

論文 複合加力を受ける無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に関する解析的研究

木下 拓也*1・中村 尚弘*1・西村 俊彦*2・岡崎 智仁*3

要旨：材料構成則の温度依存を考慮した非線形 FEM 解析により、無耐火被覆 CFT 柱の耐火時間の予測手法について検討した。Eurocode2 の材料熱劣化特性を実装した FEM 解析プログラムにより、軸力と曲げを同時に受ける無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能検証実験のシミュレーション解析を実施した。軸力比・水平方向の目標変形角をパラメータとし、柱内部の応力状態の推移や、軸力支持能力を失うタイミングについて検討した。検討の結果、実施した解析により軸力比・変形角に対応する耐火時間がある程度予測できることがわかった。
キーワード： CFT 柱, 無耐火被覆, 耐火時間, 熱応力解析, 3次元 FEM

1. はじめに

コンクリート充填鋼管造柱（以下 CFT 柱）は、鋼管の内部にコンクリートを充填した合成構造であり、鉄骨造に比べ優れた耐火性能を示すことが知られている。軸力の大きさ、コンクリート強度、部材角等の上限を制限することで、耐火被覆を施さなくても建築基準法に定められる耐火建築物の柱としての耐火性能を確保することも可能である¹⁾。

耐火被覆を施さない CFT 柱（以下無耐火被覆 CFT 柱）の耐火性能は、熱膨張により材軸方向へ伸び出す梁の影響を考慮して、建物の長期荷重に相当する軸力を与えながら柱頭を水平変形させ、且つ柱を加熱する複合加力荷加熱実験により検証されているケースが多い^{2)・5)}。

文献 5)では、既往の検討では行われてこなかった実大サイズ（□-600 mm 程度）の試験体による、複曲率形式の複合加力荷加熱実験が行われた。実験の結果、柱頭及び柱脚に鋼管の局部座屈が見られ、その内側の部分でコンクリートの破壊が集中する現象が見られた。

その原因について、文献 5)では鋼管の局部座屈が生じた部分において、部分的に鋼管による拘束が失われ、軸力と曲げモーメントが作用することでコンクリートの圧壊が進行する、という破壊シナリオが示されているが、詳細な破壊メカニズムは明らかにされていない。また、耐火時間と部材角及び軸力比との関係についても、実験に基づいた関係式が示されているが、実験データは限られており、これらのパラメータが変化したケースに対する検討は十分でない。

一方で、上述の各種パラメータの変動に対して、逐一耐火試験を行うことは、時間及びコストの観点から困難であり、そのような場合には解析的なアプローチが有効

となる。本報では、無耐火被覆 CFT 柱が軸力支持能力を失うまでの時間と、軸力比、部材角との関係を予測することを目的に、材料の温度依存特性を考慮した FEM 解析により、軸力と曲げを同時に受ける無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能検証実験のシミュレーション解析を実施する。軸力比及び水平方向の目標変形角について、文献 5)で実験が実施された範囲に加え、解析的検討を行う計 9 ケースの条件を設定し、柱内部の応力状態の推移や、軸力支持能力を失うタイミングについて検討した。

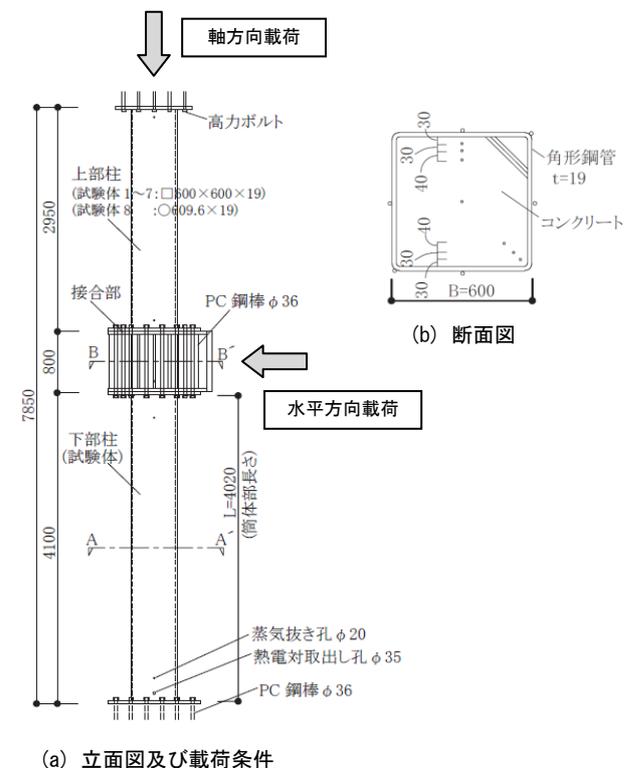


図-1 試験体概要（試験体 4）

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 博士 (工学)

*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 工修

表-1 文献5) の試験体一覧

試験体	鋼管			最大部材角 ※1	骨材	幅厚比 (B/t)	コンクリート 目標強度 (N/mm ²)	施工方法 ※2	軸力比 ※3
	形状	断面	鋼種						
1	角形	600×600×19	BCP325	1/50	石灰岩	31.6	50	方法1	0.36
2	角形	600×600×19	BCP325	1/50	石灰岩	31.6	50	方法1	0.32
3	角形	600×600×19	BCP325	1/50	石灰岩	31.6	50	方法1	0.27
4	角形	600×600×19	BCP325	1/100	石灰岩	31.6	50	方法1	0.32
5	角形	600×600×19	BCP325	1/200	石灰岩	31.6	50	方法1	0.32
6	角形	600×600×19	BCP325	1/100	硬質砂岩	31.6	50	方法1	0.32
7	角形	600×600×25	BCP325	1/100	石灰岩	24.0	50	方法1	0.32
8	円形	609.6×19	STKN490B	1/100	石灰岩	32.1	50	方法1	0.32
9	角形	600×600×19	BCP325	1/100	石灰岩	31.6	50	方法2	0.32
10	角形	300×300×9	BCR295	1/50	石灰岩	33.3	50	方法1	0.32

※1 部材角 = (水平載荷部の水平変位 / 試験体筒体部長さ)

※2 方法1: 上下柱を分離し落とし込みでコンクリート打設後、PC鋼棒で結合 方法2: 上下柱を一体で圧入によりコンクリート打設

※3 常温時のコンクリートに対する軸力比 = (軸力 N / (コンクリート部位面積 cA × 圧縮強度 ccB))

2. 対象とする実験の概要

2.1 試験体及び実験方法

対象とする実験は、竹中技術研究所で実施された、複曲率形式の複合加力を受ける無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能確認実験⁵⁾である。実大サイズ(□-600 mm 程度)の試験体による複合加力載荷加熱実験を行い、無耐火被覆 CFT 柱の火災時の挙動と破壊に至るメカニズムについて検討している。

試験体形状を図-1に、また試験体一覧を表-1に示す。無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に影響を及ぼすと考えられる軸力比、部材角、断面寸法、幅厚比、断面形状、骨材種別、打設方法をパラメータとして、計10体の試験体が計画された。断面を□-600×600×19、粗骨材を石灰岩碎石、最大部材角を1/100 rad、軸力比を0.32とした試験体4が標準試験体であり、これと異なる項目を表-1に網掛けで示している。コンクリート強度は実験時の実強度が50N/mm²となるように計画された。鋼管には一部の試験体を除きBCP325が使用された。

実験装置を図-2に示す。下部柱の脚部は固定条件となるようPC鋼棒で堅結され、上部柱の頂部は球座を介し

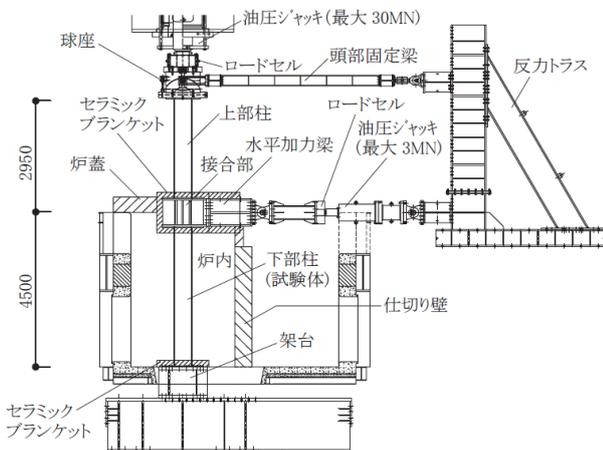


図-2 実験装置 (単位: mm)

て鉛直加力用のジャッキと接続された。上下柱の中間にあたる接合部は、梁の伸び出しを模擬した水平変位を与えるためのジャッキと接続された。加熱範囲は下部柱のみであり、炉内の接合部及び柱脚部はセラミックブランケットで被覆された。

表-1に示す軸力比に相当する鉛直軸力を試験体に与えた上で、ISO384に規定された標準加熱温度曲線に従い、試験体が破壊するまで加熱された。水平方向には、柱の部材角が1時間で表-1に示す最大部材角に到達するように、柱頭の水平変位を一定の速度で漸増させ、最大部材角到達後は水平変位を固定させた。

2.2 実験結果の概要

主要な実験結果を以下にまとめる。

- ① 試験体1~3の耐火時間比較により、軸力比が小さくなるほど耐火時間が長くなることが確認された。
- ② 試験体3~5の比較により、部材角が小さいほど耐火時間が長くなることが確認された。
- ③ 柱頭及び柱脚に鋼管の局部座屈が生じ、その内側部分にコンクリートの圧壊が集中する現象が見られた。上記③の現象は、加熱により局部座屈を生じることで部分的に鋼管の拘束が失われ、軸力と曲げを同時に受けることで広範囲に圧壊し、軸力支持能力を喪失したと推察された(図-3参照)。

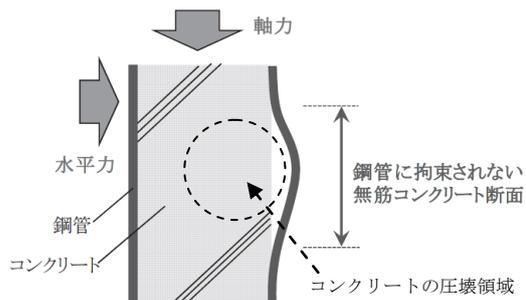


図-3 鋼管の局部座屈とコンクリートの圧壊

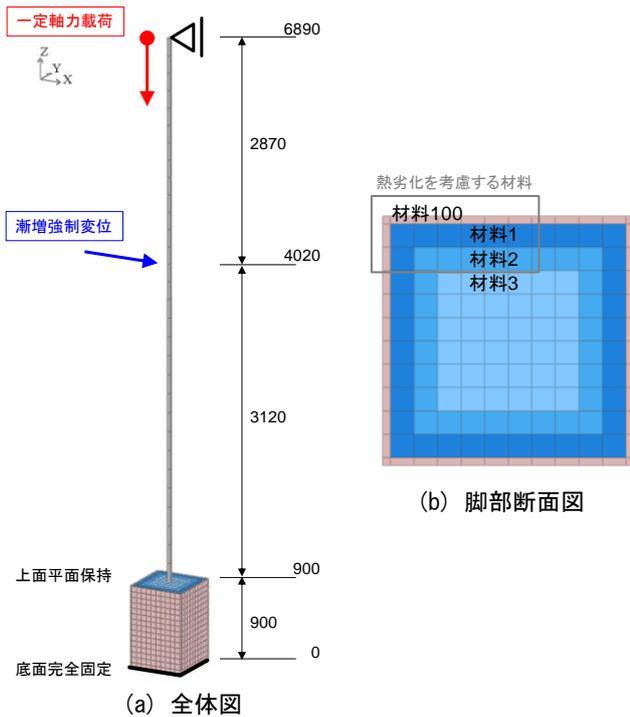


図-4 解析モデル

3. シミュレーション解析の概要

3.1 解析概要

上述の実験を対象として、非線形 FEM によるシミュレーション解析を実施した。解析の目的は、熱による材料の劣化と、軸力及び曲げの荷重が複合することによる、軸力保持能力喪失の過程を解析的に評価し、無耐火被覆 CFT 柱の耐火時間を予測することとし、下記の条件の下で実施した。

1. コンクリート及び鋼管の温度依存特性を考慮する。
2. 鋼管及びコンクリートの温度推移は、実験の測定データを利用し、熱伝導解析は実施しない。
3. 一定軸力を載荷後に、材料の温度変化と同時に水平方向の強制変位を与える。
4. 加熱による鋼管の伸びや局部座屈等の現象はシミュレーションの対象外とし、鋼管及びコンクリートの熱膨張ひずみ及び過渡ひずみ、クリープひずみは考慮しない。
5. FEM によるモデル化は、曲げモーメントが最も大きくなる柱脚部分のみとし、計算負荷を低減する。

上記の解析は、材料構成則についてのみ熱的な影響を考慮した構造解析に留まっており、実験で生じた全ての事象を説明することはできない。しかしながら、軸力保持能力喪失の最大の要因と考えられる、コンクリートの熱による劣化と複合荷重は考慮されており、圧壊のタイミングを再現することを目的としている。

3.2 解析モデル

解析モデルを図-4 に示す。CFT 柱の脚部を 8 面体ソリッドによる有限要素で、脚部以外の部分は梁要素として

表-2 常温時の材料特性

コンクリート (Fc50)	ヤング係数 (N/mm ²)	2.70E+04
	ポアソン比	0.2
	圧縮強度 (N/mm ²)	50.0
鋼管 (BCP325)	ヤング係数 (N/mm ²)	2.05E+05
	ポアソン比	0.3
	降伏強度 (N/mm ²)	392.3

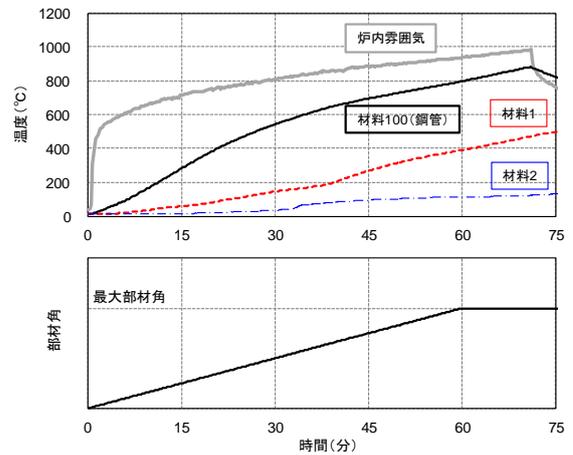


図-5 温度推移曲線及び部材角

モデル化した。実験と同様に、鉛直方向に軸力を加えた後、接合部に相当する位置に漸増の水平変位を強制変位として与えた。また、水平変位と同時に実験で計測された温度推移に基づく温度変化を材料に与える条件とした。

温度変化を与える材料は、図-4 (b) に示すように、鋼材に当たる材料 100 と、外側から 2 層目までのコンクリート (材料 1, 2) の 3 種類とした。常温時の材料定数を表-2 にまとめる。実験の条件を基に、全ケース同じ値を用いるものとした。

3.3 荷重条件及び温度推移

図-5 に、鋼管 (材料 100) 及びコンクリート (材料 1, 2) の温度推移曲線を示す。これは、各部位について安定した温度推移が計測された、対象実験の試験体 6 の温度測定結果に基づいて定めたものである。

また、温度推移と並行して与えられる水平方向強制変位による部材角の履歴も図-5 に併せて示す。水平変位は、60 分後に最大部材角に到達するよう線形に載荷され、60 分以降は最大部材角を保持させた。解析ステップは、軸力載荷後 1 分間を 100 ステップに分割するものとして計 75 分間、7500 ステップとした。

3.4 解析ケース

解析ケースを表-3 にまとめる。ケース(a)~ (c)は、部材角 1/50 で軸力比がそれぞれ異なるケースとなっており、対象実験の試験体 1~3 に対応している。ケース(d)~ (f)は部材角 1/100、ケース(g)~ (i)は部材角 1/200 としている。ケース(e)が対象実験の試験体 4、ケース(h)が試験体 5 にそれぞれ対応する。

表-3 解析ケース

ケース	最大部材角	軸力比	対応試験体
a	1/50	0.36	試験体 1
b	1/50	0.32	試験体 2
c	1/50	0.27	試験体 3
d	1/100	0.36	
e	1/100	0.32	試験体 4
f	1/100	0.27	
g	1/200	0.36	
h	1/200	0.32	試験体 5
i	1/200	0.27	

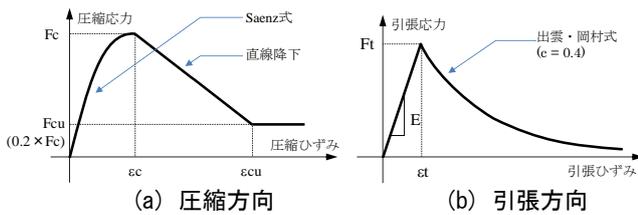


図-6 コンクリートのスケルトンカーブ

3.5 解析手法

解析には、コンクリートの非線形構成則に野口らのモデル⁶⁾を、材料の温度依存特性にEurocode2の特性⁷⁾を組み込んだFEM解析プログラムを用いた。

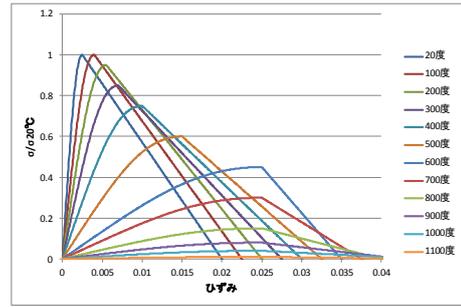
図-6に、コンクリート要素の等価一軸応力-ひずみ関係のスケルトンカーブを示す。コンクリート圧縮上昇域はSaenz式⁸⁾、圧縮軟化域は直線降下とした。圧縮方向ピーク後の収斂点は、Kent-Park式⁹⁾により定めた。引張方向は、ひび割れまでは線形とし、ひび割れ後のテンションステイフィング特性として出雲・岡村らの指数式モデル(c=0.4)¹⁰⁾を用いた。せん断伝達特性にはAl-Mahaidi式¹¹⁾を用いた。ひび割れモデルは、一軸3方向の直交ひび割れモデルとした。

温度依存特性については、Eurocode 2で示される強度残存率(劣化時強度/常温時の強度)及び最大強度時ひずみ(鋼管の場合は降伏ひずみ)のテーブルに従って与えた。

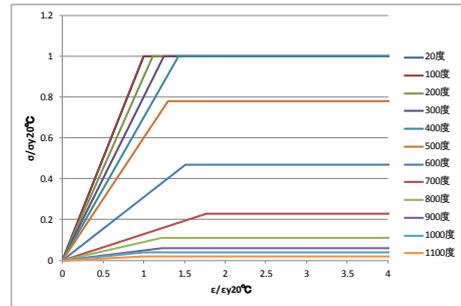
解析ステップ時の温度に従って、図-6に示す要素の圧縮強度Fc(鋼管の場合は降伏強度)と圧縮強度時ひずみεc(鋼管の場合は降伏ひずみ)の値がプログラム内部で変化するように拡張を行った。100℃ごとに定義されるテーブル間の特性については、線形補間により定められるものとした。コンクリート及び鋼管の温度依存特性の一軸応力ひずみ関係を図-7に示す。

4. 解析結果

解析の結果を表-4と図-8にまとめる。表-4の軸力支持能力喪失時間は、鉛直変位が10mmに達した時間、もしくは鉛直荷重が要因で解析不能となった時間として算



(a) コンクリート (圧縮側)



(b) 鋼管

図-7 スケルトンカーブの温度依存特性

表-4 解析結果

ケース	最大部材角	軸力比	軸力支持能力喪失時間* (min)	実験の耐火時間 (min)
(a)	1/50	0.36	47.8	51.0
(b)	1/50	0.32	51.1	58.0
(c)	1/50	0.27	48.2	65.5
(d)	1/100	0.36	60.1	
(e)	1/100	0.32	66.9	65.5
(f)	1/100	0.27	67.7	
(g)	1/200	0.36	60.8	
(h)	1/200	0.32	>75	72.5
(i)	1/200	0.27	>75	

*軸力支持能力喪失時間は、鉛直変位が10mmに達した時間、もしくは解析不能となった時間として算出した。

出した。この時間は、文献5)に示されている実験の耐火時間と概ね対応した。図-8には、柱頂部の鉛直変位の時刻歴を示す。

図-9, 10には、ケース(i)(部材角1/200, 軸力比0.27)及びケース(e)(部材角1/100, 軸力比0.32)の変形図及び鉛直方向応力コンター図を示す。ケース(i)では、時間の経過に従って曲げ変形が大きくなり、圧縮側で大きな鉛直応力が発生していることが確認できる。また、60minの段階では、熱の影響によって、最も圧縮ひずみが大いと考えられる外縁部での応力が小さくなっており、断面中央よりやや右側の非常に狭い領域でのみ圧縮力を負担している状況が観察できる。

一方、ケース(e)では、30~40minの間にコンクリートの圧壊が発生し、その後脚部の局所変形が拡大し、崩壊していく様子が確認された。

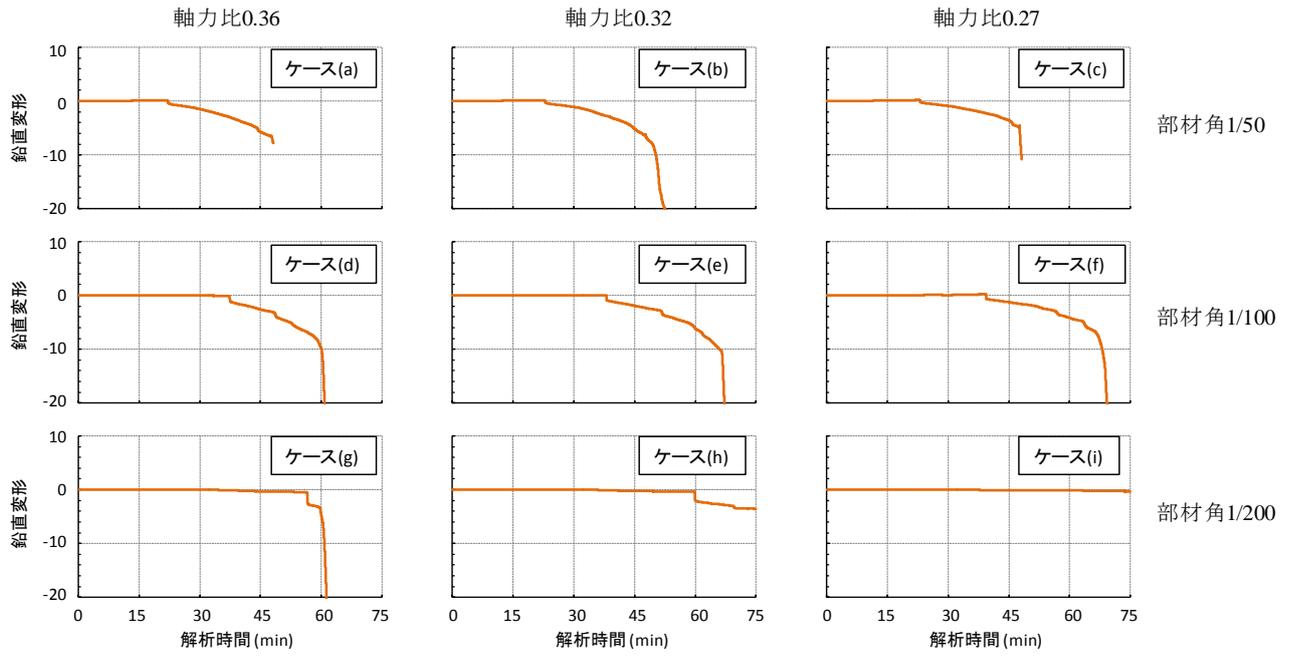


図-8 柱頂部の鉛直変位時刻歴

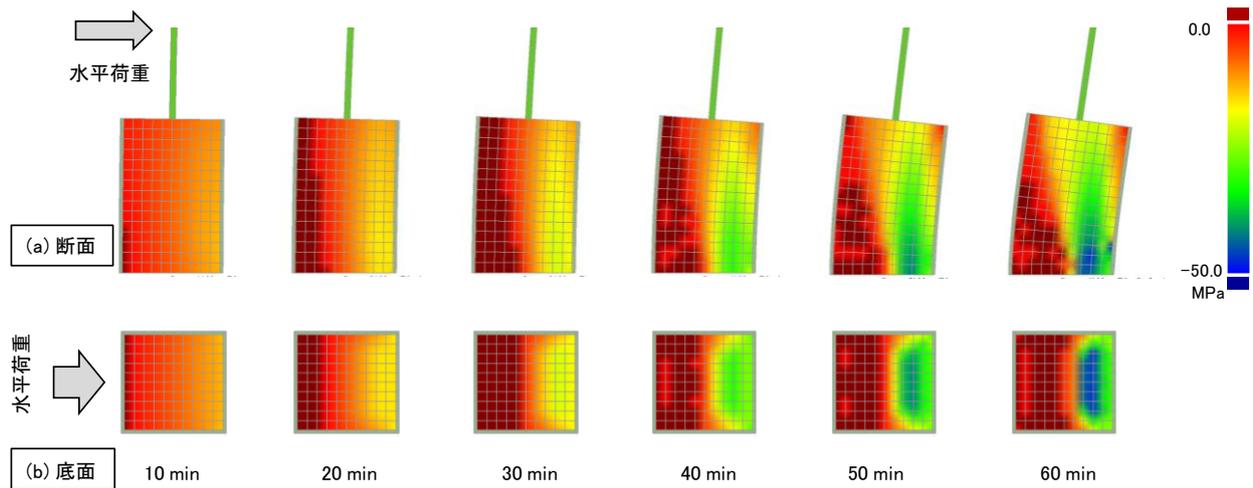


図-9 ケース(i)の変形及び鉛直方向応力コンター図 (変形倍率: 10倍)

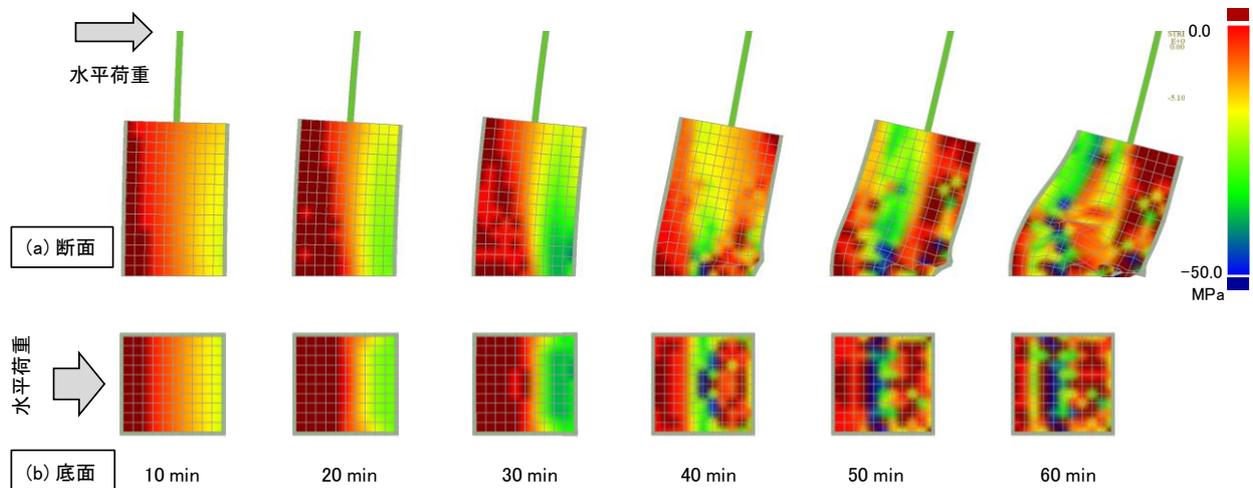


図-10 ケース(e)の変形及び鉛直方向応力コンター図 (変形倍率: 10倍)

5. まとめ

材料の温度依存特性を考慮した FEM 解析により、軸力と曲げを同時に受ける無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能検証実験のシミュレーション解析を実施した。軸力比及び水平方向の目標変形角をパラメータとして、柱内部の応力状態の推移や、軸力支持能力を失う時間について検討した。

解析の結果、熱の影響による CFT 柱内部の鉛直応力の負担状況が明らかになった。また、実施した解析の軸力保持能力喪失時間と、実験での柱耐火時間は概ね対応し、本報の手法で無耐火被覆 CFT 柱の耐火時間がある程度予測可能であることがわかった。

しかしながら、本報の手法は多くの仮定を含んだ条件となっている。無耐火被覆 CFT 柱の破壊挙動の解明のためには、熱膨張ひずみや大変形の考慮により、鋼管の局部座屈を再現すること等が、今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 新都市ハウジング協会: CFT 造耐火設計指針, 2004.4
- 2) 新都市ハウジング協会調査研究委員会躯体構造部会 CFT 耐火 WG: 無耐火被覆 CFT 長柱の耐火性能, 日本建築学会技術報告集, 第 16 号, pp. 145-150, 2002.12
- 3) 古平章夫, 藤中英生, 岡本達雄, 坪内幸一: 複合荷重を受ける充填型鋼管コンクリートの耐火性能, 日本建築学会学術講演梗概集 A-2, pp. 1405-1406, 1992.8
- 4) 湯谷孝夫ほか: 高強度コンクリートを用いた無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能 その 1~その 4, 日本建築学会学術講演梗概集 A-2, pp. 51-58 1999.9
- 5) 西村俊彦, 河野守, 長岡勉: 複曲率形式の複合加力を受ける無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 686 号, pp. 885-894, 2013.4
- 6) Noguchi, H., Kashiwazaki, T. and Miura, K.: Finite element analysis of reinforced concrete joints subjected to multi-axial loading, Thomas T.C. Hsu Symposium: Shear and Torsion in Concrete Structures, ACI SP-265, pp. 223-244, 2009.
- 7) Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004.
- 8) Saenz, L. P.: Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete by Desayi and Krishman, Journal of ACI, Vol. 61, pp. 1229-1235, 1964.
- 9) Kent, D. C. and Park, R.: Flexural members with confined concrete, Journal of Structural Division., ASCE, ST7, pp. 1969-1990, 1971.
- 10) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, Vol. 25, No. 9, pp.107-120, 1987.
- 11) Al-Mahaidi, R. S. H.: Nonlinear finiteelement analysis of reinforced concrete deep members, Report 79-1, Dept. of Struct. Eng., Cornell University, Jan., 1979.