片面加熱および偏心圧縮を受ける鉄筋コンクリート造壁柱の火災時挙動

鉄筋コンクリート造長柱の耐火性能に関する研究 その3

BEHAVIOR OF RC WALL COLUMNS SUBJECTED TO ONE SIDE HEATING
AND ECCENTRIC AXIAL LOAD IN FIRE

Study on fire resistance of slender RC columns Part 3

加藤 雅樹^{*1}, 道越 真太郎^{*2}, 馬場 重彰^{*2}, 坂田 弘安^{*3}Masaki KATO, Shintaro MICHIKOSHI, Shigeaki BABA
and Hiroyasu SAKATA

This study shows fire resistance of RC wall columns subjected to one side heating and decentering axial load. Fire-resistance tests were conducted for the RC wall columns, and we consequently obtained the fire-resistance time, deformation behavior and failure mode. In addition, thermal stress analyses in consideration of geometrical nonlinearity were conducted in order to evaluate the experimental results. Comparing the experimental and analytical results, the proposed analytical method offers a good approximation of behavior of RC wall columns in fire.

Keywords : Buckling, Non-uniform heating, Additional moment, Fire resistance test, Thermal stress analysis

座屈, 不均一加熱, 付加曲げモーメント, 載荷加熱実験, 熱応力解析

1. はじめに

筆者らは、鉄筋コンクリート造の柱を用いることで意匠性および視認性に優れた開放的な空間を実現する一つの方法として、高強度コンクリートを用いて断面寸法を縮減した細径柱部材(以下、RC長柱)の開発を行っている。RC長柱は柱の高さと断面の最小径の比(以下、高さ径比)が大きく、火災時には部材表層の熱劣化により曲げ剛性が大幅に低下するため座屈が発生し、早期に破壊する可能性がある。筆者らは既報において、火災時における通直なRC長柱の座屈耐力を接線係数理論に基づき評価する手法を提案し、載荷加熱実験の耐火時間および破壊性状を概ね評価できることを示し¹⁾、また、元たわみがRC長柱の耐火時間や変形挙動、破壊性状に与える影響を解析により把握した²⁾。

RC長柱と同様に断面の最小径が小さく、扁平な断面を有するRC柱部材(以下、RC壁柱)は、架構の水平剛性を高める耐震要素として建物に使用され、免震構造や制振構造との併用^{例えば 3)}による損傷制御構造としての開発も行われている。また、RC壁柱に梁を大きく偏心して接合する場合の構造性能評価も行われ⁴⁾、この場合、RC壁柱は柱頭に接合される水平部材から伝達される荷重を偏心圧縮軸力として負担する。これらのRC壁柱も、火災時には前述の通り曲げ剛性の低下による耐火性能の低下が懸念される。さらに外壁として使用されるRC壁柱は、火災時に屋内外で温度差が生じるような不均一加熱を受けると予想される。このような片面加熱下では、断面全周を加熱する場合に比べて部材の熱劣化範囲は小さくな

るが、断面の不均一な温度変化によりRC壁柱の面外に水平変位が生じ、さらに軸力により付加曲げモーメントが生じる。加熱中は部材表層の熱劣化により曲げ剛性が低下するため、高さ径比が大きいRC壁柱は、この付加曲げモーメントにより曲げ変形が進行することで耐火性能が低下する恐れがある。また、前述した梁の偏心接合による偏心圧縮により生じる曲げモーメントについても同様に、耐火性能を低下させると考えられる。

不均一加熱や偏心圧縮を受けるRC壁や柱部材の火災時挙動に関する研究は国内外で報告されている。森田ら⁵⁾は、コンクリートへのポリプロピレン短繊維混入の有無や表面局部破壊の有無が中心圧縮軸力下で片面加熱を受けるRC壁の崩壊時間に与える影響を載荷加熱実験で検討し、局部破壊したRC壁は無損傷の壁に比べ崩壊時間が早くなり、また壁厚さと主要支点間距離の比が1/10程度であるRC壁が片面から加熱を受ける場合、軸剛性よりも曲げ剛性の低下が耐火性能に影響することを述べている。MACLEANら⁶⁾は、高さ中央部の片面に局所加熱を受けるRC柱の変形挙動に与える軸力の大きさや偏心距離の影響を解析で検討し、偏心距離が大きいほど水平変位が大きくなることを示し、加熱面側に偏心圧縮を受ける場合には圧縮力による収縮に加熱面側の昇温による自由熱膨張が加わるため、水平変位が小さくなると述べているが、最長の加熱時間を2時間としており崩壊時間に与える影響については検討していない。BUCHANANら⁷⁾は、材端の力学的境界条件が中心圧縮軸力下で片面加熱を受けるRC壁の変形挙動および崩壊時間に与える影響を解

^{*1} 大成建設株式会社 修士(工学)^{*2} 大成建設株式会社 博士(工学)^{*3} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授・工博

Technology Center, Taisei Corp., M.Eng.

Technology Center, Taisei Corp., Dr.Eng.

Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

析で検討し、端部の回転剛性を大きくすると RC 壁に生じる水平変位が小さくなるため耐火性能が向上すると述べている。以上のように、片面加熱および偏心軸力を受ける部材レベルの挙動を実験あるいは解析で検討した研究は見られるが、破壊に至るまでの火災時挙動を載荷加熱実験により検討するとともに、その挙動を解析で追跡した研究は見られない。さらに、RC 柱の耐火性能に影響を与えると考えられる梁の軸方向伸びにより柱に生じる強制水平変位や柱部材端部の力学的境界条件は、架構レベルの検討を行うことで評価できるが、RC 長柱や RC 壁柱を有する架構の火災時挙動を検討した研究もみられない。

そこで本論文では、片面加熱および偏心圧縮を受ける RC 壁柱の載荷加熱実験を実施し、火災時における荷重支持能力、変形挙動および破壊性状を明らかにするとともに、RC 壁柱および架構の耐火性能評価に用いる解析手法の妥当性を検証するため、本実験における火災時挙動を解析により追跡する。

2. 実験検討

2.1 実験概要

2.1.1 RC 壁柱試験体

試験体一覧を Table1 に、試験体の形状および寸法を Fig. 1 に示す。試験体は計 5 体であり、全て載荷加熱実験に供した。試験体は全て断面が 250mm×600mm の長方形、高さが 4500mm とした。加熱条件は、断面の全周を加熱する場合(以下、4 面加熱)と、1 辺のみを加熱する場合(以下、1 面加熱)の 2 水準とした。軸力比は 0.3 と 0.4 の 2 水準とし、偏心圧縮は断面の弱軸周りに曲げモーメントが生じる向きに与え、偏心距離は 0mm (中心圧縮)、25mm、42mm(断面の核半径の最外端)の 3 水準とした。偏心圧縮を与える試験体には柱頭に載荷用の梁形を設けた。

2.1.2 使用材料

試験体に打設したコンクリートの使用材料および調合を Table2 に、実験時のコンクリートおよび鉄筋の常温における材料試験結果を Table3 に示す。Table3 に示す材料試験結果は、供試体 3 体の結果の平均値である。ポリプロピレン繊維は、加熱時のコンクリートの爆裂を防止するために混入した。載荷加熱実験時のコンクリートの含水率は 5.7%、材齢は約 6 ヶ月である。

2.1.3 コンクリートおよび主筋の熱間材料試験方法

3 章で示す解析により載荷加熱実験結果の追跡を行うため材料の解析モデルを得る目的で、RC 壁柱試験体を使用したコンクリートの熱間圧縮試験および鉄筋の熱間引張試験を行った。

コンクリートの熱間圧縮試験については既報 8)で示し、最高温度 800℃までの応力度と応力にのみ依存するメカニカルなひずみ(以

Fig. 1 Reinforcement arrangement

Table2 Mix proportioning of concrete

Binder : B	Ordinary portland cement : Slag and Gypsum : Silica fume = 7 : 2 : 1(Density : 2.99g/cm³)
Fine aggregate : S	Natural sand from Kimitsu (Density in saturated surface-dry condition : 2.62g/cm³)
Coarse aggregate : G	Crushed stone from Otsuki (Andesite, Max. size : 20mm, Density in saturated surface-dry condition : 2.62g/cm³)
Superplasticizer : SP	High-performance water reducing agent (Polycarboxylic acid ethers)
Thermoplastic fiber : PP	Polypropylene fiber (Diameter : 0.048mm, Length : 20mm, Density : 0.91g/cm³)

W/B	Air content	Unit quantity				SP	PP
		W	B	S	G		
[%]	[%]	[kg/m³]				[kg/m³]	
26.0	2.0	155	597	726	912	10.15	

Table3 Mechanical properties of use material at room temperature

(a) Concrete

Compressive strength σ_B	Young's modulus E_c	Poisson's ratio ν
[N/mm ²]	[×10 ⁴ N/mm ²]	[-]
123	4.30	0.22

(b) Rebar

Reinforcing bars	Yield point σ_y	Young's modulus E_s	Tensile strength σ_t	Breaking elongation
	[N/mm ²]	[×10 ⁵ N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
D19(SD490)	540	1.92	733	16.1
D22(SD390)	448	1.86	634	14.4
D10(SD295A)	370	1.83	513	17.5

Table1 Specimens

Name	Cross -section size [mm]	Column height [mm]	Heating side of cross-section	Axial force ratio $N / (\sigma_B \cdot A) *$	Eccentric distance [mm]
H4-03-0	600×250	4500	all circumferences	0.30	0
H1-03-0			one side	0.30	
H1-04-0				0.40	
H1-03-25				0.30	25
H1-03-42				0.30	42

* N : Axial force, σ_B : Compressive strength of concrete, A : Cross-section area

下、応力ひずみ)の関係,自由熱膨張ひずみおよび過渡ひずみを測定した。各試験温度における供試体数は1体である。コンクリートの応力度-応力ひずみ関係は,昇温過程において圧縮軸力により材軸方向の熱膨張を拘束した場合,無載荷に比べて圧縮強度やヤング係数が増大し,圧縮強度時の応力ひずみが小さくなることが知られて

Fig. 2 Test setup

いる^{9), 10)}。筆者らは既報において,この昇温中の圧縮軸力による拘束効果の有無をパラメータとして RC 長柱の座屈耐力を解析で評価し,一定圧縮軸力による拘束を与えて得られる応力度-応力ひずみ関係を用いることで RC 長柱の載荷加熱実験結果を概ね評価できることを示した⁹⁾。よって本論文では,昇温過程において供試体に一定圧縮軸力を与えた場合の試験結果を解析に使用した。一定圧縮軸力は既報⁹⁾と同一の軸力比 0.2 とした。

鉄筋の熱間引張試験は,3 章で後述する解析において柱主筋としてモデル化する D19(SD490)を対象とし,JIS G 0567 に従い実施した。供試体には II-6 形試験片を用い,試験温度は 200,400,600,800,1000℃ の 5 水準とした。ただし載荷速度は JIS G 0567 の規定を逸脱し,応力ひずみ 10%まで 0.3%/秒,以降破断に至るまで 7.5%/秒で実施した。各試験温度における供試体数は 1 体である。

2.1.4 RC 壁柱の載荷加熱実験方法

載荷加熱実験のセットアップを Fig. 2 に示す。Fig. 2(a)には 4 面加熱, Fig. 2(b)には 1 面加熱のセットアップを示した。実験は,試験体の柱頭に球座を設置し,柱脚は鋼製のスタブあるいは 70mm 厚さの鋼板を介して反力床に固定した。実際の架構における両材端の固定度は,材端に接合される柱や水平部材との接合方法により様々であるが,一般的に大きく,座屈長さは部材全長よりも短い。一方で両材端の回転が完全に拘束されることは無いため,載荷加熱実験では柱頭は球座に,柱脚は反力床に設置することとした。試験体には常温で所定の圧縮軸力を与え,ISO834 に規定されている標準加熱温度曲線に従い,試験体が荷重支持能力を喪失するまで加熱を実施した。各試験体に導入した所定の軸力は,Table3 に示したコンクリートの常温圧縮試験結果から算出した。偏心圧縮軸力は断面中心に対して加熱側面に偏心させて与え,屋内火災時に外周架構の柱が柱頭の屋内側に接合される水平部材から偏心圧縮を受ける状況を想定した。Fig. 2(b)は 1 面加熱を行う試験体の内,偏心距離が 42mm の例を示したが,他の試験体のセットアップと異なる点は偏心距離(柱頭の球座位置)のみである。1 面加熱は開口が少ない外周架構の柱や防火区画上の柱を想定し,柱幅 600mm の面の片側のみを加熱し,その裏面側の雰囲気温度は常温とした。また柱せい 250mm の面は断熱材を設置した。

実験時は炉内温度,試験体の断面温度および柱頭の鉛直変位を計測した。1 面加熱とした試験体には Fig. 2(b)に示す通り試験体の非加熱側面表面にひずみゲージおよび変位計を設置し,コンクリート

Fig. 3 Position of temperature measurement

の表面ひずみおよび試験体の水平変位を計測した。断面温度は試験体高さ方向中央に熱電対を設置して計測した。熱電対の設置箇所を Fig. 3 に示す。

2.2 実験結果および検討

本節では、使用材料の熱間試験および RC 壁柱の載荷加熱実験の結果と検討について示す。実験結果に関する図中には、3 章で述べる解析モデルおよび解析結果を破線で示しており、これらについては 3 章で詳述する。

2.2.1 コンクリートおよび主筋の熱間材料試験結果

コンクリートの熱間圧縮試験については既報 8) で示したため同一となる内容は含まれるが、結果を本項で示す。コンクリートの応力度－応力ひずみ関係、自由熱膨張ひずみと温度の関係および単位軸力比あたりの過渡ひずみと自由熱膨張ひずみの関係を Fig. 4 に示す。Fig. 4 に示したコンクリートの材齢は、熱間圧縮試験結果が約 3 ヶ月、常温圧縮試験結果が約 6 ヶ月である。800℃の熱間圧縮試験は、昇温中に供試体が破壊に至った。自由熱膨張ひずみは 300℃程度で減少したが、これはセメント水和物の脱水及び分解¹¹⁾や、ポリプロピレン繊維の溶融により形成された空隙からの水分逸散による収縮と考えられる。

鉄筋 SD490 の熱間引張試験結果を Table4 および Fig. 5 に示す。Fig. 5 の応力度－応力ひずみ関係には、2.1.3 項で示した常温引張試験結果も示した。応力度－応力ひずみ関係は 200℃以上では明確な降伏点を示さず、また 600℃以上で降伏点および引張強度が大きく低下した。

2.2.2 RC 壁柱の載荷加熱実験結果

断面温度の経時変化を Fig. 6 に示す。全試験体共通して爆裂は発生しなかった。4 面加熱を受ける H4-03-0 の断面温度は、2 面から加熱を受ける角部が面中央に比べ高くなり、断面中央の温度は加熱 120 分で約 140℃、加熱 180 分で約 190℃に達した。1 面加熱を受ける H1-03-0 の断面温度は、加熱面が少ないことから H4-03-0 に比べ低くなり、加熱 180 分で断面中央の温度は約 120℃、非加熱面側の表面温度は加熱前の 7℃に対し約 30℃となった。Fig. 6 には 1 面加熱を実施した試験体の内、試験体が荷重支持能力を喪失した時間（以下、耐火時間）が最も長くなった H1-03-0 の結果を示したが、耐火時間に至るまでは 1 面加熱を受ける他の試験体も概ね同様の温度結果であった。

柱頭鉛直変位の経時変化を Fig. 7 に示す。変位は加熱開始時を変位 0mm として示した。全試験体共通して加熱直後に材軸方向に膨張し、以降収縮に転じて荷重支持能力を喪失した。耐火時間は、H4-03-0 が 199 分、H1-03-0 が 215 分、H1-04-0 が 126 分、H1-03-25 が 144 分、H1-03-42 が 93 分であった。軸力の大きさと偏心距離が同一の試験体(H4-03-0、H1-03-0)は、4 面加熱の方が耐火時間が短くなり、加熱条件と軸力の大きさが同一の試験体(H1-03-0、H1-03-25、H1-03-42)は偏心距離が大きいほど耐火時間が短くなった。耐火時間における試験体の収縮変位は、4 面加熱を受ける試験体が約 26mm、1 面加熱を受ける試験体が約 4mm となり、熱劣化範囲の大きい試験体の収縮が大きくなった。

1 面加熱を受ける試験体の水平変位および非加熱面側コンクリート表面の応力ひずみ分布を Fig. 8 に示す。水平変位は加熱開始時を変位 0mm として示した。ひずみは常温載荷前を 0μとして示した

ため、常温載荷軸力により生じた応力ひずみを含んでいる。中心圧縮とした試験体は加熱開始直後から約 10～15 分まで、偏心圧縮と

Fig. 4 Result of concrete compressive test in high temperature⁹⁾

Table4 Result of reinforcing bars (SD490) tensile test in high temperature

Temperature	Yield point *	Tensile strength	Breaking elongation
[deg C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
200	491	839	15.5
400	426	665	21.5
600	201	265	26.5
800	48	77	52.5
1000	17	30	24.5

* 0.2% offset yield strength

Fig. 5 Stress - strain relationships of reinforcing bar in high temperature

Fig. 6 Temperature of cross-section

Fig. 7 Vertical displacement at top of the columns

(Legend)

Name	○	△	◇	(Fire-resistance time)	
				Experiment	Analysis
H1-03-0	30min.	120min	180min.	215min.	214min.
H1-04-0	30min.	60min.	90min	126min.	123min.
H1-03-25	30min.	60min.	90min	144min.	122min.
H1-03-42	30min.	60min.	75min.	93min.	82min.

— Experiment — Starin at compressive strength

---- Analysis result

H.S. : Heating side , N-H.S. : Non-heating side

Comp. : Compression , Tens. : Tension

(a) H1-03-0

(b) H1-04-0

(c) H1-03-25

(d) H1-03-42

Fig. 8 Distribution of horizontal displacement and surface strain

Fig. 9 Distribution of moment (example of eccentric loading)

Photo1 Specimens after tests

した試験体は加熱開始直後から約5~10分まで加熱面側コンクリートの熱膨張により加熱面側に凸に変形し、以降加熱面側の熱劣化により非加熱面側に凸の変形に転じた。その後全ての試験体で柱脚部における非加熱面側コンクリートの表面が一部剥落した直後、荷重支持能力を喪失した。

試験体の柱脚は球座を設置せず反力床に固定し、柱頭の水平変位を拘束した状態で片面加熱したため、柱頭支点の水平反力が変化することで、加熱中に曲げモーメント分布は変動する。常温載荷から破壊に至るまでの曲げモーメント分布の推移は、常温載荷時は Fig. 9(a)に示すように偏心圧縮により、試験体は加熱面側に倒れようとする試験体を支点が支持するため、支点水平反力が増加する。加熱初期は Fig. 9(b)に示すように、加熱面側に膨張することで試験体は非加熱面側に倒れようとするため、支点水平反力が減少し、柱脚の曲げモーメントが減少する。以降 Fig. 9(c)に示すように、加熱側の

Fig. 10 Analysis model

コンクリートの劣化が進むと、試験体は加熱面側に倒れようとするが、支点がこれを支えるため、支点水平反力が増加し、柱脚の回転を拘束する曲げモーメントが増加する。この曲げモーメントが変形の増大に伴い大きくなり、非加熱面側コンクリート表面の応力ひずみが圧縮強度時の応力ひずみに達することで表面のコンクリートが剥落し、破壊に至ったと考えられる。

実験後の試験体の状況を Photo1 に示す。4面加熱とした H4-03-0 は弱軸方向に「く」の字に折れ曲がっておらず、断面耐力により圧縮破壊したと考えられる。Photo1 には 1 面加熱の例として H1-03-42 を示したが、1 面加熱とした全ての試験体は、非加熱面側が凸の状態破壊し、柱脚は非加熱面側だけでなく加熱面側のコンクリートも剥落し、さらに主筋の座屈が見られた。

3. 解析検討

本章では、2 章で示した載荷加熱実験結果を解析で追跡し、解析手法の妥当性検証を行う。

3.1 解析概要

3.1.1 解析手法

解析は、既報 1)2)と同一の手法を用いる。具体的には、熱伝導解析により得られた各要素温度の時刻歴結果を用いた熱応力解析を行う。熱伝導解析には汎用 FEM プログラム ABAQUS を使用して 2 次元ソリッド要素を用い、熱応力解析には文献 12)の熱応力解析手法によるファイバーモデルを用いた。また、付加曲げモーメントの影響を考慮するため、元たわみの影響を検討した既報 2)と同様に幾何学的非線形効果を考慮した。

3.1.2 解析モデル

解析モデルを Fig. 10 に示す。断面は 196 要素に分割し、184 要素をコンクリートに、12 要素を主筋に割り当てた。主筋は要素中心位置および断面積が 2 章で示した試験体と概ね一致するよう要素寸法を定めた。4 面加熱を受ける解析モデルにおいては、断面の対称性を利用して 1/4 断面で熱伝導解析を実施したため、中央部の主筋を 2 要素に分割した。長さは 4500mm を 90 要素に分割して 1 要素の長さを全て 50mm とし、元たわみは与えず通直な圧縮部材を想定した。材端の力学的境界条件は、載荷加熱実験において試験体の柱頭には球座を設置したため、柱頭の回転は拘束せず変位は Z 方向以

外を全て拘束(以下、ビン)し、柱脚の回転及び変位は全て拘束(以下、固定)した。載荷加熱実験において球座は既報 1)で考察した通り、球座に所定のモーメントが発生するまでは回転を拘束すると考えられる。この所定のモーメントの大きさは球座面の摩擦抵抗に依存するため不明であるが、載荷加熱実験において 1 面加熱とした試験体には加熱開始直後に面外変形により球座にモーメントが発生し球座が回転することから、柱頭の力学的境界条件はビンとした。4 面加熱とした試験体は中心圧縮であり、解析モデルには元たわみを与えていないことから、解析モデルの長さや材端の力学的境界条件が解析結果に影響を与えることは無い。断面の加熱範囲は、4 面加熱については実験と同様に 4 辺を加熱し、1 面加熱については Fig. 2 に示した実験セットアップと同様に、柱幅 600mm の面の片側のみを加熱し、裏面側の雰囲気温度は常温、柱せい 250mm の面は断熱とした。柱高さ方向の加熱範囲は解析モデル全長とした。載荷加熱実験においては実験セットアップの都合上、柱頭に非加熱区間が存在するが、文献 13)に示すように、加熱区間と非加熱区間を有する部材の座屈長さは、非加熱区間側の材端の力学的境界条件をビンとした場合、部材全長を加熱区間とした座屈長さとはほぼ等しくなる。よって解析モデルでは、部材全長を加熱範囲とし、実験結果と比較することとした。

3.1.3 解析手順

立面モデルに示す所定の載荷位置に一定圧縮軸力を与えた後、熱伝導解析で得られた時々刻々と変化する断面温度を立面モデルの Z 方向全ての要素に与えることで熱応力解析を行う。

3.1.4 熱伝導解析に用いる各種物性値

本項で示す物性値は既報 1),2)と同一である。コンクリートの熱的性質には文献 14)に記載の値を用い、主筋は考慮せず全てコンクリートと見做した。コンクリートの密度は $2.4 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、含水率は 5.0%として 100~120℃間の蒸発潜熱を考慮した。加熱面の熱的境界条件については、有効輻射率を 0.82、対流熱伝達率を $23.2 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とし、1 面加熱を行う場合の非加熱面側の対流熱伝達率は $5.8 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした。加熱温度は ISO834 に記載されている標準加熱温度曲線を用いた。

3.1.5 コンクリートおよび主筋の高温物性値

コンクリートおよび主筋の高温物性値は、2.2.1 項で示した熱間試験結果をモデル化したものを用いる。

コンクリートの応力度－応力ひずみ関係のモデル化に用いた popovics 式¹⁵⁾を式(1)に、式中の温度依存の変数を Table5(a)に示す。表に記載の無い温度中間値は線形補間した。実験結果と解析モデルの比較は Fig. 4(a)に示した通り、良い対応を示した。コンクリート要素に除荷あるいは除荷後再載荷が生じた場合は、当該要素温度におけるヤング係数の勾配で応力度が変化することとした。

$$\sigma = \sigma_T \cdot \frac{\varepsilon_\sigma}{\varepsilon_T} \cdot \frac{n_T}{n_T - 1 + (\varepsilon_\sigma / \varepsilon_T)^{n_T}} \quad (1)$$

σ : 応力度, ε_σ : 応力ひずみ, σ_T : 温度 T における圧縮強度,

ε_T : 温度 T における圧縮強度時の応力ひずみ

n_T : 温度 T における形状係数

自由熱膨張ひずみは Fig. 4(b)に示した通り実験結果を温度の 5 次

Table5 Temperature-dependent properties

(a) Concrete

Temperature [deg C]	20	200	400	600	700	800 and over
Compressive strength σ_T [N/mm ²]	123	86.4	71.5	65.5	45.4	1.2
Young's modulus E_T [$\times 10^4$ N/mm ²]	4.30	3.54	2.76	2.49	2.28	0.04
Strain at compressive strength ε_T [μ]	3334	2982	3640	3431	2979	2979
Shape-dependent coefficient n_T	10.18	6.75	3.59	4.57	2.53	2.53

(b) Main rebar

Temperature [deg C]	20	200	400	600	800	1000
Young's modulus E_T [$\times 10^5$ N/mm ²] *	1.92	1.83	1.58	1.15	0.56	0.16
coefficient defined by plastic strain *	$\frac{\sigma_k}{\sigma_B}$ [N/mm ²]	1010.7	1198.3	859.0	269.9	57.3
	k	8.18	6.86	9.94	25.12	35.47

* Same value in 1000 [deg C] or more

関数で近似した。コンクリートの過渡ひずみは Anderberg らによって式(2)で定義され¹⁶⁾, K は Fig. 4(c)に示した通り実験結果をバイリニアで近似することで定めた。

$$d\varepsilon_{ir} = K \frac{\sigma}{\sigma_B} (-d\varepsilon_{ih}) \quad (2)$$

$d\varepsilon_{ir}$: 過渡ひずみの増分, K : 過渡ひずみ発生量を表す係数,

σ : 応力度, σ_B : 常温圧縮強度, $d\varepsilon_{ih}$: 自由熱膨張ひずみの増分

主筋の応力度－応力ひずみ関係のモデル化は、文献 17)と同様に応力ひずみを弾性ひずみと塑性ひずみの和として表す式(3)を用いることとした。ヤング係数の温度依存性については文献 12)の回帰式を用いた。式中の温度依存の変数を Table5(b)に示す。表に記載の無い温度中間値は線形補間した。実験結果と解析モデルの比較は Fig. 5 に示した通り、良い対応を示した。主筋要素に除荷あるいは除荷後再載荷が生じた場合は、コンクリートと同様に当該要素温度におけるヤング係数の勾配で応力度が変化することとした。

$$\varepsilon_\sigma = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E_T} + \left(\frac{\sigma}{\sigma_k} \right)^k \quad (3)$$

ε_σ : 応力ひずみ, ε_e : 弾性ひずみ, ε_p : 塑性ひずみ,

σ : 応力度, E_T : 温度 T におけるヤング係数

σ_k, k : 温度 T における塑性ひずみを定める係数

3.2 熱伝導解析結果

熱応力解析を行うにあたり、Fig. 10(b)の断面モデルを構成する各要素の断面温度を熱伝導解析により把握する。そこで、Fig. 10(b)の断面モデルを対象とした解析に先立ち、Fig. 6 の断面温度の実験結果を用いて、熱伝導解析に用いる各種物性値の妥当性を確認するための予備解析を行った。予備解析モデルとしては、Fig. 3 の熱電対位置を正確に表すため、600mm×250mm の断面を 1mm 角のメッシュに分割した断面を対象とすることとした。予備解析における

Fig. 11 Axial force ratio – Fire-resistance time relationships

熱伝導解析結果は Fig. 6 に破線で示した。実験結果に関して、H4-03-0 はかぶりコンクリートの温度である $ce-0, ce-15$ が加熱約 100 分以降で低くなる現象がみられ、加熱中にコンクリートに生じたひび割れ等の影響の可能性があるが、原因は不明である。H1-03-0 の $ce-0, ce-15$ についても同様に、加熱約 100 分以降で温度の上昇が緩やかになる現象がみられたが、その他の温度は試験体が破壊に至るまで実験結果と概ね一致したため、熱伝導解析には 3.1.4 項で示した各種値を用いることとした。

3.3 熱応力解析結果

柱頭鉛直変位の経時変化、耐火時間における水平変位および非加熱面側コンクリート表面の応力ひずみ分布について、解析結果は Fig. 7 および Fig. 8 に破線で示した。実験結果と解析結果を比較すると、柱頭の鉛直変位、耐火時間における水平変位を概ね良く評価できた。非加熱面側コンクリートの表面ひずみに関して、偏心圧縮とした試験体(H1-03-25, H1-03-42)の柱頭においては実験結果よりも解析結果が大きくなったが、これは、実験では試験体の柱頭に載荷用の梁形を設けたのに対し、解析では解析モデルの長さ方向を Fig. 10(b)に示す断面で一様としたため実験における柱頭の断面が大きいこと、また実験では試験体の柱頭に非加熱区間が存在するのに対し、解析では解析モデルの全長を加熱区間としたため柱頭において加熱面側の収縮により大きな曲率が生じたことが原因と考えられる。なお、解析においても柱脚における非加熱面側コンクリート表面の応力ひずみが Fig. 8 に一点鎖線で示した圧縮強度時の応力ひずみ(3334μ)に達することで破壊に至り、実験の破壊挙動を解析で評価できた。

軸力比と耐火時間の関係を Fig. 11 に示す。熱応力解析は載荷加熱実験を行った軸力比に加え、軸力が耐火時間に与える影響を把握するため、軸力比 0.2~0.9 の範囲を 0.1 間隔で実施した。各載荷加熱実験結果と解析結果は良い対応を示している。なお、4 面加熱とした解析モデルを対象に、既報 1)で提案した接線係数理論に基づく座屈耐力を両端部の回転を拘束した座屈長さで評価した結果、軸力比 0.2 においては断面耐力により圧縮破壊する 301 分よりやや短い 299 分で座屈破壊し、軸力比 0.3~0.9 の範囲においては座屈破壊せず断面耐力により圧縮破壊する結果となった。1 面加熱で軸力の偏心距離が異なる解析結果に関して(Fig. 11 の△と○と×)、偏心距離が大きいほど同軸力比における耐火時間は短くなった。また、中心圧縮で加熱条件が 4 面加熱と 1 面加熱で異なる解析結果(Fig. 11 の□と△)に関して、軸力比が約 0.3 を超えると、同軸力比における耐

火時間は 4 面加熱に比べ 1 面加熱が短くなった。

4. まとめ

片面加熱および偏心圧縮を受ける RC 壁柱の火災時挙動を明らかにすることを目的とし、常温圧縮強度約 120N/mm^2 のコンクリートを用いた、 $250\times 600\text{mm}$ の長方形断面で高さが 4500mm の RC 壁柱の載荷加熱実験を実施した。また、幾何学的非線形を考慮した熱応力解析により実験結果を追跡することで解析手法の妥当性を検証し、以下の知見を得た。

- ・片面加熱および偏心圧縮を受ける RC 壁柱の載荷加熱実験結果に対し、既報 1,2)と同一の解析手法および使用材料の熱間材料試験に基づく解析モデルを用いることで、火災時における変形挙動、破壊位置および耐火時間を概ね良く評価できる。
- ・本解析モデルにおいて、中心圧縮で 1 面加熱と 4 面加熱を受ける場合の耐火時間は、軸力比が約 0.3 を超えると、同軸力比では 4 面加熱に比べ 1 面加熱が短くなる。

今後は、RC 長柱を有する架構の火災時における解析を行うことで、梁の軸方向伸びにより柱に生じる強制水平変位および架構における柱部材端部の力学的境界条件が、RC 長柱、ひいては架構の耐火性能に与える影響を検討する予定である。

参考文献

- 1) Masaki Kato, Shintaro Michikoshi, Shigeaki Baba, Kazumasa Imai and Satoshi Watanabe: Buckling Strength of Slender RC Columns Subjected to Centric Axial Load in Fire Study on fire resistance of slender RC columns Part 1, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.708, pp.345-355, 2015.2 (in Japanese)
加藤雅樹, 道越真太郎, 馬場重彰, 今井和正, 渡邊悟士: 中心圧縮を受ける鉄筋コンクリート造長柱の火災時座屈耐力 鉄筋コンクリート造長柱の耐火性能に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 708 号, pp.345-355, 2015.2
- 2) Masaki Kato, Shintaro Michikoshi, Shigeaki Baba and Hiroyasu Sakata: Behavior of Slender RC Columns with Initial Deformation in Fire Study on fire resistance of slender RC columns Part 2, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.736, pp.959-968, 2017.6 (in Japanese)
加藤雅樹, 道越真太郎, 馬場重彰, 坂田弘安: 元たわみを有する鉄筋コンクリート造長柱の火災時挙動 鉄筋コンクリート造長柱の耐火性能に関する研究 その 2, 日本建築学会構造系論文集, 第 736 号, pp.959-968, 2017.6
- 3) Tsubasa Tani, Ryota Maseki, Hiroshi Hibino and Izuru Takewaki: Durability of Laminated Rubber as Rotary Bearing Development of vibration controlled high-rise RC building with low stiffness at lower stories using shear-wall and oil-dampers part 1, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.733, pp.395-403, 2017.3 (in Japanese)
谷翼, 欄龍大, 日比野浩, 竹脇出: 回転支承としての積層ゴムの耐久性 低層部剛性を低下させた超高層 RC 建物の連層壁制振架構の開発 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 733 号, pp.395-403, 2017.3
- 4) Keijiro Yamakawa, Tomoaki Sugiyama, Yasuhiro Nishikawa, Hiroyuki Narihara and Shoji Katsuta: Structural performance of reinforced concrete eccentric beam-column joints Part1 Outline of the test and failure mode, Summaries of technical papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-2, pp.419-420, 2010.7 (in Japanese)
山川慶二郎, 杉山智昭, 西川泰弘, 成原弘之, 勝田庄二: 梁側面が柱幅よりも外側に偏心した RC 造柱梁接合部の構造性能に関する研究 その 1 実験概要と破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.419-420, 2010.7
- 5) Takeshi Morita, Masuhiro Beppu and Makoto Suzuki: An Experimental Study on Structural Fire Behavior of Reinforced Concrete Wall after

- High Velocity Impact of Hard Projectile, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.708, pp.357-367, 2015.2 (in Japanese)
- 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 剛飛翔体の高速衝突を受けた鉄筋コンクリート造壁の構造耐火性に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 708 号, pp.357-367, 2015.2
- 6) JAMIE MACLEAN, VADIMS GOREMIKINS, LUKE BISBY and TIM STRATFORD: Effects of Localised or Non-Uniform Heating on Reinforced Concrete Columns, 9th International Conference on Structures in Fire, USA, pp.102-109, 2016.6
- 7) ANDREW H. BUCHANAN, V. RAO MUNUKUTLA: Fire Resistance of Load-Bearing Reinforced Concrete Walls, Proceedings of the 3rd International Symposium on Fire Safety Science, pp.771-780, 1991.
- 8) Masaki Kato, Shintaro Michikoshi, Shigeaki Baba and Hiroyasu Sakata: Compressive Tests of 110N/mm² Class High Strength Concrete in High Temperature, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp.195-196, 2017.8 (in Japanese)
- 加藤雅樹, 道越真太郎, 馬場重彰, 坂田弘安: 圧縮強度 110N/mm² 級高強度コンクリートの熱間圧縮試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.195-196, 2017.8
- 9) Masatosi Tokoyoda and Heisuke Hirashima: Compression Tests of Concrete Heated up to 700 °C with Restraining Force in High Temperature and Room Temperature Condition, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-2, pp.5-6, 2016.9 (in Japanese)
- 常世田昌寿, 山下平祐: 拘束力を伴って 700℃まで加熱されるコンクリートの熱間および冷間圧縮試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.5-6, 2006.9
- 10) Masaki Kato, Shintaro Michikoshi, Shigeaki Baba, Shusuke Kuroiwa and Hiroshi Jinnai: Compressive Tests of 100N/mm² High Strength Concrete in High Temperature and after Heating Conditions, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-2, pp.13-14, 2011.8 (in Japanese)
- 加藤雅樹, 道越真太郎, 馬場重彰, 黒岩秀介, 陣内浩: 100N/mm² 級高強度コンクリートの熱間・冷間圧縮試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.13-14, 2011.8
- 11) Heisuke Yamashita, Toru Yoshida, Daiki Shishikura, Masatoshi Tokoyoda and Takeo Hirashima: Influence of Curing Condition and Water Cement Ratio on Load-Induced Thermal Strain of Concrete Influence of water content on properties of concrete in high temperatures Part2, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.727, pp.1597-1607, 2016.9 (in Japanese)
- 山下平祐, 吉田徹, 穴倉大樹, 常世田昌寿, 平島岳夫: コンクリートの載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件と水セメント比の影響 コンクリートの高温時特性に及ぼす水分の影響(その2), 日本建築学会構造系論文集, 第 727 号, pp.1597-1607, 2016.9
- 12) Hideki Uesugi and Hiroshi Koike: Thermal Stress of Steel Structures of Tall Buildings in Fire Part1 Computer analysis method of tall structures exposed to compartment fire, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.381, pp.73-80, 1987.11 (in Japanese)
- 上杉英樹, 小池浩: 高層鉄骨架構の熱応力解析 (その1) 区画火災を受ける超高層鉄骨架構の熱応力解析手法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 381 号, pp.73-80, 1987.11
- 13) Masaki Kato, Shintaro Michikoshi and Shigeaki Baba: Fundamental Study on Buckling of Slender RC Columns with Heated and Non-Heated Areas in Fire, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp.63-64, 2015.9 (in Japanese)
- 加藤雅樹, 道越真太郎, 馬場重彰: 加熱区間と非加熱区間を有するRC長柱の火災時座屈に関する基礎検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.63-64, 2015.9
- 14) Shintaro Michikoshi and Yutaka Kobayashi: Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-2, pp.79-80, 2014.8 (in Japanese)
- 道越真太郎, 小林裕: 高強度コンクリートの高温時における力学的性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.79-80, 2004.8
- 15) Sandor Popovics: A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 16) Yngve Anderberg and Sven Thelandersson: Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden 1976
- 17) Kakuhiro Nagao, Hiroaki Eto, Hironori Niwa and Hideki Uesugi: The Results of Elevated Temperature Tensile Tests of Reinforcing Bars, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-2, pp.75-76, 2010.9 (in Japanese)
- 長尾覚博, 江戸宏彰, 丹羽博則, 上杉英樹: 鉄筋コンクリート用棒鋼の高温引張試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 75-76, 2000.9

BEHAVIOR OF RC WALL COLUMNS SUBJECTED TO ONE SIDE HEATING AND ECCENTRIC AXIAL LOAD IN FIRE

Study on fire resistance of slender RC columns Part 3

Masaki KATO^{*1}, *Shintaro MICHIKOSHI*^{*2}, *Shigeaki BABA*^{*2}
and Hiroyasu SAKATA^{*3}

^{*1} Technology Center, Taisei Corp., M.Eng.

^{*2} Technology Center, Taisei Corp., Dr.Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

Reinforced concrete columns formed with high-strength concrete have been developed with a smaller cross section than conventional “short” columns as axial load carrying members. Known as “slender” columns, they can enlarge building space and provide good visibility in architectural space.

RC wall columns whose shape of cross-section are flat and the smallest diameter are small on an equality with slender RC columns are used as earthquake resisting elements for enhancing horizontal stiffness of structural frame. They have been also developed as quake-absorbing system and vibration control system known as damage-controlled system. These RC wall columns belong in the “slender RC columns” defined by authors in case the ratio of column height to cross sectional smallest diameter is large. RC wall columns are possibly heated with one side when RC walls are used as outer wall. In these one side heating situations, RC wall columns are displaced toward a horizontal direction due to non-uniform thermal degradation of the cross-section. And furthermore, axial load generates additional moment. Bending stiffness decreases considerably due to thermal degradation of the heated surface in fire. It is anticipated that RC wall columns subjected to one side heating would fail earlier than ones subjected to all circumferences heating because of this additional moment. Moreover, it is similarly anticipated that additional moment generated by an eccentric joint of beams would lower the fire-resistance performance of RC wall columns.

This paper presents the results from an experimental and analytical studies of RC wall columns subjected to one side heating and decentering axial load in fire and leads to a discussion of fire performance which includes deformation behavior, failure mode and fire resistance time. All specimens consist of concrete with a compressive strength of approximately 120N/mm² and have rectangular cross-section with sides 250mm and 600mm in length and 4500mm in height. Comparing the experimental and analytical results, the analysis method using a fiber model based on the mechanical properties of the materials in high temperature offers a good approximation of deformation behavior, failure mode and fire resistance time. In addition, the results confirm that the centrally loaded specimens subjected to one side heating fail earlier than ones subjected to all circumferences heating under conditions that axial load ratio is about 0.3 or over.

(2017 年 9 月 10 日原稿受理, 2017 年 10 月 30 日採用決定)