

論文 強制変形を受けた鉄筋コンクリート造柱の構造耐火性に関する検討

森田 武^{*1}・鈴木 淳一^{*2}

要旨: 構造物が地震などの外力によって強制的な変形を受けると、ひび割れや残留変形を生じる場合がある。このような強制的な変形を受けた部材が火災加熱に曝された場合の構造耐火性を把握することを目的として、鉄筋コンクリート造柱を対象とした数値解析による検討を行った。解析では、柱がせん断破壊しないことを前提とし、柱の断面寸法、高さ/径比、および柱頭を水平方向に強制的に変形させた場合の部材角をパラメータとした。解析の結果、高さ/径比が7から11程度の範囲の柱で、部材角が1/150程度以下であれば、強制的に変形を与えられた鉄筋コンクリート造柱の耐火時間に大きく影響しないことが把握された。

キーワード: 火災、強制変形、部材角、鉄筋コンクリート造柱、耐火性

1. はじめに

構造物が地震などの外力によって強制的な変形を受けると、ひび割れや残留変形などの損傷を生じる場合がある。このように損傷した部材が火災加熱を受けた場合の耐火性に関する研究として、地震を想定した強制変形によって損傷させた、耐火間仕切り壁¹⁾、鉄骨造部材²⁾、および縮小架構造³⁾に対する耐火実験が行われてきている。また、鋼構造架構の地震後の耐火性に関する解析的研究⁴⁾も行われている。また、柱にあつては、火災時に加熱を受けて熱膨張する梁の伸び出しによって、柱頭が強制的に水平方向に押し出されることも知られている。

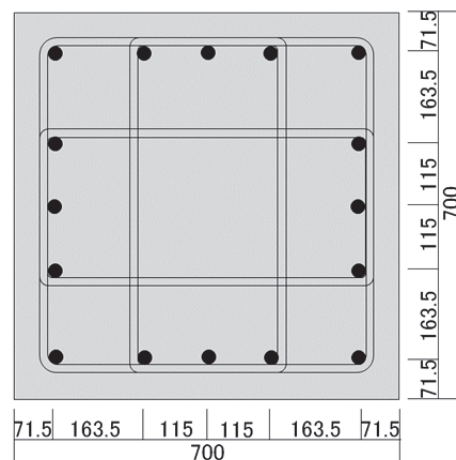
強制的な変形を受けた建築構造物の再使用性を判断する場合、構造性能や使用性とならんで、耐火性も重要なファクターとなる。本報では、鉄筋コンクリート造柱（以下、RC柱と称す）が、水平方向の強制的な変形によって部材角を生じた状態で、火災加熱を受けた場合の構造耐火性に関する基礎的な知見を得ることを目的として実施した解析的検討について報告する。

2. 解析対象としたRC柱と解析ケース

2.1 RC柱の概要

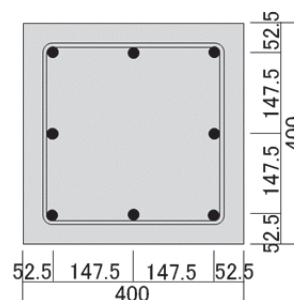
2種類のRC柱を解析対象とした。一つは、地震後の再使用性を検討した既往の研究⁵⁾を参考にして仕様を決めたRC柱である。地震後のRC造建築物の再使用性に関する耐火性の検討の今後の発展性を考えて、既往の研究と関連性をもたせることとし、検討対象として選定した。当該RC柱の断面を図-1に示す。断面は700mm×700mmである。コンクリートの設計基準強度は30N/mm²、主筋は16-D25 (SD345)である。柱高さは柱・梁接合部を剛なものとして仮定して、階高から梁成を差し引いた2800mmを基準とした。コンクリートの含水率は4wt%を仮定した。以下、本解析対象RC柱を□70と略す。

もう一つの解析対象は、建築基準法の建設省告示第



コンクリート：設計基準強度 30N/mm²
主筋：16-D25 (SD345)、帯筋：4-D13 (SD295A)

図-1 解析対象のRC柱断面⁵⁾：□70



コンクリート：設計基準強度 30N/mm²
主筋：8-D19 (SD345)、帯筋：2-D13 (SD295A)

図-2 解析対象のRC柱断面：□40

1399号「耐火構造の構造方法を定める件」(平成12年5月30日)に3時間の耐火性能を有する柱として例示されている小径40cmのRC柱とした。本検討で設定した柱の断面を図-2に示す。主筋は8-D19 (SD345)とした。また、帯筋をD13と仮定して、帯筋に対するかぶり厚さが30mmとなるように主筋の位置を定めた。□70に合わせて、柱高さは2800mmを基準とし、コンクリートの設

*1 清水建設(株) 技術研究所 博士(工学) (正会員)

*2 国土交通省 国土技術政策総合研究所 博士(工学)

計基準強度は 30N/mm²、含水率は 4wt%を仮定した。以下、本解析対象 RC 柱を□40 と略す。

2.2 支持条件と強制変形

RC 柱の柱頭と柱脚の回転変位は拘束された状態で、柱頭が強制的に水平方向に変位させられて部材角が生じる条件を仮定した。RC 柱は強制変形を受けた状態で火災加熱を受けるものとした。

2.3 火災による加熱の条件

RC 柱は、その全長を 4 側面から、ISO834 Part.1⁶⁾に規定される標準加熱温度時間曲線にしたがって、荷重が支持できなくなるまで加熱されるものとした。

2.4 解析ケース

(1) 柱の高さ/径比

解析ケースを表-1 に示す。□70 と□40 の双方において、柱の基準高さを 2800mm とし、高さ/径比を、11.2、7 および 4 の 3 水準とした。高さ/径比 11.2 は、本検討では解析を行っていないが、前述の建設省告示第 1399 号において 2 時間の耐火性能を有する柱として例示されている小径 25cm の RC 柱の高さを 2800mm とした場合の値である。

(2) 部材角

建築基準法施行令第 82 条の 2 では、層間変形角は 1/200 以内（地震力による構造耐力上主要な部分の変形によって建築物の部分に著しい損傷が生ずるおそれのない場合にあっては、1/120）とされている。この条件を勘案して、本解析ケースでは、柱頭と柱脚を層間とみなした変形角（以下、部材角と称す）を 1/400、1/200、1/150 の 3 水準とした。なお、地震のみを対象とした場合には残留変形に対する解析を行うべきであるが、ここでは火災時における梁の伸び出しによる強制変形の影響についての知見も得るため、部材角を強制的に保持した、より厳しい条件の解析を行うこととした。

(3) 強制変形の繰り返し

部材角を生じさせる柱頭の水平変位の与え方は、表-1 に示すように、正方向に 1 回だけ強制変位させる 1 方向強制変形と、一度、負方向に強制変位させてから、変位をゼロに戻し、その後、正方向に強制変位させる 2 方向強制変形の二通りを設定した。

3. 解析方法

3.1 解析手順

解析は、RC 柱の温度解析と応力変形解析で構成され、温度解析結果で得られた部材温度を応力変形解析で用いる、一方向連成解析とした。その手順および前提条件などは次のとおりとした。

(1) 部材温度解析

RC 柱が 4 側面から均等な加熱を受けた場合の内部温度を 2 次元非定常伝熱解析によって計算した。強制変形によって生じる水平断面に平行なひび割れについては、側面から流入する熱エネルギーの移動方向に平行であるため接触熱抵抗にならず、部材内部の熱伝導に影響しないものと仮定した。また、本検討では、せん断破壊は生じないことを前提としており、部材温度性状に対するせん断ひび割れの影響は考慮していない。

(2) 常温時構造解析

強制変形の計算は変位制御による弾塑性応力変形解析によって行った。所定の中心軸圧縮力を作用させた状態で RC 柱の柱頭を強制的に水平方向に変位させることによって部材角を与えた。なお、中心軸圧縮力は、(柱断面積)×(コンクリートの設計基準強度)/3 によって算定した長期許容軸力とした。

(3) 高温時構造解析

非定常弾塑性熱応力変形解析により、(2)で部材角を与えた RC 柱に対して、中心軸圧縮力と柱頭の水平変位を

表-1 解析ケース

解析ケース		柱高さ (mm)	高さ/径比	部材角	水平変位(mm)の履歴の与え方 1 方向(S) / 2 方向(W)
□70	□70-11-200-S / □70-11-200-W	7840	11.2	1/200	S:0→39.20 / W:0→-39.20→0→39.20
	□70-11-150-S / □70-11-150-W			1/150	S:0→52.27 / W:0→-59.27→0→59.27
	□70-07-200-S / □70-07-200-W	4900	7	1/200	S:0→24.50 / W:0→-24.50→0→24.50
	□70-07-150-S / □70-07-150-W			1/150	S:0→32.67 / W:0→-32.67→0→32.67
	□70-04-400-S / □70-04-400-W	2800	4	1/400	S:0→7.00 / W:0→-7.00→0→7.00
	□70-04-200-S / □70-04-200-W			1/200	S:0→14.00 / W:0→-14.00→0→14.00
	□70-04-150-S / □70-04-150-W			1/150	S:0→18.67 / W:0→-18.67→0→18.67
□40	□40-11-200-S / □40-11-200-W	4480	11.2	1/200	S:0→22.40 / W:0→-22.40→0→22.40
	□40-11-150-S / □40-11-150-W			1/150	S:0→29.87 / W:0→-29.87→0→29.87
	□40-07-400-S / □40-07-400-W	2800	7	1/400	S:0→7.00 / W:0→-7.00→0→7.00
	□40-07-200-S / □40-07-200-W			1/250	S:0→14.00 / W:0→-14.00→0→14.00
	□40-07-150-S / □40-07-150-W			1/150	S:0→18.67 / W:0→-18.67→0→18.67
	□40-04-200-S / □40-04-200-W	1600	4	1/200	S:0→8.00 / W:0→-8.00→0→8.00
	□40-04-150-S / □40-04-150-W			1/150	S:0→10.67 / W:0→-10.67→0→10.67

一定に保持した状態で火災加熱を与えた場合の変形挙動を計算した。

3.2 部材温度解析

手順(1)の部材温度解析には、差分法⁷⁾を適用した非定常伝熱解析プログラムを用いた。コンクリートの熱物性値は、EUROCODE 4⁸⁾に示されている普通コンクリートに関する温度依存性を考慮した物性値を参照した。EUROCODE 4の熱伝導率を0.8倍、比熱を1.2倍すると実験結果と解析結果が良好に一致することが報告されており⁹⁾、本解析でもこれらの倍率を乗じた物性値を適用した。さらに、コンクリートの温度は、その上昇過程において、含有水の潜熱によって100℃近傍で停滞する。本解析では、100℃で温度上昇の停滞が生じると仮定し、水の蒸発に使われる熱量は2256J/gとした。また、コンクリート内部の水分は温度と圧力の変化によって移動するが、本解析ではコンクリート内部の水分移動は考慮せず、各要素の温度は、当該要素内の含有水が0%になった時点から、再度温度上昇を開始するものとした。

3.3 弾塑性応力変形解析

手順(2)と(3)の弾塑性応力変形解析と非定常弾塑性熱力変形解析には、平面保持の仮定に基づく時間積分直接剛性法を適用したファイバーモデル（線材置換モデル）による弾塑性熱応力変形解析プログラム¹⁰⁾に、高温時における遷移クリープひずみを考慮したコンクリートの力

学特性モデル（MSモデル）¹¹⁾の改良版¹²⁾を導入したプログラムを用いた。MSモデルの改良版は、遷移クリープひずみの発生量に関してコンクリートの昇温速度の影響を考慮できるようにしたものである。これは、昇温速度が速い場合の遷移クリープひずみの発生量を低減するもので、既報¹²⁾の検討を踏まえて、本検討では昇温速度が8.75℃/minを超えた場合に遷移クリープひずみの発生量を低減する条件とした。なお、コンクリートと鉄筋の熱ひずみはEUROCODE 4に規定されるモデルを用いた。

4. 解析モデル

4.1 要素分割

解析モデルを図-3に示す。解析モデルではRC柱の高さ方向を14個のセグメントに分割した。柱頭部と柱脚部のセグメントの高さは200mmで固定とし、残りのセグメントの高さは、柱高さから400mmを差し引いた残りの高さを12分割した値とした。RC柱の水平断面は、主筋を除いて、図心軸に平行な方向を50mmの幅で分割し、図心軸に垂直な方向を25mmの幅で分割した。□70の場合で合計392要素、□40の場合で128要素とした。主筋は、これらのコンクリート要素とは別に、主筋1本あたり1要素または2要素に分割した。

4.2 部材温度解析

部材温度解析では、解析モデルを簡略化するために図

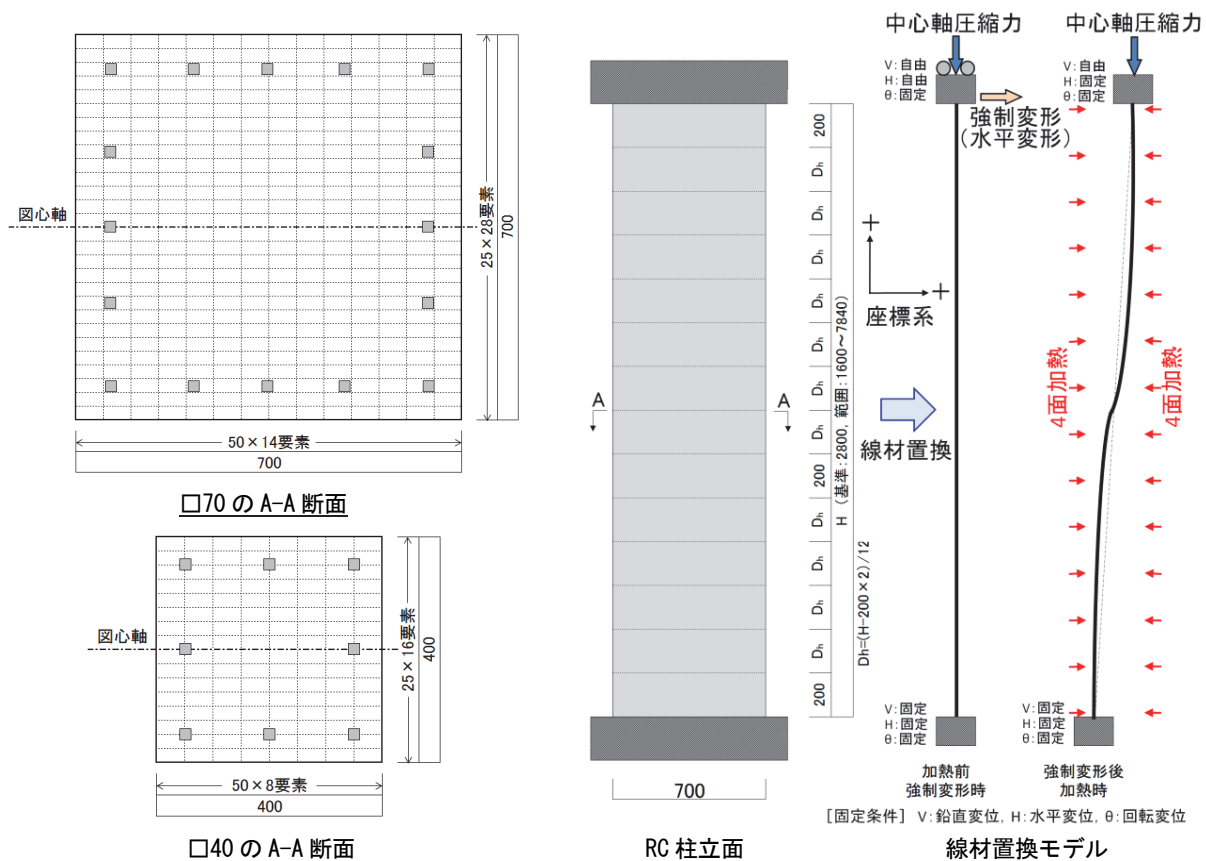


図-3 解析モデル

—3 の主筋は無視して、断面全体がコンクリートであると仮定し、断面内の各要素の温度の経時変化を2次元非定常伝熱計算により算定した。

4.3 弾塑性応力変形解析

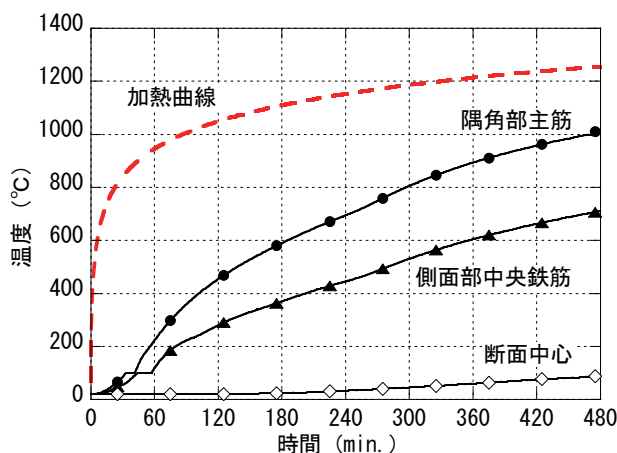
弾塑性応力変形解析では、RC 柱の高さ方向の各断面において同一の温度分布を仮定し、コンクリート要素には温度解析で得られた各時間段階の要素温度を与えた。弾塑性応力変形解析では図—3 の主筋要素を考慮し、主筋温度は、主筋に接するコンクリート要素の温度の平均値として与えた。なお、本解析ではファイバーモデルを使用しているため、帯筋は考慮していない。

柱脚の境界条件は、強制変形時と加熱時を一貫して、鉛直変位・水平変位・回転変位を固定とした。柱頭の境界条件は、強制変形時では鉛直変位と水平変位をフリーとして回転変位のみを固定とし、加熱時では鉛直変位をフリーとし、水平変位と回転変位は固定とした。

5. 解析結果

5.1 温度解析

解析対象RC柱である□70と□40の主筋温度と断面中心温度の経時変化を図—4に示す。180分における□70



図—4(1) 温度解析結果：□70

の主筋温度は、隅角部で590℃、側面中央部で370℃であり、断面中心温度は24℃であった。これに対して、□70より断面とかぶり厚さが小さい□40の主筋温度は、隅角部で811℃、側面中央部で497℃であり、断面中心温度は水の蒸発潜熱で停滞しており、100℃であった。図—4には代表的な要素の温度のみを示したが、本解析で得られた各要素の温度を用いて構造解析を行った。

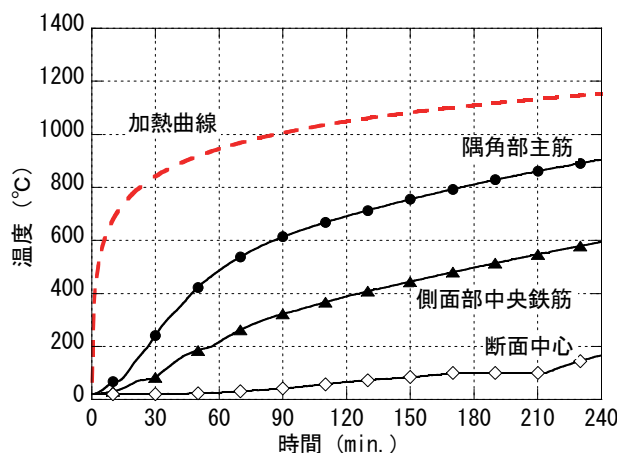
5.2 構造解析

(1) 常温時強制変形（1方向強制変形の場合）

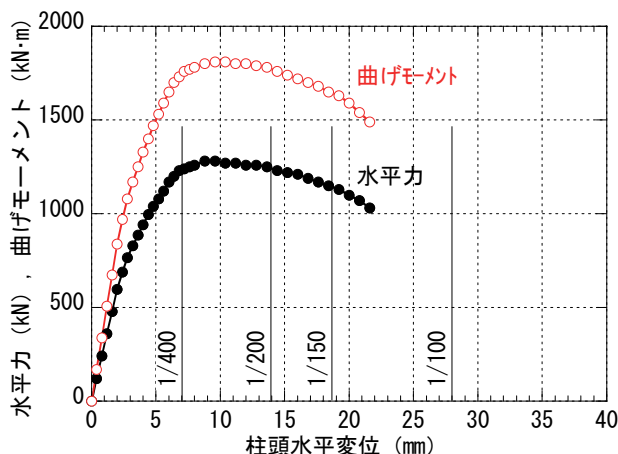
図—5に、柱高さが2800mmのケースに関して、柱頭材端の水平力・曲げモーメントと水平変位の関係を示す。□70の水平力と曲げモーメントは、部材角が1/400と1/200の間でピークに到達し、それより大きい変位では低下傾向を示した。また、□40の水平力と曲げモーメントは、部材角が1/200程度でピークに到達し、それより大きい変位では低下傾向を示した。水平力と曲げモーメントがピークを越えた後は、圧縮縁側のコンクリートは圧縮軟化域に入った状態であり、引張縁側のコンクリートにはひび割れが生じた状態であった。

(2) 高温時挙動（1方向強制変形の場合）

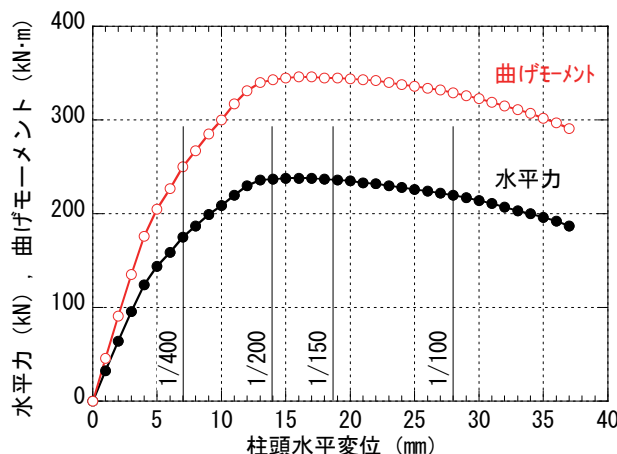
図—6に、柱高さが2800mmのケースに関して、柱頭



図—4(2) 温度解析結果：□40



図—5(1) 柱頭に作用する水平力・曲げモーメントと水平変位の関係：□70(H=2800mm)



図—5(2) 柱頭に作用する水平力・曲げモーメントと水平変位の関係：□40(H=2800mm)

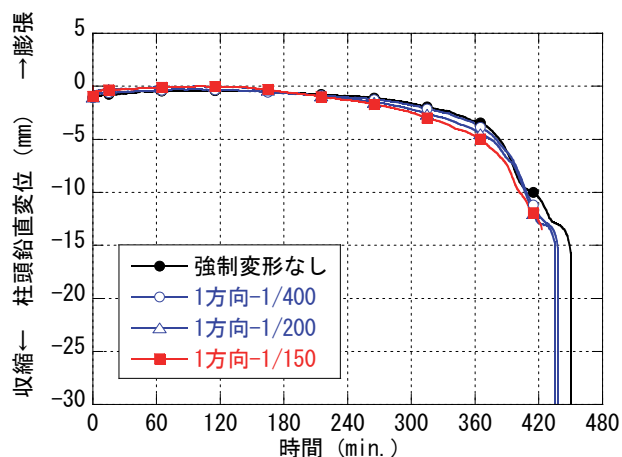


図-6(1) 柱頭鉛直変位の経時変化：□70 (H=2800mm)

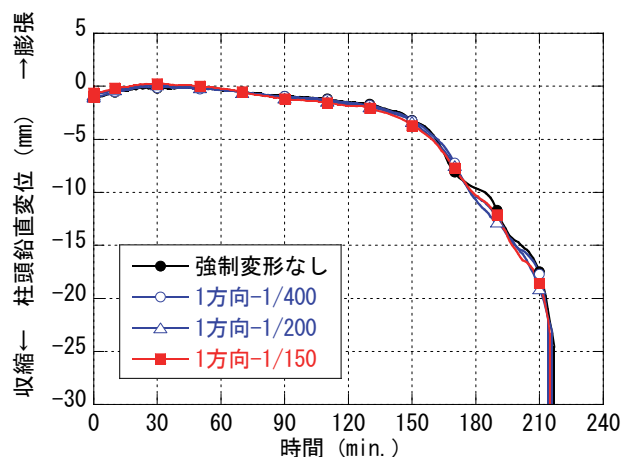


図-6(2) 柱頭鉛直変位の経時変化：□40 (H=2800mm)

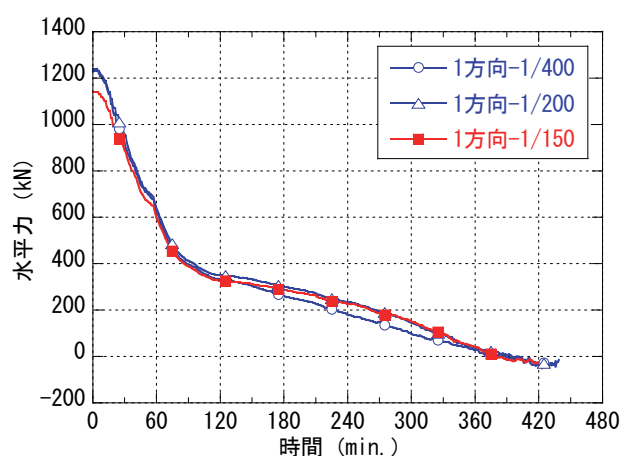


図-7(1) 柱頭水平力の経時変化：□70 (H=2800mm)

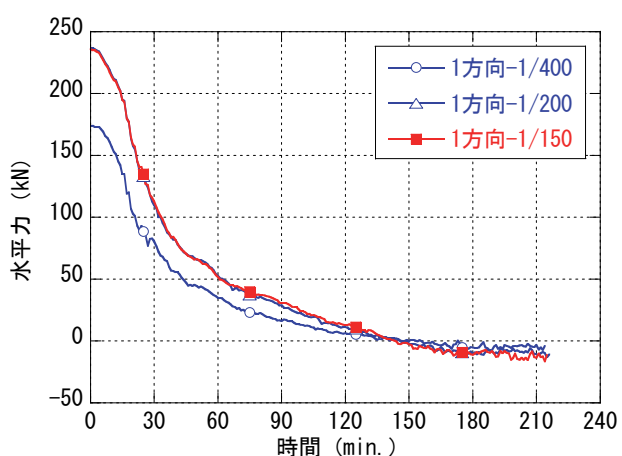


図-7(2) 柱頭水平力の経時変化：□40 (H=2800mm)

の鉛直変位の経時変化を示す。□70 では、加熱前の部材角が大きいほど収縮変位が若干大きくなり、崩壊時間（本報では、解析において内力と外力の釣合いが取れなくなり計算が収束しなくなった時間としている）も若干早くなる傾向が見られた。一方、□40 では、収縮変位と崩壊時間に対する部材角の影響は顕著には見られなかった。柱断面と部材角が大きいほど、強制変形によって生じる柱断面内のコンクリートの圧縮軟化域が大きくなるため、その影響が□70 で顕著に表れたものと考えられる。

図-7 に、加熱中に柱頭の水平変位を一定に保つために作用した水平力の経時変化を示す。□70 と□40 のいずれにおいても、柱の崩壊前には、水平力が正方向（圧縮力）から負方向正（引張力）に転じていた。これは、部材角が生じた状態で加熱を受けた柱の曲げ剛性が低下して、水平力に抗する剛性がなくなったことを示している。

(3) 崩壊時間

図-8 に、1 方向強制変位の場合の崩壊時間と部材角・高さ/径比の関係を示す。先に述べたとおり、□70 では部材角が大きいと若干崩壊時間が早まる傾向が見られる。3 時間耐火の例示仕様である□40 の崩壊時間は、部材角が 1/150 であっても、200 分を超えた。

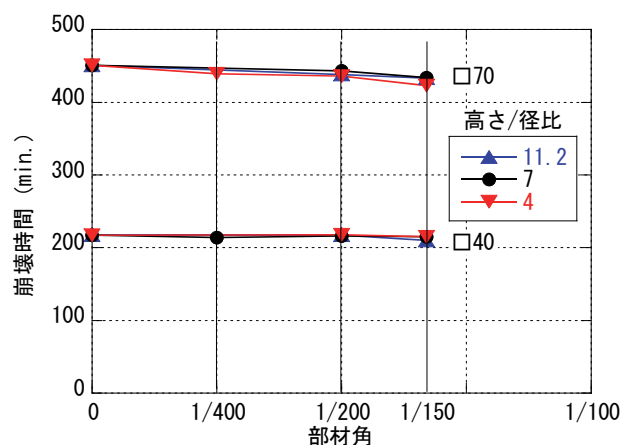
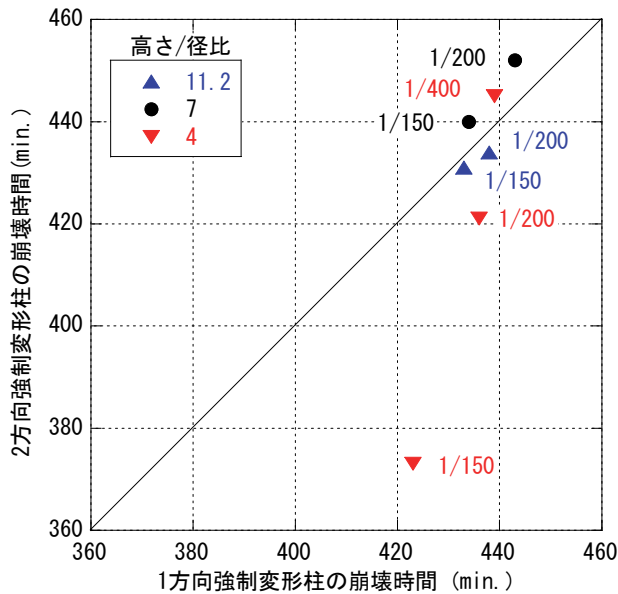


図-8 崩壊時間と部材角の関係

図-9 に、□70 と□40 に関して、1 方向強制変形と 2 方向強制変形における崩壊時間の比較を示す。□40 では 1・2 方向強制変形による差異は見られない。しかし、□70 では、高さ/径比が 4 の場合に、部材角が大きいほど 2 方向強制変形の方が崩壊時間は早くなる傾向を示した。これは、5.2 節(2)で述べたように、強制変形によって生じるコンクリートの圧縮軟化域が、高さ/径比が小さいほど大きくなることに加えて、1 方向強制変形では断面の



図一9(1) 1・2方向強制変形の崩壊時間の比較：□70

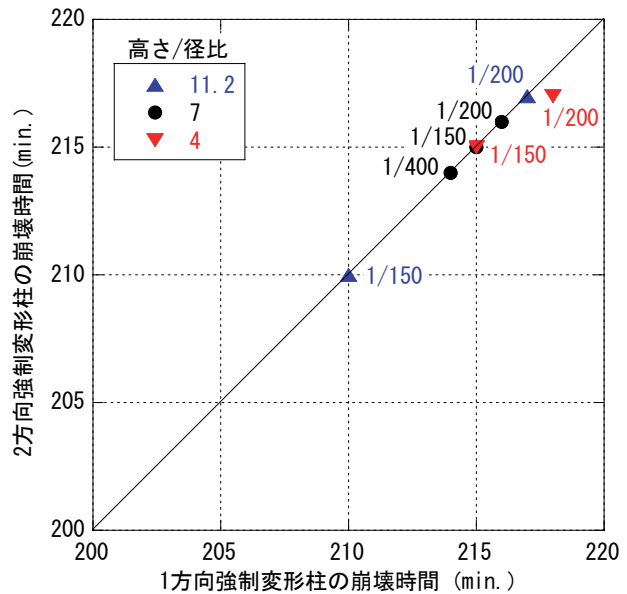
片側に生じる圧縮軟化域が、2方向強制変形では断面の両側に生じるためだと考えられる。

6. まとめ

本報では、RC柱の柱頭を強制的に水平変位させて部材角を与えた状態で火災加熱を受けた場合の構造耐火性に関する知見を得ることを目的として、数値解析による検討を試みた。その結果、柱高さが2800mmで小径が700mmと400mmの柱に関しては、部材角が1/150程度までであれば、崩壊時間に対する部材角の影響は小さいことが把握された。また、小径700mmで高さ/径比が4の柱では、部材角が大きいくほど崩壊時間が早くなる傾向が見られた。

参考文献

- 1) 鈴木弘之ほか：損傷を被った間仕切壁の耐火性能に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集(防火)，pp.255-262，2009.7
- 2) 成瀬友宏，石原直，増田秀昭，河野守：高層建築物の地震後の火災安全対策に関する研究その1:鉄骨柱の耐火性能，日本建築学会大会学術講演梗概集(防火)，pp.43-44，2010.07
- 3) Usmani A., Singh, B., Gillie, M. and Pankaj, P.: Full-scale fire test on an earthquake-damaged reinforced concrete frame, Fire Safety Journal 73 (2015) pp.1-19
- 4) 近藤史郎，池田憲一，鈴木弘之：地震後の残留層間変形角による崩壊温度の低下:地震被害を受けた鋼架構の火災時安定性(その1)，日本建築学会構造系論文集，第73巻，第630号，pp.1369-1376，2008.8
- 5) 福山洋，壁谷澤寿一ほか：損傷低減のために袖壁を



図一9(2) 1・2方向強制変形の崩壊時間の比較：□40

活用した実大5層鉄筋コンクリート造建築物の静的載荷実験(その1：研究背景)，(その2：試験体概要)，日本建築学会大会学術講演梗概集(構造IV)，pp.361-364，2015.09

- 6) ISO 834-1 (1999), Fire Resistance Tests – Elements of Buildings Construction, Part-1 General Requirements, International Organization for Standardization
- 7) 若松孝旺：火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究(第一報)－算定式の誘導，算定条件および算定要素－，日本建築学会論文報告集，第109号，pp.73-79，1965.3
- 8) EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, European Committee for Standardization, 1994
- 9) 齋藤秀人，森田武，上杉英樹：中心圧縮を受ける充填鋼管コンクリート柱の内部温度と耐火時間に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第582号，pp.9-16，2004.8
- 10) 上杉英樹，小池浩：高層鉄骨架構の熱応力解析 その1，日本建築学会構造系論文報告集，第381号，pp.73-79，1987.11
- 11) Morita, T., Schneider, U. and Franssen, J-M.: Influence of Stress History Function in the Schneider concrete model under Fire Attack, Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, pp.1057-1068, 1997
- 12) 森田武，山下平祐，別府万寿博，鈴木誠：鉛直荷重を支持する鉄筋コンクリート造壁の火災時における変形挙動に関する検討，コンクリート工学年次大会論文集，vol.37，No.1，pp.1312-1317，2015.7