# 論文 火災時におけるプレストレストコンクリート部材の爆裂挙動

藤本 謙太郎<sup>\*1</sup>·小澤 満津雄<sup>\*2</sup>·山本 哲<sup>\*3</sup>·谷辺 徹<sup>\*4</sup>

要旨:火災による高温の影響を受けた場合の PC 梁の挙動,加熱条件の違いにより PC 部材に生じる挙動の違いを把握することを目的に PC 梁の一面加熱による耐火試験を行った。実験の結果,加熱初期に爆裂が生じて 導入プレストレス量が減少して行く過程を確認することができた。さらに,高温環境下におけるコンクリートの爆裂評価手法を用いて PC 梁の爆裂挙動に関する検討を実施した。コンクリートの爆裂判定には引張ひずみ破壊モデルを適用した。その結果,PC 部材についてもプレストレスにより生じる初期圧縮ひずみの影響を 考慮することにより,爆裂初期の挙動が評価できる可能性を示した。

キーワード:プレストレストコンクリート,爆裂,導入プレストレス,引張ひずみ破壊

#### 1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下, PCと略)構造はコ ンクリートに初期圧縮力(以下, プレストレス)を導入し, コンクリートに生じる引張応力やひび割れ幅を制御する ことで幅広く利用されている。一方,火災時にはプレス トレスの影響により,爆裂が生じる危険性が鉄筋コンク リート(以下, RCと略)に比べて高いこと,導入プレスト レス力が大きいほど爆裂が生じる危険性が高いことなど が報告されている。<sup>1),2),3),4)</sup>しかし, PC 構造は, RC 構造 と同様に耐火構造であるという認識であることから,そ の耐火性に関する研究は活発ではないのが現状である。 既往の研究では,高強度コンクリートや PC 鋼材などの 各材料に関する高温時の挙動に関するものが多い。

PC 構造物はプレストレスによる拘束応力下のコンク リート構造という特異な点を有しており、火災時の挙動 は RC 構造物と異なることから、PC 構造物の耐火性につ いても検討を進めていくことは重要である。

そこで、本研究では PC 部材の火災時の爆裂性状と力 学的性状について確認するため、耐火試験を実施した。 加熱曲線は ISO834 加熱曲線と RABT30 加熱曲線を用い た。

# 2. 加熱試験

# 2.1 試験体

**表-1**に試験体に使用したコンクリートの示方配合と 圧縮強度および含水率を示す。含水率の測定は圧縮強度 試験と同一の試料で行った。すなわち,圧縮強度試験前 に試験体寸法および試験体重量を測定し,試験後に回収 した試料を 105℃の乾燥器で減量が恒量となるまで乾燥 させ,乾燥後の重量を測定して求めた。W/C は 33.5%と し,セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。 図-1 に試験体の形状寸法を示す。PC はりの試験体は, (幅)200mm×(高さ)160mm×(長さ)1500mm とした。PC 鋼 材には SBPR930/1080 φ17mm の PC 鋼棒を使用した。 軸方向鉄筋に D10(SD345)をスターラップに D6(SD295A) を用いた。試験体は,コンクリートを打設した翌日に脱 枠して,材齢3日間の湿布養生を実施し,その後は実験 室内で約 60 日間の気中養生とした。



表-1 コンクリートの示方配合と圧縮強度および含水率

水セメント比 (%)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		含水率*
			水	セメント	細骨材	粗骨材	材齢7日	加熱試験時	(%)
33.5	12.0	38.9	165	493	646	1045	75.7	86.3	5.07

\*1 (株) ピーエス三菱 東京土木支店 土木技術部 (正会員)

\*2 群馬大学大学院理工学府 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 群馬大学 理工学部 環境創生理工学科 学生 (学生会員)

\*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 耐火・機能性材料グループ グループリーダー 博士(工学) (正会員)

試験体へのプレストレスの導入は、コンクリートの圧 縮強度 30N/mm<sup>2</sup> 以上の強度が発現していることを確認 した後、材齢 2 日目に緊張した。PC 鋼材の初期緊張力は 113.5kN(約 2500 µ)とし、ロードセルおよび PC 鋼材に貼 付けしたひずみゲージにより導入緊張力の管理を行った。 プレストレス導入後、PC 鋼材とシースの空隙に PC グラ ウトを注入し一体化した。なお、弾性変形およびリラク セーションを考慮した導入プレストレスによるコンクリ ート応力は上縁側で 0.85N/mm<sup>2</sup>、下縁側で 4.68N/mm<sup>2</sup>と なるように設計を行った。

## 2.2 実験方法

# (1) 加熱試験装置

写真-1 に加熱試験に用いた高性能水平炉および試験 体設置状況を示す。加熱試験には,加熱試験面積が 900mm角のガス炉(高性能水平炉)を用いた。図-2に 断熱ブランケットの設置状況を示す。加熱試験は PC は りの支間中央部 500mm の範囲の下面1面加熱とし,加 熱面以外から吸熱が生じない様に耐熱ブランケットで試 験体を覆った。なお,ブランケットの設置は加熱面とな る PC 梁下面側で厚み 25mm を2 層とし,側面は厚み 25mm を1 層とした。

#### (2)測定項目

図-2 に PC はりの加熱試験における熱電対とひずみ ゲージおよび変位計設置位置の概要を示す。加熱試験で は、炉内温度とコンクリート内部温度および表面温度の 計測を実施した。内部温度と表面温度の計測には熱電対 を使用した。熱電対の設置位置は、支間中央部の加熱面 から5,10,20,40,60mm および125mm の位置に配置 した。また、PC 鋼材と鉄筋に常温用ひずみゲージ(許容 温度 80℃)を貼付けし、加熱時のひずみを計測した。ひ ずみゲージの計測値は測定位置付近の熱電対から計測し た温度を用いて、温度補正した。加熱時の変形挙動を確 認するために、支点部および支間中央の変位計測を実施 した。加熱試験中の爆裂状況は、水平炉の小窓より爆裂 片の飛散状況の観察および爆裂音より観察した。加熱試 験後,爆裂範囲と爆裂深さを厚み計によって,計測した。



写真-1 高性能水平炉および試験体設置状況

爆裂深さは、加熱範囲を中心に断面幅の6分割点を試験 体軸方向に5cm毎に計測した。

#### (3) 加熱条件

試験体の加熱条件は、2 水準とした。すなわち、ISO834 標準加熱曲線の1時間加熱(以下、ISO834)と RABT30 加 熱曲線(以下、RABT30)とし、各1体ずつ加熱試験を実施 した。図-3 に各加熱曲線における炉内温度の経時変化 を示す。ISO834 と RABT30 ともに概ね良好に加熱曲線 を再現できていることがわかる。



#### 2.3 加熱実験結果および考察

# (1) コンクリート内部の温度変化

図-4,5に ISO834 および RABT30 でそれぞれ加熱し た時の PC 梁支間中央部のコンクリート内部温度の経時 変化を示す。図-4より,ISO834 加熱試験では,加熱開 始後からコンクリート内部の温度が上昇している。加熱 開始 15分で加熱面から 5mm と 10mm 位置の温度が爆裂 の発生により,急激に上昇していることがわかる。また, 加熱面から 20mm 位置においても加熱から 20分で温度 の変曲点が確認でき,爆裂の発生によってかぶりが減少 したものと推察される。

図-5より, RABT30 加熱試験では,加熱開始4分経 過以降に加熱面から5,10,20mm 付近の温度が急激に 上昇し,各深さまで爆裂が進展したものと考えられる。 RABT30 では急速加熱のため,加熱直後から表層部が急 激に温度上昇し,表層部と内部に大きな温度差が生じて いることが分かる。

#### (2) PC 鋼材および鉄筋のひずみ

図-6, 図-7 に各加熱試験の PC 梁支間中央部の PC 鋼 材と鉄筋に生じるひずみの経時変化を示す。ひずみの正 の値が伸長,負の値が収縮を示す。図-6より,ISO834 加熱試験では,加熱面から深さ 60mm の位置にある PC



鋼材のひずみ(PC-1)は、加熱開始から熱膨張して爆裂開 始時に 300 µ となった。その後、爆裂とともにひずみが 減少した。

加熱面から深さ 46mm の位置にある鉄筋のひずみ (TL-1)は、PC 鋼材同様に熱膨張の影響により増加し、加 熱開始 10 分後に 250 µ となった。その後、爆裂が生じる 前にひずみが減少した。また、加熱面から深さ 116mm の位置にある鉄筋のひずみ(TU-1)は、加熱開始直後から 増加して爆裂開始前までに 100 µ となった。爆裂継続期 間はひずみの増加割合が小さくなるが、その後は再び増 加し最大 200 µ となった。

図-7 に示す RABT30 加熱試験では,加熱面から深さ 60mm の位置にある PC 鋼材のひずみ(PC-1)は,加熱開始 から熱膨張して爆裂開始時に 100 µ であった。爆裂開始 とともにひずみが減少し,爆裂継続期間中はひずみの減 少・増加を繰り返す挙動を示した。その後,ひずみが減 少した。

加熱面から深さ 46mm の位置にある鉄筋のひずみ (TL-1)は,加熱開始から爆裂開始前までに熱膨張により 220  $\mu$  膨張し,爆裂とともに減少した。加熱面から深さ 116mm の位置にある鉄筋のひずみ(TU-1)は,加熱開始後 から増加し最大 120  $\mu$  となった。



経過時間 (min) 図ー7 鉄筋・PC 鋼材ひずみの経時変化(RABT30) 全ての試験において、加熱直後から加熱に伴う熱膨張 変形が鉄筋および PC 鋼材に生じ、爆裂の発生とともに ひずみが減少する傾向を示した。主桁断面内の温度勾配 により生じた拘束応力が爆裂の発生により解放されたも のと推察される。特に、ISO834 加熱試験(図-6)では、1 回目の爆裂の発生と同時に大きくひずみが減少しており、 内部拘束により溜めこまれていた拘束応力が一気に解放 されている。一方、RABT30 加熱試験(図-7)では、PC 鋼 材のひずみが爆裂発生から減少と増加を繰り返しており、 小さな爆裂が継続的に発生し、内部拘束による拘束応力 が解放されていたものと推察される。

図-8に試験体端部から275mm離れた非加熱領域にお ける PC鋼材ひずみの経時変化と支間中央のPC鋼材位置 の温度変化を示す。端支点側の PC 鋼材ひずみ計測位置 の温度は ISO834 加熱試験で 15~77℃, RABT30 加熱試 験で 14~46℃であり,温度変化の影響はほとんど受けて いない。しかし,全ての試験体において PC 鋼材ひずみ が減少し,ISO834 加熱試験では最大 400  $\mu$ , RABT30 加 熱試験では最大 1700  $\mu$  程度ひずみが減少した。支間中央 の PC 鋼材位置の温度は ISO834 が 262℃, RABT30 が 359℃であった。PC 鋼材の受熱温度が高い試験体ほど, ひずみの減少量が大きくなった。また,PC 鋼材の受熱温 度が 200℃を超えるあたりから急激に PC 鋼材ひずみが 減少した。

加熱により, PC 鋼材ひずみが減少し収縮していること から,加熱前に導入したプレストレス量が減少している ものと推察される。要因として,高温の影響によるコン クリートの剛性低下や爆裂による断面減少に伴うプレス トレスの損失, PC 鋼材の高温時強度特性の影響などが考 えられる。今後, PC 梁の載荷試験を実施し,加熱後の強 度特性などを更に検討する予定である。

#### (3) 変形挙動

図-9 に支間中央部の変位の測定結果を示す。変位量 は正の値が下反りの変形,負の値が上反りの変形を示す。 加熱面の温度が上昇するにつれて,試験体は下向きに凸 の変形が生じ,ISO834は最大2.4mm,RABT30では3.0mm の変形が生じた。その後,温度の降下に合わせて変形量 も小さくなり,常温まで降下させた時には最終的に上向 きの残留変位が生じた。爆裂により PC はり下面側の断 面が失われたことにより,PC 鋼材偏心量の増加や断面剛 性の低下の影響によるものと推察される。

#### (4) 爆裂状況観察結果

図-10に、各試験の爆裂深さの最大値とコンクリート 内部に埋め込んだ熱電対の温度計測結果より推定した、 爆裂深さの経時変化を示す。加熱領域の熱電対の計測値 が急激に上昇した時間を爆裂発生時間とした。爆裂最大 深さは ISO834 加熱試験で 26.6mm, RABT30 加熱試験で



図-8 PC 鋼材ひずみの経時変化と受熱温度履歴







(b) RABT30 加熱曲線 写真-2 加熱試験後の試験体外観状況

は 32.9mm であった。また,爆裂継続時間は, ISO834 で 8.3 分, RABT30 で 4.2 分であった。写真-2 と図-11, 12 に爆裂状況と爆裂深さを示す。加熱範囲全面に爆裂が 生じ, RABT30 で加熱した供試体はスターラップが露出 した箇所があった。

# 3. PC 梁の爆裂深さの推定に関する検討

ここでは、谷辺ら<sup>5)</sup>が提案した爆裂深さを引張ひずみ 破壊モデルにより推定した。外部拘束を受けない梁部材 が底面より急加熱を受けた場合、コンクリート内部の温 度分布は非線形分布となる。熱膨張ひずみの分布は直線 上にはならないが、梁部材には曲げ変形が生じ、実際の ひずみ分布は直線となる。平面保持の法則が成り立つも のと仮定した場合、部材内の非線形温度分布によるひず みが拘束され部材には拘束応力が生じる(図-13)<sup>6</sup>。

そこで,得られた実験結果より,非線形温度分布によ る拘束応力を算出し,提案されている引張ひずみ破壊モ デルを用いて PC 部材の爆裂深さの推定に関する検討を 実施した。

# 3.1 非線形温度分布による拘束応力ひずみの算出

非線形温度分布により生じる拘束ひずみは,式(1),(2) を満たす直線 ( $\varepsilon = \varepsilon_0 + \phi_0 \cdot y$ ),つまりこの直線とこの温 度分布により生じる自由膨張ひずみ曲線とで囲まれた面 積の差し引きが等しくなる直線と,自由膨張ひずみ曲線 との差により求めることができる。なお,本研究では鋼 材とコンクリートのヤング係数が異なる影響は,推定結 果に与える影響が小さいことから無視している。

$$\int (\alpha T - \varepsilon_0 - y \cdot \phi_0) dA = 0 \tag{1}$$

$$\int (\alpha T - \varepsilon_0 - y \cdot \phi_0) y dA = 0$$

ここに、
$$\alpha$$
:コンクリートの線膨張係数(10<sup>-3</sup>/C)

 $\varepsilon_0: 軸ひずみ$ 

- $\phi_0$ :曲率
- y:基準点からの距離



# 3.2 引張ひずみ破壊指標( $I_{\varepsilon-f}$ )

非線形温度分布により部材に生じる拘束応力は加熱面 に平行に生じるが、見かけのポアソン効果により面外方 向に引張ひずみ( $\varepsilon_y$ )が生じる。この面外方向に発生する 引張ひずみが引張破壊ひずみ( $\varepsilon_{t-f}$ )を超えると爆裂が生 じると仮定し爆裂深さの推定を行った。引張ひずみの算 出式を(3)~(7)に示す。本研究の梁軸直角方向に生じるひ ずみが微小であることから、谷辺らの研究を適用するに あたり、鉛直方向に生じる面外直ひずみの算出方法を(4) 式とした。なお、見かけのポアソン比と引張破壊時のひ ずみは道越らの研究を参考に仮定した<sup>7</sup>。

$$\varepsilon_x = \varepsilon_T + \varepsilon_{pl} \tag{3}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_x \cdot \upsilon \tag{4}$$

$$\varepsilon_{\varepsilon-f} = \varepsilon_y / \varepsilon_{t-f} \ge 1.0 \tag{5}$$

$$\varepsilon_T = (\alpha T - \varepsilon_0 - y \cdot \phi_0) \tag{6}$$

$$\varepsilon_{pl} = \left(\frac{P}{A} + \frac{P \cdot e}{Z(y)}\right) \cdot \frac{1}{Ec} \tag{7}$$

ここに、 $\varepsilon_x$ : 面内直ひずみ(梁軸方向)  $\varepsilon_{pl}$ : プレストレスによる圧縮ひずみ  $\varepsilon_T$ : 熱応力による拘束ひずみ P: プレストレス力

(2)

- e: PC 鋼材の偏心量
- A,Z:部材の断面積および断面二次係数
- Ec:コンクリートのヤング係数
- *ε*<sub>y</sub>: 面外直ひずみ(梁鉛直方向)
- v:見かけのポアソン比(0.30)
- *ε<sub>t-f</sub>*:引張破壊ひずみ(200µ)
- $I_{\epsilon-f}$ :引張ひずみ破壊指数

### 3.3 爆裂深さの推定

図-14 に各加熱試験における爆裂開始時と終了時の 支間中央の温度分布状況を示す。非線形温度分布による 熱応力ひずみは、主桁断面内の温度分布がn次の放物線 によりあらわされるものと仮定して算出した。爆裂発生 時のコンクリート温度が 250℃程度、加熱試験実施時の 圧縮強度が 86.3N/mm<sup>2</sup>であることから、見かけのポアソ ン比を 0.30、引張破壊ひずみを 200 µ と仮定し、各加熱 試験の爆裂深さの推定値を求めた。

図-15 に算出結果を示す。ISO834 供試体の爆裂開始 時の推定値は10.7mm,終了時では28.3mm であった。実 験値はそれぞれ,10.0mm,26.6mm であり,推定値が実 測値より若干大きな値を示した。RABT30 供試体の爆裂 開始時,終了時の推定値はそれぞれ 8.2mm,32.9mm で あり,実測値は5.0mm,32.9mm と爆裂終了時はほぼ近 似した値であった。

PC 部材についても引張ひずみ破壊モデルを用いるこ



とにより,ある程度の精度で爆裂深さの推定を行うこと が可能であった。加熱によるプレストレスの減少,爆裂 や拘束応力により断面内に発生したひび割れの影響,各 材料の高温時の影響を考慮し,爆裂深さの推定精度を向 上する必要がある。

# 4. まとめ

本検討の範囲において以下の知見が得られた。

- (1)加熱面に近くに配置された鉄筋・PC 鋼材のひずみは 加熱開始から熱膨張して爆裂とともにひずみが減少 する。
- (2) ISO834 では, 爆裂とともに PC 鋼材のひずみが減少し たが, 急速加熱となる RABT30 では爆裂計測期間中は ひずみの減少・増加を繰り返すような挙動を示す。
- (3) PC 鋼材の受熱温度が高いほど, PC 鋼材ひずみの減少 が大きい。
- (4) 加熱試験中の PC 梁の挙動は, 温度勾配の影響により 下向きに凸の変形となった。その後, 温度の降下とと もに変形は元に戻り, 最終的に上向きに凸の残留変位 が生じた。
- (5) 引張ひずみ破壊モデルを用いて爆裂深さの推定を試みた結果, PC 部材についても、ある程度の精度で爆裂深さを推定できる可能性を示した。

# 参考文献

- 斎藤光: プレストレストコンクリート部材の爆裂に ついて、日本建築学会論文報告集, pp.688, 1966.10
- (社)日本建築学会:プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, pp.463-473, 1998.11.
- 吉田正友: プレストレストコンクリート構造の耐火 性に関する研究の動向, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.63, No.8, pp.571-581, Aug.2014
- N.H. Yi, S.J.Choi, S.W.Lee, J.HJ.Kim : Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading, Fire Safety Journal, Vol.71, pp.123-133, 2015
- 5) 谷辺徹,小澤満津雄,鎌田亮太,内田裕市,六郷恵 哲:高温環境下での高強度コンクリートの耐爆裂性 評価における爆裂発生指標の提案,土木学会論文集 E2, Vol.70, No.1, pp.104-117, 2014
- 田辺忠顕:マスコンクリートの温度応力制御技術の 現状,土木学会論文集,第 372 号, V-5, pp.1-15, 1986.8
- 7) 道越真太郎,小林裕,黒岩秀介:圧縮力を受けるコンクリートの高温時におけるひずみ挙動,日本建築学会構造系論文集,第621号,pp.169-174,2007.