

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04651

研究課題名（和文）爆裂の影響を考慮したプレテンションPC桁の火災被災後の耐荷力評価

研究課題名（英文）Evaluation of residual load carrying capacity of pre-tensioned prestressed concrete girders after a fire considering the effect of explosion of concrete cover

研究代表者

井上 晋（Inoue, Susumu）

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：30168447

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：PC鋼材の最高受熱温度が、冷却後の残存強度が低下する目安となる400℃まで到達せず、コンクリートの爆裂がPC鋼材に達しない限り、通常の外部火災では部材の顕著な耐荷力低下が生じる可能性は少ない。一方で、900℃を超えるような油火災を受け、残存かぶり量が20mmより少なくなるような状況では、鋼材強度の低下を適切に評価する必要がある。

本研究では、爆裂後の残存かぶり量とPC鋼材の最高受熱温度の関係、最高受熱温度とPC鋼材の残存強度の関係を示すことができた。PC鋼材の最高受熱温度を解析的に求めることができれば、本研究成果を用いて火災被災後のPC桁の残存耐荷力を評価できる可能性を見出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火災被災後のプレテンションPC橋の的確な健全性評価に際しては、爆裂の影響（深さ・範囲等）を考慮することが重要である。本研究では、爆裂後の残存かぶり量とPC鋼材の最高受熱温度の関係、PC鋼材の最高受熱温度と残存強度の関係を示すことができた。これにより、火災の種類と被災後の残存かぶり量からある程度の残存耐荷力評価が可能となるとともに、爆裂を考慮した熱伝導解析等によりPC鋼材の最高受熱温度を計算で求めることができれば、本研究成果を用いてより精緻な評価が可能となる点に学術的・社会的意義が存在すると考えている。

研究成果の概要（英文）：Unless the maximum temperature of prestressing steels reaches 400℃, which is a guideline for reducing the residual strength after cooling, and the explosion of concrete does not reach the prestressing steels, the load carrying capacity of the member will not be significantly reduced under a normal external fire. On the other hand, it is necessary to appropriately evaluate the decrease in steel strength in situations where the remaining cover is less than 20 mm after being subjected to a hydro-carbon fire with temperatures exceeding 900℃. In this study, the relationship between the residual cover after explosion and the maximum temperature of the prestressing steels, and the relationship between the maximum temperature and the residual strength of the prestressing steels are obtained. If the maximum temperature of prestressing steels can be obtained analytically, the results of this research could be used to evaluate the residual load carrying capacity of PC girders after fire damage.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：プレテンションPC桁 火災 耐荷力 爆裂 PC鋼材 最高受熱温度

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリート橋の火災による損傷は直接耐荷力に影響を及ぼすものの、受熱温度や受熱時間がある程度限定されること、適切な厚さのかぶり確保されている場合、コンクリート中鋼材の受熱温度はさほど上昇しないことなどから、コンクリートや鋼材そのものの高温履歴下の強度特性に関する研究を除き、部材の残存耐荷力に関してはこれまでほとんど研究がなされてこなかった。しかしながら、プレテンション PC 橋ではコンクリートと PC 鋼材の付着によってプレストレスが導入されているため、高温履歴による付着強度の低下にともなう導入プレストレスの減少や、かぶりコンクリートの爆裂・はく落による鋼材受熱温度の上昇が懸念され、火災直後の供用性の判定や補修・補強方法の選択に際しては、コンクリートや鋼材の受熱温度とともに、残存プレストレスや残存耐荷力・疲労特性に関する情報が必要となる。

本研究の代表者は、平成 23～25、26～28、29～31 年度の科研費による研究において、加熱後の PC 鋼材とコンクリートの残存付着特性、残存プレストレス、残存耐荷力や疲労特性を検討するとともに、補強工法に関する基礎的な検討を行ってきた。9 年間の研究を通じて、定着部が直接高温にさらされる可能性の少ない実橋においては、爆裂によるかぶりコンクリートのはく落に伴う鋼材温度の上昇が残存耐荷力に影響を及ぼす主要因と考えることができ、火災被災後のプレテンション PC 橋の的確な健全性評価に際しては、爆裂の影響（深さ・範囲等）を考慮することが必須であるとの認識のもと、本研究の計画・立案に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、実橋を想定したプレテンション PC 桁が火災を受けた場合、爆裂の深さ・範囲（加熱時間）と PC 鋼材の最高受熱温度の関係を明らかにし、その関係を用いて的確な残存耐荷力の評価を行うことを目的としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) かぶりと鋼材の最高受熱温度・残存強度の関係

実構造物での爆裂深さの影響を考慮し、加熱面からの PC 鋼材のかぶりを 10, 15, 20, 25, 30, 40mm と変化させた供試体を用いて PC 鋼材位置の受熱温度を測定し、かぶりと受熱温度の関係を求めるとともに、加熱試験後の供試体から PC 鋼材を取り出し、残存強度を測定することにより最高受熱温度と残存強度の関係を求めた。供試体には、φ12.7mm の 7 本より PC 鋼より線（SWPR7BL）を所定のかぶりに対応する位置に 3 本埋め込んだ 150×150×600mm の比較的小型のコンクリート供試体（コンクリートの設計基準強度  $f_{ck} = 50\text{N/mm}^2$ , W/C = 36%）を用いた。加熱は大型水平加熱炉を用いた一面加熱とし、加熱曲線は Eurocode に規定される最高温度を 700°C とした外部火災曲線（EX700）、最高温度を 900°C および 1100°C とした油火災曲線（HC900, HC1100）の 3 種類とした。また、加熱時間はいずれも 30 分とした。また、同時に小型電気炉を用いて、最高温度を 400～1100°C に変化させた PC 鋼材単体の加熱試験、同じ小型供試体を用いた加熱試験（最高温度、加熱曲線は大型水平加熱炉を用いたものと異なる）も実施し、PC 鋼材の最高受熱温度と残存強度の関係を求める際のデータとして用いた。

#### (2) JIS プレテンション PC 桁の加熱試験と静的載荷試験

平成 29～31 年度と同様の JIS プレテンション PC 桁（JIS-A-5373 に規定されるプレテンションスラブ橋げた（AS-05））を用いて、爆裂深さを変化させるために加熱温度（最高温度 700°C, 900°C）・加熱時間（30 分, 60 分）をパラメータとした加熱試験を実施し、実構造レベルでの鋼材受熱温度や爆裂状況を確認するとともに、その後の静的載荷試験により残存耐荷力を求めた。

### 4. 研究成果

図 1 に小型供試体の大型水平加熱炉による加熱試験から得られた PC 鋼材の最高受熱温度とかぶりの関係を示す。同図より、いずれの加熱温度においても、かぶりが大きくなるにつれて最高受熱温度はほぼ直線的に減少していくこと、いずれのかぶりにおいても最高受熱温度は加熱温度が高いほど大きくなることが確認された。

図 2 に加熱後の供試体から取り出した PC 鋼材の残存強度比（加熱しないものに対する強度比）と最高受熱温度の関係を、小型電気炉を用いた PC 鋼材単体の加熱試験、小型供試体の加熱試験から得られた結果と併せて示す。

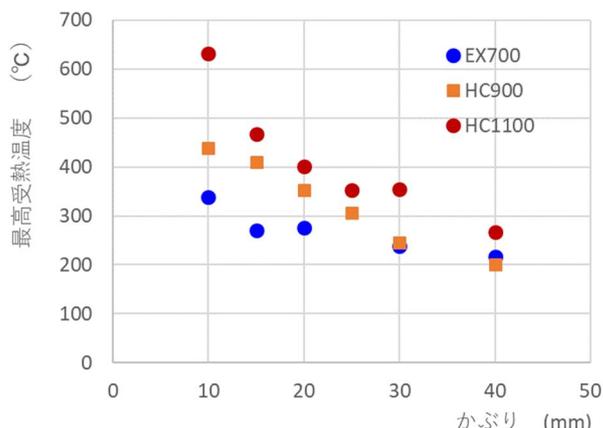


図 1 かぶりと最高受熱温度の関係

PC 鋼材のような高張力鋼は鉄筋のような普通鋼材と異なり、加熱冷却後の強度はある一定以上の高温履歴を受けると減少することが知られている。図2からわかるように、本研究で用いた PC 鋼材 (SWPR7BL) は、400 程度までは、冷却後の残存強度はほとんど低下しないこと、その後 700 程度までは最高受熱温度の増加とともに比例的に減少すること、700 を超え 1000 程度までは一定値 (0.4 程度) を保持し、1100 になるとさらに 0.3 程度まで減少することが確認された。なお、図中の実線はこれら傾向を近似的にモデル化したものである。

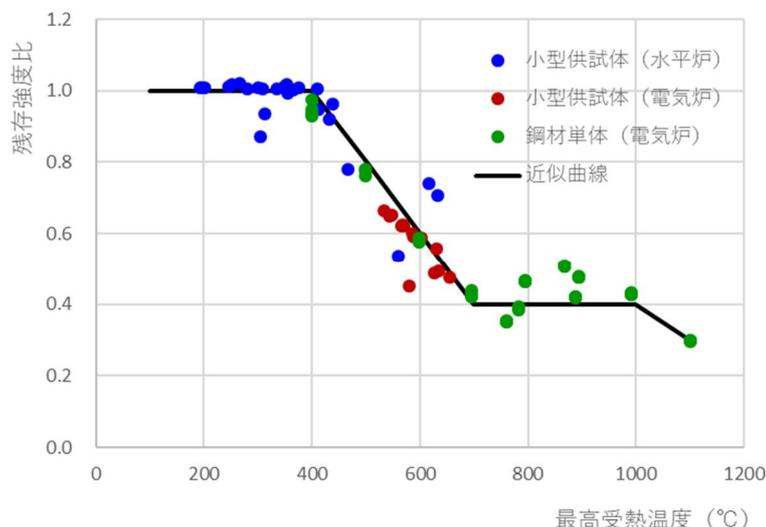


図2 PC 鋼材の最高受熱温度と残存強度比の関係

図1および図2を参照すると、爆裂後のかぶりの残りが20mm以上あれば、1100 30分の加熱を受けてもPC鋼材の最高受熱温度は400程度にとどまり、PC鋼材の残存強度はほとんど低下しないことから、実構造における耐荷力の低下はほとんどないものと考えてよい。一方で、爆裂による残るかぶりが20mm未満となると、900を超える油火災の場合はPC鋼材の強度低下を残存耐荷力の評価に考慮することが必要になると言える。一方で、最高温度が700までの一般の外部火災の場合は、爆裂による残るかぶりが10mmまで減少しても、30分程度の加熱では鋼材温度が強度低下を招く400まで達しないことから、耐荷力の低下はないと考えられる。

表1にPC桁の静的載荷試験結果の詳細を示す。静的載荷試験は全長5300mmに対し、曲げスパン1000mm、左右せん断スパン1850mmとした対称2点集中荷重載荷方式(せん断スパン有効高さ比 $a/d=6.17$ )とした。なお、表1に示すプレストレス残存率は加熱前後のPC鋼材と周囲のコンクリート間の相対変位量より求めるとともに、最大付着応力度残存率は既往の研究<sup>1)</sup>における最高受熱温度と最大付着応力度残存率の関係を内挿または外挿する形で求めた。また、PC鋼材強度低減係数は図2の実線で示される残存強度比とした。これらをもとに、終局時のPC鋼材引張りひずみを次式で計算し、土木学会コンクリート標準示方書に規定されるPC鋼材の応力-ひずみ関係に強度低減係数を考慮したうえで適用し、終局時のPC鋼材応力を求めた。なお、強度低下を考慮するPC鋼材はかぶりの爆裂状況を考慮し、最下段PC鋼材5本のうちの中央部の3本のみとした。

$$\varepsilon_p = \alpha \varepsilon_{pi} + \frac{\beta(d-x)}{x} \varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cpi}$$

$\varepsilon_p$  : 終局時のPC鋼材引張りひずみ

$\varepsilon_{pi}$  : 有効プレストレス力によるPC鋼材引張りひずみ

$\varepsilon_{cpi}$  : 有効プレストレス力による鋼材位置のコンクリートひずみ

$x$  : 中立軸

$\alpha$  : プレストレス残存率

$\beta$  : 最大付着応力度残存率

表1からわかるように、最高温度900で60分加熱したPC桁(60HC900)を除き、加熱したPC桁の最大荷重実測値は加熱しないもの(N)と比較してほとんど低下していない。これらのPC桁では最下段のPC鋼材の最高受熱温度が強度低下を招くような値に達していないことが

表1 PC桁の載荷試験結果

供試体名	加熱温度・時間	最大荷重 実測値 $P_{max}$ (kN)	曲げ破壊 荷重計算値 $P_u$ (kN)	$P_{max}/P_u$	加熱なし に対する 耐力比	圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	プレス レス残存 率 (%)	最大付着 応力度残 存率 (%)	PC鋼材最高 受熱温度 ( )	PC鋼材強度 低減係数
N	加熱なし	387.9	362.3	1.07	1.00	63.3	100	100	—	1.00
30EX700	700 -30分	399.4	347.9	1.15	1.03	62.5	92.6	36.6	196	1.00
60EX700	700 -60分	385.6	345.6	1.12	0.97	57.3	98.7	34.1	238	1.00
30HC900	900 -30分	377.1	346.2	1.09	0.98	57.3	99.7	34.8	224	1.00
60HC900	900 -60分	332.5	290.0	1.15	0.88	63.3	99.1	18.1	573	0.62

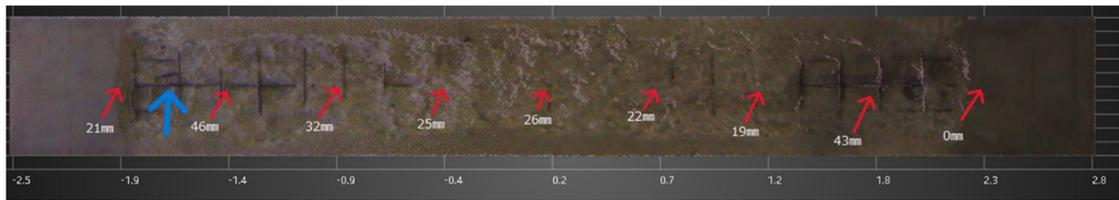


図3 加熱試験後の加熱面（桁下面）の爆裂状況（60HC900）

大きな理由である。なお、計算では加熱によるプレストレスの減少や付着強度の低下を考慮したが、PC 鋼材定着部が直接高温に曝されないような状況では、これらが残存耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、900 で60分加熱したPC 桁（60HC900）の残存耐力は加熱しないもの（N）と比較して12%程度低下した。いずれのPC 桁においても加熱時にかぶりコンクリートの爆裂が生じたが、加熱温度と時間の増加により他の加熱PC 桁と比べて爆裂深さが大きくなり、結果としてPC 鋼材の最高受熱温度（573）が鋼材低下を招く領域（400以上）に達したこと

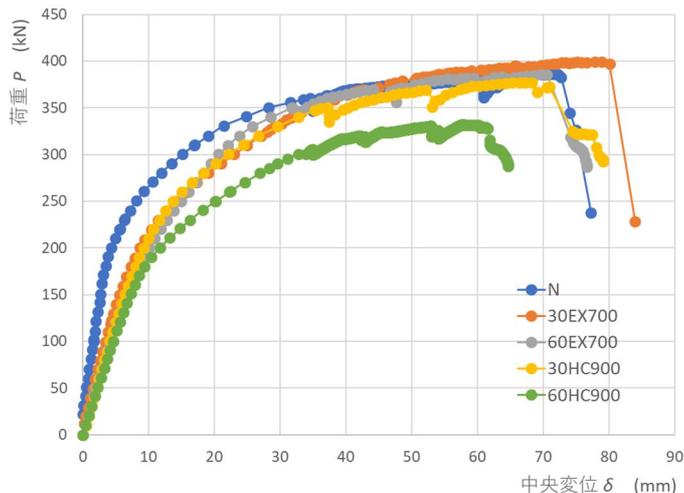


図4 PC 桁の荷重 - スパン中央変位曲線

によるものと考えられる。最終破壊形式はいずれもPC 鋼材降伏後に曲げ圧縮域コンクリートが圧壊する曲げ引張破壊となり、加熱の影響によるPC 鋼材の早期破断は確認されなかった。また、本研究で提案した方法により計算した曲げ破壊荷重計算値は実測値を10%程度安全側に評価できていることから、残存耐力の算定法として妥当なものであることが確認できた。

図3に耐力低下が顕著であったPC 桁（60HC900）の加熱後の桁下面の爆裂状況を示す。図に示すように、PC 鋼材の定着部に相当する両端650mm部分は直接加熱していないが、加熱部と非加熱部の境界近傍が最も激しく損傷し、その深さは60mmを超える箇所もみられた。一方で、鋼材の強度低下が耐力に及ぼす影響が顕著となるスパン中央部分では爆裂深さは25mm程度となっており、この近傍では残存かぶりが15mm程度以上確保されていたことになる。最下段のPC 鋼材のかぶりが44mm程度であることを考慮すれば、加熱境界部近傍では爆裂後PC 鋼材が直接高温に曝されていたことになるが、作用曲げモーメントが小さい領域であることから、耐力への影響は小さかったものと考えられる。また、加熱時の爆裂の特徴として、加熱温度が高いHC900の場合は爆裂範囲が断面横断方向の中央部分に集中する（図3参照）傾向があるのに対し、EX700の場合は、断面下縁側コンクリートが横断方向全幅にわたって爆裂・はく落する傾向が認められた。その理由については今後検討が必要であると考えている

図4にPC 桁の荷重 - スパン中央変位曲線を示す。図4に示されるように、高温加熱は荷重変位関係の初期剛性に大きな影響を与えることがわかる。前述のように900で60分加熱したPC 桁（60HC900）を除き、最大耐力はほとんど低下していない一方で、初期剛性は爆裂によるかぶりコンクリートのはく落や高温による微細なひび割れの発生により、加熱しないPC 桁と比較してかなり低下することがわかる。なお、その低下の度合いに最高加熱温度や加熱時間の影響が見取れる。

計画段階では、既存の熱伝導解析手法に爆裂の影響を考慮するプロセスの導入を試み、鋼材の最高受熱温度を推定するとともに、本研究で得られたPC 鋼材の最高受熱温度と残存強度の関係をj用いてPC 桁の残存耐力の推定を行う予定であったが、爆裂深さや範囲を解析で求めるためのデータの取得と解析プロセスの導入には至らなかった。しかしながら、爆裂後の残存かぶりと最高受熱温度の関係、最高受熱温度とPC 鋼材の残存強度の関係を示すことができ、これらを用いて火災被災後のPC 桁の残存耐力を評価することの実現可能性を見出せたことは大きな成果であると考えている。

<参考文献>

- 1) 菊本幸司, 横山直之, 井上晋, 三方康弘, 火災による高温履歴を受けたコンクリート中のPC 鋼より線の付着特性, 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 21巻, 2012年, pp.207-210

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 デニス, 三方 康弘, 井上 晋
2. 発表標題 プレテンションされたプレストレストコンクリートの残留耐力特性に及ぼす加熱温度と加熱時間の影響
3. 学会等名 土木学会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------