

論文 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

森田 武*1・山下 平祐*2・別府 万寿博*3・鈴木 誠*4

要旨：鉛直荷重を支持する鉄筋コンクリート造壁が炭化水素火災による急速加熱を片側から受けた場合の変形挙動を把握することを目的として、鉄筋コンクリート造壁を模擬した縮小試験体に対する載荷加熱実験と数値計算による変形解析を行った。実験の結果、壁は火災初期に加熱側に凸に変形した後、裏面側に凸の変形に移行して曲げ圧縮破壊した。変形解析では、コンクリートの遷移クリープひずみがコンクリートの温度と昇温速度に依存すると仮定してパラメータスタディを実施し、昇温速度が7.5~10°C/minを超えた場合の遷移クリープひずみを低減した結果、数値解析における鉛直変位挙動を実験結果に近似することができた。

キーワード：鉄筋コンクリート造、壁、火災、変形挙動、耐力、耐火性

1. はじめに

設計基準強度が60N/mm²を超える高強度コンクリートは、火災時に爆裂（部材表層のコンクリートが剥離・飛散する現象）を生じる可能性の高いことが知られており、NewRC総プロ¹⁾以降、高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造（以下、RC造と略す）柱の耐火性に関する実験的検討が多く実施されてきた。

一方、RC造部材は、建設省告示第1399号（平成12年5月）において、所定の断面寸法とかぶり厚さを確保していれば、耐火構造として認められている。そのため、普通強度コンクリートを使用したRC造部材の耐火性に関する実験的検討の報告は、高強度コンクリートに比べて極めて少ないのが現状である。

本検討では、設計基準強度24N/mm²程度の普通強度コンクリートを使用したRC造壁が、建築部材の一般的な耐火試験で用いられている標準加熱（ISO834）²⁾よりも急速に温度上昇する炭化水素火災加熱³⁾を受けた場合に関して、爆裂発生の有無、変形挙動および火災時耐力を把握することを目的とした。本検討は、RC造壁の縮小試験体に対する載荷加熱実験と熱応力変形解析で構成される。載荷加熱実験では、ポリプロピレン短繊維（以下、PP短繊維と略す）によるコンクリートの補強の有無を実験パラメータとし、一定の中心軸圧縮力を載荷したRC造壁縮小試験体に対して炭化水素火災加熱を行った。また、熱応力変形解析では、実験結果のシミュレーション

に併せて、コンクリートの遷移クリープひずみ（以下、TCひずみと略す）が変形挙動に及ぼす影響に関するパラメータスタディを行った。なお、高温時のコンクリートのひずみ構成は式(1)で表わされ、TCひずみ（ ϵ_{tcreep} ）とは、圧縮応力下のコンクリートが温度上昇する過程において生じる不可逆なひずみであり、全ひずみ（ ϵ_{total} ）から応力ひずみ（ ϵ_{stress} =弾性ひずみ+塑性ひずみ）と熱ひずみ（ ϵ_{temp} ）を除いたひずみである⁴⁾。

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{stress} + \epsilon_{temp} + \epsilon_{tcreep} \quad (1)$$

2. 載荷加熱実験

2.1 試験体

表-1に試験体に使用したコンクリートの使用材料を、表-2に調合と圧縮強度及び含水率を示す。コンクリートは、PP短繊維補強の有無をパラメータとした2種類である。表-2の調合名は、PLAINがPP短繊維無混入、

表-1 使用材料

材料	種類・物性など
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm ³
粗骨材	硬質砂岩（碎石 2005, 青梅産），表乾密度 2.65 g/cm ³
細骨材	山砂（君津法木産），表乾密度 2.63 g/cm ³
混和剤	AE減水剤，AE剤，空気量調整剤
短繊維	ポリプロピレン（PP）： 長さ 10mm，径 0.05mm，密度 0.91 g/cm ³

表-2 調合・圧縮強度・含水率

調合名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				PP混入率 (vol%)	圧縮強度 (N/mm ²)		含水率 (wt%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材		材齢 28	実験時	
PLAIN	55	46	175	318	817	973	0	35.2	45.9	3.67
PP10							1.0	24.7	30.6	4.08

*1 清水建設（株） 技術研究所 博士（工学）（正会員）

*2（一財）建材試験センター 修士（工学）

*3 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科 博士（工学）（正会員）

*4 千葉工業大学 工学部建築都市環境学科 工博

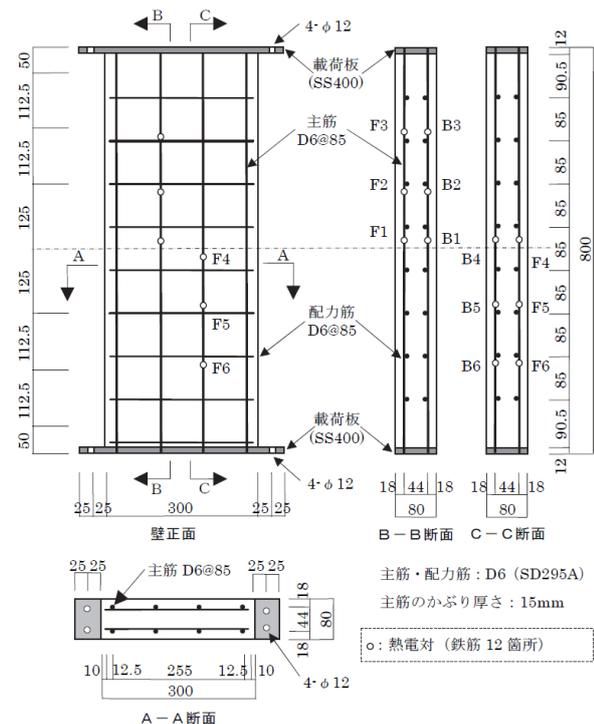


図-1 試験体の形状・寸法 (単位: mm)

PP10 が PP 短繊維混入率 1.0vol% (コンクリートの体積に対して外割り) のコンクリートを示す。鉄筋は D6 (SD295A) を使用した。使用した鉄筋の降伏点と降伏ひずみの実測値は、各々、342N/mm²、2060 μ であった。

図-1 に示すように、RC 造壁の縮小試験体は、(高さ) 800mm \times (幅) 300mm \times (厚さ) 80mm の RC 板とした。鉄筋は、縦横 85mm 間隔の格子状に配した複配筋で、縦筋比(主筋)と横筋比はいずれも 0.93%、縦筋のかぶり厚さは 15mm、試験体表面から縦筋の重心までの距離は 18mm とした。試験体は、表-2 に示す割合に対して各 1 体を製作した。以下、本報では試験体名を調査名と同一とする。試験体は、コンクリートを打設した翌日に脱型して、28 日間 20 $^{\circ}$ C の水中で養生し、その後は実験室内で約 250 日間の気中養生とした。

2.2 実験方法

(1) 実験装置

荷重加熱実験には、壁炉と加力装置で構成される実験装置を使用した。実験装置を図-2 に、試験体の設置状況を写真-1 に示す。壁炉はガスバーナー4基で試験体を加熱するもので、炉内温度はプログラム設定器によって自動制御される。加力装置は、鋼製フレーム、その上部の 1000kN 荷重計と球座、および下部の 500kN オイルジャッキと球座で構成されている。

(2) 試験体の支持方法と断熱養生

試験体の加熱面の上下端は幅 50mm の範囲を厚さ 25mm のセラミックブランケット 4 層で被覆して断熱養生した。また、試験体の鉛直方向側面は、試験体の全厚

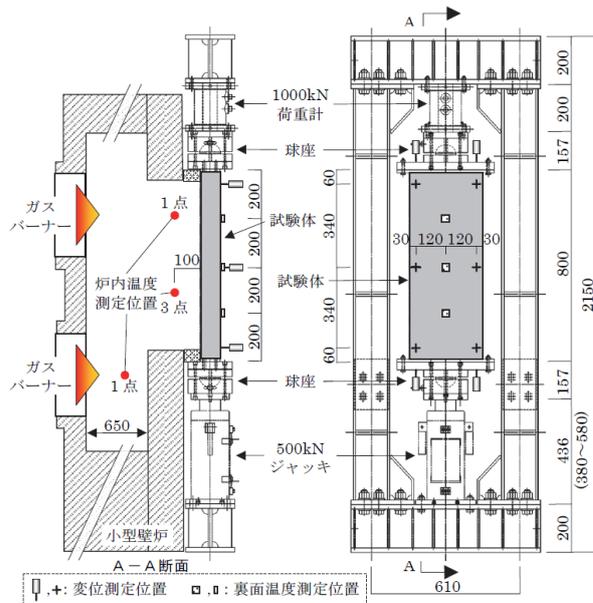


図-2 荷重加熱実験装置 (単位: mm)

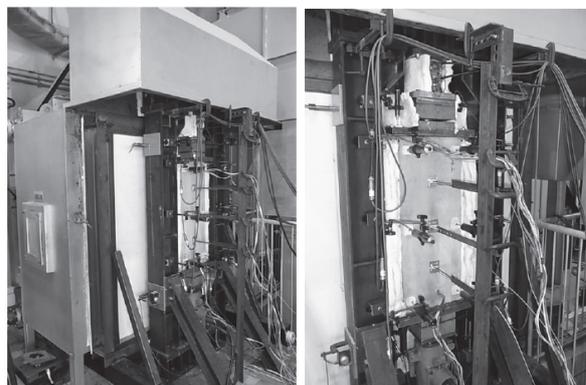


写真-1 荷重加熱実験装置と実験状況

を厚さ 25mm のセラミックブランケット 2 層で被覆して断熱養生した。試験体に対する有効加熱面積は(高さ) 700mm \times (幅) 300mm である。

(3) 荷重条件

加熱前に中心軸圧縮力を試験体に作用させ、加熱中は試験体が破壊するまで一定に保持した。中心軸圧縮力は、PLAIN と PP10 のコンクリートの圧縮強度の実測値(σ_b)を用いて次のように設定した。

$$\text{PLAIN: } \sigma_b \times \text{断面積} / 3 = 45.9\text{N/mm}^2 \times 24000\text{mm}^2 / 3 = 367.2 \text{ kN}$$

$$\text{PP10: } \sigma_b \times \text{断面積} / 3 = 30.6\text{N/mm}^2 \times 24000\text{mm}^2 / 3 = 244.8 \text{ kN}$$

(4) 加熱条件

炭化水素火災加熱曲線に準じて試験体の片面を加熱し、非加熱面は常温の空気(31 \sim 34 $^{\circ}$ C)に曝される条件とした。加熱は試験体が破壊した時点で中止した。

2.3 荷重加熱実験結果および考察

(1) 試験体の破壊状況

各試験体の荷重加熱実験後の状況を写真-2 に示す。

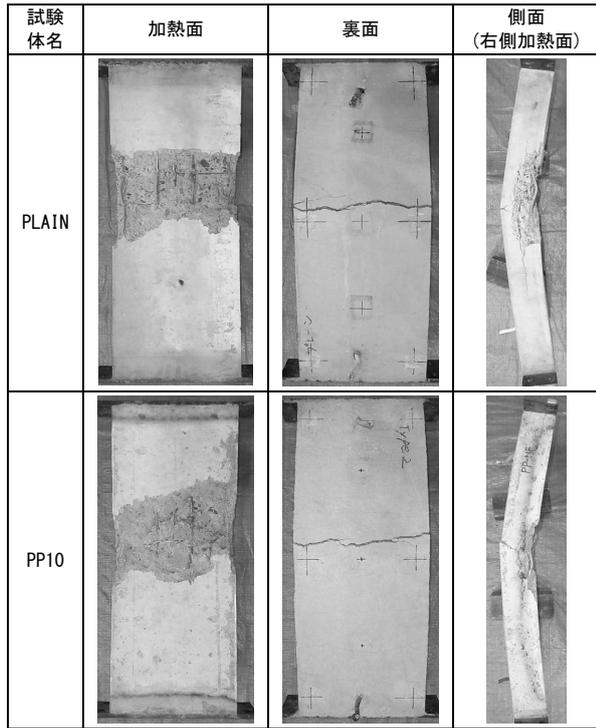


写真-2 载荷加熱実験後の試験体の状況

PP 短繊維補強の有無に関係なく爆裂は生じなかった。PLAIN で爆裂がなかったのは、含水率が比較的低かったことが一因として考えられる。また、PLAIN と PP10 では圧縮強度が 15N/mm^2 程度異なっていたが、崩壊時間は、PLAIN と PP10 で同等の 42.5 分であった。本実験結果から、鉄筋量が今回の試験体と同程度で、壁厚と高さの比が 1/10 程度の場合、コンクリートの圧縮強度が異なっても軸力比が同等であれば、試験体の崩壊時間が等しくなる可能性のあることを示していると考えられる。

(2) 温度性状

図-3 に炉内平均温度、図-4 に試験体高さ中央における加熱側・裏面側の主筋温度および裏面温度の経時変化を示す。加熱初期の炉内温度は炭化水素火災曲線よりも若干低い傾向を示したが、7 分経過以降は概ね所定の温度で制御することができた。炉内温度、加熱側と裏面側の主筋温度および裏面温度の昇温速度は、PLAIN と PP10 で概ね同等な傾向を示した。

(3) 変形挙動

図-5 に鉛直方向変位と試験体高さ中央の面外方向変位の経時変化を示す。変位は加熱開始時点の変位をゼロとして図示している。試験体には、加熱開始後、膨脹方向に鉛直変位が生じるとともに、加熱面側に凸の方向に面外変位を生じた。これは加熱面側のコンクリートが裏面側よりも高温となり、熱膨張量が大きいためだと言える。その後、加熱が進むに従い、鉛直変位は収縮方向に転じるとともに、加熱面側に凸方向の面外変位が減少して裏面側に凸の方向に転じた。これは加熱面側のコンク

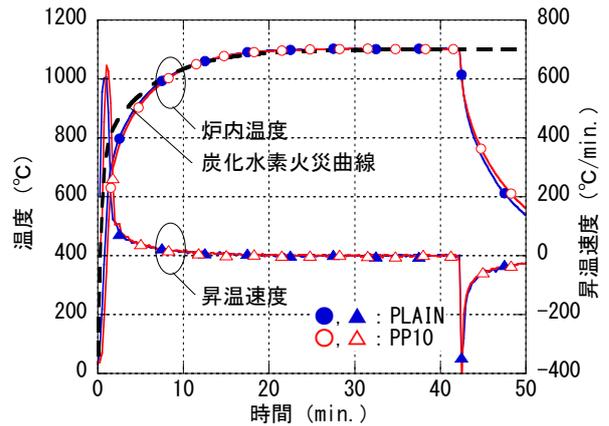


図-3 炉内平均温度と昇温速度の経時変化

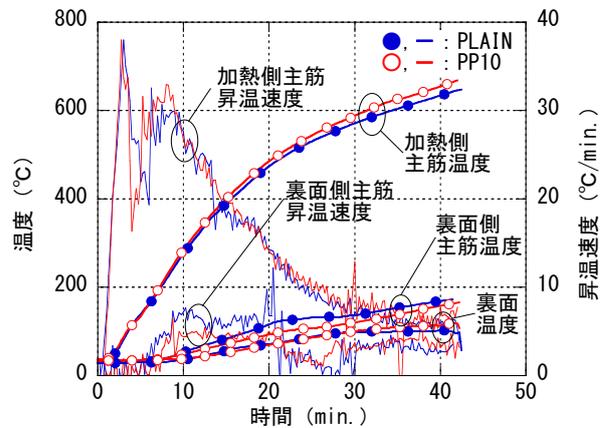


図-4 主筋の温度・昇温速度と裏面温度の経時変化

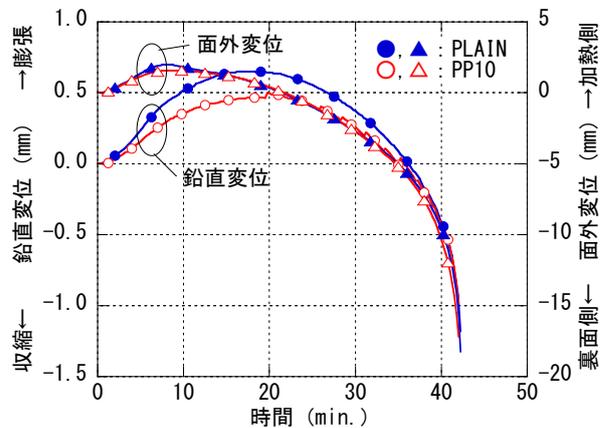


図-5 鉛直変位と試験体中央の面外変位の経時変化

リートがより高温になることによって圧縮強度とヤング係数が低下したこと、また、それに伴って、部材の等価断面 (ヤング係数の低下を考慮した断面) における重心位置が裏面側に移動して偏心による曲げが生じたためだと言える。そして、収縮方向の鉛直変位と裏面側に凸方向の面外変位が増加の傾向を示している中で、P- δ 効果によって試験体高さ中央位置における曲げモーメントが増加し、加熱面側のコンクリートが圧壊して試験体が崩壊に至ったと考えられる。

加熱初期の膨張方向の鉛直変位が PP10<PLAIN となったのは、PP 短繊維が高温で消失して微細な管状空隙を形成することにより、疑似的なクラックを生じてヤング係数が若干低下したためだと考えられる。PP 短繊維を混入したコンクリートに関して、載荷状態における高温時の熱膨張がプレーンコンクリートに比べて小さくなることは、既往の研究⁵⁾でも報告されている。

3. RC 造壁縮小試験体の変形挙動に関する解析的検討

前述の PLAIN 試験体の変形挙動を熱応力変形解析によってシミュレーションするとともに、TC ひずみ変形挙動に及ぼす影響に関するパラメータスタディを行う。なお、PP 短繊維を混入したコンクリートの TC ひずみについては十分な知見が得られていないため、PP10 試験体については本解析検討の対象外とした。

3.1 遷移クリープひずみに対する昇温速度の影響

圧縮応力下におけるコンクリートに関して、昇温速度が 0.2~5°C/min 程度⁴⁾の範囲であれば、TC ひずみの発生量に大きな差異は生じないと報告されている。一方、昇温速度 1, 3, 6°C/min において、昇温速度が大きいほど、全ひずみの収縮量が小さくなること、およびコンクリートの熱膨張を拘束した場合に生じる拘束応力が大きくなること報告されている⁶⁾。昇温速度が大きいほど拘束応力が大きいにもかかわらず、一定の圧縮応力下で発生する全ひずみの収縮量が小さいということは、昇温速度が大きくなったことで熱膨張ひずみの発生量が小さくなったのではなく、収縮ひずみである TC ひずみの発生量が小さくなったことを示していると考えられる。

上述の考察をもとに、本実験におけるコンクリートの昇温速度を見直すと、図-3 から、試験体表面の昇温速度は 10°C/min よりも極めて大きくなるものと推測される。また、図-4 から、加熱側主筋付近のコンクリートの昇温速度が 40°C/min 程度に達することがわかる。そこで、本解析検討では、昇温速度が TC ひずみの発生量に影響することに着目したパラメータスタディを行う。

3.2 解析方法

(1) 部材温度解析と熱応力変形解析

部材温度解析には、既報⁷⁾でも使用した、差分法^{8),9)}を適用した非定常伝熱解析プログラムを用いた。解析における壁炉の熱伝達特性やコンクリートの熱定数等は既報で適用したものと同等とした。

変形挙動解析には時間積分直接剛性法を適用した弾塑性熱応力変形解析プログラム¹⁰⁾に TC ひずみを考慮した高温時におけるコンクリートの力学特性モデル¹¹⁾ (以下、MS モデルと称す)を導入したプログラムを用いた。また、コンクリートと鉄筋の熱ひずみは EUROCODE 4¹²⁾に規定されるモデルを用いた。

(2) 昇温速度に応じた遷移クリープひずみの低減

TC ひずみの低減は、オリジナルの MS モデルで算定される TC ひずみに低減係数 (α) を乗じて行った。

α の導出では、まず、文献 6) に報告されている応力レベル (圧縮荷重/圧縮強度) 0.3 で昇温速度が 1, 3, 6°C/min の全ひずみと熱膨張ひずみの測定結果および MS モデルで計算した応力ひずみを式(1)に代入して、各昇温速度に関するコンクリート温度-TC ひずみ関係を求めた。そして、昇温速度 1°C/min に対する昇温速度 3, 6°C/min の TC ひずみの比率を求めて、これを α とした。

α の導出結果とモデル化した α を図-6 に示す。コンクリート温度が 100°C 以下の場合には、TC ひずみが膨張ひずみとなったため、解析では昇温速度にかかわらず $\alpha=0$ とした (文献 6) では 100°C 以下の過渡ひずみ (TC ひずみからクリープひずみ成分を除いたひずみ) をゼロにすると、解析と実験が良く一致することが述べられている。200~600°C では、 α の変化が小さいことからこの温度範囲の平均値を求め、その値を解析における 200°C 以上の α とした。昇温速度が 1, 3, 6°C/min 以外の α は、1, 3, 6°C/min の低減係数を回帰分析して得られた回帰式を用いて求めた。(図-6 右図)。100~200°C の温度範囲の α は、連続性を持たせるため、線形補間して求めた。

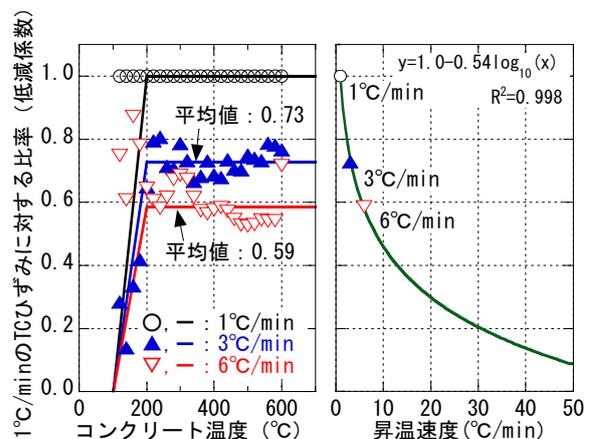


図-6 低減係数 α の導出結果とモデル化

3.3 解析モデルと解析ケース

(1) 解析モデル

図-7 に解析モデルを示す。解析モデルでは、RC 造壁縮小試験体の高さ方向について載荷板を 12mm の厚さ、鋼板に接している RC 部分を 13mm の厚さ、残りの 750mm の高さの RC 部分を 25mm の厚さのセグメントに分割した。断面は厚さ方向を 2mm の厚さで分割した。温度解析は加熱範囲のセグメント断面を対象として行った。変形挙動解析では温度解析で得られた各時間段階の各要素温度を入力値とするが、図-7 に示す加熱範囲外の C1 と C2 のセグメント断面の要素温度については、加

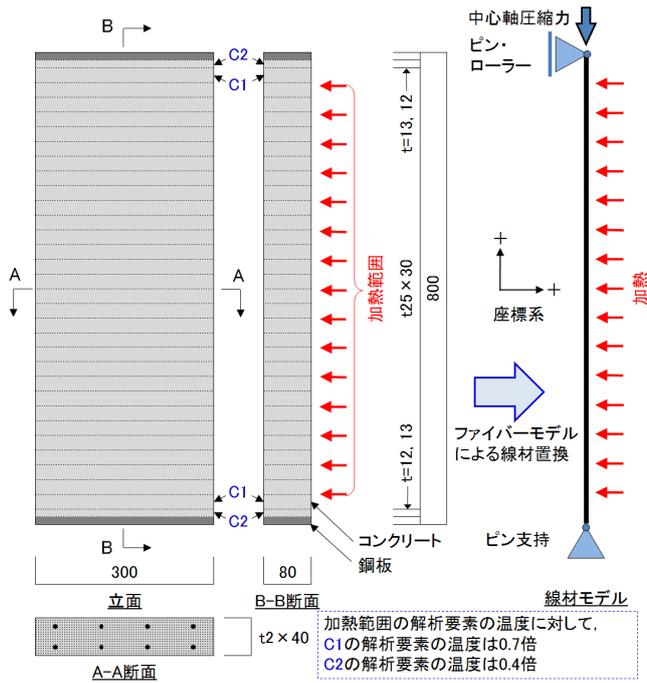


図-7 解析モデル

熱範囲の要素温度に対して、C1は0.7倍、C2は0.4倍した。この倍率は、加熱範囲とC1の境界面を加熱面に見立てて、42分時の加熱範囲の厚さ方向の温度分布の比率から定めた。鋼板温度は常温のまま一定と仮定した。

(2) 解析ケース

3.2(2)で導出した α は昇温速度 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ を境界値(K_b)としてTCひずみが低減されるものであるが、本パラメータスタディでは、 K_b を5.0, 7.5, 10.0, 12.5, $15.0^\circ\text{C}/\text{min}$ にスライドしたケースおよびオリジナルのMSモデル(すなわち、 $K_b = \infty$)の6ケースについて解析を行った。

3.4 解析結果および考察

(1) 温度性状

図-8に加熱側主筋温度・裏面側主筋温度・裏面温度の経時変化に関する実験結果と解析結果の比較を示す。解析結果は、実験結果に対して全般的に低い温度になった。加熱20分と40分における実験値と解析値の差は、加熱側主筋温度で 51°C と 42°C 、裏面側主筋温度で 68°C と 55°C 、裏面温度で 37°C と 19°C となった。

材料の熱定数を求める材料レベルの試験と部材実験を比べると、加熱速度・部材の変形・ひび割れ・コンクリートの水分移動など、種々の点で条件が異なる。そのため、実験値と解析値を完全に一致させることは難しいと考えられる。そこで、ここでは明確な根拠がない中で熱伝達条件や熱定数を調整して解析結果を実験結果に近づけることはせず、得られた温度解析結果をそのまま変形挙動解析の入力条件にすることとした。

(2) 変形挙動

図-9に鉛直変位の経時変化に関する実験結果と解析

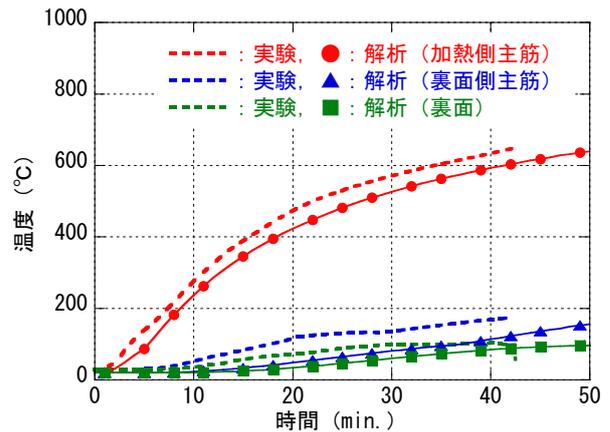


図-8 試験体温度に関する実験結果と解析結果の比較

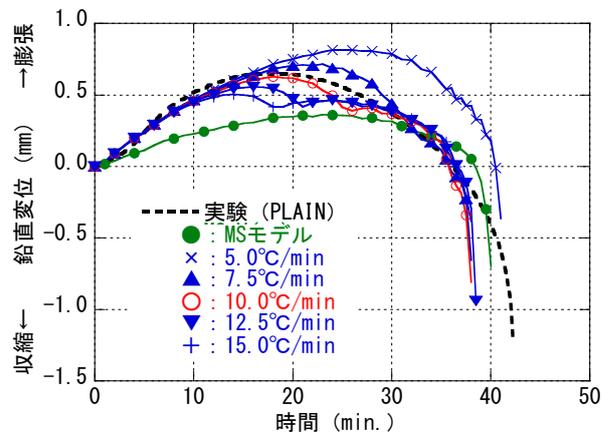


図-9 鉛直変位に関する実験結果と解析結果の比較

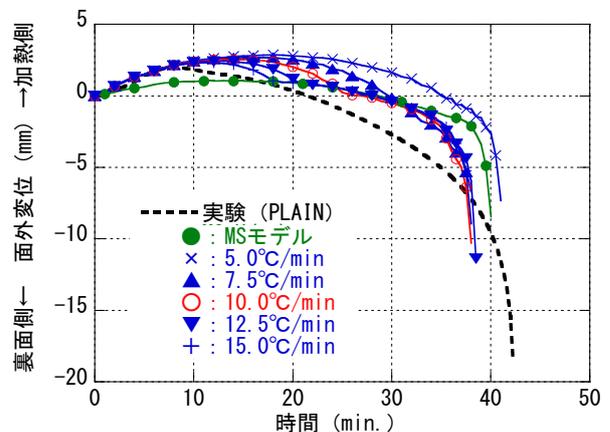


図-10 面外変位に関する実験結果と解析結果の比較

結果の比較を示す。オリジナルのMSモデルでは膨張方向の変位が実験よりも小さくなった。 K_b を変化させた場合、 K_b が大きいほど、膨張変位の最大値が小さくなり、最大膨張変位に到達するまでの時間が短くなる傾向が見られる。崩壊時間については、 $K_b = 5.0^\circ\text{C}/\text{min}$ の場合に実験と概ね一致する結果となった。他の K_b では、実験よりも崩壊時間が3~4分程度早くなる傾向を示した。鉛直変位挙動については、 K_b が7.5, $10^\circ\text{C}/\text{min}$ の解析結果において、定量的に実験に近い傾向を示した。 K_b が10.0, 12.5,

15.0°C/min の解析結果において、18～25 分のあたりで鉛直変位の挙動が収縮から膨張に転じている変曲点があるが、これは昇温速度の大きい加熱初期に大きな TC ひずみが発生し、その後の TC ひずみの発生量が小さいために熱ひずみの影響が現れたものと言える。

図-10 に試験体高さ中央の面外変位の経時変化に関する実験結果と解析結果の比較を示す。解析結果は、実験結果に比べて、全体的に加熱側に凸の変位が大きく、裏面側に凸の変位は小さくなった。実験では、加熱開始後約 20 分に加熱側に凸の状態から裏面側に凸の状態に入ったが、解析では、 $K_b=5.0^\circ\text{C}/\text{min}$ の場合を除いて、25～30 分の間に裏面側に凸の状態に移行した。

面外変位が加熱面側に凸から裏面側に凸に移行するタイミングは加熱側のコンクリートと主筋の剛性・強度の低下に依存し、裏面側に凸に移行した後の変形は裏面側主筋の剛性・強度に依存すると考えられる。図-8 に示したように、裏面側主筋温度は解析よりも実験の方が高く、裏面側主筋の剛性・強度は実験の方が早く低下したものと推定される。そのため、解析における裏面側に凸の面外変位が実験よりも小さくなった可能性がある。

4. 結論

本検討では、普通強度コンクリートを使用した RC 造壁が炭化水素火災を受けた場合の爆裂の有無、変形挙動および火災時耐力を把握するため、RC 造壁縮小試験体の載荷加熱実験と数値計算による変形挙動解析を行った。その結果、本検討の範囲において以下の知見が得られた。

- ・設計基準強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 程度のコンクリートであれば、PP 短繊維補強の有無に関係なく、炭化水素火災を受けても爆裂は生じない。
- ・片面から加熱を受ける RC 造壁は加熱初期に加熱側に凸に変形するが、加熱側のコンクリートの剛性・強度の低下とともに、裏面側に凸の変形に移行し、加熱側のコンクリートの圧壊で崩壊に至る。
- ・長期許容軸力下における耐火時間（崩壊時間）は PP 短繊維補強の有無に関係なく同等である。
- ・急速加熱を受ける RC 造壁の変形挙動解析では、コンクリートの温度と昇温速度の依存性を考慮した遷移クリープひずみを用いると、鉛直方向の変形挙動に関して実験結果と比較的良好一致が得られる。

今回の検討では、コンクリートの昇温速度が遷移クリープひずみと壁の変形挙動に及ぼす影響にのみ着目した。しかし、その他の力学特性や熱定数についても昇温速度が影響する可能性もあり、その検討は今後の課題である。

謝辞

解析検討にあたり、千葉大学 平島岳夫氏から貴重な実

験データをご提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 青山博之ほか：鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発，建築研究報告 No.139，国土交通省建築研究所，2001
- 2) ISO834-1 Fire-resistance tests - Elements of building construction- Part 1: General requirements, International Organization for Standard, 1999
- 3) EUROCODE 1: Basics of design and actions on structures Part 2-2: Actions on structures exposed to fire, European Committee for Standardization, 1994
- 4) Schneider, U.: Concrete at High Temperatures - A General Review, Fire Safety Journal, Vol.13, pp.55-68, 1988
- 5) 右田周平，前田孝一，平島岳夫，馬場重彰：高強度コンクリートの高温時力学的特性に及ぼすポリプロピレン繊維の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.11-12，2011.7
- 6) 兼城莉乃，豊田康二，平島岳夫：高強度コンクリートの高温時の力学的特性に関する実験（その1）・（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.181-184，2008.7
- 7) 森田武，別府万寿博，鈴木誠：剛飛翔体の高速衝突を受けたコンクリート板の火災時における温度性状に関する検討，コンクリート工学年次大会論文集，vol.36，No.1，pp.1312-1317，2014.7
- 8) 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
- 9) 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（第二報）—算定式の解法—，日本建築学会論文報告集，第111号，pp.31-36，1965.5
- 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) EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, European Committee for Standardization, 1994.