

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420443

研究課題名(和文) 火災による高温履歴を受けたプレテンションPC部材の残存耐力の評価と補強法

研究課題名(英文) Evaluation of Residual Capacity of Pre-tensioned Prestressed Concrete Members Damaged by a Fire and Their Strengthening Methods

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、火災を受けたプレテンションPC部材の残存耐荷特性を加熱試験・載荷試験により検討した。

火災の影響が鋼材定着部にまで及ぶ場合、PC部材のプレストレスは著しく減少し、静的・疲労耐力とも低下することが明らかとなった。その低下の程度は加熱温度やPC鋼材のかぶりなどによって異なるが、火災への配慮が要求される部材では、耐久性から要求されるかぶりの2倍以上を確保することが重要であることが確認された。

また、鋼板接着および炭素繊維プレート接着による補強は低下した特性を回復させるのに有効であるが、適用に際しては損傷したコンクリート表面の処理方法に留意することが重要であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, residual road carrying capacity of pre-tensioned prestressed concrete members damaged by a fire is investigated.

In case that the anchorage regions of prestressing steels were directly exposed to flames of a fire, prestress of a prestressed concrete member decreased significantly, and accordingly, the residual static and fatigue capacity of the member decreased. Although the degree of deterioration depends on the test variables such as the maximum suffered temperature, the cover of prestressing steels, and so on, the cover should be more than twice of that determined from the durability requirement for the members in which fire-resistant properties are required. It was confirmed that steel plate bonding and carbon fiber plate bonding are quite effective for restoring the deteriorated load carrying capacity of pretensioned prestressed concrete members damaged by a fire. However, attention should be paid to the treatment of the deteriorated concrete surface.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：耐火性 プレテンションPC部材 残存プレストレス 静的耐力 疲労性状 鋼板接着 炭素繊維プレート接着

### 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、トンネルのような閉空間の火災ではなく、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が保たれていれば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、平成18年12月30日に発生した国道1号線守口高架橋の火災事故の復旧対策を検討するに際して、残存プレストレスを精度よく推定する方法がなく、残存耐力に関しても不明な点が多かったことから、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がとられ、結果的に車線規制の全面解除まで約7ヶ月を要した。

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。研究代表者はその解明を目的として、平成23年度から3年間、科学研究費による補助を受けて研究を実施し、以下の成果が得られた。

- ・コンクリートとPC鋼より線の付着強度残存率は受熱温度により大きく影響を受け、かぶりが30mmの場合、700/30分加熱で約50%、900/30分加熱で約40%、1100/30分加熱で約30%となる。また、900以上の加熱により付着応力度-自由端変位関係の初期剛性は著しく低下する。表面温度700程度までの一般的な火災の場合、付着強度の著しい低下を抑制するためには50mm以上のかぶりが必要である。

- ・プレテンションPCはり部材の高温履歴によるプレストレス減少率は、加熱温度が高いほど大きくなり、700/30分で約2%、900/30分で約4%、1100/30分で約8%となる。ただし、これらの値の算定法については今後検討の余地がある。

- ・高温履歴による最大耐力の減少率はかぶりや加熱温度によって異なり、かぶりが小さいほど、また、加熱温度が高いほど減少率が大きくなる。ただし、その値は最大でも15%程度であり、かぶりが70mmの場合、最大耐力は最高温度によらずほとんど減少しない。一方、荷重-変形関係の初期剛性は、高温履歴によって発生したひび割れの影響等により低下する。

上記のような所定の成果が得られた反面、加熱試験に際してプレテンション部材の要であるPC鋼材端部定着領域が加熱できなかったことが残存プレストレスや最大耐力に

影響を及ぼす可能性があること、静的な検討は実施できたものの、実構造物では繰返し荷重による疲労劣化、とくに付着疲労劣化が考えられること、効果的な補修・補強方法を確立することが必要であること等が今後の課題であると考えられ、本研究を申請するに至った。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は以下のとおりである。

- ・プレテンションPCはり部材のPC鋼材端部定着領域を含めた加熱試験を実施し、定着領域を含めたPC鋼材の付着劣化が残存プレストレスと残存耐力に及ぼす影響について検討を行う。その結果より、受熱温度や受熱範囲、鋼材のかぶりを考慮した残存プレストレス、残存静的耐力の評価方法を提案する。

- ・高温履歴を受けたプレテンションPCはり部材の疲労試験を実施し、付着疲労強度の低下がたわみ性状や疲労寿命等に及ぼす影響を検討する。

- ・火災による高温履歴を受けたプレテンションPC部材の効果的な補修・補強対策を明らかにするため、鋼板接着、炭素繊維プレート接着等が静的耐力や疲労耐力ならびにたわみ性状に及ぼす効果について実験的に検討する。

### 3. 研究の方法

実験に用いたPCはり供試体の概要を図-1に示す。PC鋼材にはφ12.7mmのPC鋼より線(SWPR7BN)を使用し、コンクリートの設計基準強度は $f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$ とした。なお、コンクリートに導入されるプレストレスは全断面一様で $5.8\text{N/mm}^2$ とした。実験要因は、高温履歴の有無および最高温度(高温履歴無し、700、1100)、かぶり(30mm、50mm、70mm)、補強材料(ST:鋼板、CF:炭素繊維プレート)である。

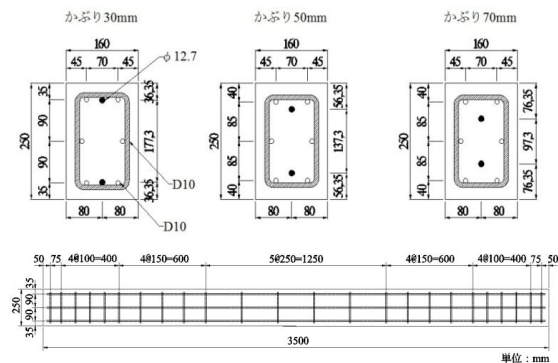


図-1 プレテンションPCはり供試体

#### (1) 加熱試験

加熱温度履歴として、Eurocodeに規定されるEX曲線(最高温度700:EXシリーズ)およびHC曲線(最高温度1100:HCシリーズ)を採用した。これらの加熱曲線を図-2に示す。なお、加熱時間はいずれも30分と

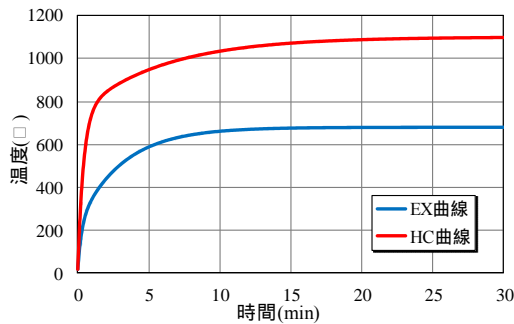


図-2 加熱曲線

し、加熱範囲は PC 鋼材定着部を含む供試体下面全体とした。加熱試験中は 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熱電対により測定するとともに、炉内温度を測定した。ただし、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。

(2) 静的載荷試験および疲労試験

静的載荷試験および疲労試験は、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た。静的載荷は、破壊に至るまで単調漸増型載荷とした。疲労試験では、上限荷重として健全な PC はりのディコンプレッションモーメントに相当する 18kN と、曲げひび割れ発生荷重に相当する 30kN の 2 種類を設定し、各 10 万回の繰返し荷重を与えた。また、下限荷重はいずれも 5kN とした。なお、疲労破壊を生じなかった供試体については、その後静的載荷を実施し、残存耐力を求めた。

(3) 補強方法

加熱した供試体の静的試験結果より、健全な供試体からの耐荷力の減少量を算出し、その減少量を鋼板 (SS400) で補うものとして、その必要断面積を求めた (幅 140mm、厚さ 2.3mm)。また炭素繊維プレートの補強量は鋼板で補強した場合と軸方向剛性 EA ができるだけ等しくなるようにその断面積を求めた (幅 100mm、厚さ 2.0mm、実際の EA は鋼板の 1.4 倍程度)。

補強材の接着方法は、供試体底面の損傷個



写真-1 補強後の供試体の状況

所をはった後、鋼板では 10mm のアンカーを用いて鋼板を設置し、その後注入樹脂で固定した。炭素繊維プレートでは、ひび割れ部に塗布することで 0.3mm 以下の微細なひび割れに毛細管現象により浸透し、接着一体化をすることが可能な樹脂で断面修復をした後、炭素繊維プレートをエポキシ樹脂で圧着した。補強後の状況を写真-1 に示す。

4. 研究成果

(1) 加熱後のコンクリートの諸強度

表-1 に、材料試験により得られた加熱後のコンクリートの諸強度を示す。加熱によりコンクリート強度は大きく低下し、特に、曲げ強度、ヤング係数は加熱によるひび割れの影響により著しく低下することがわかる。

表-1 加熱後のコンクリートの諸強度

シリーズ	圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )
N	46.6	33.4	2.73	7.51
EX700	25.0	8.9	1.8	1.5
HC1100	9.1	0.4	0.75	0.22

(2) はり供試体の最高受熱温度

表-2 にはり供試体の各かぶり位置の最高受熱温度 (平均値) を、また、図-3 に 1100 で加熱した場合の炉内およびコンクリート内部の温度履歴の一例を示す。

表-2 より、コンクリート内部温度は 700 と 1100 で 1.4~1.8 倍の差が生じる結果となった。なお、1100 で加熱した場合、かぶり 30mm 位置での最高温度は平均で約 350

表-2 各かぶり位置の最高受熱温度

シリーズ	加熱温度 (°C)	最高受熱温度 (°C: 平均値)		
		30mm 位置	50mm 位置	70mm 位置
EX700	700	193	155	128
HC1100	1100	348	229	177

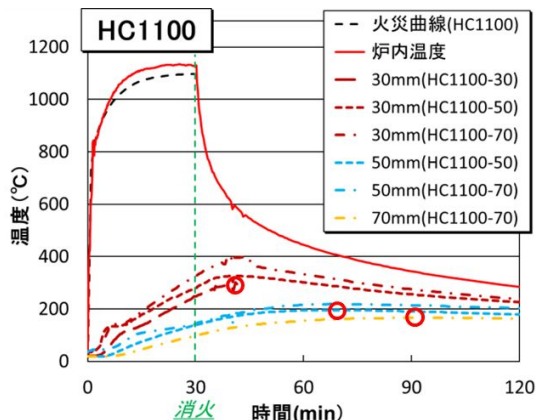


図-3 内部温度履歴の一例 (1100 加熱)

と高くなるが、PC 鋼材の加熱冷却後の強度が低下するような領域には至っていない。

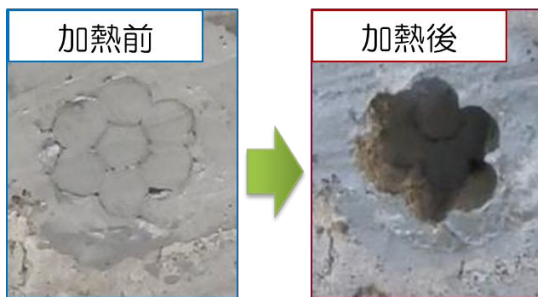
### (3) プレストレス減少率

表-3 に加熱によるプレストレス減少率を、また、写真-2 に加熱試験前後の PC 鋼材定着端部の状況を示す。

加熱温度を高くすることによってプレストレスの減少量は大きくなり、特に 1100 加熱・かぶり 30mm の場合は、写真-2 に示すように、PC 鋼材が加熱に伴う付着の劣化により大きく内部に引き込まれ、導入プレストレスの約 80% が消失する結果となった。定着部を直接加熱しない既往の研究では、1100 加熱・かぶり 30mm の場合のプレストレス減少率が約 8% であったことを考慮すると、プレテンション PC 部材で鋼材定着部が直接高温にさらされるような火災を受ける場合は、プレストレスが大きく減少する可能性があることがわかる。一方、かぶりを大きく確保することで加熱によるプレストレス力の損失は抑制され、特に、かぶりを 70mm 確保することでプレストレス力の減少を約 45% に抑えることができることがわかる。

表-3 プレストレス減少率

供試体名	加熱温度 (°C)	かぶり (mm)	プレストレス減少率 (%)	平均値
30EX700-30W-1	700	30	57.1	52.0
30EX700-30W-2			42.6	
30EX700-30W-ST1			48.2	
30EX700-30W-ST2			53.2	
30EX700-30W-CF1			54.1	
30EX700-30W-CF2			56.8	
30HC1100-30W-2	1100	30	68.4	77.9
30HC1100-30W-ST1			81.0	
30HC1100-30W-ST2			79.0	
30HC1100-30W-CF1			85.3	
30HC1100-30W-CF2			75.6	
30EX700-50W-1			700	
30EX700-50W-2	50	53.0		
30EX700-70W-1	70	50.4		45.6
30EX700-70W-2	70	40.8		
30HC1100-50W-2	1100	50	63.5	63.5
30HC1100-70W-2		70	46.7	



30HC1100-30W-1

写真-2 加熱試験前後の定着端部の状況

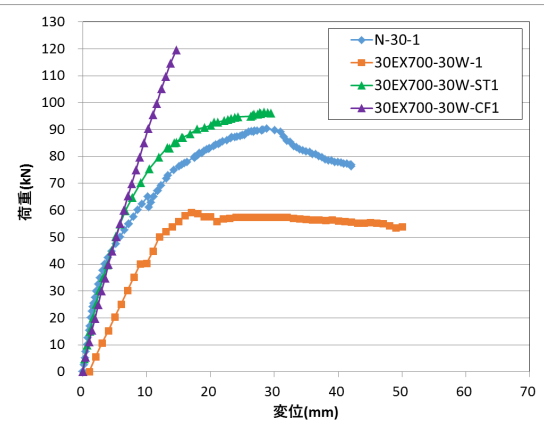
### (4) 静的荷重試験結果

表-4 に、健全な供試体の曲げ破壊荷重計算値  $P_u$  と最大荷重実測値  $P_{max}$  との比および最大荷重実測値の N シリーズ供試体の最大荷重実測値に対する割合を示す。また図-4 に荷重 - 中央変位関係の一例を示す。

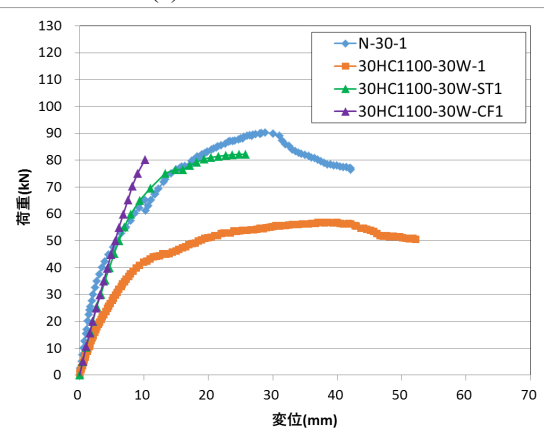
表-4 より、補強を行わない全ての供試体の  $P_{max}$  が N シリーズの  $P_{max}$  を下回ることから、プレストレスの減少に加え材料劣化や付着

表-4 静的荷重試験結果

供試体名	曲げ破壊	最大荷重	$P_{max}/P_u$	N シリーズに対する最大荷重実測値の割合
	荷重 $P_u$ (kN)	実測値 $P_{max}$ (kN)		
N-30-1	71.2	90.3	1.27	-
N-50-1	64.9	87.6	1.35	
N-70-1	60	81.2	1.35	
30EX700-30W-1	71.2	59.3	0.83	0.66
30EX700-50W-1	64.9	60.7	0.94	0.69
30EX700-70W-1	60	63.8	1.06	0.79
30HC1100-30W-1	71.2	57.1	0.80	0.63
30HC1100-50W-1	64.9	61.2	0.94	0.70
30HC1100-70W-1	60	76.4	1.27	0.94
30EX700-30W-ST1	71.2	96.5	1.36	1.07
30EX700-30W-CF1		119.6	1.68	1.32
30HC1100-30W-ST1		82.2	1.15	0.91
30HC1100-30W-CF1		80.1	1.13	0.89



(a) 加熱温度 700



(b) 加熱温度 1100

図-4 荷重 - 変位関係の一例

の低下の影響が大きいことがわかる。しかし、補強した供試体において、700 で加熱した供試体では最大荷重  $P_{max}$  が N-30 を上回り、補強の効果が十分に発揮されていることが確認された。

図-4 より、補強を行わない供試体は初期剛性が著しく低下していることがわかる。これは、加熱によるひび割れの発生に伴う剛性低下やプレストレスの減少が大きく影響していると考えられる。一方、補強を行うことで初期剛性は加熱しない供試体 (N-30-1) とほぼ同等まで回復する結果となった。ただし、加熱温度の違いによって僅かに初期剛性の回復量に差が生じ、1100 加熱の方が 700 加熱の場合よりも初期剛性の回復量が僅か

に少なくなった。これは、加熱温度の違いによって補強材の接着面の損傷状況が異なるためだと考えられる。

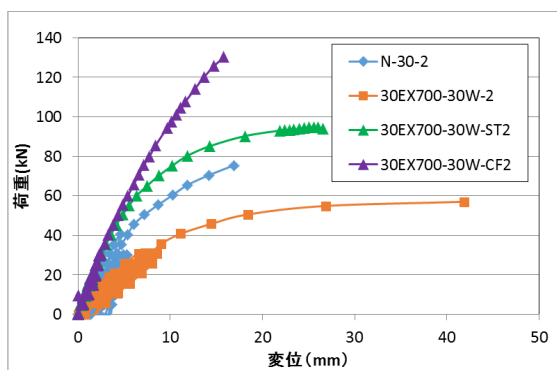
#### (5) 疲労試験結果

表 5 に、疲労寿命、残存耐力、N シリーズに対する残存最大荷重実測値の比を示す。また、図-5 荷重 - 中央変位関係の一例を示す。

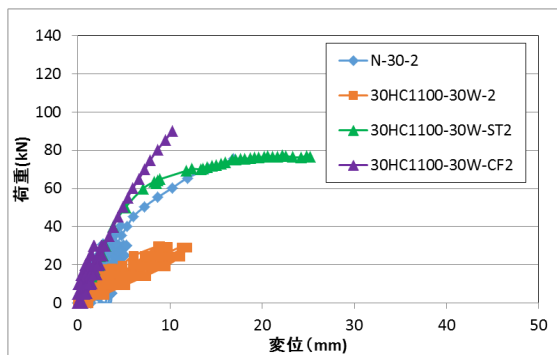
補強を行わない 30EX700-30W 以外の供試体は繰返し载荷の途中で破壊に至ったことから、プレストレスの減少に加え材料劣化や付着の低下が疲労性状に及ぼす影響が極めて大きいことがわかる。しかし、補強した供試体はいずれも疲労破壊せず、700 で加熱した供試体では残存静的耐力が加熱しない供試体 (N-30-2) 残存耐力を上回り、補強の効果が十分に発揮されていることが確認された。一方、加熱温度が 1100 の場合、鋼板

表-5 疲労試験結果

シリーズ	疲労寿命	残存静的耐力	Nシリーズに対する比
N-30-2	疲労破壊せず	81.0kN	-
N-50-2	疲労破壊せず	69.9kN	-
N-70-2	疲労破壊せず	84.5kN	-
30EX700-30W	疲労破壊せず	59.6kN	0.74
30EX700-30W-ST2	疲労破壊せず	94.0kN	1.16
30EX700-30W-CF2	疲労破壊せず	130.0kN	1.60
30EX700-50W	30kN : 5000回	80.1kN*	-
30EX700-70W	18kN : 43950回	-	-
30HC1100-30W	30kN : 9428回	-	-
30HC1100-30W-ST2	疲労破壊せず	76.8kN	0.95
30HC1100-30W-CF2	疲労破壊せず	90.2kN	1.11
30HC1100-50W	30kN : 28468回	-	-
30HC1100-70W	30kN : 21902回	-	-



(a) 加熱温度 700



(b) 加熱温度 1100

図-5 荷重 - 変位関係の一例 (疲労試験)

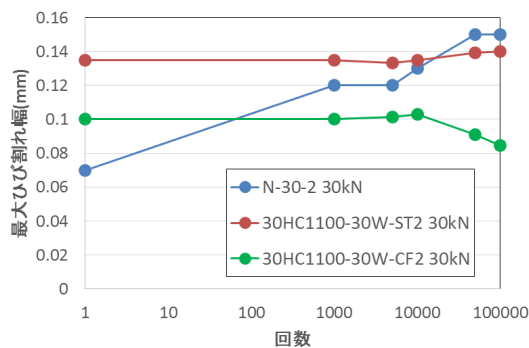


図-6 最大ひび割れ幅の変化

で補強した供試体は加熱しない供試体の残存耐力までは回復しなかった。これは、700 と 1100 で PC 鋼材定着部のコンクリートと PC 鋼材の付着強度の残存率が異なり、プレストレスの減少量が異なることに加え、接着面のコンクリートの劣化による補強材の接着の早期剥離が起因しているのではないかと考えられる。また、炭素繊維プレートで補強した供試体は静的载荷試験、疲労試験後の静的载荷試験のいずれにおいても、炭素繊維プレートの剥離により終局破壊に至り、剥離したプレートの表面には下面コンクリートが付着している状況であった。終局時近傍の炭素繊維プレートとコンクリートの付着応力度は鋼板の場合の約 2 倍となっており、付着応力度の増加と高温履歴によるコンクリート表面の損傷に起因して最終的に剥離が生じたと考えられる。

図-5 より、加熱された後に補強を行わない供試体は、静的载荷試験と同様に初期剛性が著しく低下する傾向を示した。しかし、補強を行うことで初期剛性は加熱しない供試体以上に回復する結果となった。

図-6 は 1100 で加熱した場合の 30kN の繰返しにおける最大ひび割れ幅の変化を示したものである。補強供試体は、加熱によるひび割れの影響で、初载荷時のひび割れ幅は N シリーズ (N-30-2) よりも大きくなるが、30kN の繰返し载荷時では N-30-2 供試体のひび割れ幅が繰返しとともに増加するのに対し、補強供試体では一定値を保っており、ひび割れの進展抑制に効果を発揮していることがわかる。

なお、かぶり量が 50mm および 70mm の場合、補強を行わない場合はいずれも疲労破壊していることから、プレテンション PC 部材が火災によって 700 以上の高温履歴を受けた場合は、補強を行うことを優先的に考慮する必要があると言える。

#### (6) まとめ

既往の研究では、プレテンション PC 部材が火災による高温履歴を受ける場合、PC 鋼材定着部が直接火災にさらされず、その影響が小さい場合には、大きなかぶりを確保することでプレストレスの損失や最大耐力の低下を抑制することが可能であるとしていた。しかし、PC 鋼材定着部が直接高温履歴を受

けるような場合，加熱によるコンクリートの劣化が激しく，定着部近傍のコンクリートの付着強度の低下が著しくなるため，プレストレスの減少が著しくなり，特に耐疲労特性が著しく減少することが明らかとなった。また，かぶり厚が 30mm の供試体を加熱した後，健全な供試体の静的耐力と同等になるように鋼板および炭素繊維プレートで補強を行い，静的耐力および疲労性状を検討した結果，加熱温度が 1100 になるとその効果は若干減少するものの，既往の補強方法を用いることで健全な供試体と同程度まで耐力や変形性状を回復することができることが明らかとなった。

## 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Susumu Inoue, Naoyuki Yokoyama, Osamu Ohyama : Effect of Fire Damage on the Residual Prestress and Load Carrying Capacity of Pre-tensioned Prestressed Concrete Beams, Proceedings of 10th Japanese German Bridge Symposium, 査読無, 2014

〔学会発表〕(計 4 件)

田淵陽佑，井上晋，三方康弘：火災による損傷を受けたプレテンション PC はり部材の耐荷特性とその補強効果に関する研究，2017 年 5 月 27 日，大阪工業大学（大阪府・大阪市）

田淵陽佑，井上晋，三方康弘：火災による損傷を受けたプレテンション PC はり部材の疲労性状，2016 年 6 月 11 日，立命館大学（滋賀県・草津市）

田淵陽佑，井上晋，三方康弘：火災を受けたプレテンション PC はり部材の残存耐荷特性に及ぼす受熱範囲の影響，2015 年 5 月 30 日，摂南大学（大阪府・寝屋川市）

横山直之，井上晋，三方康弘，大山理：火災による高温履歴を受けたプレテンション PC 梁部材の残存耐荷特性に関する実験的研究，平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会，2014 年 5 月 31 日，大阪産業大学（大阪府・大東市）

## 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：30168447