

# 剛飛翔体の高速衝突を受けたコンクリート造壁の火災加熱に対する温度性状と構造挙動に関する実験的研究

森田 武

(技術研究所)

## An experimental study on the temperature and structural behavior of a concrete wall exposed to fire after a high-velocity impact by a hard projectile

Takeshi Morita

爆発を伴う事故やタービンなどの回転機器の事故では飛散物が発生し、これらの飛散物が飛翔体となって構造物に衝突する可能性がある。航空機なども構造物に衝突する飛翔体になり得る。これらの飛翔体の衝突事象では、油や燃料などの可燃物が存在した場合、火災を誘発する可能性がある。本研究では、コンクリート構造物が剛飛翔体の高速衝突を受け、かつ火災を受けた場合を想定して、衝突作用後のコンクリート板の遮熱性および鉄筋コンクリート造耐力壁の構造耐火性を把握することを目的とした。縮小スケールのコンクリート壁に対して高速衝突実験と耐火実験を実施した結果、衝突作用と火災作用における局部破壊の影響と短繊維補強の有効性が確認された。

Projectiles, such as turbine blades, can be released in an accident and impact structures. Airplanes and other flying objects can also become impact projectiles. These impacts occasionally cause fire when fire loads, such as oil, fuel, and other combustible materials, are present. This study examines the thermal insulation performance of concrete plates and the structural fire behavior of load-bearing reinforced concrete walls that are exposed to fire after a high-velocity impact by a hard projectile. Impact and fire tests were carried out using small-scale concrete plates and reinforced concrete walls. The results show the influence of local damage and the advantage of short-fiber reinforced concrete subjected to impact loads and fire.

### 1. はじめに

近年、爆発事故や自然災害によって衝撃的な荷重がコンクリート構造物に作用し、損傷や破壊を生じるケースが増加している。

衝撃荷重によるコンクリート構造物の破壊は、全体破壊と局部破壊に分類できる<sup>1)</sup>。飛翔体がコンクリート構造物に高速度で衝突すると、衝突条件によって、**図-1**に示すように、表面破壊(衝突面の破壊(条件によって板内部に斜めひび割れが生じる))、裏面剥離(衝突面と反対面のコンクリートの剥離)、貫通(表面破壊と裏面剥離が連結して飛翔体が裏面側へ貫通する破壊)等の局部破壊を生じる<sup>2)</sup>。局部破壊は、構造部材の剛性や耐力を低下させるだけでなく、裏面剥離や貫通に至る場合には裏面に飛散物を生じる。飛散物の危険から構造物内の人命や財産を守るためには、裏面剥離や貫通を防止する必要がある。著者らは、裏面剥離の防止対策としてコンクリートの短繊維補強に

着目して高速衝突実験を実施し、その有効性を確認した<sup>3)</sup>。

一方、発電施設等でのタービンブレードの破損・飛散による衝突と火災、あるいは航空機の衝突による火災などの事故事例があるように<sup>4)6)</sup>、衝突作用後の構造物の内部あるいは外部において、燃料・油などの可燃物の燃焼による火災が発生する可能性がある。衝突後の火災から構造物内の人命や財産を守るには、衝突作用とその後の火災作用の双方に対して、部材・構造体の構造安定性を

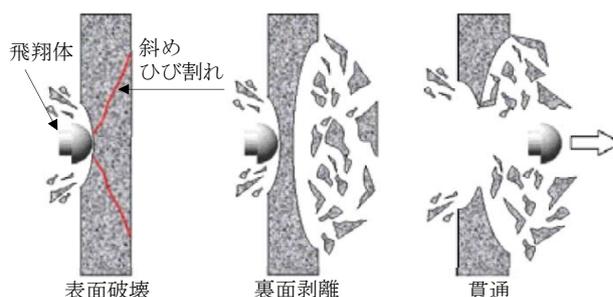


図-1 局部破壊の破壊モード<sup>2)</sup>

確保するとともに、火災区画以外への延焼や屋外から屋内への延焼を防止しなければならない。そのためには、局部破壊したコンクリート構造体が火災加熱を受けた場合の温度性状や構造耐火性を把握する必要がある。

本報では、衝突作用後に火災を受けるコンクリート構造物の安全性評価手法の構築に資するべく、高速衝突を受けたコンクリート造壁の遮熱性と構造耐火性を把握すること、およびこれらの性能に対する短繊維補強の効果を確認することを目的として実施した、実験的検討<sup>7,8)</sup>について報告する。本検討は、コンクリート造壁に対する高速衝突実験と耐火実験で構成される。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験体

試験体は、遮熱性検討用のコンクリート板試験体(以下、CP と略す)と構造耐火性検討用の鉄筋コンクリート造壁縮小試験体(以下、RW と略す)の2種類とした。

#### 2.1.1 使用材料

表-1 に試験体に用いた普通コンクリートの使用材料を示す。使用した材料は、普通ポルトランドセメント、硬質砂岩砕石、山砂、および混和剤である。また、ポリプロピレン短繊維(以下、PP短繊維と略す)を耐衝撃性能の向上<sup>3)</sup>および火災時の爆裂抑制<sup>9)</sup>を目的として使用した。

表-2 にコンクリートの調合、圧縮強度および耐火実験時の含水率を示す。使用したコンクリートは、設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup> で計画し、水セメント比は 55.0%、目標空気量は 5%とした。調合は4種類であり、Plain は短繊維無混入、P20-05

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	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	硬質砂岩(砕石2005, 青梅産), 表乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup>
細骨材	山砂(君津法木産山砂), 表乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup>
混和剤	AE減水剤(標準形(I種)), AE剤(I種), 空気量調整剤
短繊維	ポリプロピレン(PP) 長さ：10mmまたは20mm, 直径：0.048mm 密度：0.91g/cm <sup>3</sup> , 引張強度：298N/mm <sup>2</sup>

表-2 コンクリートの調合・圧縮強度・含水率

調合名	試験体シリーズ	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				PP (vol%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		含水率 (%)
			W	C	S	G		28日	耐火時	
Plain	CP	55.0	175	318	817	973	0.0	33.1	41.0	—
	RW						0.0	35.2	45.9	3.7
P20-05	CP	0.5	31.2	40.0	3.3					
P20-10	CP	1.0	28.3	34.3	3.1					
P10-10	RW	1.0	24.7	30.6	4.1					

注) W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材

と P20-10 は繊維長 20 mm の PP 短繊維をそれぞれ 0.5vol%、1.0vol%混入した。P10-10 では、施工性を考慮して、繊維長 20mm とほぼ同等な耐衝撃性能が得られることを確認した<sup>3)</sup>、繊維長 10mm の PP 短繊維を 1.0vol%混入した。

使用した鉄筋は異形棒鋼 D6(SD295A)であり、降伏点強度の実測値は 342N/mm<sup>2</sup>であった。

#### 2.1.2 試験体の形状・寸法

図-2 に CP 試験体の形状・寸法を示し、図-3 に RW 試験体の形状・寸法を示す。本実験で使用した高速衝突実験装置と同じ装置を使用した既往の研究<sup>2,3,10)</sup>では、厚さ 80mm の試験体に対して多くの実験が行われており、破壊モードの予測が可能であることから、CP 試験体と RW 試験体の厚さも 80mm とした。

##### 1) CP 試験体

CP 試験体は、高さ：500mm×幅：500mm×厚さ：80mm であり、鉄筋補強「なし」と「あり」の2種類の仕様とした。鉄筋コンクリート板は、100mm 間隔の格子状に鉄筋を配し、ダブル配筋とした。かぶり厚さは 10mm とした。

##### 2) RW 試験体

RW 試験体は、高さ：800mm×幅：300mm×厚さ：80mm であり、壁厚と高さの比は 1/10 とした。軸方向に主筋 D6 を 8 本配し、かぶり厚さは 15mm とした。主筋の端部は試験体の上・下端の載荷板(厚さ 12mm、SS400)に溶接して固定した。主筋には、図-3 に示す F1~F6 および B1~B6 の位置に熱電対を取り付けた。

#### 2.1.3 試験体の種類と実験条件

表-3 に試験体の種類と実験条件を示す。衝突条件は、衝突なし、および衝突速度を 215m/s と 315m/s とした。衝突速度は、既往の実験<sup>2,3,10)</sup>をもとに設定したもので、Plain を使用した無筋

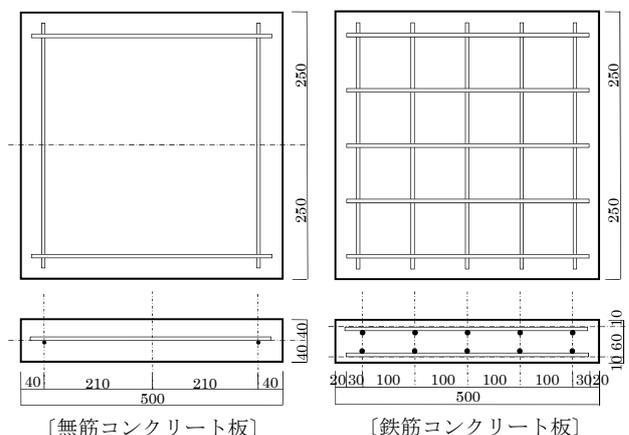


図-2 CP 試験体の形状・寸法(単位：mm)

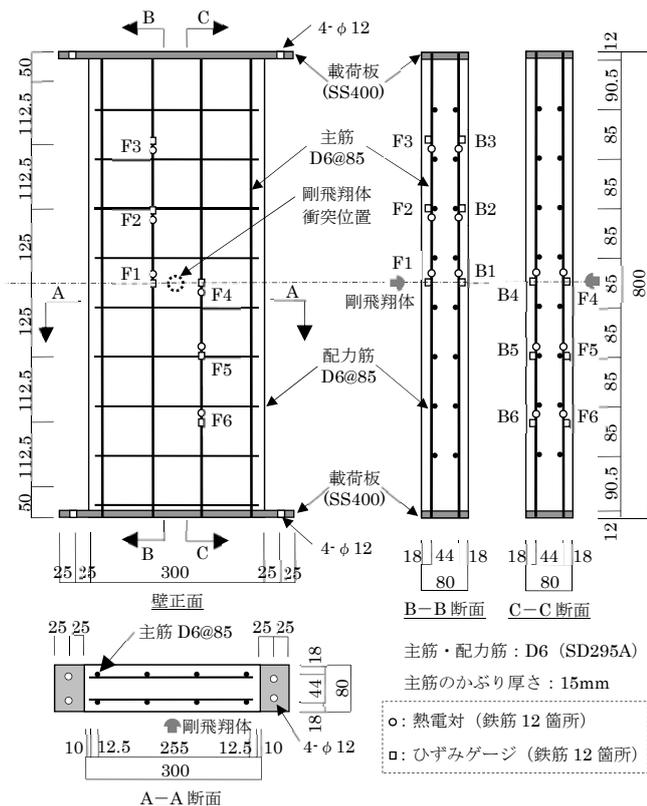


図-3 RW 試験体の形状・寸法 (単位: mm)

表-3 試験体の種類と実験条件

試験体名	コンクリート/鉄筋	衝突速度 (m/s)	試験体名	コンクリート	衝突速度 (m/s)
CP-PL-2	Plain	215	RW-PL-0	Plain	なし
CP-PL-3	Plain	315	RW-PL-2	Plain	215
CP-RC-2	Plain+鉄筋	215	RW-P10-0	P10-10	なし
CP-RC-3	Plain+鉄筋	315	RW-P10-2	P10-10	215
CP-P05-2	P20-05	215	RW-P10-3	P10-10	315
CP-P05-3	P20-05	315			
CP-P10-2	P20-10	215			
CP-P10-3	P20-10	315			

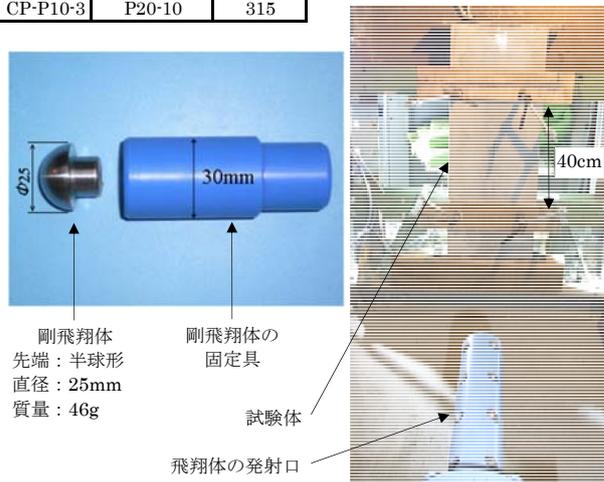


写真-1 剛飛翔体および試験体の設置状況

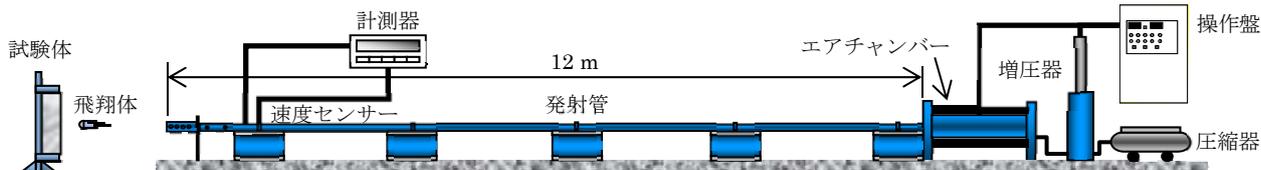


図-4 高圧空気式飛翔体発射装置の概要<sup>10)</sup>

の CP 試験体の局部破壊モードが、215m/s では表面破壊、315 m/s では裏面剥離となる速度である。

## 2.2 高速衝突実験

### 2.2.1 実験装置

高速衝突実験には、図-4 に示す高圧空気式飛翔体発射装置<sup>10)</sup>を使用した。飛翔体および RW 試験体の設置状況を写真-1 に示す。本装置は、圧縮器・増圧器・エアチャンバー・発射管(長さ 12m、内径 35mm)で構成されており、圧縮空気で飛翔体を発射・加速する。衝突速度は発射口に設置したレーザー式速度検出センサーで測定される。本実験では、先端形状が直径 25mm の半球型で質量 46g の鋼製(SS400)の飛翔体を使用した。

### 2.2.2 試験体の支持方法

写真-1 に示すように、RW 試験体は、剛飛翔体の衝突位置(図-3)から上下に 20cm 離れた位置で、鋼製フレームと木製合板を介してクランプで固定した。CP 試験体も、同様な方法で衝突面の上下縁を固定した。

### 2.2.3 測定項目

剛飛翔体の発射速度、表面破壊の貫入深さと直径、裏面剥離の深さと直径を測定した。なお、表面破壊と裏面剥離の直径は、破壊面の最大・最小・中間程度の長さの測定値を平均して求めた。深さは破壊部の最大深さとした。

## 2.3 CP 試験体に対する遮熱性実験

### 2.3.1 実験装置

遮熱性実験には、都市ガス燃料とする小型壁炉を使用した。炉にはバーナーが 4 基、炉内温度測定用の熱電対が 5 本設置されている。写真-2 に実験装置と試験体の設置状況を示す。試験体に対する有効加熱範囲は 450mm×450mm である。

### 2.3.2 加熱条件

試験体に飛翔体が衝突した面を加熱面とし、裏面は炉外の常温空気に暴露される条件とした。加熱温度条件は、燃料火災を想定して、炭化水素火災を模した標準加熱温度時間曲線<sup>11)</sup>(以下、H.C. 曲線と略す)にしたがった 2 時間加熱とした。

### 2.3.3 測定項目

測定項目は炉内温度 5 点(試験体加熱表面から 100mm の位置で測定)と試験体の裏面温度とし、裏面温度は赤外線サーモグラフィで測定した。

## 2.4 RW 試験体に対する荷加熱実験

### 2.4.1 実験装置

荷加熱実験には、小型壁炉と加力装置で構成される実験装置を使用した。実験装置を図-5に、試験体の設置状況を写真-3に示す。小型壁炉はCP試験体の遮熱性実験に使用したのと同じものである。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、下部に 500kN オイルジャッキと球座が取り付けられている。試験体は、加力装置上下の球座の載荷板と試験体の載荷板をボルトで接合して支持した。

### 2.4.2 荷条件

加熱に先立って、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 P10-10 の荷加熱実験時における圧縮強度の実測値( $\sigma_b$ )を用いて次のように設定した。

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

$$\text{P10-10} : \sigma_b \times \text{断面積} / 3 \\ = 30.6\text{N/mm}^2 \times 24000\text{mm}^2 / 3 = 244.8 \text{ kN}$$

### 2.4.3 加熱条件

遮熱性実験と同様に、試験体に飛翔体が衝突し

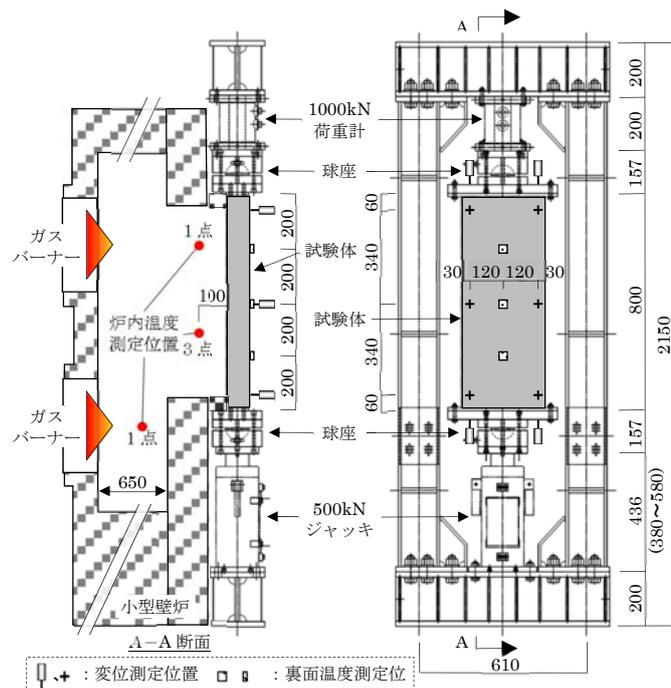


図-5 荷加熱実験装置の概要(単位: mm)

た面を加熱面とし、裏面は炉外の常温空気に暴露される条件とした。加熱は、H.C.曲線にしたがって行い、試験体が破壊した時点で中止した。

### 2.4.4 測定項目

試験体内部の鉄筋温度 12 点(図-3)、および炉内温度 5 点、裏面温度 3 点、荷方向の変位 4 点と面外方向の変位 6 点(図-5)を測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 高速衝突実験

表-4に、実験時における飛翔体の衝突速度の実測値、表面破壊の貫入深さと平均直径、および裏面剥離深さと平均直径を示す。また、図-6と図-7に後述の耐火実験結果と併せて、衝突実験後のCP試験体の局部破壊の状況を示し、図-8にRW試験体の局部破壊の状況を示す。



写真-2 加熱実験装置と試験体設置状況

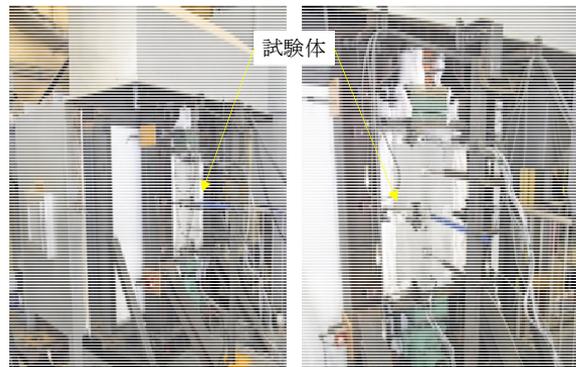


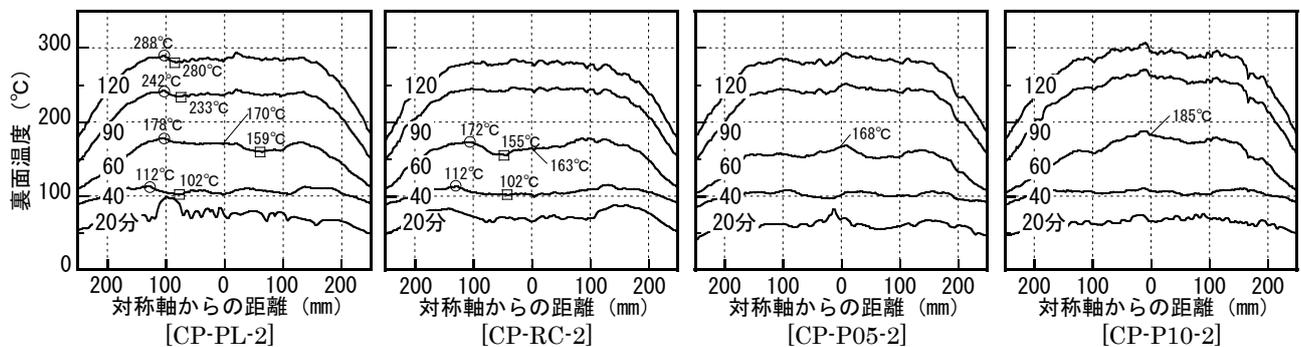
写真-3 荷加熱実験装置と試験体設置状況

表-4 高速衝突実験結果

試験体	衝突速度(m/s)		表面破壊(mm)		裏面剥離(mm)	
	設定	実測	最大深さ	平均直径	最大深さ	平均直径
CP-PL-2	215	216	16	96	0	0
CP-PL-3	315	313	22	109	33	230
CP-RC-2	215	214	14	71	0	0
CP-RC-3	315	315	21	117	28	215
CP-P05-2	215	216	18	81	0	0
CP-P05-3	315	315	29	117	0	0
CP-P10-2	215	211	16	86	0	0
CP-P10-3	315	315	29	95	0	0
RW-PL-0	-	-	-	-	-	-
RW-PL-2	215	212	15	86	0	0
RW-P10-0	-	-	-	-	-	-
RW-P10-2	215	214	18	66	0	0
RW-P10-3	315	305	22	79	37	177

試験体	衝突後(加熱前)	加熱中の裏面の状況(上:赤外線サーモグラフィの熱画像、下:写真)				温度 スケール °C	加熱後 上:衝突面 下:裏面			
	上:衝突面 下:裏面	20分	40分	60分	120分					
CP-PL-2										
CP-RC-2										
CP-P05-2										
CP-P10-2										

衝突後(加熱前)・加熱中・加熱後の試験体



裏面の高さ中央水平方向の温度分布

(○: 円状ひび割れ(斜めひび割れ)外側の最高温度、□: 円状ひび割れ内側の最低温度)

図-6 CP試験体(衝突速度: 215m/s)の高速衝突実験後と耐火実験時の状況および裏面温度分布

試験体	衝突後(加熱前)	加熱中の裏面の状況(上: 赤外線サーモグラフィの熱画像、下: 写真)				温度 スケール	加熱後
	上: 衝突面 下: 裏面	20分	40分	60分	120分		
CP-PL-3							
CP-RC-3							
CP-P05-3							
CP-P10-3							

衝突後(加熱前)・加熱中・加熱後の試験体

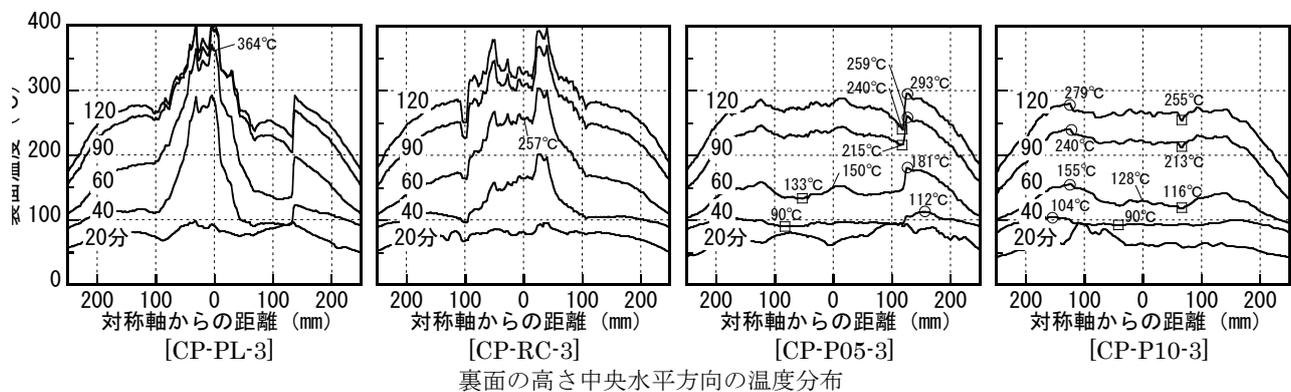


図-7 CP試験体(衝突速度: 315m/s)の高速衝突実験後と耐火実験時の状況および裏面温度分布

試験体	高速衝突実験後		载荷加熱実験後			
	衝突面	裏面	衝突面(加熱面)	裏面	側面(右側加熱面)	側面拡大
RW-PL-0						
RW-PL-2						
RW-P10-0						
RW-P10-2						
RW-P10-3						

図-8 RW 試験体の高速衝突実験後と耐火実験後の状況

### 3.1.1 CP 試験体

衝突速度 215m/s の CP-PL-2 と CP-RC-2 では表面破壊のみが生じ、衝突速度 315m/s の CP-PL-3 と CP-RC-3 では裏面剥離が生じた。無筋の CP-PL シリーズと有筋の CP-RC シリーズでは、衝突速度が同じ場合、ほぼ同等な局部破壊性状であり、鉄筋の有無は影響しない結果となった。

短繊維補強した CP-P05 および CP-P10 シリーズでは表面破壊のみが生じたが、衝突速度 315m/s の場合には試験体裏面にひび割れが視認され、215m/s ではひび割れは認められなかった。このように、裏面剥離やひび割れが抑制された理由は、PP 短繊維の架橋効果であると考えられる。本実験において、短繊維補強が局部破壊の抑制に有効であることが確認された。

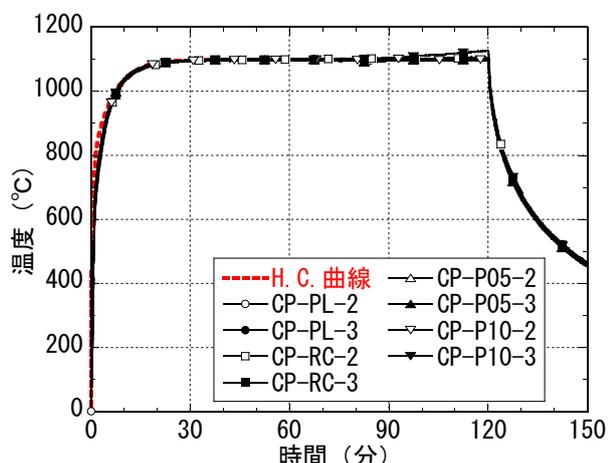
### 3.1.2 RW 試験体

衝突速度 215m/s の RW-PL-2 は CP-PL-2 と CP-RC-2 と同様に、RW-P10-2 は CP-P05-2 と CP-P10-2 と同様に、表面破壊のみが生じた。しかし、衝突速度 315m/s の RW-P10-3 は、CP-P05-3 と CP-P10-3 では裏面剥離が生じなかったのに対して、裏面剥離が生じた。RW-P10-3 で裏面剥離が生じた原因を本実験結果のみで解明することはできないが、裏面剥離の直径から判断して、衝突作用に対する押抜きせん断力に抵抗する押抜きせん断面(図-1の斜めひび割れ面)が、CP-PL-3 や CP-RC-3 と比較して小さくなっていることから、試験体の幅が影響した可能性が考えられる。

## 3.2 耐火実験

### 3.2.1 炉内温度の測定結果

図-9に、CP 試験体の遮熱性実験および RW 試験体の載荷加熱実験における炉内温度の測定結果を示す。炉内温度は、加熱初期において H.C. 曲線



よりも若干低くなったが、加熱開始後約 7 分経過した時点から、概ね H.C. 曲線と同等な温度で制御された。なお、RW 試験体の炉内温度測定結果において、高温維持期間が異なっているのは、試験体が破壊した時点で加熱を中止したためである。

### 3.2.2 CP 試験体の遮熱性

#### 1) 加熱による損傷

図-6と図-7に示すように、加熱・冷却期間を通じて、加熱面と裏面において外見上の損傷の拡大は認められなかった。加熱初期には、コンクリートの含有水が裏面から放射状および円状に湧出した。この湧水は、飛翔体の衝突によって衝突位置から裏面に向かって形成された放射状ひび割れと押抜きせん断によるコーン状のひび割れ(図-1の斜めひび割れあり、以下、斜めひび割れまたは円状ひび割れと称す)を通じて生じたと考えられる。円状の湧水は衝突速度 315m/s の試験体で顕著であることから、衝突速度が速くなると斜めひび割れを生じる可能性が高くなると言える。

#### 2) 裏面剥離を生じなかった試験体の裏面温度

CP-P05-2 の 40 分時におけるひび割れ部の裏面温度、および CP-P05-3 の 40 分時における表面破壊の真裏の裏面温度が若干高くなっているが、その他の試験体では 40 分時以降の裏面温度に対する表面破壊とひび割れの影響はほとんど見られない。また、円状ひび割れの外側よりも内側の方が裏面温度は低くなっており、斜めひび割れが熱抵抗になったと言える。なお、裏面温度が 100°C 以下のレベルである 20 分時において、ひび割れ部の温度が 20~30°C 程度高くなったのは、裏面のコンクリートよりも温度の高い水が湧出したためである。以上のように、本実験では、高速衝突によって生じた表面破壊やひび割れは、遮熱性に対して顕著な影響を及ぼさなかった。

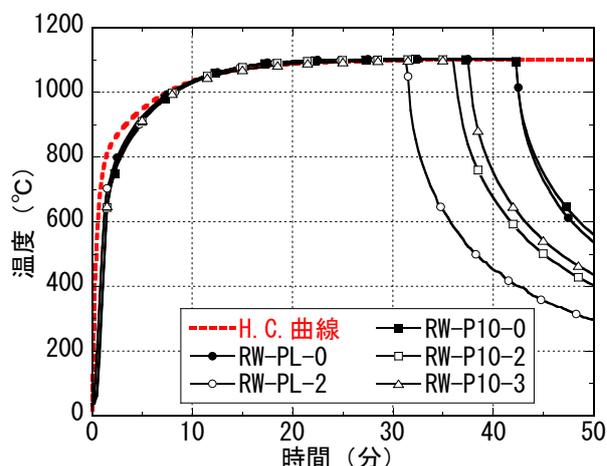


図-9 耐火実験時の炉内温度の経時変化 (左図: CP 試験体、右図: RW 試験体)

### 3) 裏面剥離を生じた試験体の裏面温度

CP-PL-3 と CP-RC-3 の裏面温度は、裏面剥離を生じなかった試験体に比べると 120°C程度高くなった。裏面剥離を発生させないことが遮熱性の確保に重要であることが確認された。

#### 3.2.3 RW 試験体の構造耐火性

各試験体の載荷加熱実験前後の状況を図-8 に示す。また、試験体の高さ中央における加熱側および裏面側の主筋平均温度（図-3、F1 と F4 の平均、B1 と B4 の平均）の経時変化を図-10 に示し、鉛直変位と試験体高さ中央の面外変位の経時変化を図-11 に示す。変位は、中心軸圧縮力導入後の加熱開始直前の変位をゼロとして図示した。

各試験体の崩壊時間は次のとおりであった。

RW-PL-0 : 42.5分 RW-PL-2 : 31.5分  
RW-P10-0 : 42.5分 RW-P10-2 : 36.5分  
RW-P10-3 : 37.5分

なお、高速衝突実験による試験体の残留変形は極めて小さかったことから、残留変形が試験体の荷重支持性能に及ぼした影響は、表面破壊や裏面剥離の影響に比べて、小さかったと考えられる。

### 1) 構造挙動

加熱開始後、試験体には膨張方向の鉛直変位と加熱側に凸の面外変位を生じた。これは、加熱側のコンクリートの方が裏面側よりも高温になり、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、面外変位は、加熱側に凸から、裏面側に凸の方向に転じた。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、それに伴い、部材の等価断面における重心が裏面側に移動して、偏心による曲げが発生したためだと言える。そして、裏面側に凸の面外変位が増加することによって、P- $\delta$ 効果による曲げモーメントが増加し、加熱側のコンクリートが圧壊して崩壊に至った。

### 2) 表面破壊等の影響

RW-PL-0 と RW-P10-0 は崩壊時間が同じであった。これに対して、RW-PL-2 の崩壊時間は11分、RW-P10-2 は6分早くなっており、表面破壊によって、火災時の耐力低下が早くなることが確認された。また、RW-PL-2 と RW-P10-2 の表

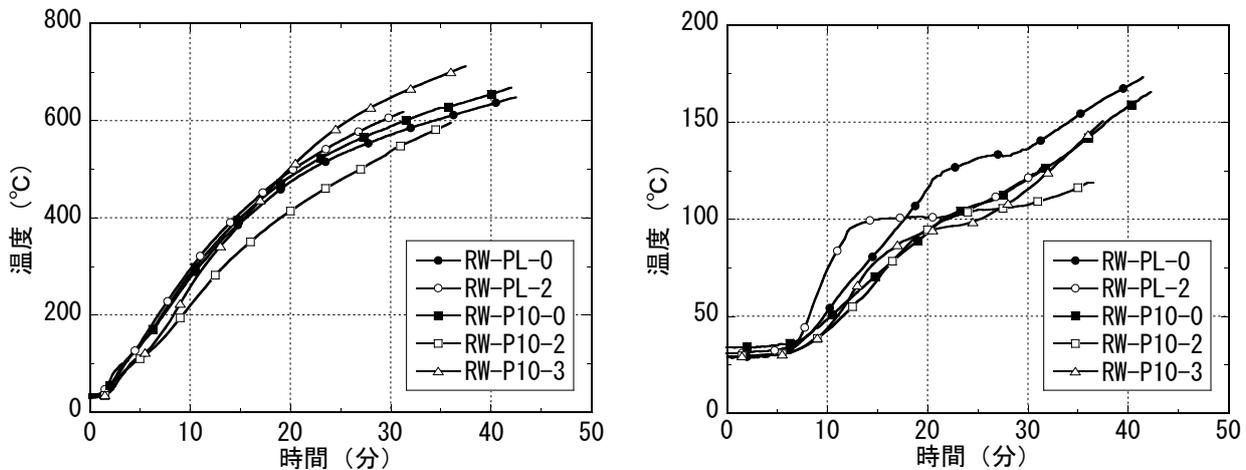


図-10 RW 試験体の主筋温度の経時変化 (左図：加熱側鉄筋、右図：裏面側鉄筋)

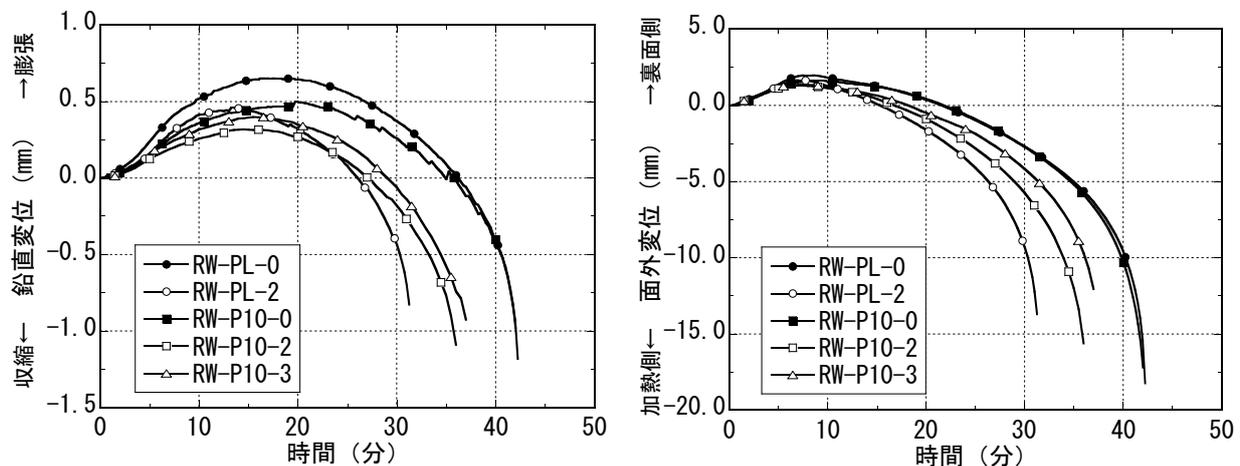


図-11 RW 試験体の変位の経時変化 (左図：鉛直変位：右図：高さ中央の面外変位)

面破壊の規模は概ね等しいことから、双方の崩壊時間の差異は、高速衝突によって試験体内部に生じたひび割れの影響だと考えられる。図-8の衝突実験後の写真で、RW-PL-2の裏面には放射状と円状のひび割れが見られるが、RW-P10-2では見られない。本結果から、短繊維補強は、高速衝突によるひび割れ等の損傷を低減し、その結果として、構造耐火性の向上にも寄与することが把握された。

### 3) 裏面剥離等の影響

裏面剥離を生じたRW-P10-3の崩壊時間は、高速衝突による断面欠損が大きいにもかかわらず、RW-P10-2と1分程度の差であった。この結果から、崩壊に至る原因として、軸剛性よりも曲げ剛性の低下の方が支配的だったと考えられる。すなわち、両者とも面外変位の経時変化は同傾向であり、片面加熱によってP- $\delta$ 効果による曲げモーメントが増大し、加熱側のコンクリートが圧壊して崩壊した。加熱が進行すると裏面側には引張応力が作用するが、コンクリートは引張強度が小さいため、裏面剥離が生じていても曲げ剛性は大きく変わらない。このため、裏面剥離が崩壊時間に対して大きく影響しなかったものと考えられる。

## 4. まとめ

剛飛翔体の高速衝突を受けたコンクリート造壁の遮熱性と構造耐火性を把握すること、およびこれらの性能に対する短繊維補強の効果を確認することを目的として、高速衝突実験と耐火実験を実施した。その結果、本実験の範囲では、以下の知見が得られた。

### 1) 短繊維補強の有効性

PP短繊維補強は、耐衝撃性能の向上に有効であり、コンクリート内部のひび割れの低減や裏面剥離の抑制に効果がある。その結果、火災加熱に対する遮熱性と構造耐火性の向上にも寄与する。

### 2) 遮熱性

表面破壊および衝突位置から裏面にかけて形成された放射状ひび割れと斜めひび割れは、コンクリート板の遮熱性に大きな影響を及ぼさない。斜めひび割れは、熱抵抗となって裏面の温度上昇を抑制する。裏面剥離を防止することは遮熱性を確保する上で重要である。

### 3) 構造耐火性

鉄筋コンクリート造壁は、加熱側のコンクリートの強度と剛性の低下による曲げ変形の増大によって崩壊する。表面破壊および試験体内部に生

じたひび割れは、崩壊時間を早める原因となる。崩壊に至る過程において、試験体は裏面側に凸に湾曲し、裏面側は引張状態となるため、裏面剥離は崩壊時間に大きく影響しない。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、防衛大学校教授 別府万寿博先生、千葉工業大学教授 鈴木誠先生から懇切丁寧なるご指導を戴いた。ここに深謝の意を表します。

## <参考文献>

- 1) 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法、構造工学シリーズ6、1994。
- 2) 防衛施設学会：高速衝突を受けるコンクリート構造物の局部破壊に対する設計ガイドライン（案）、2014。
- 3) 森田武、別府万寿博、鈴木誠：高速衝突を受けるポリプロピレン短繊維補強コンクリートの耐衝撃性能、日本建築学会構造系論文集、第78巻 第684号、pp.319-327、2013。
- 4) “Turbine risks reassessed,” Nuclear Engineering International, Vol.39, No.476, pp.42-44, 1994,
- 5) Mlakar, P.E., Dusenberry, D.O., Harris, J.R., Haynes, G., Phan, L.T. and Sozen, M.A.: The Pentagon Building Performance Report, American Society of Civil Engineers, Technical Reports, 2003.
- 6) Gross, J.L. and McAllister, T.P.: Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of the World Trade Center Towers, National Institute of Standards and Technology, Report NIST NCSTAR 1-6, WTC Investigation, 2005.
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) Morita, T., Nishida, A., Yamazaki, N., Schneider, U. and Diederichs, U.: An experimental study on spalling of high strength concrete elements under fire attack, Fire Safety Science - Proceedings of the Sixth International Symposium on Fire Safety Science, pp.855-866, 1999.
- 10) 別府万寿博、三輪幸治、大野友則、塩見昌紀：鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究、土木学会論文集、Vol.63, No.1, pp.178-191、2007。
- 11) EUROCODE 1: Basics of design and actions on structures Part 2-2: Actions on structures exposed to fire, European Committee for Standardization, 1994.