

# 論文 火熱を受けたRC柱の耐震性能と炭素繊維シート補強の効果

白石 一郎\*1・河井 隆朗\*2・高木 仁之\*3

**要旨**：本研究は、都市直下型地震で多数の建物が火災被害を受けた場合を想定し、当該建築物の短期間継続使用の可能性を調査するもので、加熱炉で加熱を受けたRC柱の模型実験を実施し、その耐震性能劣化や補強方法について検討したものである。本報は文献1)の継続として、高軸力下での耐震性能劣化、加熱後の養生期間の影響および炭素繊維シート補強の効果について調査している。さらに曲げせん断加力実験終了後、軸力載荷実験を実施し、加熱および水平力により損傷を受けたRC柱の軸支持能力についても検討した。

**キーワード**：鉄筋コンクリート柱、加熱、耐震性能、軸支持能力、炭素繊維シート補強

## 1. はじめに

本研究は、火災火熱を受けたRC部材の耐震性能の劣化やその補強方法を調査することを目的としている。本報告は、文献1)に引き続き、加熱炉により加熱したRC柱を対象として曲げせん断加力実験を実施し、高軸力下での耐震性能劣化、加熱後の養生期間の影響、および、炭素繊維シート補強効果について考察した。

加熱後の養生期間の影響に関しては、材料レベルでの研究があるものの<sup>2), 3)</sup>、部材レベルでの研究はほとんどないことから、加熱後の養生期間におけるRC部材の耐震性能回復の有無を調べるために実施したものである。

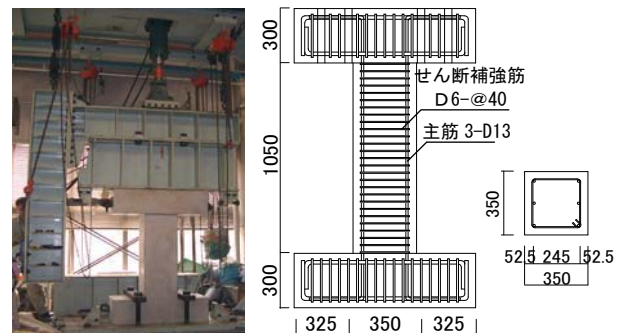


図1 試験体概要

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体形状、配筋および試験体一覧を図-1、表-1に示すが、3、4階建ての学校建築のRC柱を想定したもので、断面350mm×350mm、高さ1050mmで、およそ実大の1/2スケールとなっている。試験体は、同一形状・配筋で、加熱を受けない試験体N00-N7、1時間加熱の試験体F1H-N4ST, F1H-N4LT, および、2時間加熱の試験体F2H-N4ST, F2H-N7, F2H-N4CFの計6体である。また、試験体F2H-N4CFは、2時間加熱後に炭素繊維シート巻き付け補強したものである。試験体のシアスパン比は1.5で、加熱を受けない試験体は、せん断余裕度1.2以上で曲げ破壊型として設計されたものである。なお、表-1には、文献1)の試験体についても示されている。

### 2.2 加熱計画

RC柱への加熱温度は、文献1)と同様に、国際標準規格ISO834の標準加熱曲線(式1)に準拠し、1時間後に945°C、2時間後に1049°Cに達する加熱を実施した。なお、加熱においては、試験部以外の燃焼破壊を防ぐため、試験部以外は耐火被覆養生を行っている。炉内温度の測

表-1 試験体一覧

試験体名	軸圧縮応力度 [N/mm <sup>2</sup> ]	コンクリート圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	あばら筋比 [%]	加熱の有無	加熱後の養生期間 (ヶ月)	CFシート補強
本研究	N00-N7	7	31.1	0.46	加熱なし	なし
	F1H-N4ST	4	32.1		1時間加熱	
	F1H-N4LT	4	22.3		1時間加熱	
	F2H-N4ST	4	31.7		2時間加熱	
	F2H-N7	7	24.0		2時間加熱	
	F2H-N4CF	4	37.2		2時間加熱	
文献1)	N00-N4	4	31.0	加熱なし	なし	
	F1H-N4	4	30.0	1時間加熱		
	F2H-N4	4	28.0	2時間加熱		
使用鉄筋	主筋	6-D13	$\sigma_y=348$	[N/mm <sup>2</sup> ]		
	帯筋	2-D6	$\sigma_y=366$	[N/mm <sup>2</sup> ]		
CFシート	引張強度	3500	[N/mm <sup>2</sup> ]			
	ヤング係数	$23 \times 10^5$	[N/mm <sup>2</sup> ]			

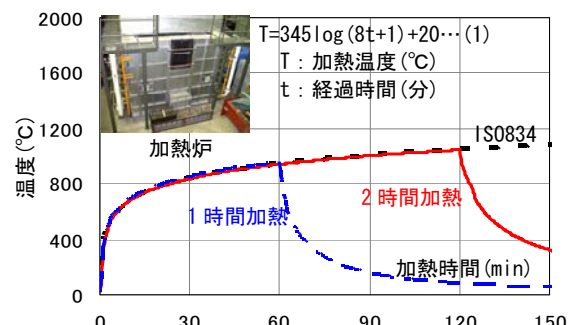


図-2 炉内温度測定値

\*1 日本工業大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

\*2 富津市役所 (前 日本工業大学大学院 工学研究科 建築学専攻) 修士 (工学)

\*3 明治大学 理工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)

定値は図-2に示すように、標準加熱曲線とよく一致しており、所定の加熱が加えられたことを確認した。

なお、試験体は実大の1/2スケールであり、実大のRC柱の加熱状況とは異なるものとなる。これは加熱炉や加力装置の制約等によるものであるが、本実験結果は、より厳しめの評価になるものと判断している。

加熱後の試験体状況を試験体 F2H-N7 を例として、図-3に示すが、コンクリート表面が粗くなるとともに、主筋に沿うような縦ひび割れが発生していた。このような加熱後の試験体状況は、他の試験体および文献1)でも同様であった。



(a) 加熱なし (N00-N7) (b) 2時間加熱 (F2H-N7)

図-3 加熱後の状況

### 2.3 曲げせん断加力実験計画

加熱後所定の養生期間において、RC柱の曲げせん断加力実験を実施した。

養生期間については、試験体 F1H-N4ST, F2H-N4ST では半月程度の短期間で、試験体 F2H-N7, F1H-N4LT および F2H-N4CF ではおよそ半年の長期間とした。また、試験体 F2H-N4CF では、2時間加熱後、図-4に示すように、炭素繊維シート巻き付け補強を実施した。

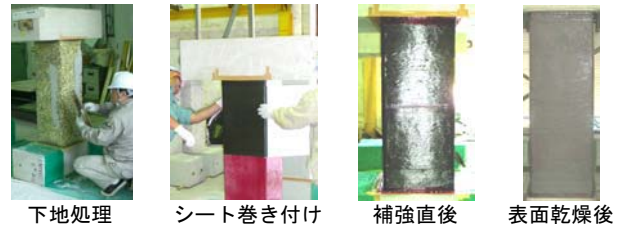


図-4 炭素繊維シート補強施工状況

曲げせん断加力実験は、一定軸力下での逆対称曲げを作用させるもので、図-5に示すように、鉛直アクチュエータで一定軸力を载荷しながら、水平アクチュエータにより水平力を繰り返し载荷した。水平力および軸力は、加力装置内蔵の検出器によって測定し、試験体の水平変位は、上下スタブ間の水平変位差として測定を行った。

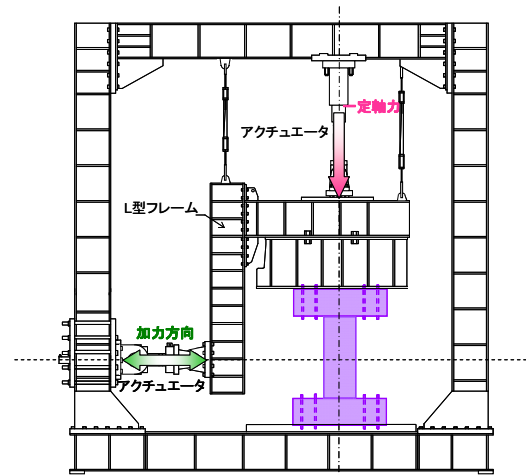


図-5 曲げせん断加力装置

### 2.4 軸方向加力実験計画

曲げせん断加力終了後、加熱および水平力による損傷を受けたRC柱の軸支持能力を調査するために、図-6の軸方向加力実験を実施した。試験体は、N00-N4, F1H-N4, F2H-N4, F2H-N7 および F2H-N4CF の5体で、水平方向の残留変位がなくなるように処理した後に、軸方向力を载荷させる実験を実施した。



図-6 軸力载荷状況

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 加熱を受けたRC柱の耐震性能

#### (1) 破壊状況および強度・変形状

実験結果一覧を表-2に示し、曲げせん断加力実験後の破壊状況および荷重-変位関係を図-7に示す。

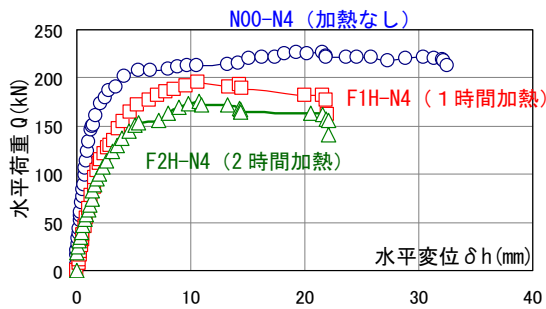
表-2 実験結果一覧

	試験体名	加熱実験	水平载荷実験				軸载荷実験		
		加熱時間 (h)	一定軸力 $N_0$ (kN)	最大水平荷重 $Q$ (kN)	終局時水平変位 $\delta_{hu}$ (mm)	経験水平変位 $\delta_{hmax}$ (mm)	最大鉛直荷重 $N_u$ (kN)	軸力比 $\eta$	最大鉛直荷重時鉛直変位 $\delta_{vu}$ (mm)
本研究	N00-N7	0	857.5	316	9.6	14.4			
	F1H-N4ST	1	490	214	13.3	35.2			
	F1H-N4LT	1	490	206	14.8	30.9			
	F2H-N4ST	2	490	204	10.6	21.2			
	F2H-N7	2	857.5	183	5.13	5.5	1814	0.62	4.46
	F2H-N4CF	2	490	238	19.5	35.2	1780	0.39	3.16
文献1)	N00-N4	0	490	227	19.3	32.5	1544	0.41	2.26
	F1H-N4	1	490	195	10.7	22.6	1725	0.47	3.68
	F2H-N4	2	490	176	10.8	22.1	1493	0.44	4.43

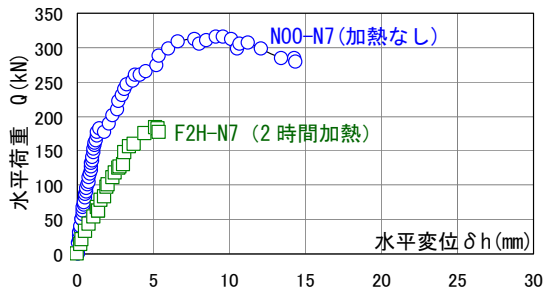
破壊状況についてみると、加熱なし試験体 N00-N7 では、柱頭・柱脚部に曲げひび割れが発生し、端部圧縮コンクリートの圧壊が生じ、曲げ破壊した。これに対して、加熱を受けた試験体では、加熱後に既に生じていた主筋に沿うひび割れが、曲げせん断加力により拡大して付着割裂破壊に至った。また、炭素繊維シート補強した試験体 F2H-N4CF では、損傷はシート補強部分とスタブとの境界である柱頭・柱脚に集中し、シート補強部では縦方向破断はみられず、繊維方向の裂け目のみが確認できた。

荷重-変位関係を図-7、図-8に示すが、加熱を受けた試験体では、加熱なしの試験体に比べて、剛性、強度および変形性能が劣化していることがわかる。この耐震性能劣化については、高軸力を受ける場合は、2時間加熱の F2H-N7 は、加熱なしの N00-N7 に比べ、終局強度が4割程度減少しており、3割程度強度低下した低軸力の場合より耐震性能劣化が大きかった。

終局強度への軸力の影響についてみると、図-9のよ



(a) 軸応力度  $\sigma_0=4$  (N/mm<sup>2</sup>)



(b) 軸応力度  $\sigma_0=7$  (N/mm<sup>2</sup>)

図-8 加熱による耐震性能劣化

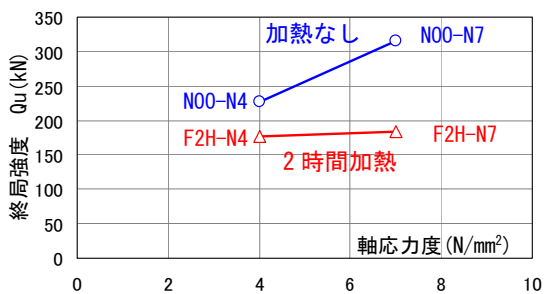
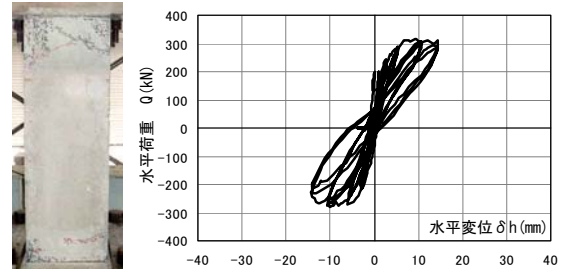
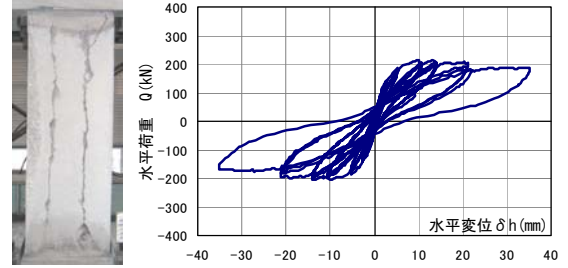


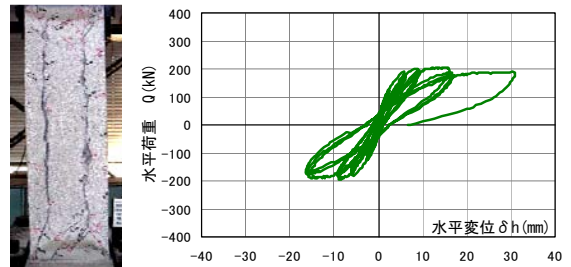
図-9 軸力の影響



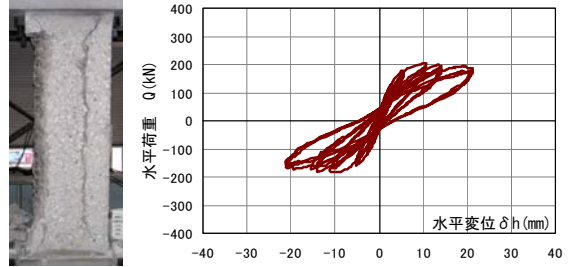
(a) N00-N7 (加熱なし)



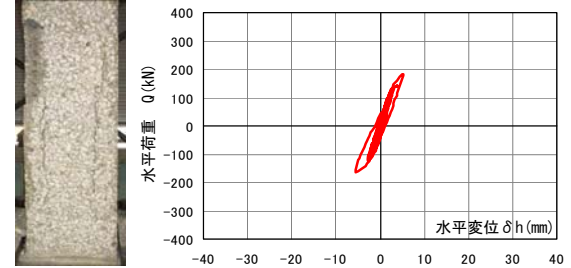
(b) F1H-N4ST (1時間加熱)



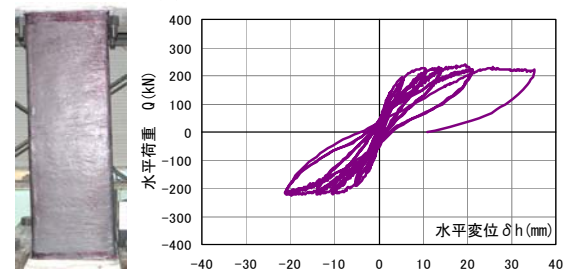
(c) F1H-N4LT (1時間加熱)



(d) F2H-N4ST (2時間加熱)



(e) F2H-N7 (2時間加熱)



(f) F2H-N4CF (2時間加熱, シート補強)

図-7 破壊状況と荷重-変位関係

うに、加熱なしの試験体では、高軸力の方が低軸力よりも、終局強度が増加しているのに対し、2時間加熱では、高軸力と低軸力の試験体で、ほぼ同等の終局強度となっており、軸力の影響はほとんどみられなかった。これは、加熱した試験体では、軸力の影響があまり大きくない破壊モードに変化したためと考えられる。

### (2) 加熱後の養生期間の影響

養生期間の違いによる荷重－変位関係や終局強度の比較を図-10に示す。図より、1時間加熱および2時間加熱の場合ともに、加熱後の養生期間により、耐震性能が回復するような傾向はみられなかった。

### (3) 炭素繊維シート巻き付け補強の効果

試験体 F2H-N4CF は、加熱炉で2時間加熱した後、図-4のように炭素繊維シート巻き付け補強を行ったものである。

図-7(f)に、試験体の破壊状況および荷重－変位関係を示し、図-11にシート補強の効果について示す。図より、炭素繊維シート巻き付け補強を実施した試験体 F2H-N4CF は、シート補強なしの試験体 F2H-N4 に比べて、終局強度が30%程度上昇し、終局強度以降も大きな耐力低下がなく、良好な変形性能を有していることがわかる。さらに、シート補強した試験体は、加熱なしの試験体 N00-N4 と比較しても、剛性の低下はみられるものの、耐力はほぼ同等となっている。従って、2時間加熱により、耐震性能が大きく劣化した RC 柱においても、炭素繊維シート補強により、加熱を受けない RC 柱の耐震性能と同等まで回復させる可能性があるかと判断される。

本研究の RC 柱試験体は、実大のおよそ 1/2 スケールであり、実大の RC 柱に比べて、加熱に対してより厳しめの実験であることから、実際の炭素繊維シート補強の効果はさらに良好となる可能性がある。

### 3.2 加熱を受けた RC 柱の軸支持能力

軸方向加力実験を実施した5体の実験結果を表-2に示す。また、曲げせん断加力終了後（軸方向加力実験前）の破壊状況と、軸方向加力実験後の破壊状況を、試験体 N00-N4, F1H-N4 および F2H-N4 の3体について図-12に示す。また、軸力と鉛直変位の関係を図-13, 図-14に示す。ここで、加熱なしの試験体 N00-N4 および、シート補強した試験体 F2H-N4CF では、加力装置の能力から、破壊まで加力することができなかった。

軸方向破壊まで加力できた試験体の軸支持能力についてみると、軸方向破壊時の軸力比は、1時間加熱の試験体では0.47で、2時間加熱では0.44となっており、加熱や曲げせん断加力による損傷により、無損傷の RC 柱に比べて、軸支持能力が半分程度に低下していた。

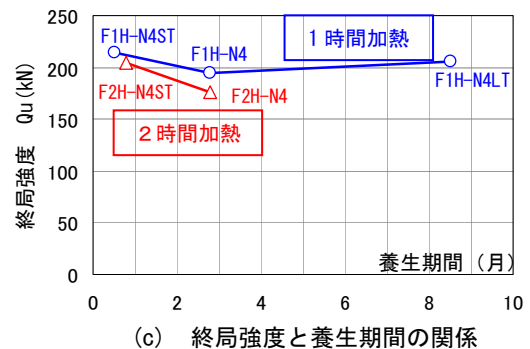
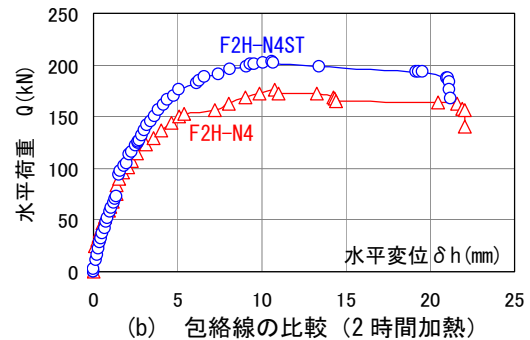
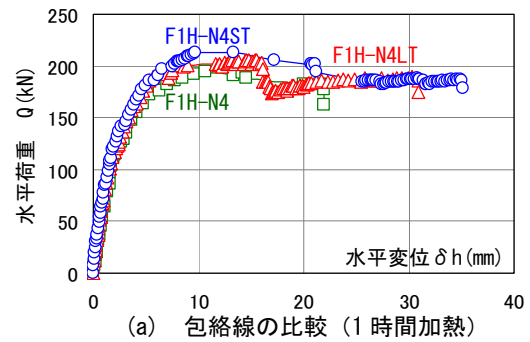


図-10 養生期間の影響

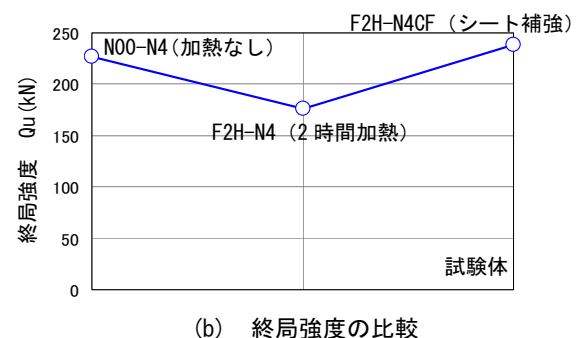
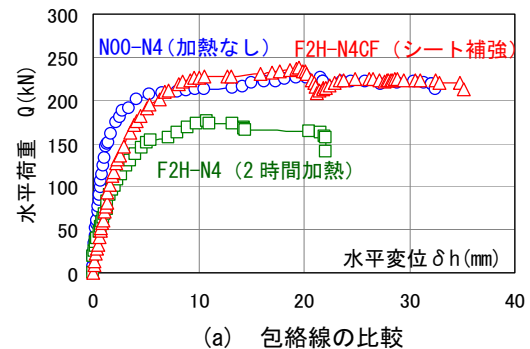
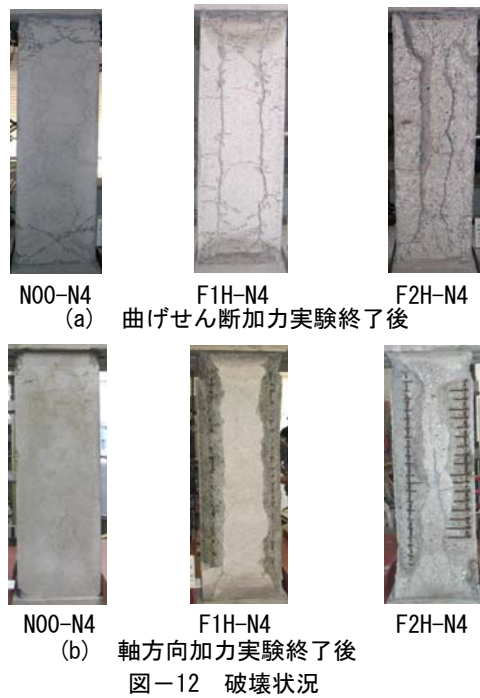


図-11 炭素繊維シート補強の効果



シート補強した試験体 F2H-N4CF では、2 時間加熱を受けたにもかかわらず、図-15 に示す各載荷ステップの鉛直変位増分が、加熱なしの試験体と同様に小さく、2 時間加熱の試験体 F2H-N4 に比べて軸支持能力も改善されていることがわかる。

#### 4. 加熱を受けた RC 柱の終局強度評価法

##### 4.1 加熱を受けた RC 柱のせん断伝達機構

加熱を受けた RC 柱の実験結果を再現することを目的として、文献 1) では、図-16 のような非線形有限要素解析<sup>4)</sup>を実施した。この解析では、大宮らの提案式により、加熱後の部材内部温度分布を予測し<sup>5)</sup>、その温度分布に基づいた材料の残存強度やヤング係数を用いて<sup>6)</sup>、<sup>7)</sup>、解析を実施した。図-17 は、この解析に用いた断面内のコンクリート圧縮強度分布であり、解析結果と実験結果の比較を図-18 に示すが、両者はおおよそ対応している。

解析結果の終局強度時の主応力を図-19 に示すが、アーチ機構のような力の流れがみられる。加熱を受けた RC 柱では、加熱により表面近くのコンクリート残存強度が小さいため、加熱なしに比べて、圧縮ストラットが細くなっている様子がみてとれる。

##### 4.2 加熱を受けた RC 柱の終局強度

ここでは、加熱を受けた RC 柱の終局強度評価法について検討する。まず、図-19 の解析結果を参考に、図-20 のような柱せいの半分の幅を有するアーチ機構を仮定する。次に、柱頭、柱脚、および中央高さにおける圧縮ストラット内の平均圧縮強度を終局強度計算用のコンクリート圧縮強度として採用する。

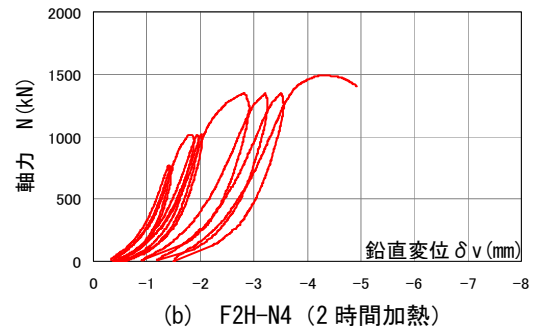
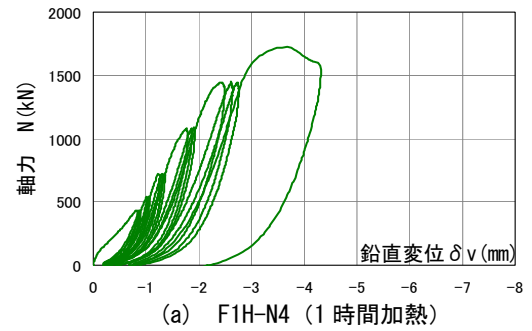


図-13 軸力-鉛直変位関係

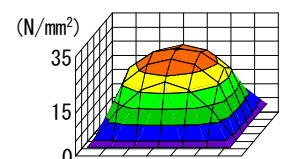
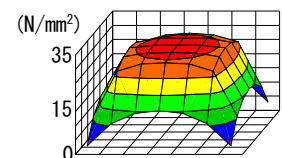
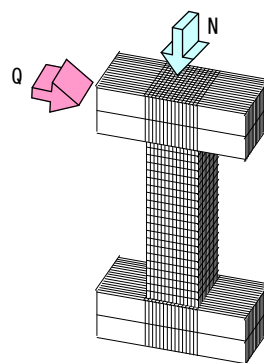
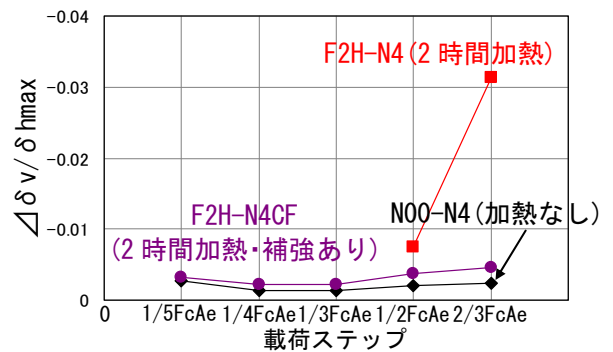
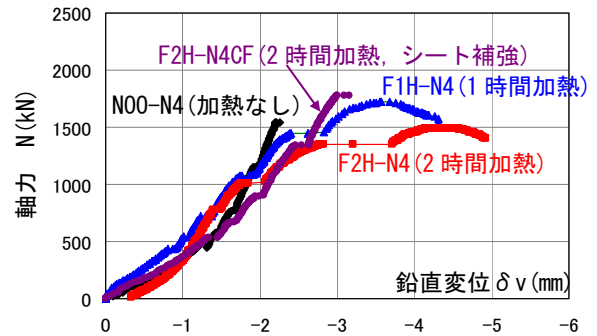


図-17 圧縮強度分布

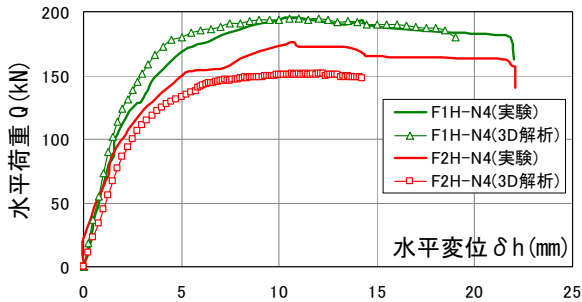


図-18 FEM解析と実験の比較

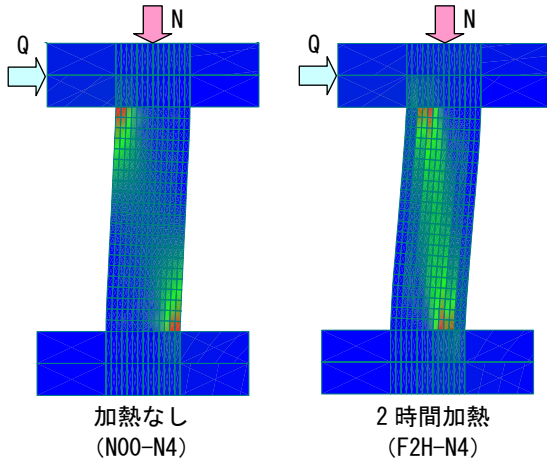


図-19 応力分布図

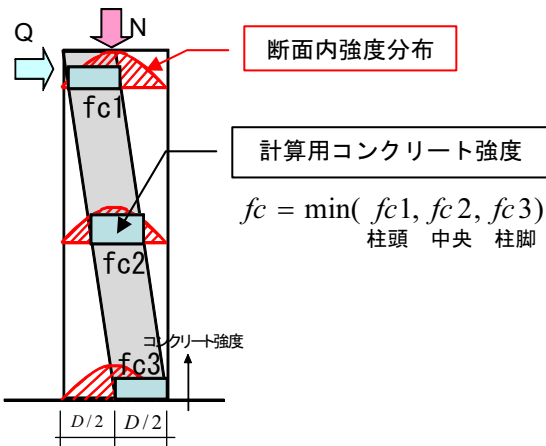
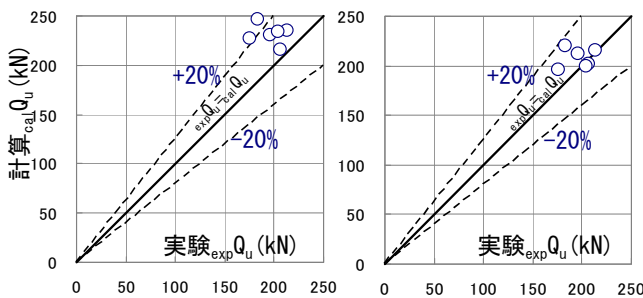


図-20 終局強度計算用のコンクリート強度



(a) 加熱前の強度採用 (b) 図-20の強度採用

図-21 終局強度計算値と実験値の比較

加熱を受けた試験体の破壊モードは、図-7のように、加熱により生じた縦ひび割れが、曲げせん断加力で拡大することによる付着割裂破壊と判断されるが、通常の付着割裂破壊とは異なるため付着割裂強度式ではなく、荒川式に前述のコンクリート強度を用いて終局強度を評価することとした。

上記の方法による計算結果と実験結果の比較を図-21に示す。図より、加熱前のコンクリート圧縮強度を用いた場合には、計算値がやや大きめの評価になっているのに対し、圧縮ストラット内の平均強度を用いた計算結果は、より実験結果に近くなっている。

## 5. まとめ

本報で得られた結論を以下に示す。

- 1) 加熱を受けた RC 柱の耐震性能は、高軸力下においても、低軸力下と同様に、加熱なしの RC 柱より劣化することが確認された。
- 2) 加熱を受けた RC 柱の耐震性能への養生期間の影響についてみると、養生期間後も、剛性、強度および変形性能が回復する傾向はみられなかった。
- 3) 2時間加熱を経験した RC 柱に炭素繊維シート補強した試験体は、加熱なし試験体に比べて、剛性はやや低下するものの、同等の強度および変形性能を有しており、加熱を受けた RC 柱への炭素繊維シート巻き付け補強は有効であると判断される。
- 4) 加熱を受けた RC 柱に対して、アーチ機構の圧縮ストラット内の平均コンクリート強度を用いた終局強度計算値は、実験結果とよく一致していた。

## 参考文献

- 1) 高木仁之, 白石一郎: 加熱を受けた鉄筋コンクリート柱の強度・変形性能の劣化に関する研究, JCI年次論文集, Vol.30, No.3, pp.121-126, 2008
- 2) 原田有: 建築耐火構法, 工業調査会, pp.49-53, 1973
- 3) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, 2004
- 4) ATENA: PROGRAM DOCUMENTATION, Cervenka Consulting, Revision Oct. 31, 2005
- 5) 大宮喜文: コンクリート系部材の断面温度予測, 日本建築学会学術講演梗概集(北海道), pp.87-88, 2004. 8
- 6) 一瀬賢一, 河辺伸二: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの圧縮強度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp.17-22, 2002. 11
- 7) 一瀬賢一, 河辺伸二: 高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の火災時の変形性状に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 568 号, pp.1-6, 2003. 6