

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06520

研究課題名（和文）プレテンションPC橋の火災被災後の健全度評価と補強設計法

研究課題名（英文）Soundness evaluation and rehabilitation design of pre-tensioned prestressed concrete bridges after a fire

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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：1100℃加熱の場合、加熱がプレテンションPC桁の残存耐力や疲労性状・変形性状に及ぼす影響は著しく、継続使用を考える場合は適切な補強が必要となることが明らかとなった。本研究では汎用的な補強技術であるポリマーセメントモルタルによる断面修復と鋼板接着による補強を実施したが、耐力や初期剛性の回復、さらにはひび割れや変形の進行の抑制等、十分な効果を確認することができた。さらに、PC鋼材の受熱温度からプレストレスの減少率、PC鋼材とコンクリートの付着強度の低下率、およびPC鋼材の強度低下を推定し、それらを考慮することにより火災被災後のPC桁の残存耐力について安全側に評価できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレテンションPC橋の場合、付着特性の劣化に伴うプレストレスの減少や静的残存耐力、疲労耐力に関しては既往の知見がほとんどなく、従来ほとんど行われることのなかった実構造部材レベルでの火災加熱実験を大型加熱炉を用いて行い、その結果に基づいて、火災による損傷を受けたプレテンションPC橋の健全度評価手法や補強設計法を示すことができた点に大きな学術的意義・社会的意義を有し、その成果は今後社会基盤施設の耐火性を検討する際の貴重な資料となる。また、今後の課題や研究の方向性についても併せて示しており、学術的意義は高い。

研究成果の概要（英文）：When the heating temperature was 1100 °C, the effect of heating on the residual load carrying capacity, fatigue properties and deformation properties of the pre-tensioned PC girder became significant, and an appropriate strengthening is necessary when considering continued use. In this study, cross-section restoration with polymer cement mortar and reinforcement with steel plate adhesion were performed. As a result, sufficient effects such as recovery of maximum load carrying capacity and initial rigidity, and suppression of progress of cracking and deformation were confirmed. Furthermore, the residual load carrying capacity of PC girders after a fire disaster can be estimated appropriately in safe side considering the prestress decrease rate, the decrease rate of the bond strength between prestressing steel and concrete, and the reduction in the strength of the prestressing steels which are expected from the maximum experienced temperature of prestressing steels.

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 加熱試験 最高受熱温度 残存耐力 残存プレストレス 鋼板接着補強 爆裂 熱伝導解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

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耐荷力に直接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、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に代表されるように、プレテンション方式の PC 橋が火災を受けた場合、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力・疲労特性に関する情報が必要となるが、この点に関する知見はきわめて少ないのが現状であった。そのような状況の下、本研究の研究代表者は、平成 23~25 および 26~28 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、残存静的耐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。これらにより得られた主な知見は以下のとおりである。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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るが、PC 鋼材端部定着部が直接加熱されない場合は、1100 30 分で加熱した場合でも約 8%と比較的小さい。これに対して、定着部が直接加熱される場合は、はり端部の PC 鋼材定着部側面に付着割裂ひび割れが観察されるなど、PC 鋼材とコンクリートの付着劣化が顕著となり、プレストレスが最大で 50%程度減少する。

(4) 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、PC 鋼材定着部が加熱されない場合は、その値は付着強度ほどではなく最大でもかぶり 30mm で 15%程度であり、かぶりが 70mm の場合、最大耐力は加熱温度によらずほとんど減少しない。一方、PC 鋼材定着部が加熱される場合は、かぶりが 30mm の場合、耐力減少率が 35%にも達する。

(5) 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。特に PC 鋼材定着部が加熱を受けるとプレストレスの減少に伴い部材剛性がさらに低下する。

(6) PC 鋼材端部定着部が加熱を受ける場合、その疲労耐久性は加熱を受けない供試体と比較して著しく低下する。この主な原因は加熱によるひび割れや PC 鋼材の付着損失による剛性の低下(変形の増加)が大きく影響しており、最終的に曲げ圧縮部コンクリートの圧縮疲労破壊を生じる可能性が高くなる。このことから判断すると、耐荷力の回復、特に疲労耐久性の回復には、部材の剛性を高めるような補強が必要であると判断される。

平成 28 年度までの研究により、当初の目的は達成できたと考えているが、これらの検討は引張側の PC 鋼材が 1 本のみモデル供試体で行っており、実橋に用いられるような PC 鋼材が断面内に複数本配置された部材でその性状を確認しておく必要があること、また、これまでに得られた知見をもとに、実橋が火災による損傷を受けた場合の健全度評価手法や補強設計法を確立しておくことが今後の大きな課題である考え、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、平成 28 年度までに得られた研究成果を基礎とし、実構造に用いられるプレテンション PC 桁を対象として、火災被災後の各種構造特性と補強効果を確認するとともに、熱伝導解析等を通じて、火災を受けたプレテンション PC 橋の健全度評価手法と補強設計法を提案することである。具体的な内容は以下のとおりである。

(1) 実橋に用いられる、JIS A 5373 スラブ用プレストレスコンクリート橋げたを対象とした加熱試験を実施し、火災による高温履歴が残存プレストレスや残存耐力・残存疲労耐久性に及ぼす影響について実部材レベルで検討を行う。

(2) 加熱を受けた供試体の熱伝導解析を行い、PC 鋼材位置のコンクリート温度の推定を行う。また、これまでに得られている加熱後の PC 鋼材の付着強度残存率やプレストレスの減少率、加熱冷却後の PC 鋼材の強度残存率を用いて残存耐荷力を評価する手法を提案する。さらに、その手法の妥当性を実験結果と比較することにより検証する。

(3) 平成 28 年度の研究成果により、効果的であると確認された鋼板接着補強を実施し、その効果を実部材レベルで確認するとともに、その補強設計法を提案する。

以上より、火災による高温履歴を受けたプレテンション PC 部材の健全性評価・判定・対策に関する総合的な資料を提示する。

3. 研究の方法

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 43.65mm

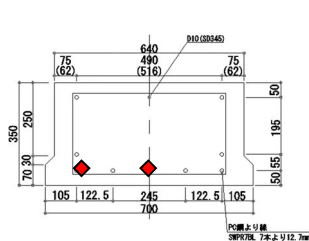


図-1 供試体断面図

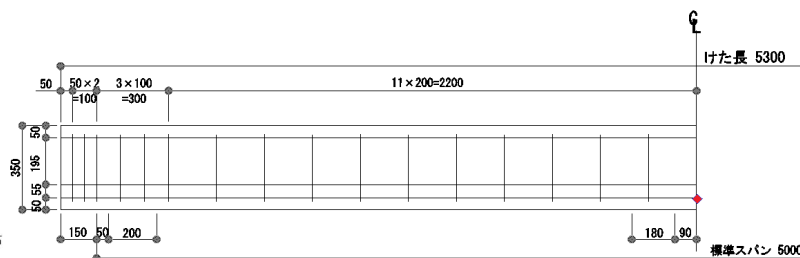


図-2 供試体側面図

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 (SWPR7BL) 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 $\sigma'_{cr}=0.3\text{N/mm}^2$ 、下縁で $\sigma_{cr}=9.4\text{N/mm}^2$ である。また、加熱試験時の PC 鋼材の受熱温度を測定するために、各供試体のスパン中央位置 (図-1, 2 中印) に 2 個の熱電対を設置した。供試体の名称と実験要因は表-1 に示すとおりである。

なお、補強を行う供試体 (30HC1100-ST シリーズ) の補強量については、最高温度 1100 で加熱した供試体 (30HC1100-1) と健全な供試体 (N-1) の静的最大耐力の差を求め、その減少量を鋼板 (SS400) で補うものとして、式(3-1)より必要断面積 A_s を求めた。

$$M_u = A_s \cdot f_{sy} (d - 0.4X) \quad (3-1)$$

M_u : 曲げ耐力減少量 (N・mm), A_s : 必要鋼板の断面積 (mm²), d : 鋼板の有効高さ, f_{sy} : 鋼板の降伏強度 (N/mm²), X : 健全な供試体の終局時の中立軸 (mm)

(1) 加熱試験

加熱試験に用いた火災曲線は、以下の式(3-2)、(3-3)に示される Eurocode に規定されている最高温度を 700°C に設定した EX 曲線 (外部火災曲線)、最高温度を 1100°C に設定した HC 曲線 (油火災を対象とした炭化水素曲線) の 2 種類である。なお、加熱時間は 30 分間、加熱区間は桁中央部 4000mm とし、両端部 650mm を除いた底面からのみの加熱を行った。

$$\text{EX 曲線: } \theta_{700} = 20 + 660 (1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) \quad (3-2)$$

$$\text{HC 曲線: } \theta_{1100} = 20 + 1080 (1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (3-3)$$

ここに、 θ : 温度 (°C), t : 時間 (min)

加熱試験時のコンクリートの含水率は 30EX700 シリーズ、30HC1100-ST シリーズは 4.0%、30HC1000 シリーズは 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の内部温度、炉内温度、PC 鋼材とその周囲のコンクリートの加熱後の相対変位量の 3 項目である。

(2) 荷重試験

静的荷重試験は、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 (せん断スパン比 $a/d=6.17$) とし、破壊に至るまで単調漸増荷重を実施した。疲労試験は、静的荷重試験と同様の対象 2 点集中荷重方式とし、上限荷重を加熱しない PC 桁のディコンプレッションモーメントに相当する 140kN、曲げひび割れ発生荷重に相当する 180kN に設定し 0.5 ~ 1.2Hz で各 100000 回繰返し荷重を行った。なお、全ての供試体が 180kN の 100000 回の繰返しで疲労破壊に至らなかったため、その後静的荷重を実施し残存耐力を求めた。

4. 研究成果

(1) 加熱試験結果

加熱後のコンクリートの諸強度を表-2 に示す。1100 で加熱した 30HC1100 シリーズ、30HC1100-ST シリーズについては、加熱によりコンクリートが表層から崩壊し、強度を求めることができなかった。

各 PC 桁供試体内部の PC 鋼材位置の最高受熱温度を表-3 に、図-3 に時間の経過に伴う内部温度の推移の一

表-2 コンクリートの諸強度

シリーズ	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
Nシリーズ	62.5	43.6	4.18	6.59
30EX700シリーズ	19.3	3.86	1.35	0.74

表-3 最高受熱温度と到達時間

供試体名	最高温度 (°C)	到達時間 (min)
30EX700-1	196	36
30EX700-2	176	34
平均	186	35
30HC1100-1	275	45
30HC1100-2	315(912)	42(30)
平均	295	44
30HC1100-ST1	263(791)	54(9)
30HC1100-ST2	191(460)	31(34)
平均	227	43

(括弧内は爆裂箇所の最高温度)

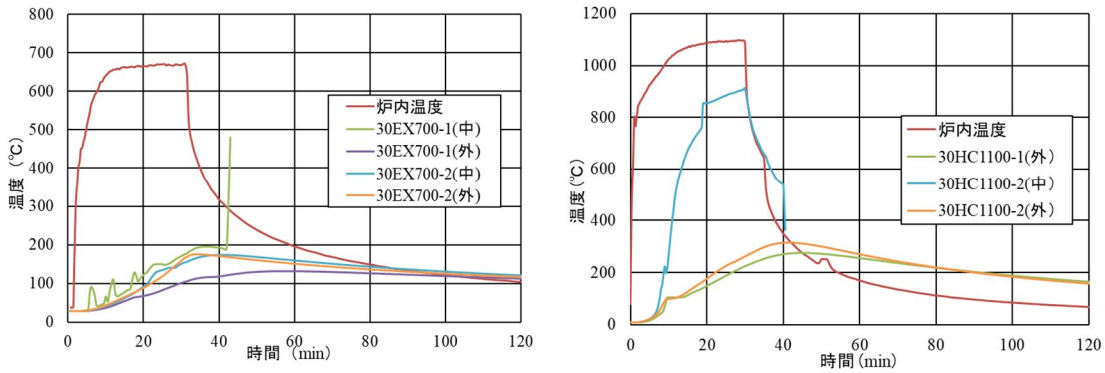


図-3 炉内温度と供試体内部温度

例を示す。表-3 より、コンクリート内部温度は30EX700 シリーズに対し30HC1100 シリーズは約1.6 倍、30HC1100-ST シリーズは約1.2 倍の差が生じる結果となった。加熱前後の下縁側 PC 鋼材と周囲のコンクリートの間の相対変化量から、加熱後のプレストレス減少率とプレストレスの減少を考慮した下縁応力の減少率を算出した結果を表-4 に示す。表-4 より、PC 鋼材の最高受熱温度が高くなるほどコンクリートと PC 鋼材の付着力が低下するため、PC 桁の下縁側 PC 鋼材のプレストレス減少率は大きくなった。下縁応力の減少率についても同様であった。

表-4 プレストレスと下縁応力減少率

供試体名	加熱試験によるプレストレス減少率 (%)	下縁応力減少率 (%)
30EX700-1	6.58	5.83
30EX700-2	7.24	6.46
30HC1100-1	10.7	9.53
30HC1100-2	9.89	8.79
30HC1100-ST1	7.27	6.46
30HC1100-ST2	7.53	6.67

図-4 に加熱後の PC 桁下面の状況を示す。30EX700 シリーズは底面全体のコンクリートが一様にはく落とし、底面のコンクリートとともに側面のコンクリートもはく落していることが確認できたが、PC 鋼材の露出は認められなかった。一方、30HC1100 シリーズと30HC1100-ST シリーズでは、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ていることが確認された。また、爆裂深さに関しても、加熱温度1100 度では底面から50mm 付近に位置するせん断補強筋や PC 鋼材が露出し、直接加熱を受ける状態となっていたことがわかる。

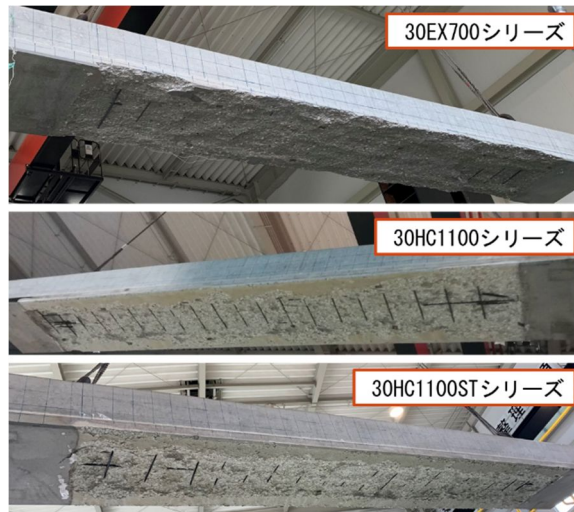


図-4 加熱後の PC 桁下面の状況

(2) 載荷試験結果

加熱後の供試体はコンクリートの爆裂の影響により PC 鋼材が直接高温を受けることから強度低下が懸念される。また、プレストレス力および付着力の低下に伴う終局時の PC 鋼材引張応力度の低下が考えられる。これらの影響を考慮し、終局時の PC 鋼材引張ひずみを式(4-1)によって求め、PC 鋼材の強度、プレストレス力および付着力の低下がどの程度最大耐力に影響を及ぼすかを検討した。

$$\varepsilon_p = \alpha \varepsilon_{pi} + \beta \frac{d-x}{x} \varepsilon'_{cu} + \varepsilon_{cpi} \quad (4-1)$$

ε_p : 終局時の PC 鋼材引張ひずみ、 ε_{pi} : 有効プレストレス力による PC 鋼材の引張ひずみ、 ε_{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、 ε'_{cu} : コンクリートの終局限界ひずみ、 α : プレストレスの残存率、 β : 最大付着応力度残存率

上式中のプレストレスの残存率 α については加熱試験結果(表-4 参照)を、また、最大付着応力度残存率 β については既往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。さらに、高温履歴を受けた PC 鋼材の強度低減係数には、Eurocode に規定され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た。これらの値を静的載荷試験結果(疲労試験後の静的載荷含む)とともに表-5 に示す。なお、プレストレス残存率および最大付着応力度残存率は下側5本のすべての PC 鋼材に適用し、PC 鋼材の強度低減係数は爆裂による影響が大きいと考えられる中央部3本の PC 鋼材にのみ適用した。

表-5 より、30EX700 シリーズでは、加熱面のコンクリートが爆裂によりはく落しているにもかかわらず、PC 鋼材が直接高温に晒されることがなかったため、その最大耐力は加熱しない N

表-5 静的載荷試験結果（疲労試験後の静的載荷含む）

供試体名	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	Nシリーズ に対する 最大 荷重比	圧縮部コ ンクリ ート強度 f'_c (N/mm^2)	α (%)	β (%)	PC 鋼材 の強度低 減係数
N-1	369	370	1.00	-	72.8	-	-	-
N-2	391	363	1.08					
30EX700-1	397	359	1.11	1.08	62.5	93.4	51.1	1.00
30EX700-2	380	359	1.06	0.97				
30HC1100-1	248	229	1.08	0.67	75.6	89.3	31.4	0.06
30HC1100-2	314	219	1.43	0.80				
30HC1100-ST1	620	462	1.34	1.68	69.0	92.7	34.7	0.11
30HC1100-ST2	629	551	1.14	1.61				

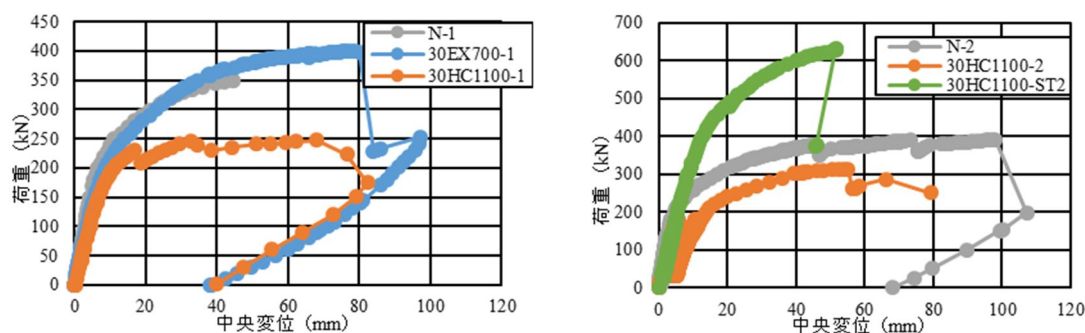


図-5 荷重 - スパン中央変位曲線の一例

シリーズと比較してほとんど低下していない。一方、30HC1100 シリーズでは、爆裂深さが大きく PC 鋼材が直接高温に晒されたことから載荷中に PC 鋼材の破断が生じ、最大耐力は N シリーズと比較して 20~33%低下している。これらの結果から、耐力低下の主な要因は PC 鋼材の直接加熱による強度低下であったといえる。これに対し、プレストレスの減少率や最大付着応力度低下率が最大耐力に及ぼす影響は本研究ではさほど顕著ではなかった。これは、プレテンション PC 桁の PC 鋼材定着部である端部を加熱していないことによる影響が大きく、既往の研究で示したように、定着部が直接加熱を受ける場合は、付着強度の減少やそれに伴うプレストレスの減少が大きくなることから、これらが最大耐力に及ぼす影響は大きくなると考えられる。また、鋼板接着により補強した供試体は N シリーズの供試体の最大耐力を大きく上回っており、十分な補強効果が得られている。

また、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した曲げ破壊荷重計算値は最大荷重実測値を安全側に、かつ、比較的精度よく評価できており、本研究で用いた手法は妥当であったと言える。

図-5 に荷重 - スパン中央変位曲線の一例を示す。700 で加熱した 30EX700 シリーズの供試体は、加熱しない N シリーズの供試体と最大耐力、初期剛性ともほとんど変わらないのに対し、1100 で加熱した 30HC1100 シリーズの供試体は、最大耐力や初期剛性が他のものと比較して低下するとともに、疲労試験における残留変位の進行が顕著となった。鋼板で補強した供試体では、初期剛性が回復するとともに、残留変位の進行もほとんど見られず、所定の補強効果が得られていることが確認できた。

本研究では、最高温度 700 の加熱による影響は、耐力やひび割れの進展状況からみると大きなものではなかった。しかし、底面のコンクリートに爆裂が生じていることから断面修復や、脆弱部コンクリートのはく落防止などの措置は必要であると考えられる。一方、1100 の加熱が残存耐力や疲労性状・変形状に及ぼす影響は著しく、継続使用を考える場合は適切な補強が必要となる。本研究では汎用的な補強技術であるポリマーセメントモルタルによる断面修復と鋼板接着による補強を実施したが、耐力や初期剛性の回復、さらにはひび割れや変形の進行の抑制等、十分な効果を確認することができた。さらに、PC 鋼材の受熱温度からプレストレスの減少率、PC 鋼材とコンクリートの付着強度の低下率、および PC 鋼材の強度低下を推定し、それらを考慮することにより火災被災後の PC 桁の残存耐力について安全側に評価できることを明らかにした。今後の課題として、爆裂の影響範囲を実験により明確にすること、爆裂の影響を考慮した熱伝導解析を行い PC 鋼材の受熱温度の推定の精度を高めていくこと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1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 越野まやか, 井上晋	4. 巻 28
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第28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	6. 最初と最後の頁 103-108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 越野まやか, 井上晋, 三方康弘
2. 発表標題 プレテンションPC桁の火災被災後の残存耐荷特性
3. 学会等名 令和元年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 越野まやか, 井上晋, 三方康弘
2. 発表標題 プレテンションPC桁の火災時の熱伝導解析と耐荷特性
3. 学会等名 平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 越野まやか, 井上晋
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第28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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 越野まやか, 井上晋, 三方康弘
2. 発表標題 火災を受けたプレテンションPC桁の残存耐荷特性
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 越野まやか, 井上晋, 三方康弘
2. 発表標題 JISプレテンションPC桁の火災被災後の残存耐荷特性と補強効果に関する研究
3. 学会等名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020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