

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560558

研究課題名(和文) 火害を受けたプレテンションPC部材中PC鋼材の付着特性と残存耐荷力の評価

研究課題名(英文) Bond Characteristics of Prestressing Tendons within Pre-tensioned Prestressed Concrete Members Damaged by a Fire and Evaluation of Their Residual Load Carrying Capacity

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) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートとPC鋼材の付着強度、PCはり部材の残存プレストレスや最大耐力は高温履歴の影響により減少するが、その減少率は、加熱温度が高いほど、加熱時間が長いほど、また、かぶり小さいほど大きくなる傾向がみられた。一方で、かぶりを大きくすることで鋼材の受熱温度は低下し、平均付着強度や最大耐力の低下を抑制することが可能となり、かぶりを70mm確保しておけば、700～1100℃、30分間の加熱においても最大耐力はほとんど低下しないことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Bond strength between concrete and prestressing tendons, as well as residual prestress and load carrying capacity of pre-tensioned prestressed concrete beams decreased due to the effect of high temperature exposure by a fire. These decreasing ratio became larger with increasing in applied temperature and exposure time, and with decreasing in concrete cover. On the other hand, an increase in concrete cover thickness could restrain the enhancement of temperature in prestressing tendons and mitigate the reduction in bond strength and load carrying capacity. Especially, in the case of 70mm concrete cover, load carrying capacity scarcely decreased even when subjected to 30 minutes heating up to 1100 degree centigrade.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：火害 PC鋼材 高温履歴 付着 残存プレストレス 残存耐荷力 プレテンション部材 熱伝導解析

1. 研究開始当初の背景

近年、都市内高架橋の火災による被害事例が数多く報告されている。たとえばタンクローリーの横転・炎上による首都高速道路鋼桁の落下や隣接資材置き場の火災による国道1号線守口高架橋の損傷など、重要路線が長期にわたって閉鎖や車線規制された場合の社会的・経済的損失はきわめて大きく、被災後の供用性の判定や事後の対策をできる限り速やかに行うことが要求されている。

平成18年12月30日に発生した国道1号線守口高架橋火災事故では、地上から約10メートルの高さにある高架橋の単純プレテンションT桁および2柱ラーメン橋脚が約30分間火災にさらされ、高温履歴による損傷を生じた。研究代表者は、その「火災被災復旧検討委員会」の委員長の命を受け、その復旧業務に関わったが、その際に問題となったのが残存プレストレスの評価である。PC鋼材自体の受熱温度は350以下と顕著な強度低下を起こすには至っていなかったが、本橋がプレテンションPC橋であり、かぶりコンクリートに顕著な浮き、剥落、ひび割れが認められたため、付着特性の劣化によるプレストレスの低下が懸念された。しかしながら、残存プレストレスを精度よく推定する方法がなく、結果として損傷の大きかった2径間、11本の桁に関してプレストレスの減少を見込み、その分を鋼板で補強するという対策をとり、約7ヶ月後ようやく車線規制を全面解除することになった。

このように、プレテンションPC部材が火災による損傷を受けた場合、コンクリートや鋼材の受熱温度や受熱時間、残存材料強度のみならず、鋼材とコンクリートの間の付着劣化を考慮した上で残存プレストレスや残存耐荷力を評価する必要があるにもかかわらず、この点に関する知見はきわめて少ないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、火災による高温履歴を受ける場合のPC鋼材とコンクリートの付着特性ならびにプレテンションPC部材の残存耐力を実験により明らかにし、残存耐荷力の評価や補修・補強設計のための資料を得ることを目的としている。

3. 研究の方法

火災被災後のプレテンションPC部材の残存プレストレスや残存耐荷力を評価するためには、まず、高温受熱後のPC鋼材とコンクリートの付着特性を把握することが重要である。したがって、まず、付着強度試験供試体の加熱試験を行い、温度履歴の違いや、かぶり、鋼材径が高温受熱後の付着特性に及ぼす影響を検討した。次いで、かぶりを変化させたプレテンションPCはり供試体に対し、クリープ・収縮がほぼ収束した段階で加熱試験を行い、加熱前後のプレストレスの変動を

測定するとともに、載荷試験により残存耐荷力を健全な試験体と比較・検討した。

以下に、各試験の概要を示す。

(1) 加熱試験

加熱試験でのコンクリートの加熱温度は、平成18年の守口高架橋の火災事故において、プレテンションPC桁橋が約30分間で300~600度受熱したことを考慮して最高温度を700に想定した(EXシリーズ)。また、タンクローリー車の炎上を想定し、最高温度を900および1100に設定した試験も併せて実施した(HCシリーズ)。なお、加熱時間は30分間を基本としたが、加熱時間の影響の検討を目的として、60分間加熱の実験も併せて行った。これらの加熱曲線を図-1に示す。

加熱試験中は測温機能付ひずみ計や熱電対により、PC鋼材位置を含む所定の位置(表面より30, 50, 70mm)でのコンクリートの受熱温度を測定するとともに、炉内温度を測定した。また、加熱は橋梁下での火災を想定し、供試体下面からのみとした。ただし、PCはり供試体の両端250mm区間は設置時の都合により加熱を受けていない。また、諸強度測定用コンクリート試験体は炉内に入れて加熱したため全面からの加熱を受けている。

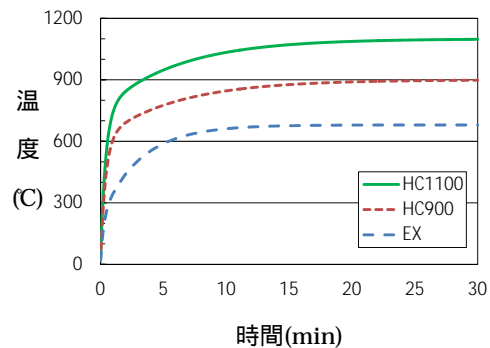


図-1 加熱曲線 (加熱時間 30 分の場合)

(2) 付着強度試験

付着強度試験には、図-2に示すような角柱の断面中心にPC鋼材を1本埋め込んだ供試体を用いた。PC鋼材には7本よりφ12.7mm ( $f_{py}=1860\text{N/mm}^2$ )および7本よりφ15.2mm ( $f_{py}=1870\text{N/mm}^2$ )を使用し、実験要因はかぶりの大きさ(30mm, 50mm, 70mm)とした(かぶりの大きさや鋼材径により図-2中のxは異なり、φ12.7に対しx=72.7, 112.7, 152.7mm, φ15.2に対しx=75.2, 115.2, 155.2mm)。角柱部分の長さは全て100mmとし、全長は1100mmとした。また、コンクリ

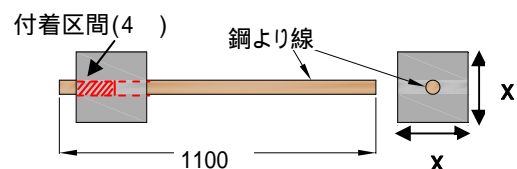


図-2 付着強度試験用供試体の詳細

ートの設計基準強度はいずれも  $f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$  とした。供試体はこれらの要因の組合せごとに各9体作製し、土木学会規準「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)(JSCE-G 503-2010)」に準じて付着強度試験を実施した。

### (3) PC はり供試体の荷重試験

プレテンション PC はり供試体には、図-3 に示す断面を有する全長 3500mm のものを用いた。PC 鋼材には 7 本より PC 鋼より線  $\phi 12.7\text{mm}$  ( $f_{py}=1860\text{N/mm}^2$ ) を、組立筋およびせん断補強筋には D10 ( $f_{sy}=356\text{N/mm}^2$ ) を使用した。実験要因はかぶりの大きさ(30mm, 50mm, 70mm)とし、コンクリートの設計基準強度は  $f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$  とした。

荷重方法は、曲げスパン 600mm, せん断スパン 1200mm とした対称 2 点集中荷重方式とし、破壊に至るまで単調増型荷重を実施した。また、せん断スパン比  $a/d$  は供試体のかぶりにより異なり、 $a/d=5.6, 6.2, 6.9$  (順に 30, 50, 70mm) となっている。

荷重中は、荷重荷重、スパン中央部、荷重点部および支点部の鉛直変位、スパン中央部および断面引張側 PC 鋼より線位置におけるひび割れ幅のほか、引張側 PC 鋼より線および同位置のコンクリートの軸方向変位も測定した。

## 4. 研究成果

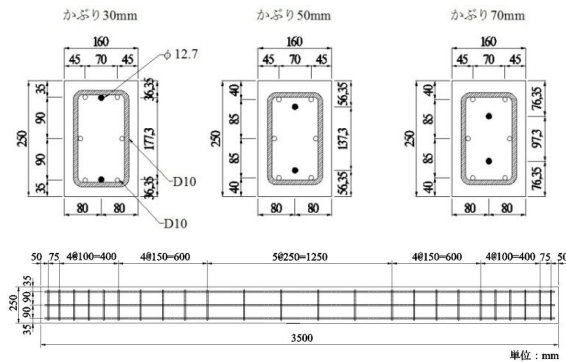


図-3 プレテンション PC はり供試体

### (1) 加熱試験結果

炉内に設置したテストピースの圧縮強度、曲げ強度、引張強度、ヤング係数はいずれも低下し、圧縮および引張強度と比較して、曲げ強度、ヤング係数の低下が著しくなった。加熱後のテストピースの表面には多数のひび割れが発生しており、特に HC1100 シリーズはひび割れ幅も大きく、損傷が激しかった。なお、HC シリーズの強度残存率は最高温度が 700 である EX700 シリーズと比べると著しく低下しており、最高温度が 900 を超えるような受熱があった場合、コンクリート強度は著しく低下するといえる。また、コンクリートの表面色と受熱温度のおよその関係は、受熱温度 600~950 で灰白色、950 以上で淡黄色になるとされているが、HC900 シ

リーズおよび HC1100 シリーズの表面色はそれぞれ灰白色、淡黄色となり、その指標に沿う結果となった。

加熱温度や時間に関係なく、加熱試験中の炉内温度は点火直後から急激に上昇するのに対し、各かぶり位置のコンクリート内部温度は徐々に上昇する傾向があり、消火後に最高温度を記録した(図-4 参照)。PC 鋼材位置のコンクリートの最高受熱温度は、かぶりが小さいほど、加熱温度が高いほど、加熱時間が長ほど高くなり EX700-30(最高温度 700, 30 分加熱)シリーズのかぶり 30mm 位置で約 160 (平均値, 以下同じ), かぶり 50mm 位置で約 110, かぶり 70mm 位置で約 80, EX700-60(最高温度 700, 60 分加熱)シリーズでは、かぶり 30mm 位置で約 250, かぶり 50mm 位置で約 150, かぶり 70mm 位置で約 150 となった。また、HC シリーズでは、900 30 分間加熱の場合、かぶり 30mm 位置で約 290, 50mm 位置で約 180, 70mm 位置で約 120 の受熱, 1100 30 分間加熱の場合、かぶり 30mm 位置で約 340, 50mm 位置で約 200, 70mm 位置で約 140 の受熱となった。

HC シリーズの PC はり供試体については、一次差分モデルによる熱伝導解析を行い、加熱試験から得られた実測値との比較検討を行った。なお、解析には汎用プログラム SOFIS TiK を用いた。

解析により得られた PC はり供試体の温度履歴の一例(HC1100, かぶり 70mm)を実測値とともに図-4 に示す。実測値では 100~150 の時点で潜熱の影響が顕著に表れてい

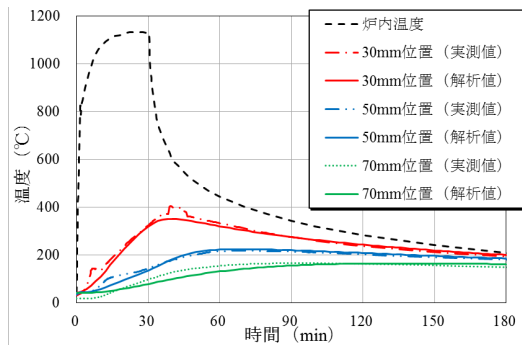


図-4 温度履歴の比較(HC1100-70 供試体)

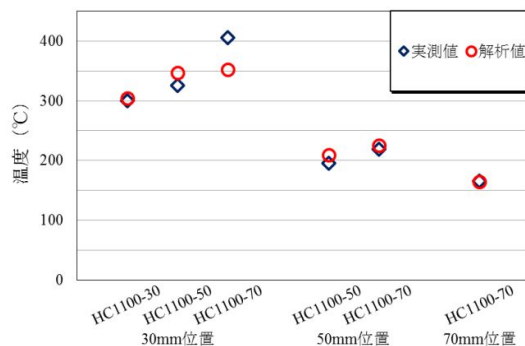


図-5 最高受熱温度の比較 (HC1100 シリーズ)

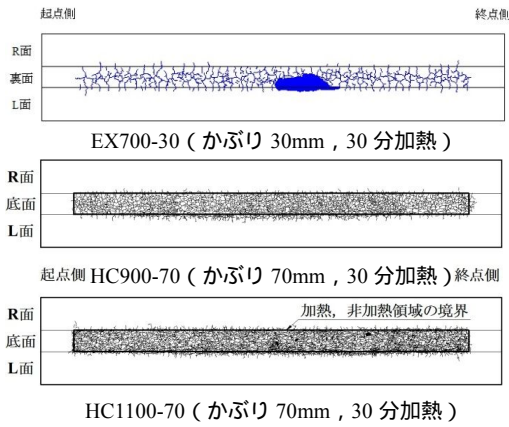


図-6 加熱後のPCはり供試体の損傷状況

のに対して、解析値においては潜熱による温度上昇勾配の変化はほとんど確認することができなかった。しかし、潜熱の影響部以外の温度上昇勾配については、解析値は実測値の挙動を表現することができている。また、図-5に示すように、最高受熱温度についても実測値と近い結果が得られた。最高受熱温度の実測値に対する解析値の誤差は平均で約5.3%、最大で13.3%となり、標準偏差は12.5%となったが、およその受熱温度を推定するには十分な精度を有していると考えられる。

加熱後のPCはり供試体の損傷状況の一例を図-6に示す。いずれの供試体も高温履歴を受けた下面全体にひび割れが生じており、またそのひび割れは側面にまで及んでいることがわかる。この状況はかぶりによらずどの供試体でも同様であったが、より高い温度履歴を受けると、加熱面に細かくひび割れが発生し、上面側へ伸展することが確認された。特に、1100で加熱した供試体では、側面に底面側から約15mm~30mm伸展したひび割れが数多く確認され、長いものでは50mmを超えるものも存在したことから、加熱面から約30mmの範囲では、コンクリートは著しく損傷していたものと推察される。

加熱試験中に供試体内部のPC鋼材位置に埋め込んだ測温機能付ひずみ計を用いて、加熱前後の導入プレストレス量の変化を推定した。その結果、加熱温度が高いほど、また、加熱時間が長いほど、プレストレスの減少量は大きくなるものの、その減少率は最大でも9%程度(1100, 30分加熱)にとどまり、後述の付着強度試験結果から推定されるほどは大きくなかった。この理由は端部定着部を加熱していないことによる影響が大きいと考えられるが、この点に関しては今後の検討が必要である。

## (2) 付着強度試験結果

試験により得られた平均付着強度(供試体9体の平均値)の加熱しない供試体(Nシリーズ)に対する付着強度残存率とかぶりの関係をPC鋼より線の径ごとに図-7に示す。なお、ここでは、主として加熱時間が30分間の場合の試験結果について述べる。

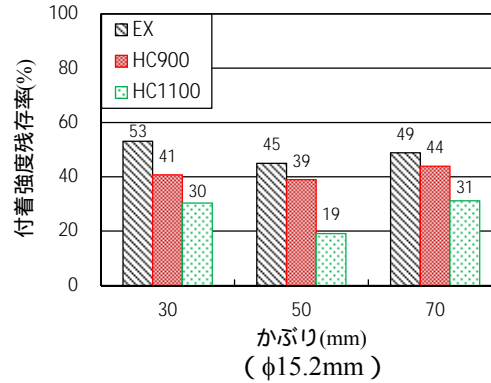
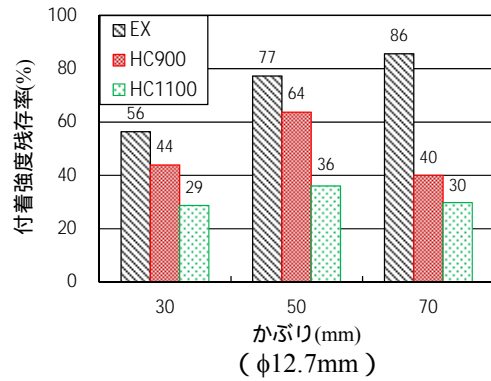


図-7 付着強度残存率とかぶりの関係

図-7において、φ12.7mmでかぶりが50、70mmの場合に、一部残存率が高くなっているものが見られるものの、両径ともに高い温度履歴を受けた供試体ほど付着強度残存率が低下し、EXシリーズで約50%、HC900シリーズで約40%、HC1100シリーズで約30%となっていることから、コンクリートとPC鋼より線の付着特性には鋼材およびコンクリートの最高受熱温度が大きく影響していると考えられる。

平均付着強度から算出した各供試体におけるPC鋼材の必要定着長の一例を図-8に示す。加熱温度が高いほどグラフの傾きが大きくなる傾向から、高温履歴を受ける場合、かぶりを大きくすることが必要定着長を小さくすることに有効であることがわかる。また、コンクリート標準示方書には、φ15.2mmまでのPC鋼より線の定着長は65φとしてよいという記述があるが、本試験条件の範囲内では高温履歴を受けた供試体のうち、HCシリー

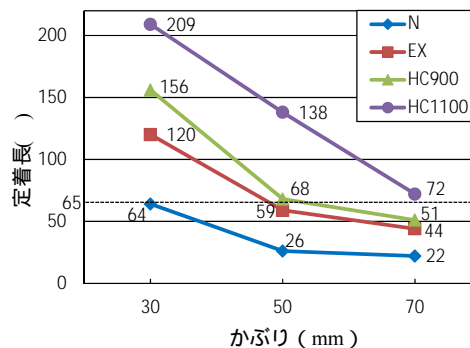


図-8 必要定着長 (φ15.2mm)

ズではほぼすべての供試体でこれを上回る定着長が必要となった。また、EX シリーズについてはかぶり 30mm の供試体のみ 65 φ を上回る値を示していることから、EX 曲線で代表されるような一般的な火災を想定する場合には、50mm 以上のかぶりを確保することが必要であると考えられる。一方、HC シリーズにおいては、かぶりを 70mm 確保していても 1100 で加熱した場合は必要定着長が 65 φ を超える結果が得られた。コンクリート標準示方書には、「一般的な環境下において耐久性を満足するかぶりの値に 20mm を加えた値を最小値とすれば、耐火性に関する照査は省略してよい」という記述があるが、一般的なはり部材の施工誤差を考慮した最小かぶりは 50mm であり、それに 20mm を加えただけでは、油火災の場合、プレテンション PC 部材の残存プレストレスや残存耐力について問題が生じる可能性があるといえる。

付着強度試験から得られた付着応力度 - 自由端変位関係の一例を図-9 に示す。N シリーズ供試体では、載荷初期段階において、自由端変位がほとんど生じることなく付着応力度だけが增加する領域が存在するが、HC シリーズ供試体ではそのような領域は存在しないことが同図より確認できる。初滑時（自由端変位が急増する時点）の応力度はコンクリートと PC 鋼より線間の粘着力によるところが大きいと考えられ、高温履歴を受けることによりこの成分が低下したことがその一因と考えられる。ただし、EX シリーズの付着強度は N シリーズより低下するものの、付着応力度の増加に伴う自由端変位の変化挙動はほぼ同様であり、載荷初期段階では自由端変位がほとんど発生していない。このことから、最高加熱温度が 700 の場合、コンクリートと PC 鋼より線間の付着抵抗成分のうちセメントペースト硬化体と鋼材との化学的粘着によるものは一部失われるが、ある程度残存している傾向にあると考えられる。一方、HC900、HC1100 の両シリーズでは自由端変位が載荷初期からなだらかな勾配で増加し、初期剛性は N シリーズと比較して極めて小さいことがわかる。これは高温受熱によりひび割れが発生したことに加え、HC シリーズのような高温下ではコンクリー

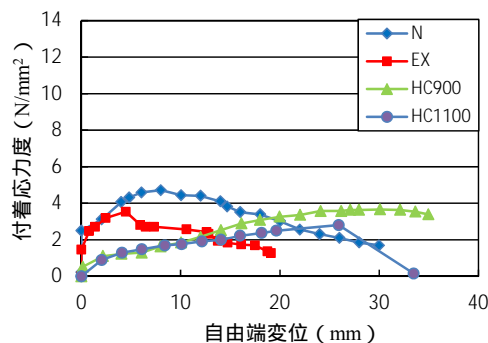


図-9 付着応力度-自由端変位関係  
(φ12.7mm, かぶり 30mm)

トの脆弱化が著しくなることによるものと考えられる。

### (3) PC はり供試体の載荷試験結果

表-1 に加熱時間を 30 分とした各供試体の最大耐力実測値, 対応する N シリーズ供試体の最大耐力に対する比を示す。

表-1 PC はり供試体の載荷試験結果

供試体名	最高温度	かぶり (mm)	最大耐力 (kN)	耐力比
N-30	-	30	90.3	-
N-50		50	87.6	
N-70		70	81.2	
EX30-30-2	700	30	77.1	0.85
EX30-50-2		50	82.3	0.94
EX30-70-2		70	79.5	0.98
HC900-30	900	30	79.0	0.87
HC900-50		50	79.0	0.90
HC900-70		70	82.9	1.02
HC1100-30	1100	30	76.6	0.85
HC1100-50		50	78.0	0.89
HC1100-70		70	78.7	0.97

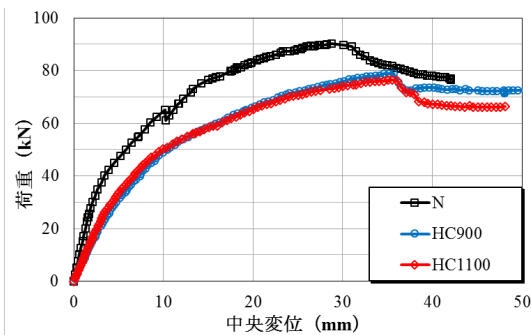
かぶりが 30mm の場合、N-30 供試体に対して EX30-30-2 供試体は 15%、HC900-30 供試体は 13%、HC1100-30 供試体は 15% 最大耐力が低下し、HC シリーズにおいては加熱温度が高いほど耐力低下が若干大きくなる傾向を示している。ただし、この場合でも耐力低下は最大で 15%にとどまっており、材料試験結果や付着強度試験結果における減少率と比較するとかなり小さい。これは、材料試験では供試体が全面から加熱を受けているのに対して、はり供試体は下面からのみの加熱であり、圧縮域コンクリートの損傷がほとんどないこと、また、PC 鋼材の受熱温度が強度低下を生じるようなレベルまで達していなかったこと（最高で約 400）が理由として考えられる。また、はり中央部分の PC 鋼材とコンクリートの付着強度は付着試験結果と同様に低下していると考えられるが、はり供試体の加熱試験においては PC 鋼材の端部定着部は直接加熱を受けておらず、この部分での定着が確保されていたことが結果に影響を及ぼしていると考えられる。

かぶりが 50mm の場合も、かぶり 30mm の場合と同様に、加熱温度が高いほど最大耐力が低下する傾向が見られるが、その低下率はかぶりが 30mm の場合と比較して小さい。

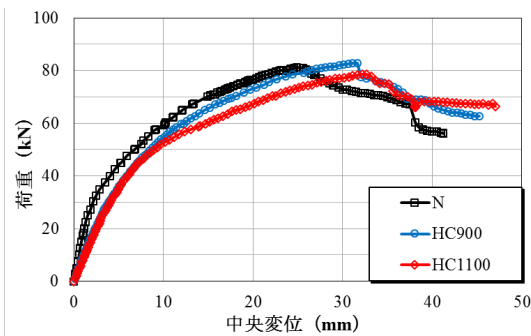
かぶりが 70mm の場合は、N-70 供試体に対して、最大でも 1100 加熱の HC1100-70 供試体でわずか 3%の耐力低下となった。

以上のことから判断すると、30 分間加熱の場合、加熱温度が高いほど、また、かぶりが小さいほど、最大耐力の低下は大きくなるが、かぶりを 70mm 確保することにより、1100 までの加熱に対する耐力低下を抑制することが可能であるといえる。

図-10 にかぶりが 30mm と 70mm の HC シ



(1) かぶり 30mm



(2) かぶり 70mm

図-10 荷重 - 中央変位関係の一例

リーズ供試体の荷重 - 中央変位関係に対応する N シリーズ供試体と比較して示す。

図より, HC シリーズにおいて 900 または 1100 の加熱を受けた供試体では, 初期剛性が大きく低下していることがわかる。その低下の程度は, かぶりが 30mm および 50mm の場合は, 加熱温度 700 の EX シリーズと比較して大きくなっており, 加熱温度の影響がうかがえたが, 900 と 1100 で明確な差異は認められなかった。これらのことから, 加熱温度の上昇とともに初期剛性の低下は大きくなるが, 900 を超えるような温度の領域では, その差は顕著でなくなると考えられる。なお, かぶりが 70mm の場合は, 剛性低下はかぶりが 30, 50mm の場合と比較して小さくなるものの, 加熱を受けていない供試体と比較すると初期剛性は低下することが確認され, 加熱時に断面引張側に生じたひび割れの影響がうかがえる。

#### (4) まとめ

本研究で実施した一連の試験結果より, コンクリートが高温履歴を受けることにより, 内部の水蒸気圧が上昇し, 供試体内部や表面に微細なひび割れが生じ, 強度が低下することが確認できた。材料強度や PC 鋼材との付着強度, PC はり供試体の残存プレストレスや最大耐力の減少率は, 加熱温度が高いほど, 加熱時間が長いほど, また, かぶりが小さいほど大きくなる傾向がみられたが, かぶりを大きくすることで鋼材の受熱温度は低下し, 平均付着強度や最大耐力の低下を抑制することが可能となり, かぶりを 70mm 確保しておけば, 700 ~ 1100, 30 分間の加熱においても最大耐力はほとんど低下しな

いことが明らかとなった。

しかしながら, 上述の結果はプレテンション PC 部材において重要と考えられる端部定着部近傍が直接加熱されていない状況でのものであることに注意する必要がある。今後はその点も含めた検討が必要であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2 件)

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, 第 22 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, 査読有, 第 22 巻, 2013, pp.305-310  
 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, 査読有, 第 21 巻, 2012, pp.207-210

### 〔学会発表〕(計 5 件)

横山直之, 菊本幸司, 井上晋, 大山理: 火災による高温履歴を受けたプレテンション PC はり部材の耐荷特性に関する研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会第 V 部門, 2013 年 9 月 6 日, 日本大学  
 菊本幸司, 横山直之, 井上晋, 大山理: 火災による高温履歴がプレテンション PC はり部材の耐荷特性に及ぼす影響, 平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2013 年 6 月 8 日, 大阪市立大学  
 Naoyuki Yokoyama, Koji Kikumoto, Susumu Inoue and Yasuhiro Mikata: Effect of Fire Damage on Bond Characteristics between Prestressing Strand and Concrete, International Workshop on Front Research and Technology in Structural Engineering, Osaka Institute of Technology, 2012 年 9 月 15 日, 大阪工業大学  
 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 鋼より線の付着特性に関する実験的研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会第 V 部門, 2012 年 9 月 6 日, 名古屋大学  
 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, 2012 年 6 月 9 日, 神戸市立工業高等専門学校

## 6. 研究組織

### (1) 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: 3 0 1 6 8 4 4 7