

# 論文 リング拘束加熱試験法による PC シースの火災損傷評価手法に関する基礎的研究

河原 優明\*1・小山 拓\*2・藤嶋 涼\*3・小澤 満津雄\*4

**要旨:** 本研究では、ポストテンション方式のプレストレスコンクリートで使用されるシースの火災時損傷評価手法を提案するために、リング拘束枠に PC 鋼棒とシースを設置しグラウトを充填した供試体を作製し、加熱試験を実施した。シースはポリエチレン製と鋼製を用いた。計測項目は内部温度と蒸気圧および拘束応力、超音波伝搬速度とした。リング拘束加熱試験法の加熱試験の結果、火災により PE 製シース管を使用したポストテンション方式の PC 部材では、加熱時に PE が熔融し、コンクリートにひび割れが発生する可能性がある。

**キーワード:** プレストレスコンクリート, 爆裂, リング拘束加熱試験, ポリエチレン製シース, 鋼製シース

## 1. はじめに

プレストレスコンクリート (以下, PC) はプレストレスの導入により, コンクリートのひび割れの制御や引張応力の低減を行うことで土木構造物の長大化や高機能化に貢献してきた。しかしながら, PC 部材はプレストレスの影響により火災時に爆裂が生じやすいという報告がある<sup>1)</sup>。ポストテンション方式では, シースに PC 鋼材を配置し, プレストレスを導入後, グラウト材をシース内に充填することで PC 鋼材を腐食から保護している。ここでシースの種類としては鋼製(以下, SS 管)とポリエチレン製(以下, PE 管)のものが一般的に使用されている<sup>2)</sup>。PE は腐食防止の観点から有用であるが, 火災時には PE 管が 150°C で熔融する危険性があり, PE 管内部のグラウトと PC 鋼材が損傷を受ける可能性がある。白石ら<sup>3)4)</sup>は, シースの種類とグラウトの充填率を実験因子とした PC 部材を模擬した小型加熱試験を実施し, 加熱に伴い PE 管が熔融, 燃焼すると内部のグラウトが損傷を受けることを報告している。さらに, シースの種類とかぶり厚を実験因子とした PC はりを作製し加熱試験を実施した結果, かぶりの厚さとシースの種類によって, 爆裂の有無に差異があることを報告している。本研究グループでは, 同一配合で作製した PC はり部材とリング拘束供試体を加熱して爆裂評価を実施し, PC 部材とリング供試体に爆裂

規模の比較を実施した<sup>5)6)</sup>。一方, シースの種類が火災時に PC 部材の損傷に与える影響と評価手法については, 未検討な課題である。そこで, 本研究では, PC 部材に使用するシースの火災損傷評価手法を構築する基礎資料を得るために, リング拘束供試体にシースを配置し, PC 鋼棒とグラウトを充填したものを作製し, 加熱試験を実施し, 加熱面の損傷状況を評価した。シースを鋼製と PE 製の 2 種類とした。併せて, 加熱時の内部温度と拘束応力および蒸気圧を測定し, 加熱時のコンクリートの損傷状況を評価した。加えて, 既往研究で実施したシースの種類とかぶり厚が異なる PC はりの加熱試験結果と比較を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 配合および使用材料

表-1 にコンクリートの計画配合を示す。W/C は 50% とし, セメントは早強ポルトランドセメント (密度: 3.14 g/cm<sup>3</sup>) を使用した。s/a は 48% とし, 細骨材は硬質砂岩 (密度: 2.62 g/cm<sup>3</sup>) のものを, 粗骨材は硬質砂岩 (密度: 2.65 g/cm<sup>3</sup>) を用いた。混和剤 SP はポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。混和剤 AE はポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸塩 AE 剤を使用した。練り上がり時のスランプと空気量はそれぞれ 12 cm, 4.5% であつ

表-1 コンクリート計画配合

SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP	混和剤 AE
12	4.5	50	48	165	330	875	948	2.64	0.017

\*1 群馬大学 理工学部 物質環境類 土木環境プログラム 4年 (学生会員)

\*2 群馬大学大学院 理工学府 物質環境類 土木環境プログラム 助教 (正会員)

\*3 オリエンタル白石 (株) 本社 技術本部 技術研究所 研究員

\*4 群馬大学大学院 理工学府 物質環境類 土木環境プログラム 教授 (正会員)

た。材齢 28 日の圧縮強度と弾性係数はそれぞれ 49.1 N/mm<sup>2</sup>, 32.4 kN/mm<sup>2</sup>であった。

## 2.2 リング拘束供試体概要

本研究では、3 種類の供試体を用意した。すなわち、a)R-Control, b)R-SS55, c)R-PE55 とした。図-1 に本研究で用いたリング拘束供試体(R-SS55,R-PE55)の概要を示す。a)R-Control は、PC 鋼材を配置しないものとした。b)R-SS55 は、リング内部に SS 管(内径 45mm, 外径 48mm)を配置しシース内に PC 鋼棒(26 mm, C 種 1 号, 0.2%耐力: 1197 N/mm<sup>2</sup>, 引張応力: 1294 N/mm<sup>2</sup>)とグラウトを 100% 充填した。c)R-PE55 は、シースに PE(内径 45mm, 外径 53mm)を使用した。共通事項を以下に示す。拘束リングの寸法は外径 300 mm×高さ 150 mm×肉厚 8 mm とし鋼製のものを使用した。拘束リングの内部には温度測定用の熱電対を設置した。加えて、水蒸気圧測定用に外径 5 mm×内径 2 mm×長さ 170 mm のステンレスパイプを 4 本設置した。鋼製リングの外側表面にはひずみゲージ(許容温度 80℃)と熱電対を対極に設置した。供試体内部の熱電対とステンレスパイプの設置位置は 5 mm, 10 mm, 25 mm, 40 mm とした。加えて、鋼製リング表面のひずみゲージと熱電対の設置位置はいずれも供試体底面から、5 mm, 10 mm, 25 mm, 40 mm, 82.5 mm, 125 mm とした。

## 2.3 加熱試験概要

図-2 に加熱試験の概要を示す。本研究では、小型円筒電気炉(電気炉内径 φ160 mm×深さ 300 mm)を使用した。加熱試験の手順を示す。炉内温度を 1150℃まで昇温した後、リング拘束供試体にひずみゲージと熱電対および蒸気圧測定用パイプに圧力計を接続し、シリコンオイルを充填した状態で電気炉の近くまで運搬した。次に電気炉開口部の上蓋を取り外した瞬間に、リング拘束供試体の底面を電気炉開口部にセットし、加熱を開始した。加熱は 1150℃一定で 80 分加熱とした。なお、1150℃一定とした理由は、加熱開始 5 分間における供試体の昇温が速く、熱応力が大きくなり、爆裂が生じやすくなることで安全側の評価をするためである。加熱試験直前に R-SS55 と R-PE55 は PC 鋼材端部にナットをねじ込み、固定した。リング拘束供試体の底面にある鋼製リング部分には断熱材ブランケットを設置し、リング自体の温度上昇を抑制した。本試験では、シース底面の位置が 300℃に達する 80 分加熱とした。なお、80 分加熱をした理由は、白石らの研究<sup>3)</sup>に基づき、シース底面位置である 40 mm が十分に受熱され、300℃に達する時間として設定したためである。加熱試験後、加熱面の観察と爆裂深さの測定を行った。

## 2.4 超音波伝搬速度試験

加熱試験後、損傷度を評価するため、超音波伝搬速度

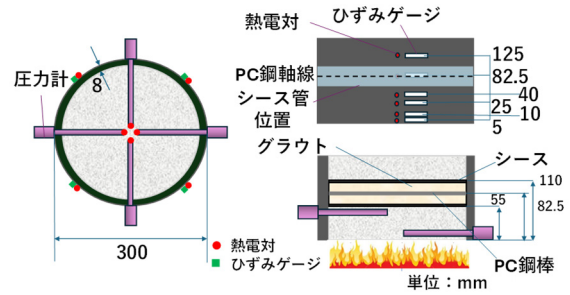


図-1 リング供試体(PC 鋼棒, シース管あり)

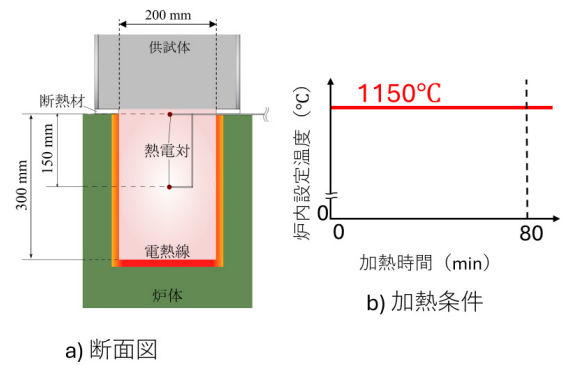


図-2 加熱試験概要

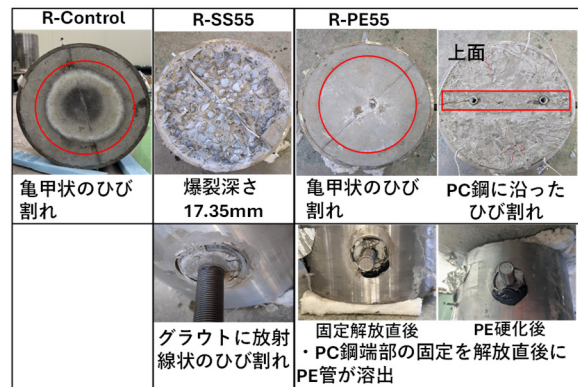


図-3 リング供試体の加熱面と端部の状況

を軸直角断面の水平方向で計測した。リング拘束供試体での計測箇所は、供試体の軸方向では上縁から 10, 25, 40, 65, 125 mm に加えシース位置である 40 mm および PC 鋼棒位置の 85 mm で透過法により計測した。PC はりでの計測箇所は、軸直角方向ではかぶり 25mm 水準は上縁から 25, 50, 75, 100, 125, 140, 165 および 175mm の位置に加え PC 鋼棒位置の 152.5mm 位置, かぶり 55mm 水準は上縁から 25, 50, 75, 100, 110, 135, 150 および 175mm の位置に加え PC 鋼棒位置の 122.5mm 位置で透過法により計測した。

## 2.5 拘束応力の算出方法

加熱試験中にコンクリートに生じる拘束応力は、薄肉円筒理論<sup>7)</sup>に基づき、鋼製リングの円筒方向ひずみ測定値を用いて算出した。算出方法を式(1)に示す。

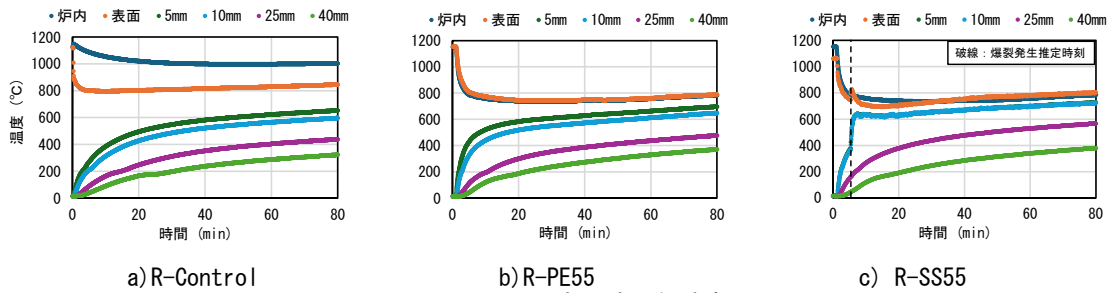


図-4 内部温度の経時変化

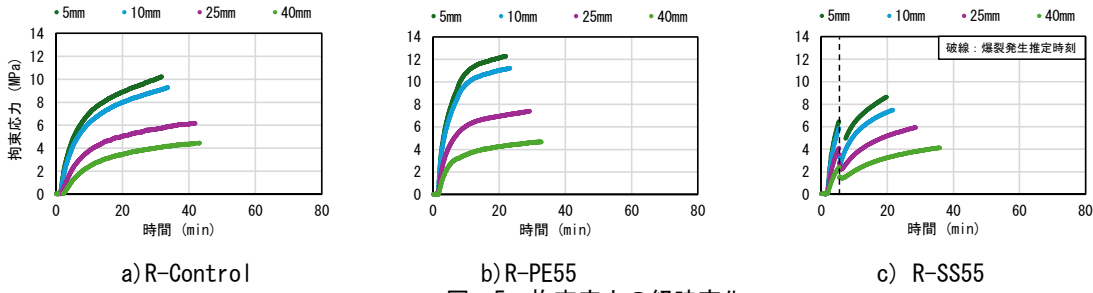


図-5 拘束応力の経時変化

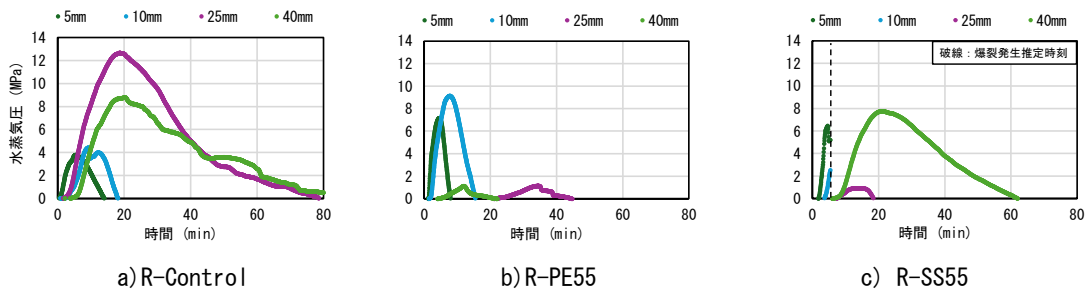


図-6 水蒸気圧の経時変化

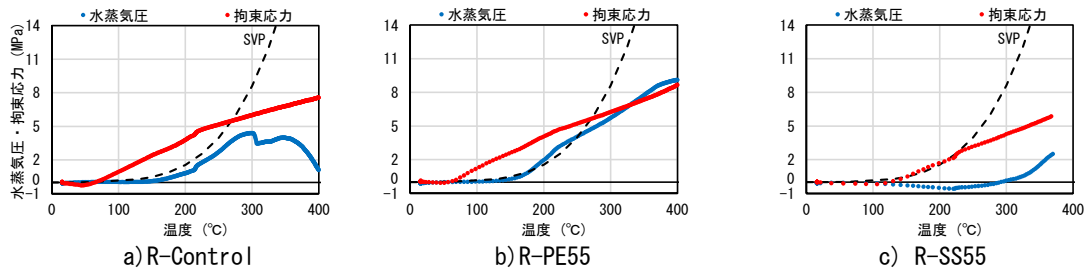


図-7 拘束応力と水蒸気圧および内部温度(10mm位置)

$$\sigma_{ye} = \varepsilon_{\theta} \cdot E_s \cdot t / R$$

$\sigma_{ye}$  : コンクリートに生じる拘束応力

$\varepsilon_{\theta}$  : リング円筒方向ひずみ

$E_s$  : リング材弾性係数

$t$  : リング材厚み

$R$  : リング材内径

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 加熱面の性状

図-3 に加熱試験後におけるリング拘束供試体の加熱面の損傷状況の結果を示す。R-Control では亀甲状のひび

割れが生じた。一方、R-SS55 において爆裂が発生した。最大爆裂深さは 17.3 mm であった。これは、PC 鋼材と SS 管およびグラウトが一体化して剛性が高く拘束が大きいいため、加熱による拘束応力の増加と急激な水蒸気圧の上昇により、爆裂が生じたと考えられる。R-PE55 は爆裂が発生せず、亀甲状のひび割れが生じた。加えて、供試体の上面には PC 鋼材に沿ったひび割れが生じたことを確認した。爆裂が生じなかったのは、PE 管が熔融し、体積変化による膨張圧が高まるものの、グラウトに熱損傷が生じ、ひび割れが入ることで剛性が低下したためであると考えられる。次に、PC 鋼材の端部の状況を説明する。加熱試験直後に、ナットを緩めグラウトとシースの状況を確認した。R-SS55 はグラウトに放射線状のひび割

れが発生した。一方、R-PE55 はナットを緩めた瞬間、加熱試験で溶融した PE 管が液体状となって噴出した。グラウトは加熱に伴って放射線のひび割れが生じていた。なお、亀甲状のひび割れや微細なひび割れは近接目視で確認できる。

### 3.2 供試体内部温度の経時変化

図-4 に炉内温度および供試体内部温度の経時変化を示す。併せて、破線で爆裂発生推定時刻を示す。なお、R-SS55 において、10mm 位置のデータに 5 mm 位置のデータが重なってしまったのは、熱電対の設置時に位置がずれていた可能性が考えられる。全体の傾向として、炉内と供試体表面の温度は、加熱に伴い低下した。これは、加熱に伴いコンクリート供試体への熱伝達、コンクリート中の自由水が蒸発する際の蒸発潜熱への影響が考えられる。表面温度は 800°C 付近に収束していることがわかる。加熱面の近い位置より温度が上昇する傾向となっている。5 mm 位置の温度は約 600°C 付近に収束していることがわかる。R-Control と R-PE55 は爆裂が生じていないため、急激な温度変化は見られない。

R-SS55 は、加熱面から 5 および 10 mm 位置の温度が加熱後約 5 分で、急激に上昇した。この時点で爆裂が生じ、5 mm と 10 mm に設置した熱電対が炉内に曝されたことを示すものである。炉内と供試体表面温度も急激に増減が確認できる。内部温度の変化から鋼製管では、爆裂の発生は 1 度のみであった。

### 3.3 拘束応力の経時変化

図-5 に拘束応力の経時変化を示す。ここでは、拘束応力の算出する際に用いたひずみゲージの許容温度が 80°C であるため、許容温度範囲内のデータを用いた。全体の傾向として、加熱面に近い 5 mm 位置から拘束応力が大きくなった。これは、加熱領域のコンクリートが加熱に伴う熱伝導によって熱膨張し、この変形を鋼管が拘束することで拘束応力が生じるためである。5 mm 位置における拘束応力の最大値は R-Control と R-PE55 それぞれで 10 MPa と 12 MPa であった。R-SS55 は加熱の継続によって拘束応力が増加するが、爆裂が生じた瞬間に拘束応力が一時的に低下した。その後、加熱の継続により、拘束応力が増加する傾向を示した。

### 3.4 水蒸気圧の経時変化

図-6 に水蒸気圧の経時変化を示す。併せて、R-SS55 には爆裂発生推定時刻を示す。全体の傾向として、加熱面に近い 5、10 mm 位置の水蒸気圧は加熱に伴い急激に上昇し、低下する傾向を示した。特に R-SS55 は爆裂が発生した時間付近で、水蒸気圧の急減が確認できる。40 mm 位置では、R-Control と R-SS55 において水蒸気圧の上昇は確認できるが、急激な低下は見られず、緩やかに低下する傾向を示した。5 mm と 10 mm 位置における水

蒸気圧の最大値の範囲は 2.5 MPa~9 MPa であった。

### 3.5 内部温度と拘束応力および水蒸気圧の関係

図-7 に加熱面から 10 mm 位置の拘束応力と水蒸気圧および内部温度の関係を示す。併せて、飽和水蒸気圧曲線（以下、SVP）を示す。Ichikawa ら<sup>8)</sup>はコンクリート内部の水蒸気圧と温度変化について、考察を行っている。すなわち、SVP を境界として左側を過飽和領域、右側を不飽和領域としている。R-Control は加熱に伴う温度上昇によって、水蒸気圧が上昇し、260 °C 付近で低下した。これは、加熱により内部温度が上昇し、水分が蒸発して水蒸気圧が増加するが 260 °C 付近で、拘束応力に起因するマイクロクラックが発生すると推察され、内部に蓄積されていた水蒸気圧が低下したと考えられる。R-PE55 は 240 °C まで水蒸気圧が SVP に沿って上昇しており、10



図-8 加熱後のリング供試体の損傷状況

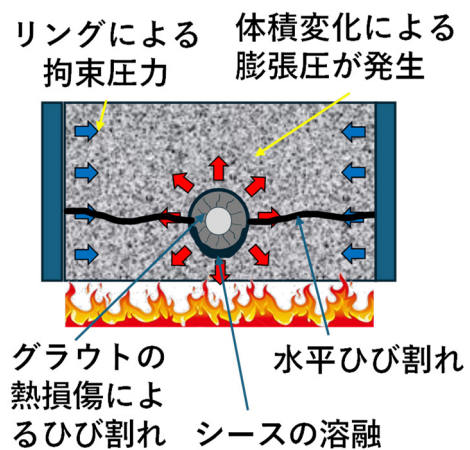


図-9 PE シースの溶融と損傷

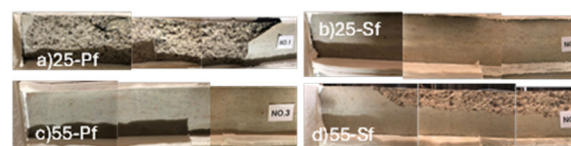


図-10 加熱面の損傷状況(PC はり)<sup>4)</sup>

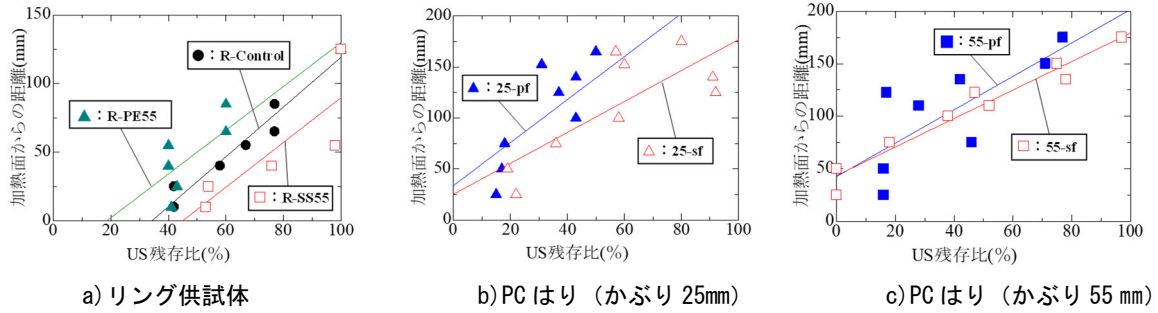


図-11 加熱後の US 残存比

mm 位置が飽和状態であることがわかる。R-SS55 は 300 °C 以降で水蒸気圧の上昇が見られた。

### 3.6 加熱後の損傷状況

図-8 に加熱後の試験体の損傷状況に示す。加熱試験が終了した供試体について、側面の拘束リングを切断し内部コンクリートの損傷状況を確認した。なお、微細なひび割れは近接目視で確認できる。R-Control と R-SS55 は、供試体側面部にひび割れ確認できなかった。一方、R-PE55 は加熱面から 65 mm 位置で、PC 鋼棒が配置されている付近に、水平ひび割れが確認できた。また、シースから上面においても縦方向のひび割れが確認できた。これらのひび割れ発生に関しては、下記の 2 点が考えられる。すなわち、①加熱に伴う PE 管の熔融、液体となった PE が熱膨張することで、コンクリートに引張応力が発生する。②加熱の継続により、グラウトも加熱され、グラウト内部の自由水が蒸気圧となることでコンクリートに引張応力が作用することが考えられる(図-9)が、今後さらに検討が必要である。

次に、供試体を割裂し破断面とシースの損傷状況を確認した。R-Control は加熱面から 40 mm 位置までが黄土色に変色し 40 mm から 90 mm 位置では白色に変色していた。黄土色に変色したのは、200 °C 以上の熱を受けたため<sup>9)</sup>であると考えられる。また、40 mm から 90 mm まで白色に変色したことを確認した。白色に変色したのは、コンクリート内の水分が蒸発し、150 °C 以上でセメント中のカルシウム化合物が分解して白色のカルシウム塩が表面に現れたためである<sup>9)</sup>と考えられる。R-SS55 は爆裂面から 40 mm まで黄土色に変色したことを確認した。また、SS 管下部が黒く変色したことを確認した。これは、300 °C 以上の熱を受け、表面の鉄分が酸化して酸化鉄が形成された<sup>9)</sup>ためであると考えられる。R-PE55 は加熱面から 40 mm まで黄土色に変色したことを確認した。加えて、PE 管下部が溶解し変形していることが確認できた。次に採取したシースの損傷状況を確認した。R-SS55 は鋼製シースに大きな損傷や変形は見られなかった。一方、R-PE55 は、PE シースの加熱面側が熔融によってコンクリートが付着し、一部溶解した痕が確認できた。

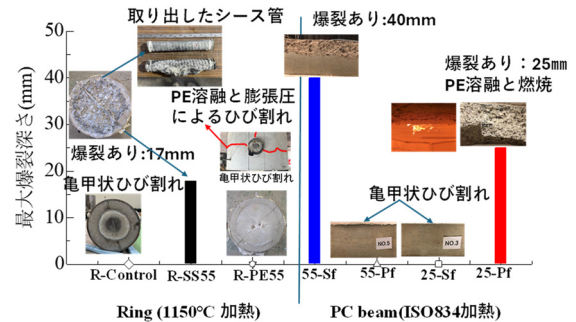


図-12 最大爆裂深さと損傷の特徴 (リング供試体と PC はり試験体)

### 3.7 シースの種類が加熱時の損傷性状に与える影響

ここでは、リング拘束加熱試験と PC はりの加熱試験結果をもとに、シースの種類が爆裂に与える影響を考察する。白石ら<sup>4)</sup>は、2 種類のシースとかぶり厚を実験因子として、PC はり試験体の加熱試験を実施した。概要を以下に示す。試験体の種類はかぶり厚とシースの種類より、4 種類としている。a)25-Pf(かぶり 25 mm, PE 管), b)55-Pf(かぶり 55 mm, PE 管), c)25-Sf(かぶり 25 mm, SS 管), d)55-Sf(かぶり 55 mm, SS 管)とし、加熱は ISO834 で 90 分間とした。加熱によって 25-Pf のシース表面の温度は 600 °C まで達しているとしている。この試験体の加熱後の超音波伝搬速度比(以下、US 比)と爆裂の有無について考察する。

図-9 に PC はりの加熱面<sup>4)</sup>の状況を示す。リング供試体(図-3)は R-SS55 は爆裂が生じ、爆裂深さは 17.3 mm であった。R-Control と R-SS55 は亀甲状のひび割れが確認できた。PC はりは 25-Pf で爆裂が生じコンクリート内部の PE 管が気化して燃焼した。爆裂深さは 25 mm であった。55-Sf も爆裂が生じ、爆裂深さは 40 mm であった。そのほかは爆裂が生じず、亀甲状のひび割れが生じた。

図-10 に本実験で実施したリング供試体の断面内の US 比と白石らが実施した PC はりの US 比分布を示す。US 比は、リング供試体では加熱面から 125 mm 位置の US 値との比率とした。PC はりは、加熱なしの PC 試験体の US 値を規準とした。断面内の US 比をもとに、1 次関数により最小二乗近似した直線を併せて示す。ここで、

図-10 a)の緑色の線は青色(R-PE55)の近似線である。全体の傾向として、加熱面に近いほど、US 残存比は低下していることがわかる。これは、加熱面に近いほど、高温に曝されることでセメント水和生成物の脱水分解とひび割れが生じたことが影響していると考えられる。

リング供試体では R-Control, R-SS55, R-PE55 ともに US 比の最小値は 40~50%の範囲であった。爆裂が生じた R-SS55 よりも R-PE55 の方が全体的に US 値は低い傾向にある。これは、PE 管の熔融によって、内部にひび割れが生じたことが影響したと考えられる。PC はりのシリーズは、リング供試体よりも US 残存比が低い。これは、ガス炉を使用し ISO834 加熱曲線で加熱したことで出力が高いため、PC はりの深部まで加熱損傷が大きいことがわかる。

図-11 にリング供試体と PC はり試験体について最大爆裂深さと加熱損傷の特徴を比較した。PC はりは、PE 管を使用しかぶりが 25 mm の 25-Pf で爆裂が生じた。これは、かぶりが十分ではなく PE 管の熔融と気化時の膨張圧が爆裂に影響したと考えられる。爆裂後は、PE 管が気化して燃焼していることが確認されている。SS 管を使用した 25-Sf では爆裂は生じず、加熱面に亀甲状のひび割れが生じたのみであった。かぶり 55 mm の場合で PE 管を用いた 55-Pf は爆裂が生じなかった。加熱によって、PE 管の熔融は生じると考えられるが、かぶりが 55 mm あることで爆裂が抑制できたと考えられる。一方、SS 管を使用しかぶりが 55 mm ある 55-Sf は、深さ 40 mm まで爆裂が生じた。これは、①かぶりが大きいこと、②プレストレスが導入されていること、③PC 鋼棒と SS 管およびグラウトが一体化されて剛性が高いことにより、爆裂が激しくなったと考えられる。

リング拘束供試体では、シースと PC 鋼棒を配置した水準ではかぶりを 55mm に設定した。SS 管を使用した R-SS55 で、PC はりと同様に爆裂が生じる結果となった。今回はプレストレスを導入しておらず、ナットで固定したのみであったが、SS 管と PC 鋼棒およびグラウトで一体化され剛性の高い状態で、加熱表面を 1050°C で加熱したことで、爆裂が生じたものと考えられる。PE 管を使用した R-PE55 は爆裂が生じなかったが、コンクリート内部に水平ひび割れが生じ、PC 鋼棒の端部ナットを外した瞬間に熔融した PE の噴出が確認できた。加熱後、加熱面には亀甲状のひび割れが確認できた。加熱表面からは確認できない損傷が内部で生じる可能性が示唆された。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) PE 管を使用した水準では、加熱時に爆裂が生じなかったが、PE が熔融し、噴出することを確認した。
- 2) PE 管を使用した水準において、加熱後の確認をした結果、加熱面に対し、水平方向にコンクリートのひび割れが発生していることを確認した。

以上より、火災により PE 製シース管を使用したポストテンション方式の PC 部材では、加熱時に PE が熔融し、コンクリートにひび割れが発生する可能性があるため、今後さらに検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) N.H. Yi, S.J. Choi, S.W. Lee, J.H.J. Kim : Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading, Fire Safety Journal, Vol.71, pp.123-133, 2015.1
- 2) 中村光ほか: コンクリートを学ぶ-構造編-, 理工図書, 2021
- 3) 白石真由奈, 東洋輔, 旭澤広輝, 小澤満津雄: ポストテンション方式 PC 部材の火害性状および耐火性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.865-870, 2024.6
- 4) 白石真由奈, 東洋輔, 旭澤広輝, 小澤満津雄: ポストテンション方式 PC 部材の火害性状および耐火性能評価, プレストレストコンクリート工学会, 第33回シンポジウム論文集, pp. 371-376, 2024.10
- 5) M. Ozawa, K. Fujimoto, H. Ikeya : Comparison of fire spalling behaviours between ring-restraint and prestressed concrete specimens during fire, Cement and Concrete Composites, Vol.126, February 2022, 104341
- 6) 橋田美知花, 池谷拓由紀, 藤本謙太郎, 小澤満津雄: 火災時における天然繊維混入 PC はりの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集 pp.730-735, Vol.43, No.1, 2021
- 7) T Timoshenko, S W. Krieger : heory of plates and shells: Bending moments in a simply supported rectangular plate with a concentrated load, 1959
- 8) Ichikawa, Y. and England, G.L.: Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperature, Nuclear Engineering and Design, Vol.228, Issues 1-3, pp.245-259, Mar.2004
- 9) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, 2017.3