

## 火災による高温履歴がプレテンションPC桁の残存耐荷特性に及ぼす影響

大阪工業大学大学院 学生会員 ○越野 まやか  
大阪工業大学 正会員 工博 井上 晋

Abstract : In recent years, fire damages of bridges and viaducts have been reported. The final purpose of this study is to confirm structural characteristics of fire damaged pre-tensioned prestressed concrete girders and reinforcing effect of them. In this study, the residual load carrying capacity of prestressed concrete girder after a fire was examined. In the case of heating up to 1100°C, the cover concrete damaged significantly. During the heating test, the concrete of the bottom surface exploded and spalled off. As a result, the strength of several prestressing steels decreased and some of them finally broke during the loading test. The maximum load carrying capacity decreased approximately 30 % due to the influence of heating. However, the residual load carrying capacity can be estimated on a safe side by the detailed estimation adapted in this study.

Key words : Fire resistance, Residual load carrying capacity, Loss of prestress, Bond strength

## 1. はじめに

近年、橋梁の火災事例が比較的多く報告されている。コンクリート橋においては、ひび割れの発生や爆裂によるコンクリートの剥落という損傷は生じるものの、かぶりが鋼材を保護する性能を有することから、鋼橋と比較して致命的な損傷に至る可能性は少ないと考えられてきた。しかしながら、守口高架橋の火災事例<sup>1)</sup>にみるように、プレテンションPC橋が火災を受けた場合、かぶりコンクリートの強度低下や爆裂によるコンクリートの剥落が残存プレストレスや耐荷性能に及ぼす影響に関する知見は必ずしも多くはなく、プレテンションPC橋の火災に対する性能およびその照査法を再検討する必要性が高まっている。このような背景の下、著者らは火災による高温履歴がコンクリートとPC鋼材の付着特性やプレテンションPC桁の残存プレストレスおよび残存耐荷特性に及ぼす影響ならびに被災後の補強方法について検討してきた<sup>2)~4)</sup>。これらの成果は比較的小型の供試体の試験結果に基づくものであったが、本研究で、実構造に用いられるJISプレテンションPC桁を対象とし、その火災被災後の各種構造特性と補強効果を確認することを最終目的とし、まず、最高温度を1100°Cに設定した油火炎を対象とした炭化水素曲線(HC曲線)を用いた加熱試験を実施した。その後、加熱試験を実施した供試体および健全な供試体についてそれぞれ静的載荷試験を行い、火災による高温履歴を受けたPC桁の残存耐荷特性について検討した。

## 2. 供試体概要

供試体は図-1, 2に示すような、上幅640mm, 下幅700mm, 全長5300mm, かぶり50mmのプレテンションPC桁(JIS A 5373 に規定されるプレテンションスラブ橋PC桁(AS 05))とし、計8体作製した。また、PC鋼材にはφ12.7の7本よりPC鋼より線を使用し、コンクリートの設計基準強度は $f_{ck}=50\text{N/mm}^2$ とした。導入プレストレスは上縁で $\sigma'_{ct}=0.3\text{N/mm}^2$ , 下縁で $\sigma_{ct}=9.4\text{N/mm}^2$ である。また、各供試体に加熱試験

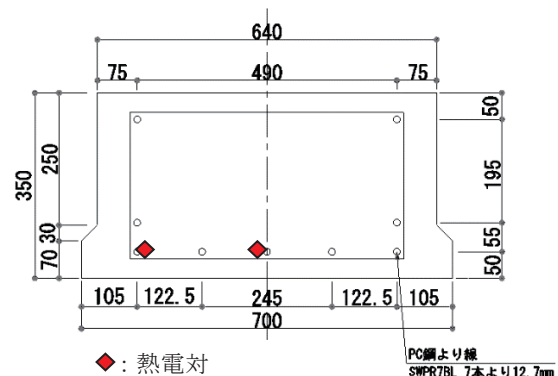


図-1 PC桁断面図

時のPC鋼材の受熱温度を測定するための熱電対を設置した。その位置を図-1, 2に示す。

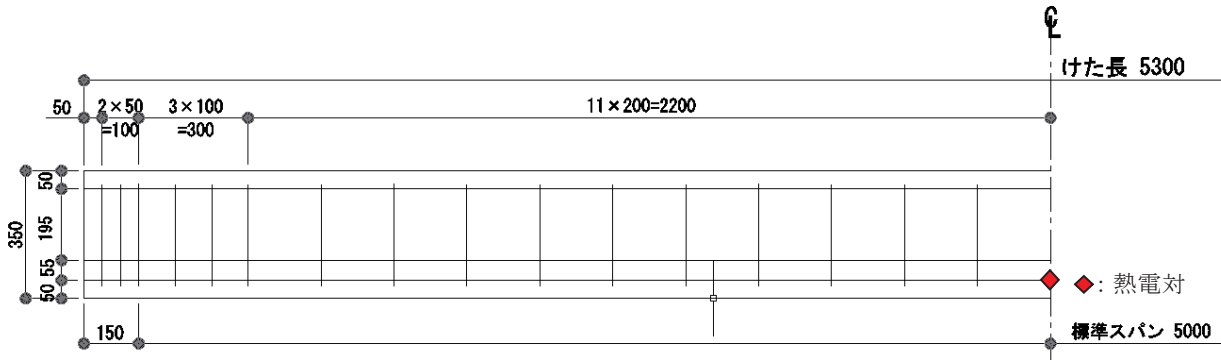


図-2 PC 桁側面図

### 3. 熱伝導解析

加熱試験に先立ち、加熱時の供試体内部の受熱温度を、1次元差分モデルを用いた熱伝導解析により推定した。なお、解析には汎用プログラムSOFiSTiKを用いた。

#### 3. 1 解析モデルおよび諸条件

解析に用いたモデルを図-3に示す。解析における火災曲線は、最高温度 1100°Cの火災曲線 (HC1100) を使用し、加熱時間は 30 分間とした。この火災曲線は、式(1)に示す Eurocode<sup>5)</sup> で定義されている HC 曲線である。この条件を底辺のみに与えた。その他の境界は、初期値を試験開始直前の供試体内部の平均温度とし、外気へ放熱を行う状態を設定している。熱伝達係数として Eurocode<sup>5)</sup> で定義されている  $\alpha_{c,fi}=50(W/m^2K)$  を使用した。さらに、鋼材およびコンクリートの熱物性値は Eurocode<sup>6),7)</sup> に定義されているものを用いた。コンクリート含水率は加熱試験開始時の 4.2%とし、3%時のピーク値から比例計算にて 4.2%時のピーク値 (2634J/kgK) を算出し、比熱へと適用した。

これらの諸条件で熱伝導解析を行い、供試体内部のPC鋼より線9本のうち最下部5本について温度履歴の検討を行った。

$$\theta_{1100} = 20 + 1080 (1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (1)$$

$\theta$  : 温度 (°C) ,  $t$  : 時間 (min)

#### 3. 2 解析結果

加熱時間は30分であるが、PC鋼より線の受熱温度が最大となるのは、加熱開始から50分後で最高受熱温度は、No.1で195°C、No.3で235°C平均値は、220°Cであった。

加熱開始30分以降、外部からの熱は周囲の

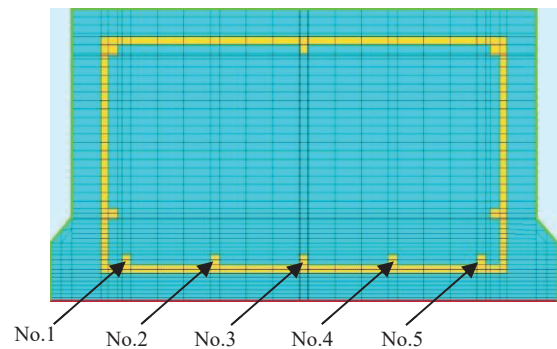


図-3 PC 鋼より線の位置

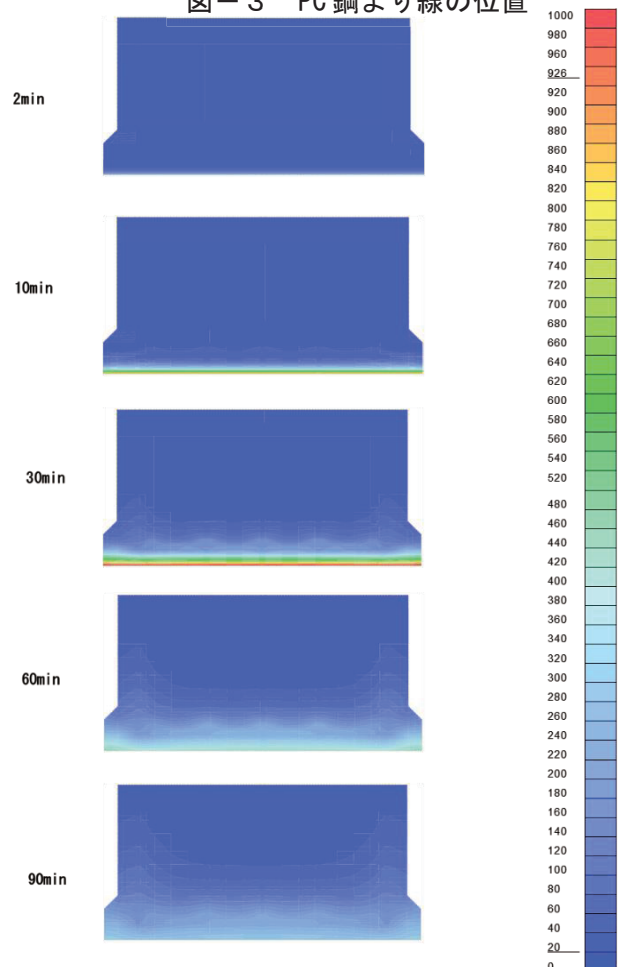


図-4 時間の経過に伴う供試体の温度変化

温められた空気の影響のみである。図-4より、60、90分後ゆっくりと断面上部の方に熱が伝わってくる事がわかる。これは、コンクリートの熱拡散率の影響である。

また、供試体断面の外側に近いほど内側よりも温度が低くなっている。これは、側面や外部に周囲の空気が触れている条件で解析しているため、周囲の空気へ熱が放出されるからである。

#### 4. 加熱試験

##### 4.1 加熱試験概要

加熱試験は8体のうち2体(供試体6, 7)について水平加熱試験炉を使用して底面からのみ加熱し、式(1)に示す最高温度1100°Cの火災曲線を用いて行った。なお、供試体6は加熱のみ、供試体7は加熱後静的載荷試験を行った。また、加熱区間は桁中央部4000mmとし、桁両端部は加熱していない。なお、加熱時間は30分間とし、試験時の含水率は4.2%であった。また、加熱試験における計測項目はコンクリート内部温度(最下段鋼材位置の熱電対)、炉内温度(炉内8つの熱電対の平均値)、PC鋼材とコンクリートの相対変位量の3つである。

##### 4.2 加熱試験結果と熱伝導解析結果の比較

最下段のPC鋼材位置(供試体断面内、外)に設置した熱電対の受熱温度と炉内温度を熱伝導解析の結果とともに図-5に示す。熱伝導解析の結果は、代表として最高受熱温度が最も高くなった最下段5本のうち中央位置のPC鋼材(No.3)についてのみ示している。

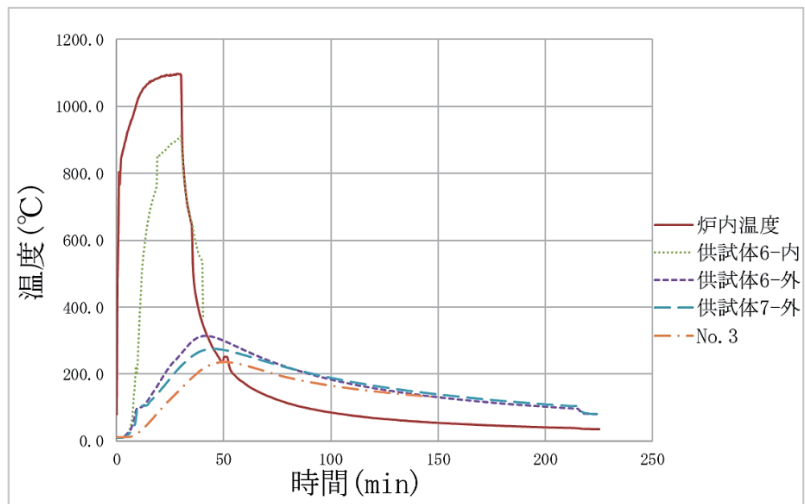


図-5 最下段 PC の受熱温度・炉内温度と熱伝導解析結果

写真-1のように加熱範囲の底面の断面中央部を中心に爆裂が加熱面全長にわたって生じた。このため、爆裂箇所の鋼材は最高温度が約900°Cまで上昇している。また、表-1に加熱試験における熱電対の最高温度実測値(爆裂箇所以外)と熱伝導解析によるPC鋼材の最高受熱温度およびその到達時間を示す。実測値、解析値ともに300°C以下であり、Eurocode3<sup>6)</sup>によれば爆裂箇所以外のPC鋼材の強度低下は考慮しなくてよいと考えられる。



写真-1 加熱試験後の供試体底面

今回の熱伝導解析では爆裂の影響を考慮していないため、最高受熱温度や到達時間について精度よい結果が得られているとは必ずしもいえない。したがって、今後は爆裂の影響などを考慮する必要があると考える。

表-1 最高受熱温度と到達時間

	最高受熱温度(°C)	到達時間(min)
実測値平均	295	43
解析値	235	50

また、今回の加熱試験の条件と同じである1100°C・30分加熱において、小型の供試体レベルでは、このような爆裂は見られなかった<sup>2)~4)</sup>。しかし、実構造レベルになると、部材断面が大きくなり、全体の水分量が多くなることなどから水蒸気圧が大きくなり激しい爆裂が生じたと考えられる。また、爆裂が断面の下面中心領域で激しくなったのは、側面からの放熱や水分の蒸散が影

響しているものと思われる。

5. 加熱後静的載荷試験

5. 1 加熱後静的載荷試験概要

HC1100の高温履歴を与えた加熱試験後のPC桁（供試体7）ならびに加熱なしのPC桁（供試体8）に対し静的載荷試験を行った。なお、供試体6, 7, 8以外は本論文では検討に用いていない。載荷方法は、スパン4700mm, 曲げスパン1000mm, せん断スパン1850mmとした対称2点集中荷重方式とし、破壊に至るまで単調漸増型載荷を実施した。なお、せん断スパン比a/dは6.17 (a=500mm) である。静的載荷時のコンクリートの圧縮強度は加熱なしのPC桁で $f'_c=72.8\text{N/mm}^2$ , 加熱ありのPC桁の加熱前で $f'_c=75.6\text{N/mm}^2$ であった。また、諸強度測定用供試体を加熱試験時に炉内に設置し同じ高温履歴を与えたが、試験後にはどの供試体も崩壊しており、強度測定を行うことができなかった。

5. 2 静的載荷試験結果

表-2 曲げ耐力

(1) 最大荷重

表-2に最大荷重の実測値と曲げ破壊荷重の各計算結果と加熱の影響による減少率を示す。表-2より、加熱したPC桁の最大荷重実測値は、加熱しないものと比べ約3

	最大荷重 実測値 Pmax(kN)	曲げ破壊荷重計算値 Pud(kN)		最大荷重 実測値比 Pmax/Pud
		鋼材強度低下 のみ考慮	付着力低下の 影響も考慮	
加熱無	368.8	353.5		1.04
加熱有	247.7	215.4	212.6	1.17
		215.4	212.6	
減少率(%)	32.8	39.1	39.9	

割低下した。しかし、既往の研究成果<sup>3)</sup>では、かぶり50mmで1100°C・30分加熱の場合、耐力低下は約1割程度であった。この差は、加熱試験時の爆裂によってコンクリートが剥落し断面欠損したこと、PC鋼材が直接高温加熱を受け強度が低下したことが大きく影響していると考えられる。

また、PC鋼材とコンクリートの付着の低下がPC桁の耐力低下に及ぼす影響は表-2に示すようにさほど顕著ではなく、加熱によるPC鋼材の強度低下が耐力低下の大きな要因であると考えられる。PC鋼材の強度低下と付着力の低下を考慮したファイバー法で曲げ破壊荷重を求めた結果、実測値との誤差は14%であった。また、加熱したPC桁の最大荷重近傍ではPC鋼材の破断音が確認され、除荷後にPC鋼材のよりが戻り緩む状況が確認できた。これは、加熱によってかぶりコンクリートが剥落したことに加え、高温受熱によって鋼材強度が低下し、載荷時に破断することで緊張力が解放されたことによるものと考えられる。

(2) 荷重—中央変位関係

図-6に静的載荷試験時の荷重—中央変位関係の加熱の有無による比較を示す。加熱した供試体は初期剛性が低下していることがわかる。なお、加熱なしの供試体の最大荷重以降の変位については変位計不良のため計測不可となった。加熱した供試体では、230kN, 245kNで荷重が減少している。このとき、衝撃音があり、最下段のPC鋼材の一部が破断したと考えられる。最大荷重では、加熱した供試体は加熱なしの供試体のおよそ6割となった。

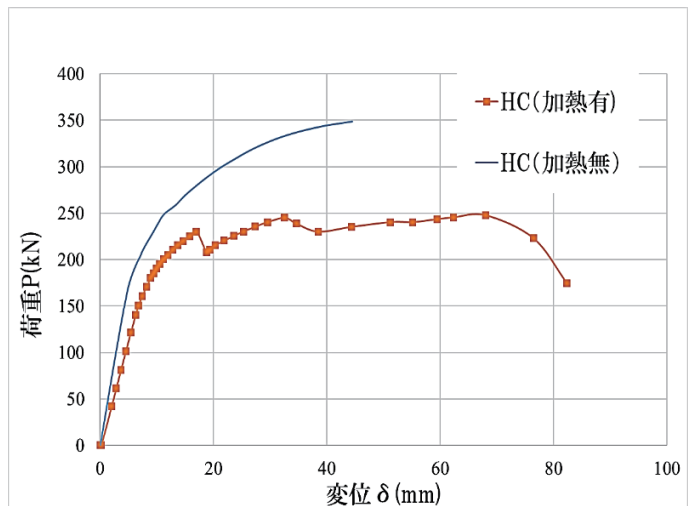


図-6 荷重—中央変位関係（加熱有無比較）

(3) PC鋼材とコンクリート間の相対変位

桁両端部において、最下段のPC鋼材と周囲のコンクリート間の相対変位量を加熱試験後、および載荷試験後にノギスを用いて計測した。これらを表-3に示す。また、これらの差（載荷試験によ

り引き込まれた量)を併せて示す。なお、鋼材番号は図-7の通りである。

加熱試験後の荷重試験では、全ての鋼材において引き込まれた長さが大きくなっていることから、下縁側のPC鋼材は全て付着切れによりプレストレスが低下していることがわかる。特に鋼材の位置が端部になるにつれて、差が大きくなることが確認されたが、番号3の中央の鋼材は途中で破断し、鋼材のよりが戻っているため値に大きな変化が見られなくなっている。



図-7 鋼材番号

この結果から、中央部はもともと爆裂で付着がなくなっており、かぶりが残っている断面の両側部近い箇所での影響が顕著となることが明らかとなった。

### 5.3 曲げ耐力の計算

表-2には、加熱の影響によ

るPC鋼材の強度低下のみを考慮した場合、さらにプレストレスおよび付着力の低下も加味した場合の曲げ耐力の算定を試みた。計算はファイバー法を用い、設計圧縮強度は50N/mm<sup>2</sup>とした。プレストレスおよび付着力の低下を考慮する際には式(2)を用いた。

$$\epsilon_p = \alpha \epsilon_{pi} + \beta \frac{d-x}{x} \epsilon'_{cu} + \epsilon_{cpi} \quad (2)$$

$\epsilon_p$ : 終局時のPC鋼材引張ひずみ

$\epsilon_{pi}$ : 有効プレストレス力によるPC鋼材の引張ひずみ

$\epsilon_{cpi}$ : 有効プレストレスによるPC鋼材位置のコンクリートひずみ

$\alpha$ : プレストレスの残存率

$\beta$ : 最大付着応力度残存率

#### (1) PC鋼材の強度低下

加熱試験によって写真-1のようにPC桁底面に爆裂が生じた。そのため、Eurocode3<sup>9)</sup>に記載されている高張力鋼の高温時における応力-ひずみ関係の低減係数を用いて、PC鋼材の強度低下について検討した。今回は、4.2節で示したように、供試体底面の爆裂により最下部5本のPC鋼材のうち中央部3本のPC鋼材が最高温度900°Cの加熱を受けていると想定し、降伏強度の低減係数に0.060を使用した。

#### (2) プレストレスの減少

5.2節(3)で示したPC鋼材とコンクリートの間の相対変位量を供試体の全長5300mmで除すことによりひずみを算出した。さらに、加熱によるひずみ変化量を加熱前の導入ひずみで除すことにより加熱試験によるプレストレス減少率(PC鋼材の

引張応力の減少率)を算出した。表-4にその結果を示す。また、PC鋼材引張応力度の減少を考慮した断面下縁のコンクリート応力の減少率は、供試体6で9.48%、供試体7で8.73%であった。なお、今回静的荷重試験を実施した供試体は、供試体7であるのでプレストレスの残存率 $\alpha$ は90.1%とした。また、PC鋼材の定着部である端部を加熱しない既往の研究<sup>8)</sup>では、1100°C加熱・かぶり30mmの場合のプレストレス減少率は約8%であった。したがって、今回の加熱試験によるプレストレスの減少率はそれら

表-3 PC鋼材引き込まれた長さ(単位: mm)

		1	2	3	4	5	平均
加熱試験後	起点側	1.75	1.30	1.75	1.80	2.40	1.80
	終点側	1.70	1.35	1.45	2.05	1.65	1.64
	合計	3.45	2.65	3.20	3.85	4.05	3.44
荷重試験後	起点側	2.75	1.55	1.80	2.20	3.05	2.27
	終点側	1.80	1.75	1.60	2.40	2.40	1.99
	合計	4.55	3.30	3.40	4.60	5.45	4.26
差	起点側	1.00	0.25	0.05	0.40	0.65	0.47
	終点側	0.10	0.40	0.15	0.35	0.75	0.35
	合計	1.10	0.65	0.20	0.75	1.40	0.82

表-4 加熱によるプレストレス減少率

供試体名	加熱前(導入時)ひずみ( $\mu$ )	加熱によるひずみ変化量( $\mu$ )	加熱によるプレストレス減少率(%)
供試体6	6564	704	10.7
供試体7	6564	650	9.9
平均	6564	677	10.3

と同等であるといえる。

### (3) 付着力の低下

加熱によるコンクリートとPC鋼材間の付着力の低下に関しては、爆裂によりPC鋼材がむきだしとなった箇所は局所的で、PC鋼材定着部である桁端部

やPC鋼材の大半がコンクリートで覆われていたため、下縁側PC鋼材5本の付着力が低下していると仮定している。なお、最大付着応力度残存率は既往の研究成果<sup>8)</sup>により、受熱温度の影響が大きいことが明らかとなっている。そこで、その研究成果をもとにPC鋼材の最高受熱温度と最大付着応力度残存率の関係から案分により求めた。その数値を表-5に示す。その結果から、最大付着応力度残存率 $\beta$ は31.4%とした。

### 6. まとめ

JIS A 5373 に規定されるプレテンションスラブ橋PC桁に対して最高温度1100°Cの高温加熱を与えた合、底面のコンクリートに爆裂が生じてかぶりコンクリートが剥落するなど著しく損傷することが確認された。かぶりコンクリートの剥落により鋼材が直接加熱を受けたため強度低下を生じ、載荷試験時には下縁側5本のPC鋼材のうち数本が最終的に破断した。加熱の影響による最大荷重の低下は約3割であったが、PC鋼材の加熱による強度低下ならびにプレストレスの減少や付着強度の低下を考慮することで、残存耐力は安全側に評価できることが明らかとなった。また、熱伝導解析の結果と加熱試験時の熱電対の計測温度について比較すると、PC鋼材の最高受熱温度は誤差約20%で実測値の方が高温となった。さらに、最高受熱温度への到達時間は実測値が43分、解析値が50分という結果が得られた。今回の熱伝導解析では爆裂の影響を考慮していないため、最高受熱温度や到達時間について精度よい結果が得られているとは必ずしもいえない。したがって、今後は爆裂の影響などを考慮し、より精度の高い結果が得られるようにする必要があるといえる。

### 謝辞

本研究の一部はJSPS科研費（基礎研究（C）：17K06520）の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 田崎祥二：一般国道1号守口高架橋火災被災復旧の取り組みについて～供用中のPCT桁橋における復旧工法の検討事例～、平成19年度国土交通省国土技術研究会：一般部門、2007.10
- 2) 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、プレストレストコンクリート工学会第21回シンポジウム論文集、pp.207-210,2012.10
- 3) 横山直之、菊本幸司、大山理、井上晋：火災による高温履歴がプレテンションPC梁部材の耐荷特性に与える影響、プレストレストコンクリート工学会第22回シンポジウム論文集、pp.305-310,2013.10
- 4) Susumu Inoue, Yosuke Tabuchi: Effect of Fire Damage on the Residual Prestress and Load Carrying Capacity of Pre-tensioned Prestressed Concrete Bridge Girders, Proc. of the 5th International fib Congress, ID81, 2018.10
- 5) Eurocode 1: Actions on structures -Part 1-2: General actions -Actions on structures exposed to fire, pp. 24-25, 2002. 11
- 6) Eurocode 3: Design of steel structures Part1.2: General rules Structural fire design,2003.4
- 7) Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1.2: General rules -Structural fire design, 2002.10
- 8) 横山直之、菊本幸司、井上晋、三方康弘：高温履歴を受けたコンクリートとPC鋼材の付着特性に関する基礎的研究、平成24年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集、v-15,2012.6

表-5 PC鋼材の最高受熱温度と最大付着応力度残存率

供試体名	PC鋼材の最高受熱温度(°C)	最大付着応力度残存率(%)
HC1100-φ12.7(かぶり30mm <sup>8)</sup> )	350	28.8
HC1100-φ12.7(かぶり50mm <sup>8)</sup> )	197	36.0
供試体7	294	$\beta = 31.4$