論文 火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

高木 仁之*1・白石 一郎*2

要旨:都市直下型地震では,多くの建物が火災被害を受ける恐れがあるものの,すべての被災建築物を短期間に建て直すことは事実上困難である。本研究では,火災被害を受けた建築物を短期間継続使用することを 想定して,当該構造の耐震性能を検討するもので,火災がRC部材の構造性能に与える影響を模型実験より把 握することを目的として,RC柱試験体を加熱した後に曲げせん断加力実験を行い,RC柱の強度・変形性能の 劣化状況を調べ,併せて有限要素法解析を実施し検討した。

キーワード:鉄筋コンクリート柱,加熱,構造性能,曲げせん断実験,曲げ降伏先行,残存耐力

1. はじめに

近年首都圏直下型地震,その他の巨大地震の危険性が 指摘されている。兵庫県南部地震のような都市直下型地 震では,多くの建物が火災被害を受ける恐れがあるもの の,すべての被災建築物を短期間に建て直すことは事実 上困難である。本研究では,火災被害を受けた建築物を 短期間継続使用することを想定して,当該構造の耐震性 能を検討するものである。

本研究では,火災が RC 部材の構造性能に与える影響 を実験より把握することを目的として,RC 柱試験体を加 熱した後に,曲げせん断加力実験を行い,加熱後の RC 柱の構造性能について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究で用いた試験体は,既存小中学校校舎を対象とした3,4階程度の低層 RC 建物の柱部を想定し,実物 大建物を約1/2スケールモデルに縮小した試験体である。 試験体は総数3体で,その構成を表-1に示し,図-1 に配筋図を兼ねて試験体の形状を示す。

試験体は火災燃焼時間の違いによる構造性能を見る ため,試験体は全て同一形状・同配筋の計3体である。 燃焼状況として N00を不燃, F1Hを1時間燃焼, F2Hを 2時間燃焼とする。

試験部の形状は,試験区間長さ 1050[mm],断面幅 350[mm],断面せい 350[mm],コンクリート設計基準強 度 Fc=24[N/mm²]である。

試験部に使用した鉄筋は,主筋に D13 を6本配筋し, また,帯筋として D6 を 40[mm]ピッチで配筋している。

*1 明治大学 理工学部建築学科准教授 工博 (正会員) *2 日本工業大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員) その鉄筋の周囲には設計かぶり厚さ40[mm]を設け 鉄筋の定着も十分に確保している。

尚,加熱前の材料実験より得られた鉄筋の力学的性質 を表 - 2 に,実験時の試験体コンクリートの圧縮強度を 前掲の表 - 1 中に示す。

2.2 加熱計画

加熱温度は国際標準規格 ISO 834 の標準火災加熱曲線 式(1)に準拠し,炉内温度は1時間後(試験体 F1H)に 945,2時間後(試験体 F2H)に1049 に達する加熱実 験を実施する。加熱の際,試験部以外の燃焼破壊が起こ るのを防ぐため,試験部以外は耐火被覆養生を行う。加 熱実験における炉内温度を図-2に示すが,炉内温度は 標準加熱曲線にほぼ一致していることが確認される。



 ^{2.3} 加力方法
加力装置を図-3に示す。試験体F1Hおよび試験体F2H

に対して,加熱後2ヶ月間の室温冷却期間をおいて,曲 げせん断加力実験を実施する。3体の試験体ともに正負 繰り返し変形制御(上下スタブ間水平変位)漸増載荷を 行う。

表 - 1 試験体概要 軸圧縮 コンクリート あばら筋比 応力度 強度[N/mm²] [%] 試験体 燃焼時間 $[N/mm^2]$ N00 31 不燃 F1H 30 1 時間 F2H 4 28 0.46 2 時間 使用鉄筋 主筋:6-D13, y=345[N/mm²] 帯筋:2-D6, y=295[N/mm²]



実験結果および考察

実験後の試験体状況を図-4に,各試験体の荷重水 平変位関係を図 - 5 に示す。

初期剛性は,加熱していない試験体NOOを100%とした とき,加熱した試験体 F1H・F2H はそれぞれ 59%・34%と 低い数値を示す。

図-6は,各試験体の荷重変形曲線を包絡線で比較し, また,図-7は,同一水平変形時の強度について試験体 N00 を 100%とした場合の各試験体の強度残存割合を示し ている。図 - 7より,加熱を受けた RC 柱の強度が低下 していることが認められ、1時間加熱を受けた試験体 F1H は加熱なし試験体 NOO に比べて, 強度が2割程度,2時 間加熱を受けた試験体 F2H では3割程度低下する。

3.1 破壊性状

加熱していない N00 は、試験体上部および下部の曲げ ひび割れが進行した後,やや鈍角の斜めひび割れが

表 - 2 鉄筋の力学的性質

鉄筋	ヤング率	降伏強度	引張強度	伸び率
種類	[×10⁵N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[%]
D6	1.85	366	519	15.5
D13	1.79	348	489	19.9





加力装置 図 - 3





NOO (加熱せず)















発生する。このようなひび割れが高さ方向で断面せい (D)の長さ以内に多数発生するが,中央部付近では無 傷である。加力終了まで耐力低下はないが,曲げ圧縮縁 側でややコンクリートの剥落が観察された。(写真 - 1 参 照)



写真-1(左から右に進行)

次に,加熱1時間の F1H は,加力前に加熱より生じ た主筋に沿ったかぶりコンクリート付近の縦ひび割れ および中央部の亀の甲状のひび割れが発生している。加 力に伴い加力開始前の亀の甲状ひび割れと縦ひび割れ が共に進行していき,最終的にはかぶりコンクリートが 分離し剥落する。(写真-2参照)



写真-2(左から右に進行)

最後に加熱2時間のF2Hは,F1Hとほぼ同様な破壊経 過であるが,ひび割れ幅などの破壊性状は一層劣悪であ る。(写真-3参照)



写真-3(左から右に進行)

以上より,破壊性状は,加熱を受けてない試験体では, 柱頭および柱脚に曲げひび割れが発生する曲げ破壊型 であったが,加熱を受けた試験体では,主筋に沿った付 着割裂ひび割れが支配的となっている。

3.2 固有ループのエネルギー吸収能

各変形制御段階の繰り返し最終ループ(固有ループ) における履歴ループエネルギー量を求め,図-8に示し た。変形抑制時の部材角が1/100[rad]までは,F1H,F2H のエネルギー吸収量はN00の70~80%であるが,その後, 部材角1/75[rad]からは,50%程度のエネルギー吸収量で あり吸収能が劣ることが分かる。図 - 8の各試験体の変 位段階にける等価粘性減衰定数を求め,図 - 9に示す。





P23(1/400) P33(1/200) P43(1/100) P53(1/75) P62(1/50)

図-8 エネルギー吸収能



図 - 9 等価粘性減衰定数

等価粘性減衰定数は、部材角が 1/200[rad]のときは全試 験体とも 3%程で、あまり差は見られない。部材角 1/100[rad]では F2H も N00 と共に 4.5%程に増加するが、 部材角 1/75[rad]からは N00 のみ大幅に増加し F1H F2H3 は N00 の 70~80%程度の増加であり、F1H と F2H との 差はあまり見られない。

3.3 終局変形

ここでは,N00 において得られた最大荷重の 80% 耐力 時点の変形を終局変形と定義した。各試験体における終 局変形は N00 は 33mm (1/33[rad])以上の終局変形能を 有すが,F1H では 22mm (1/50[rad]),F2H では 13mm (1/100[rad])程度であり,N00,F1H,F2H の順に終局 変形性能の低下が見られる。

4.火熱を受けたRC柱の解析的検討

本章では,前章までに示した火熱を受けたRC柱の 実験結果を,解析的な手法によりに再現が可能であるか を検討したものである。まず,既往の研究により,火熱 を受けたRC柱断面内の温度分布を予測し,その火熱に よるコンクリートおよび鉄筋の材料特性の低下を考慮 して,有限要素法により解析を行う。

4.1 解析モデルの構築

解析プログラムは文献1)に示す非線形有限要素解析 であり,解析モデルは,図-10のような3次元解析と 2次元解析である。主筋と帯筋は線要素にモデル化する が,2次元解析の帯筋は分布要素にモデル化する。

(1)火熱を受けたRC柱内部の温度分布

加熱前の断面内温度は,室温と同一で一様分布と仮定 し,加熱後の部材内部の温度は,大宮らの提案式(2)に より評価する²。計算結果の温度分布を図-11に示す。

$$\frac{T - T_0}{460^{1/6}} = 1 - \left\{ 1 - \left[\gamma \left(t/l_x \right)^2 \right]^{x/l_x} \right\} \left\{ 1 - \left[\gamma \left(t/l_y \right)^2 \right]^{y/l_y} \right\}$$
(2)

ここで, T:断面内温度, T₀:初期温度, t:加熱 時間, x,y:表面からの距離,係数 は普通コンクリー トで4.5×10⁻⁹であるが,詳細については文献2)を参 照されたい。鉄筋の温度については,同式による温度分 布予測から,主筋位置で加熱1時間では598,加熱2 時間では828 とした。

(2) コンクリートおよび鉄筋の材料特性の劣化

高温に曝されたコンクリートおよび鉄筋の機械的性 質の劣化が知られている。

高温下におけるコンクリート圧縮強度の低下につい ては図 - 12のような種々の提案式があるが,本報では, 火熱によるコンクリートの圧縮強度低下を,文献3)の 一瀬らの提案式(3)により評価した。また,コンクリー トのヤング係数劣化についても,一瀬らの提案式(4)に より評価した(図 - 13)。

$$\frac{\sigma_{c(T)}}{\sigma_{c(20)}} = 1.02 + 3.75 \times 10^{-4} T - 2.44 \times 10^{-6} T^2$$
 (3)

$$\frac{E_{c(T)}}{E_{c(20)}} = 1.07 - 2.53 \times 10^{-3} T + 1.45 \times 10^{-6} T^{2}$$
 (4)

鉄筋についても,既往の研究によると,高温になるほど強度低下し,加熱後常温に戻った状態では,図-14 に示すように 600 以上で強度が低下することが文献 4)に報告されている。本報では,表-3を参考として, 鉄筋は予測温度に基づいて,加熱1時間の試験体では強 度低下なしとし,加熱2時間の試験体では鉄筋強度が 87%残存すると仮定する。



(3) 火熱を受けた R C 部材内部の材料強度分布

加熱前は一様温度分布と仮定し,加熱後は図-11の 温度分布に基づいて,コンクリートの圧縮強度およびヤ ング係数の劣化を式(3),式(4)より予測した結果を図-15に示す。ここで,コンクリート表面では1割程度強 度が残存しているものと仮定した。なお,柱の高さ方向 の強度分布は一様と仮定している。

- 4.2 解析結果および考察
- (1)3次元解析結果

3次元解析結果と実験結果の荷重 - 変位の比較を,図 - 16に示す。終局強度については,加熱を受けた柱が, 加熱なしに比べて強度低下する傾向については実験結 果と対応している。また,図 - 17の終局強度時の主応 力分布をみても,加熱を受けた試験体ほど,圧縮応力ブ ロックが断面内部に移動していることがわかる。このこ とは,加熱を受けた柱の応力中心間距離が小さくなって いることを示しており,終局強度の低下と符合している。 しかしながら,図 - 18のひび割れ破壊状況をみると, 図 - 4の実験で生じた柱軸方向のひび割れは発生して おらず,破壊状況は再現できていない。

表	- 3	高温下の鉄筋強度	文献 4)
				_

编封温度	SD345(単位:N/mm²)		
()	降伏点	引張強度	
20	394	583	
500	393	574	
600	388	561	
650	377	543	
700	350	507	
800	342	515	







(a)N00-N4 (b)F1H-N4 (c)F2H-N4図 - 1 7 主応力分布(3次元解析)



(a)N00-N4 (b)F1H-N4 (c)F2H-N4図 - 1 8 ひび割れ状況(3次元解析)

(2) 簡易解析モデルによる解析結果

ここでは,より簡易に火熱を受けたRC柱の解析を行うことを目的として,図-10(b)の2次元解析により 解析を実施した。簡易モデルでは,図-15のコンクリートの材料特性分布に対して,圧縮強度およびヤング係数を,柱幅方向に単純平均したが,簡易モデルの材料特性分布を図-19に示す。

この簡易解析モデルによる2次元解析と3次元解析の 比較を図-20に示し,2次元解析と実験結果との比較 を図-21に示す。図より,2次元解析の結果は,3次 元解析とほぼ同様となっており,材料特性を柱幅方向に 単純平均した簡易解析モデルは妥当であると判断され る。簡易解析モデルによる,終局時の応力分布を図-2 2に示すが,前述と同様に,火熱を受けたRC柱ほど, 外側コンクリートの劣化のために応力中心間距離が小 さくなり,その結果部材強度が低下していることがわか る。

以上,本報の解析結果によれば,火熱を受けたRCの 部材強度の劣化についてはほぼ再現することができた が,破壊状況については大きく異なっており,さらなる 検討が必要である。

5.まとめ

本報では,火熱を受けた鉄筋コンクリート柱の強度・ 変形性能の劣化状況を調べるために,模型実験および解 析を実施した。

本実験は曲げ降伏先行型柱を対象としたものであっ たが,予備実験を行い,加熱後の構造性能を検討した結 果,加熱が破壊性状および剛性,強度低下に大きな影響 を与えることを確認した。

また,本報の解析結果によれば,火熱を受けたRC柱 の部材強度の低下はほぼ再現できたが,破壊性状につい ては実験結果との差異があり,解析モデルの構築には, さらに検討が必要である。

参考文献

- 1)ATENA: PROGRAM DOCUMENTATION, Cervenka Consulting, Revision Oct.31,2005
- 2)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),pp88-88,2004.8
- 3) 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,pp17-22,2002.11
- 4)日本建築学会:構造材料の耐火性ガイドブック,2004

(N/mm²) 35 15 0 火熱 1 時間 火熱 2 時間











