

剛体の衝突を受けた短繊維補強鉄筋コンクリート造壁の構造耐火性

Structural fire behavior of RC wall with short fiber reinforcement exposed to fire after impact of a rigid body

森田武*, 別府万寿博**, 鈴木誠***

Takeshi Morita, Masuhiro Beppu and Makoto Suzuki

* 博(工), 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

** 博(工), 防衛大学校教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博, 千葉工業大学教授, 工学部建築都市環境工学科 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

Key Words: Impact, over all target response, fire, fire resistance

キーワード: 衝突, 全体破壊, 火災, 耐火

1. はじめに

建築物や土木構造物へ車両などが衝突した場合、衝突を受けた側の空間で燃料などの燃焼による火災が発生し、構造物が火災外力の影響を受ける可能性がある。このような事象に対して、人命や財産を守るためには、衝突作用とその後の火災作用に対して部材・構造体の構造安定性を確保する必要がある。そこで著者らは、剛飛翔体の高速衝突を受けた鉄筋コンクリート造壁（以下、RC造壁と称す）が衝突面側から火災加熱を受けた場合に関して、遮熱性と構造耐火性に関する基礎的な知見を得るために、実験および解析的な研究を行ってきた¹⁾²⁾。本報では、剛体の衝突を受けた短繊維補強 RC 造壁が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衝突実験、載荷加熱実験および熱応力変形解析について報告する。

2. 実験方法

2.1 試験体

(1) 使用材料

表-1 に試験体に使用したコンクリートの材料を示し、表-2 にコンクリートの調合を示す。また、表-3 に、衝突実験時と載荷加熱実験時における圧縮強度、および載荷加熱実験時における含水率を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には硬質砂岩碎石を使用した。コンクリートは、水セメント比が55%であり、ポリプロピレン短繊維をコンクリートの体積に対して外割りで1.0vol%混入した。載荷加熱実験時の圧縮強度は30.6N/mm²、含水率は4.08wt%であった。

鉄筋には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、それぞれ342N/mm²、2060 μ であった。

(2) 形状・寸法

図-1 に試験体の形状・寸法を示す。試験体は鉄筋コンクリート造（以下、RC造）の壁を縮小したRC造壁縮小試験体であり、試験体中央に水平力（衝突荷重）が作用した場合にせん断破壊よりも曲げ破壊が先行し、かつ、健全な状態において、コンクリートの長期許容圧縮応力度と試験体の水平断面積の積で算定される荷重を鉛直方向に作用させても座屈しないように設計した。試験体の寸法は、幅300mm×高さ800mm×厚さ80mmであり、鉄筋を縦横85mm間隔の格子状に配した複配筋とし、縦

表-1 コンクリートの使用材料

材料	種類・物性など
セメント (C)	普通ポルトランドセメント
粗骨材 (G)	硬質砂岩 (碎石 2005, 青梅産), 表乾密度 2.65 g/cm ³
細骨材 (S)	山砂 (君津法木産), 表乾密度 2.63g/cm ³
混和剤 (Ad)	AE 減水剤, AE 剤, 空気量調整剤
短繊維 (PP)	ポリプロピレン (PP) : 長さ 10mm, 径 0.048mm, 密度 0.91g/cm ³

表-2 コンクリートの調合

調合名	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					PP (vol%)
		W	C	S	G	Ad	
PP10	55	175	318	817	973	3.18	1.0.

表-3 圧縮強度・ヤング係数および含水率

調合名	衝突実験時 (材齢約 50 日)		載荷加熱実験時 (材齢約 130 日)		
	σ_b	E	σ_b	E	含水率
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)
PP10	25.3	25100	30.6	27000	4.08

※材齢 28 日まで標準養生, 28 日以降気中養生

筋（主筋）比と横筋比はいずれも 0.93%である。縦筋のかぶり厚さは 15mm，試験体表面から主筋の重心までの距離は 18mm とした。試験体の主筋には図-1 に示す F1～F6 および B1～B6 の位置にひずみゲージ（一般測定用，ゲージ長さ 2mm，幅 1.5mm）と熱電対（K 熱電対，素線径 0.65mm）を取り付けた。

表-1 に試験体の種類を示す。試験体は，衝突なしの PP0.0 試験体と衝突ありの PP1.5 試験体の 2 体とした。

2.2 衝突実験

図-2 に衝突実験の模式図を示す。試験体は支点間距離

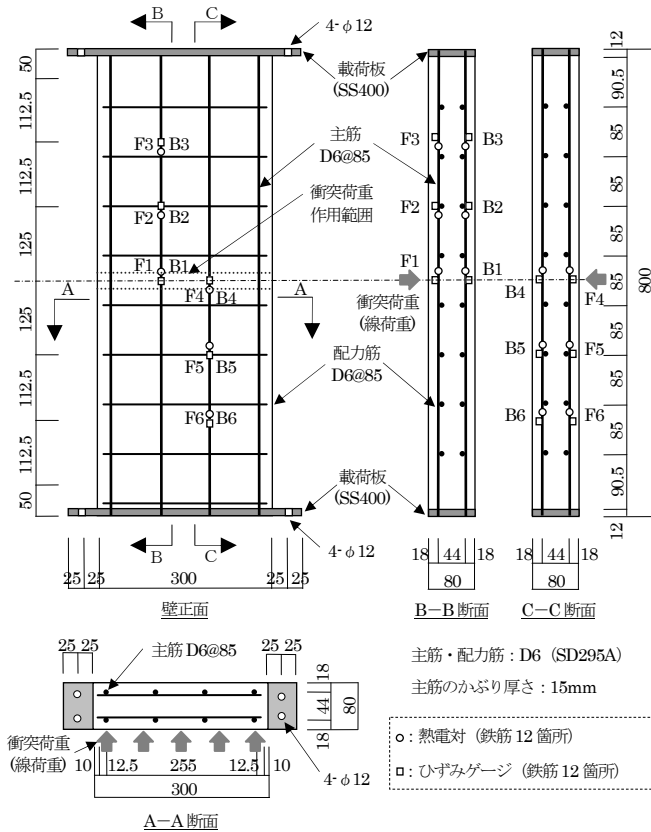


図-1 試験体の形状・寸法（単位：mm）

表-1 試験体種類

試験体名	コンクリート種類	衝突速度 (m/s)
PP0.0	PP10	0
PP1.5		1.5

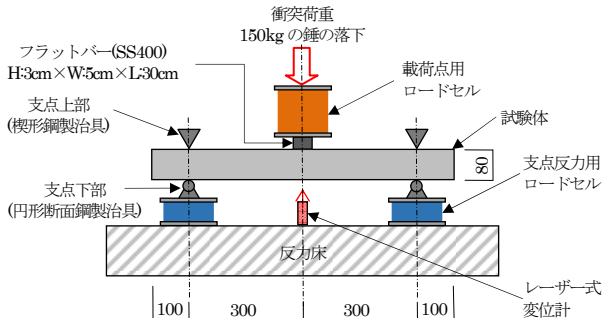


図-2 衝突実験の模式図（単位：mm）

離 600mm の支持架台に設置され，上方から試験体に向けて剛体を落下させた。支点の下部は円形断面鋼製治具となっており，上部は重錘衝突時の試験体の跳ね上がりを防止する楔形鋼製治具となっている。衝突荷重は支点間中央に設置されたロードセルと高さ 30mm×幅 50mm×長さ 300mm のフラットバー（SS400）の鋼製治具を介して 150kg の鋼製錘を落下させて，線荷重として試験体に作用するようにした。また，線荷重用鋼製治具の跳ね上がりを防止するため，治具と試験体を強力粘着テープで接着した。本実験で使用した衝突実験装置では水平加力ができないため，中心軸圧縮力が作用していない試験体に対して重錘を落下させた。

2.3 荷重加熱実験

図-3 に実験装置の概要を示し，写真-1 に実験装置に試験体を設置した状況を示す。荷重加熱実験には，小型壁炉と加力装置で構成される実験装置を使用した。小

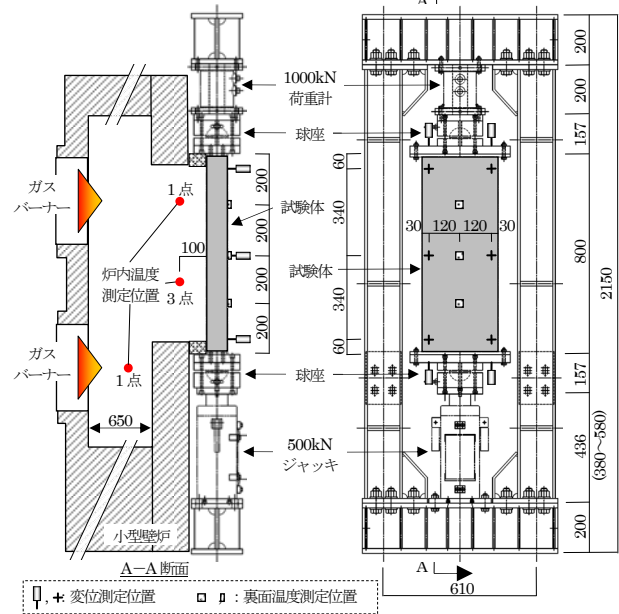
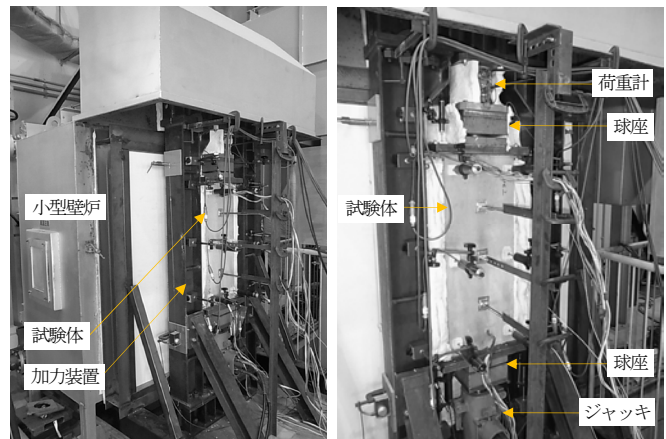


図-3 荷重加熱実験装置の概要（単位：mm）



(a) 実験装置

(b) 試験体部分拡大

写真-1 荷重加熱実験の状況

型壁炉は都市ガスを燃料とするガスバーナー4基で試験体を加熱するもので、炉内には炉内温度測定用のシーstype熱電対が5本設置されている。炉内温度はプログラム設定器によって所定の温度に自動で制御される。試験体に対する加熱はEUROCODE 1³⁾に規定される炭化水素火災加熱曲線に従い、試験体を衝突面側から加熱した。

加力装置は自己釣り合い型の鋼製フレームの内側上部に1000kN荷重計と球座、内側下部に500kNオイルジャッキと球座が取り付けられている。この装置による鉛直方向の載荷荷重は、コンクリートの圧縮強度の1/3と試験体断面積の積から算出した244.8kNとし、加熱中は一定に保持した。

3. 実験結果

3.1 衝突実験

(1) 破壊状況

PP1.5試験体に対して衝突実験を実施した結果、試験体の破壊モードは曲げ破壊であった。

写真-2に衝突実験後の試験体の状況を示す。剛体の衝突によって、衝突面と反対側の裏面には試験体高さ方向の中央付近で幅方向に1本のひび割れが生じていた。ひび割れ幅は0.5~0.6mmであった。

(2) ひずみ・変形状

図-4にPP1.5試験体の裏面側主筋のひずみの経時変化を示す。図-4に示したひずみの経時変化において、B1とB4のひずみに差異を生じた原因として、ゲージ貼付け位置とひび割れ発生箇所の位置関係の影響が考えられ、ひび割れがゲージ近傍を通過した箇所のひずみが大きくなったものと推察される。ひずみはB1とB4に集中し、他の位置のひずみの発生量は極めて小さかった。B1とB4における残留ひずみの平均値は約3600 μ であり、降伏ひずみの2060 μ を超えていることから、中央部の鉄筋は降伏していると言える。図-5に面外残留変位を示す。面外残留変位の平均値は2.2mm、最大値は2.8mmであった。

3.2 載荷加熱実験

(1) 破壊状況

写真-3にPP0.0試験体、写真-4にPP1.5試験体の載荷加熱実験後の状況を示す。各試験体には加熱面側のコンクリートの圧壊と主筋の座屈が生じていた。また、加熱面と反対側の裏面には試験体高さ方向の中央付近で幅方向に1本のひび割れが生じていた。載荷加熱実験によってPP1.5に生じたひび割れは、衝突実験によって生じたひび割れの位置と異なっていた。

試験体の崩壊時間（荷重が支持できなくなった時点）は、PP0.0が42.5分、PP1.5が44.5分であり、両者の崩壊時間には大きな差はなく、崩壊時間に対する衝突の影響は認められなかった。

(2) 温度・変形挙動

図-6に、後述の解析結果と併せて、加熱側主筋温度と裏面側主筋温度の経時変化を示す。図中、加熱側主筋

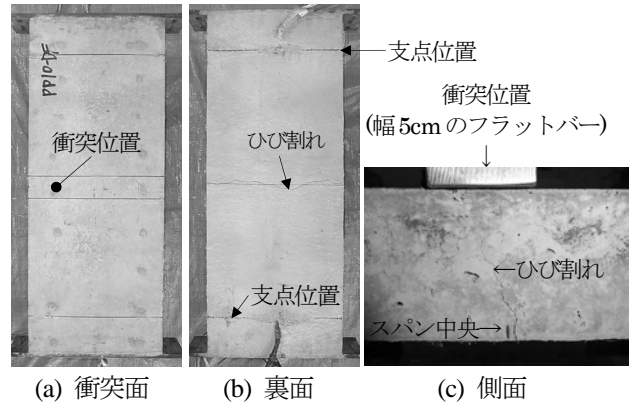


写真-2 衝突実験後のPP1.5試験体

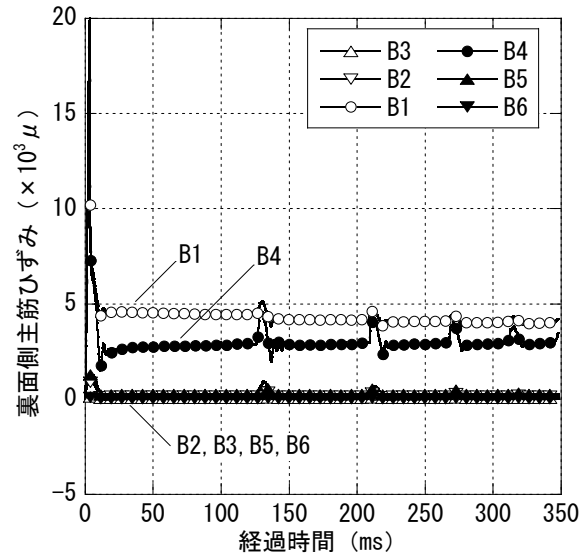


図-4 裏面側主筋ひずみの経時変化

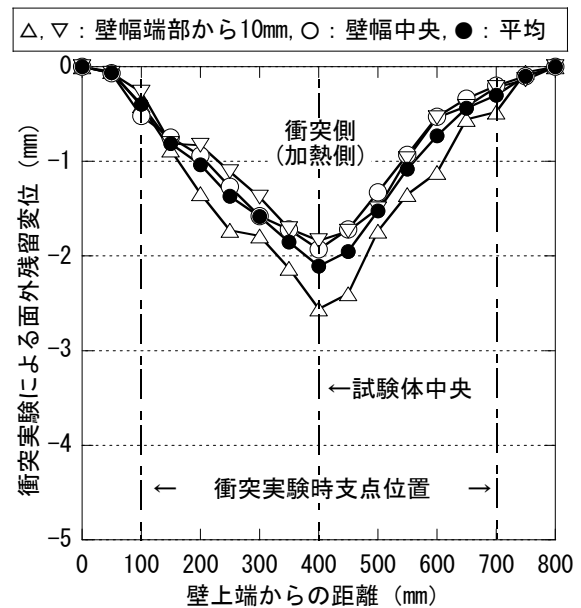
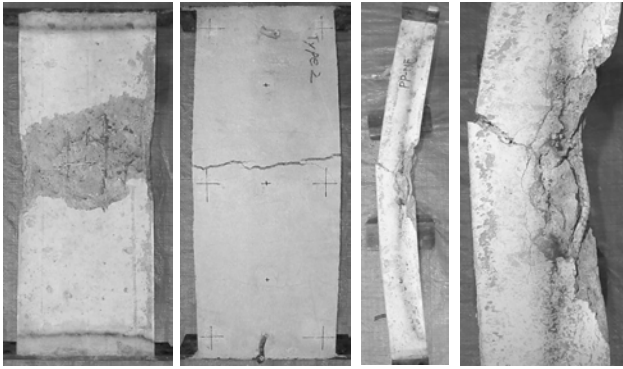
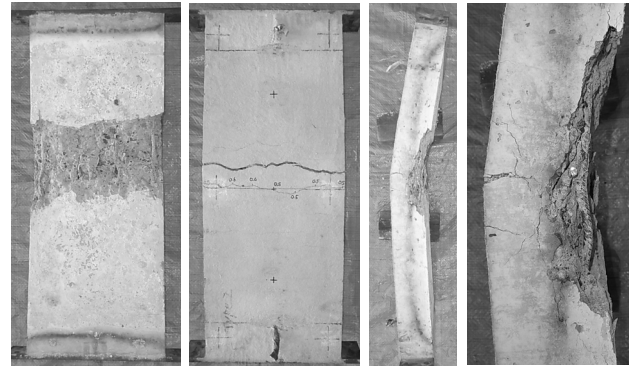


図-5 面外残留変位



(a) 加熱面 (b) 裏面 (c) 側面 (d) 側面拡大
 ※側面写真は右側が加熱面。

写真-3 試験体 PP0.0 の荷重加熱実験後の状況



(a) 加熱面 (b) 裏面 (c) 側面 (d) 側面拡大
 ※側面写真は右側が加熱面

写真-4 試験体 PP1.5 の荷重加熱実験後の状況

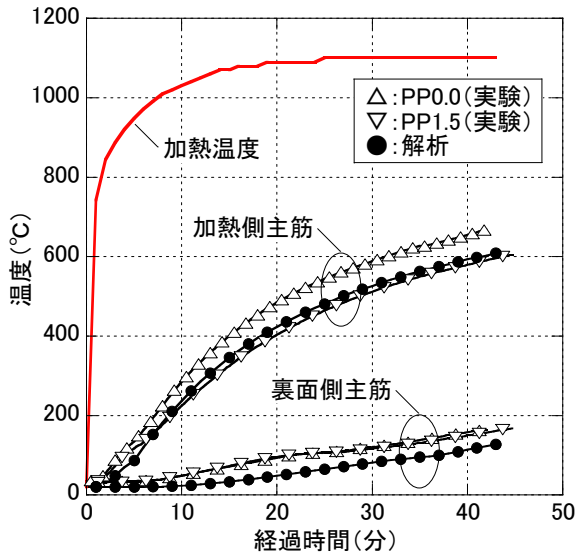


図-6 主筋温度の経時変化

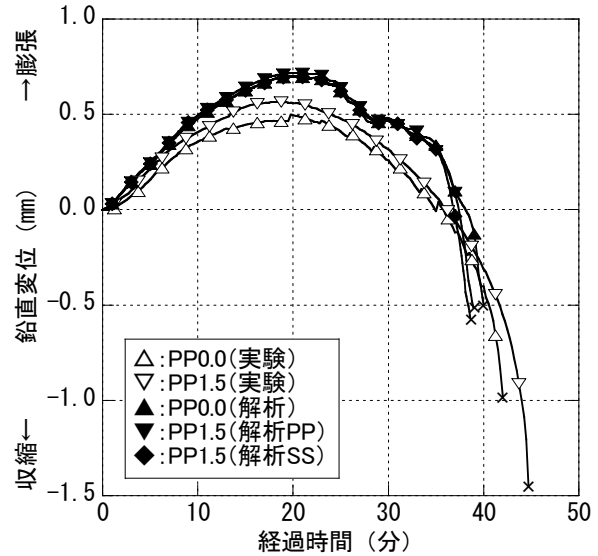


図-7 鉛直変位の経時変化

温度は、図-1 に示した、試験体の高さ方向の中央位置付近の F1 と F4 の平均温度であり、裏面側主筋温度は B1 と B4 の平均温度である。崩壊時の加熱側主筋温度は 600~700°C 程度であり、裏面側主筋温度は 200°C 以下であった。

図-7 に鉛直変位の経時変化を、図-8 に試験体高さ方向の中央位置における面外変位の経時変化を、後述の解析結果と併せて示す。試験体の変形挙動は、加熱開始後、膨張方向に鉛直変位が生じるとともに、加熱側に凸の方向へ面外変位を生じた。これは加熱側のコンクリートが裏面側よりも高温となり、熱膨張が大きいからだと言える。その後、鉛直変位は収縮方向に転じるとともに、面外変位は裏面側方向へ転じた。これは加熱側のコンクリートがさらに高温にな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さらに増加する中で、 $P-\delta$ 効果による曲げモ

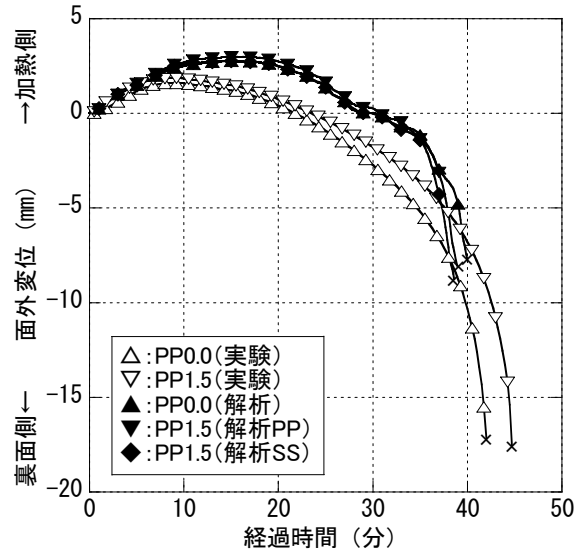


図-8 面外変位の経時変化

メントも増加し、曲げ圧縮破壊によって試験体が崩壊に至ったと考えられる。

4. 熱応力変形解析

4.1 解析方法

(1) 解析手順

温度解析と熱応力変形解析の一方連成解析⁴⁾によって、試験体の変形挙動を解析した。解析を簡易にするため、衝突による壁の損傷を動的解析ではなく静的解析で与えることにした。解析手順と前提条件は次のとおりとした。

・手順1：部材温度解析

非損傷の壁が火災加熱を片側から受けた場合の壁体内部温度を非定常伝熱解析によって計算した。PP1.5 試験体には、幅方向にひび割れが生じていたが、部材温度解析では、このひび割れは無視した。

・手順2：常温時構造解析

変位制御型の弾塑性応力変形解析により、中心軸圧縮力が作用していない状態で静的な強制面外変形によって壁を損傷（ひび割れを導入）させた後、反力がゼロになるまで強制変形を戻す計算を行った。

・手順3：高温時構造解析：非定常弾塑性熱応力変形解析を用いて、手順2で損傷を与えた壁に対して、所定の中心軸圧縮力を載荷した後、手順1で算定した温度を時刻歴で与える計算を行った。

手順1の部材温度解析には、差分法を適用した非定常伝熱解析プログラムを用いた。手順2と3の弾塑性応力変形解析と非定常弾塑性熱応力変形解析には時間積分直接剛性法を適用したファイバーモデルによる弾塑性熱応力変形解析プログラム⁵⁾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⁴⁾を導入したプログラムを用いた。

(2) 解析モデル

図-9に解析モデルを示す。解析モデルでは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。手順3の変形挙動解析では、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した。

PP1.5 試験体では、剛体の衝突時に試験体の水平変位が拘束された可能性が考えられた。そのため、手順2の解析では、支持条件を両端ピン支持(PP)と単純支持(SS)の2種類とし、衝突による面外方向の最大変位(2.8mm)を変位制御で試験体に与えた後に除荷する静的解析を行った。そして、手順3の解析では、支持条件を載荷加熱実験に合わせて、熱応力と変形の解析を行った。

4.2 解析結果

(1) 温度性状

前出の図-6に、解析で得られた主筋温度の経時変化

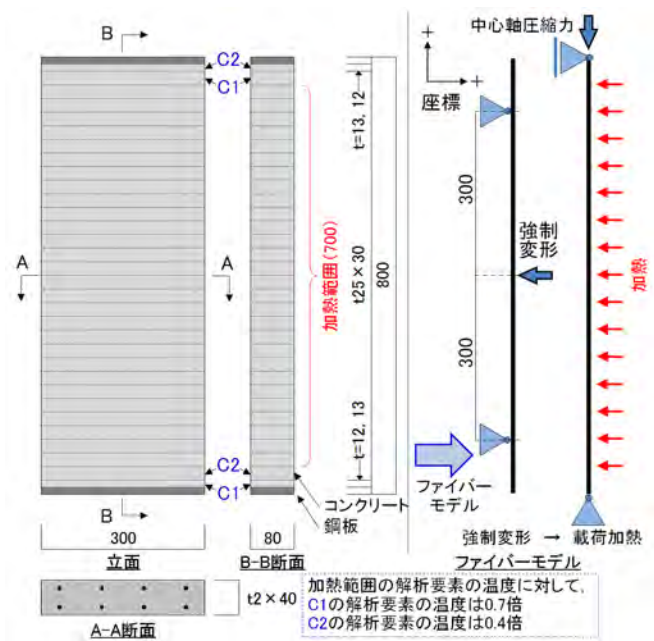


図-9 解析モデル

を示す。加熱側主筋温度の解析結果は、PP1.5の実験結果に近い主筋温度-時間関係になった。裏面側主筋温度の解析結果は、実験結果に比べて50°C程度低くなった。

主筋温度の経時変化について、実験結果と解析結果が完全には一致していないが、手順3の熱応力変形解析では、本解析で得られた温度解析結果をそのまま部材温度の入力条件にすることとした。

(2) 変形挙動

前出の図-7に、解析で得られた鉛直変位の経時変化を示し、図-8に、面外変位の経時変化を示す。実験における崩壊時間がPP0.0で42.5分、PP1.5で44.5分であることに対して、解析における崩壊時間は、PP0.0が40分、PP1.5-PPとPP1.5-SSが39分となり、解析および実験の崩壊時間が概ね等しい結果となった。また、鉛直方向および面外方向の変位に関する経時変化は、解析と実験とで定性的には一致した。しかし、定量的には、膨張方向の鉛直変位、および加熱側へ凸の面外変位が実験よりも解析の方が大きくなった。

(3) 応力・ひずみ挙動

図-10に加熱開始後0, 10, 20, 30分および崩壊直前における応力分布と全ひずみ分布を示す。

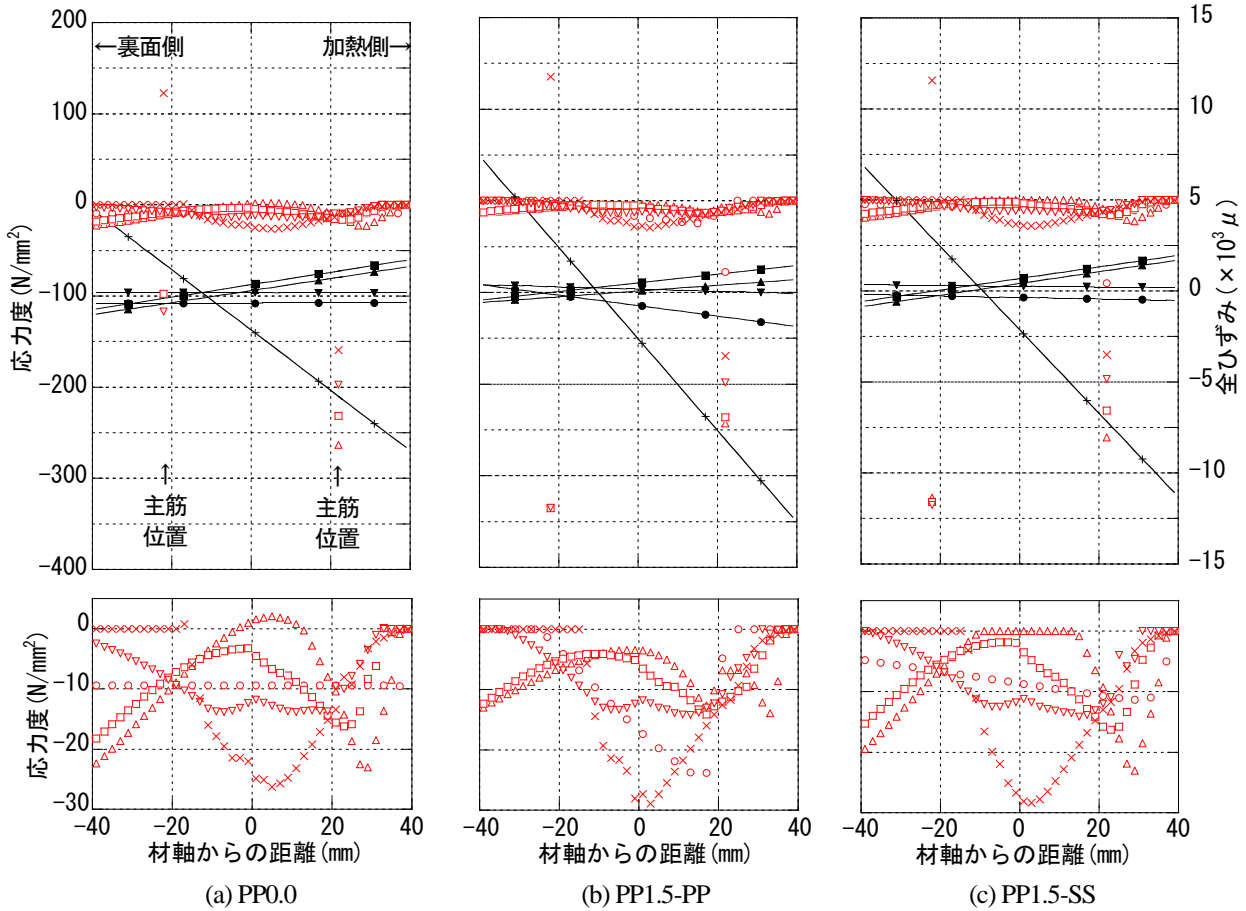
0分における全ひずみ分布から、PP1.5-PPとPP1.5-SSは、衝突を模擬した強制変形の影響で、軸力導入後も曲げ変形が残っており、変形量はPP1.5-PPの方が大きい。

10分における全ひずみ分布では、加熱側のコンクリートの圧縮応力度が熱膨張によって増加する傾向、および加熱面側に凸の湾曲によって裏面側のコンクリートにおいても圧縮応力度が増加する傾向が見られる。

10分から20分に掛けて、加熱面側のコンクリートが高温になってヤング係数と圧縮強度が低下する影響により、コンクリートの圧縮域が加熱面側から裏面側の方

応力度 ○:0分, △:10分, □:20, ▽:30, ×:崩壊直前

ひずみ ●:0分, ▲:10分, ■:20, ▼:30, +:崩壊直前



※下図は応力度(コンクリート)の拡大図
 図-10 試験体中央断面の応力度と全ひずみの分布

へシフトする傾向が見られる。

崩壊直前には、コンクリートに生じる圧縮応力度の最大値が壁の材軸付近に認められ、裏面側のコンクリートはひび割れによって引張応力度がゼロになっている。

PP1.5-PP と PP1.5-SS の裏面側の主筋には、0、10、20、30分において降伏点の 342N/mm^2 に近い圧縮応力度が生じており、剛体の衝突を模擬した強制変形によって引張側の塑性ひずみが生じていた影響によるものと言える。

崩壊時の裏面側鉄筋の温度は図-6 に示すように 200°C 以下であり、温度による降伏点の低下は小さいと考えられ、解析上、3 試験体の崩壊直前の裏面側鉄筋の応力度は、降伏点に達していなかったと考えられる。

5. まとめ

RC 造壁縮小試験体に対して衝突実験、载荷加熱実験および熱応力変形解析を行った。その結果、剛体の衝突によって、衝突面と反対側の主筋が若干降伏した程度の曲げ破壊を生じた試験体では、構造耐火性能の低下は小さいことが確認された。

参考文献

- 1) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 高速衝突を受けたコンクリート板の火災加熱に対する温度性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻 第 694 号, pp.2247-2256, 2013.
- 2) 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 80 巻 第 708 号, pp.357-367, 2015.
- 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) 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.
- 5) 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.