
Temperature of Steel Bar

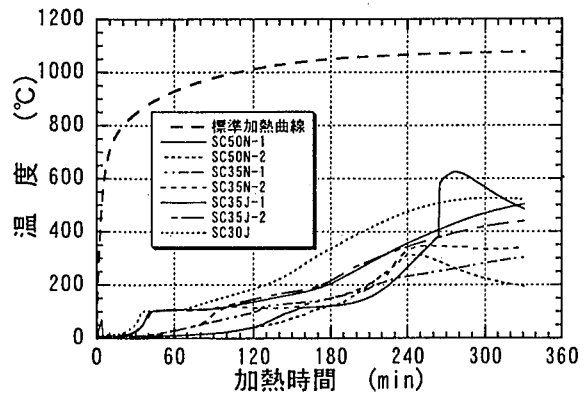


Fig.7 断面中心部の温度  
Temperature in the Center of Section

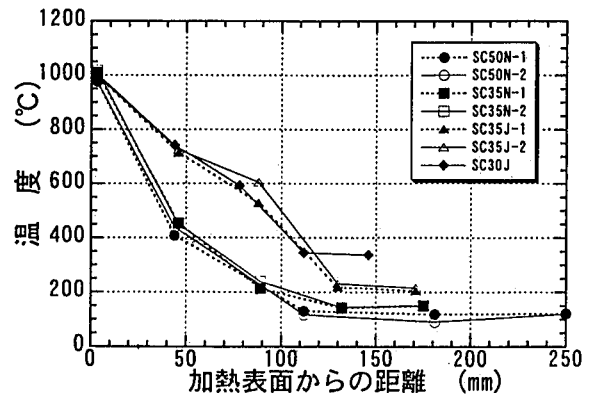


Fig.8 断面内部の温度分布 (加熱3時間後)  
Temperature Distribution Heating after Three Hours

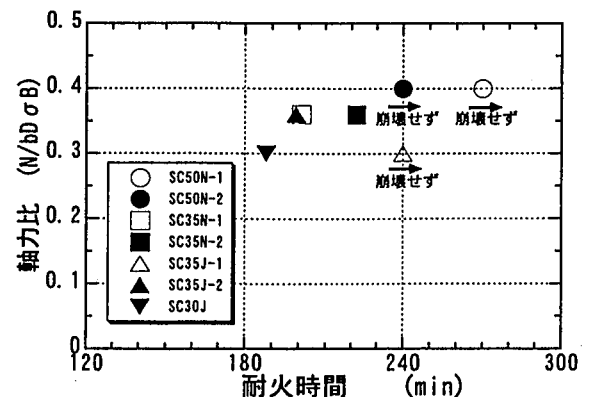


Fig.9 軸力比と耐火時間の関係  
Relationship between  $N/bd\sigma_b$  and Fire Resistance Time

考慮しないものとし、鉄筋の高温時における応力-ひずみ関係は熱間素材試験の結果を補間して定め、コンクリートの高温時における応力-ひずみ関係にはEurocode No.4<sup>9)</sup>を用いた。解析に用いた各材料の高温時における応力-ひずみ関係をFig.12に示す。

4.2 変形挙動

軸方向の変形挙動について、実験値と解析値を比較してNタイプをFig.13に、JタイプをFig.14に示す。試験体は、加熱開始初期段階には温度上昇に伴う熱膨張により材軸方向に伸び出すが、表層部コンクリートと内部コンクリートとの間に大きな温度差が生じているため、それに伴う熱膨張の差により中心部コンクリートの圧縮応力は低下し、表層部コンクリートが軸方向応力の多くを負担する。加熱の進展につれ、表層部コンクリートは熱劣化により応力負担が減少し、軸方向応力の負担は内部コンクリートへと遷移していく。それと同時に加熱初期に生じていた伸び変形は収縮に転じ、徐々に収縮していく。さらに加熱が進むと、主筋および内部コンクリートの温度上昇に伴う強度低下により軸耐力を保持できなくなり、最終的に崩壊する。

解析値は、実験値に比較して加熱開始初期時の伸び出し量が大きい傾向を示している。Nタイプの解析値は、加熱が進行しても加熱初期に生じている伸び出し量の差をそのまま維持してゆくが、Jタイプの解析値は実験値に遅れて急速に収縮に転じており、その収縮速度はほぼ実験値に対応している。SC35J-2の解析値は、加熱開始110分頃から実験値を上回る収縮速度を示し、加熱175分後に崩壊に至っている。

4.3 加熱時の軸耐力

矩形に分割された断面要素において、各要素の温度より算定される材料強度を全断面積について累加することにより、加熱を受ける試験体の軸耐力を式(1)に定義する。式(1)により定義される高温時と常温時の軸耐力の比を軸耐力比として式(2)に定め、また実験時の軸耐力比を式(3)に定義する。

$$[軸耐力] N_c(T) = \sum (A_c \times \sigma_b(t)) + \sum (A_s \times \sigma_y(t)) \dots (1)$$

$$[軸耐力比] N_t(T) = N_c(T) / N_c(RT) \dots (2)$$

$$[実験時の軸耐力比] N_{exp} = N / N_c(RT) \dots (3)$$

- Ac,As : コンクリート要素および鉄筋要素の断面積
- $\sigma_b(t)$  : 温度t℃におけるコンクリート強度
- $\sigma_y(t)$  : 温度t℃における鉄筋の降伏点(0.2% offset)
- t : 断面要素の温度 (℃)
- Nc(T) : 加熱を受ける試験体の軸耐力
- Nc(RT) : 常温時における試験体の軸耐力
- N : 実験時の軸耐力

温度上昇に伴う各試験体の軸耐力比の経時変化をFig.15に示す。SC50N-1と2はほぼ直線的に緩やかに軸耐

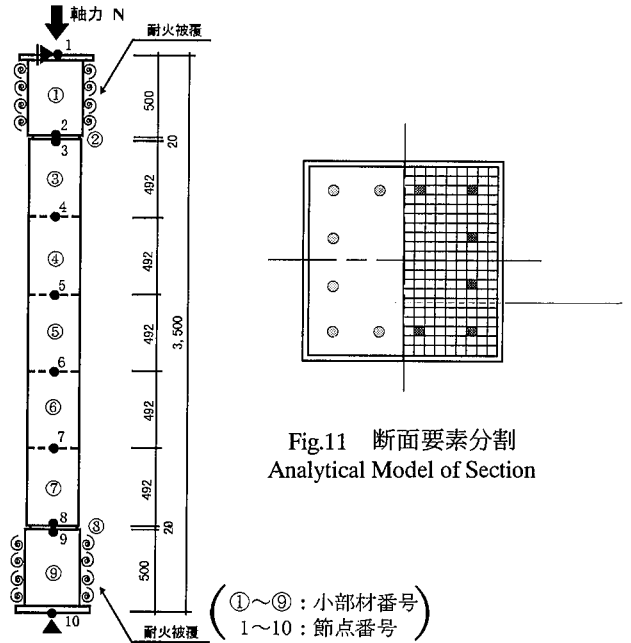


Fig.11 断面要素分割 Analytical Model of Section

Fig.10 解析モデル Model of Analysis

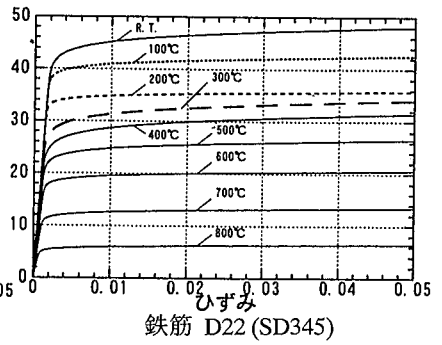
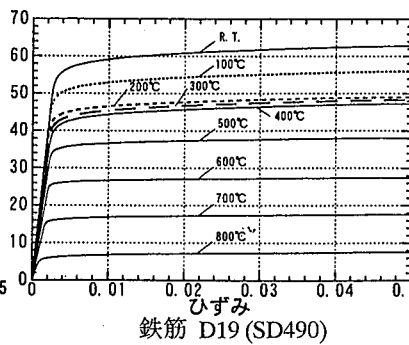
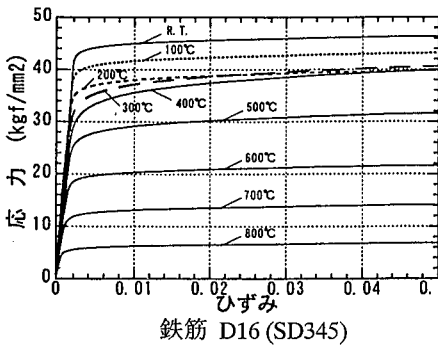
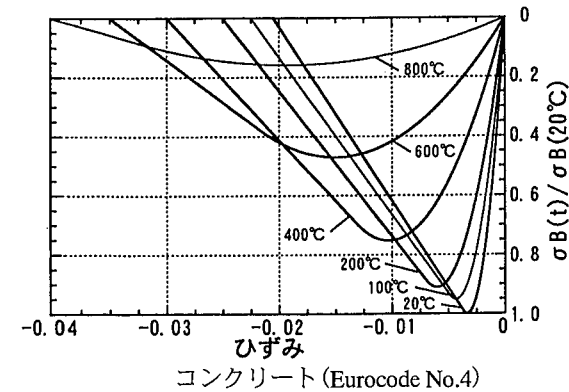


Fig.12 高温時の応力-ひずみ関係 Stress-Strain Relationship at High Temperatures

力が低下しており、また、田形鋼板のヒートブリッジ効果により熱の流入量が多いJタイプは、Nタイプに比べて軸耐力の低下の割合が大きなものとなっている。式(2)に基づいて算定した実験終了時における軸耐力比( $N_t(T)$ )と軸荷軸力比( $N_{exp}$ )の関係をFig.16に示す。これより、本手法では試験体の軸耐力を高めめに評価する傾向となった。

### 5. まとめ

無耐火被覆の鋼板拘束柱の軸荷加熱試験ならびに数値解析を行った結果、本研究の範囲で以下に示す知見が得られた。

- (1) 無耐火被覆の鋼板拘束柱は、3時間以上の耐火性能を有している。
- (2) スケール効果およびコンクリート強度が耐火時間に及ぼす影響は極めて大きい。
- (3) 断面内に配した十字鋼板の耐火性能に対する補強効果はみられなかった。
- (4) 今回用いた解析手法は、高温時の軸耐力を全体として高めめに評価していた。

なお、耐火性能をよりの確に評価するための今後の課題として、下記が挙げられる。

- 1) スケール効果およびコンクリート強度が耐火時間に及ぼす影響の定量的把握。
- 2) コンクリート材料の高温時の構成則の明確化。

### 謝 辞

本研究の遂行にあたり、日本大学 齋藤 光 教授と千葉大学 上杉英樹 助教授には貴重なご助言ご指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 吉岡研三, 他: チューブ構造による41階建RC造建物の耐震設計—その6 高軸力を受ける鋼板拘束柱の強度と変形能, 日本建築学会大会学術講演梗概集C, p. 777~778, (1989. 10)
- 2) 上杉英樹, 他: 鋼板巻き鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, p. 213~216, (1997. 9)
- 3) Becker, J. and Bresler, B.: FIRES-RC-A Computer Program for the Fire Response of Structure-Reinforced Concrete Frames, Report No. UCB FRG74-3, University of California Berkeley, (1974.7)
- 4) 上杉英樹, 他: 火災時におけるコンクリート充填鋼管柱の荷重支持能力に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol. 42B, p. 379~386, (1996. 3)
- 5) Commission of European Communities: Eurocode No.4, Design of Composite Structures Part10; Structural Fire Design, (1990.4)

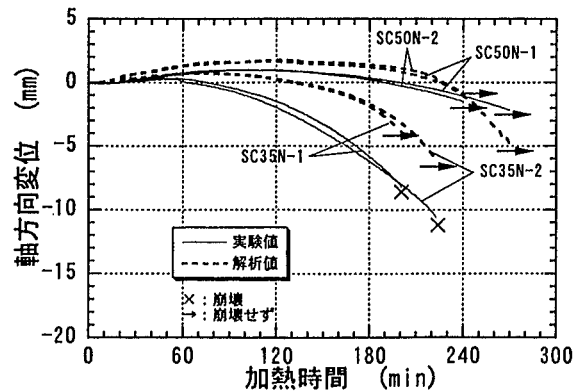


Fig.13 軸方向変位 (Nタイプ)  
Axial Deformation (Type N)

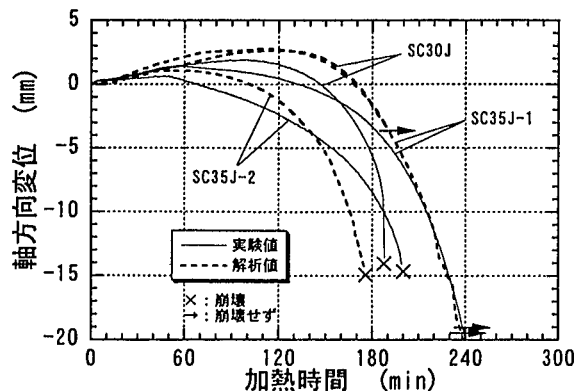


Fig.14 軸方向変位 (Jタイプ)  
Axial Deformation (Type J)

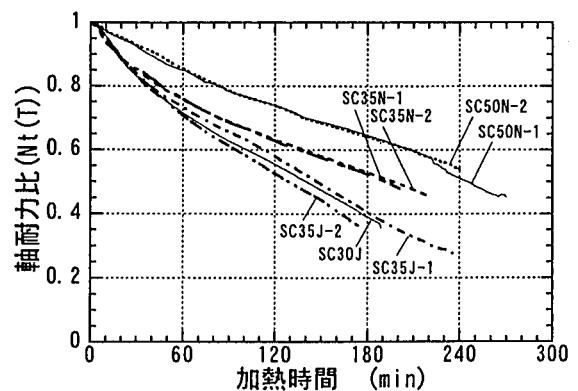


Fig.15 軸耐力比の経時変化  
Relationship between Axial Strength Ratio and Heating Time

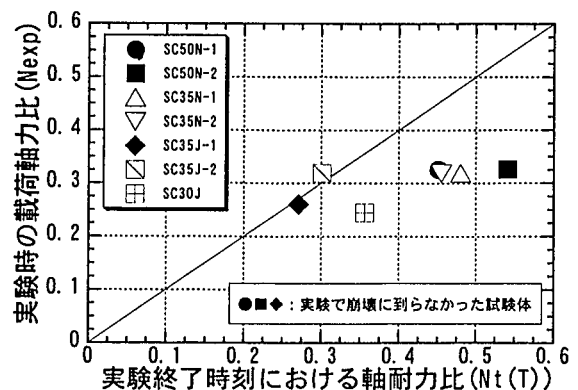


Fig.16 軸荷軸力比と式(2)に基づく軸耐力比の関係  
Relationship between Axial Load Ratio and Axial Strength Ratio Based on Equation (2)