

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

大阪工業大学大学院		○菊本 幸司
大阪工業大学大学院		横山 直之
大阪工業大学	正会員 工博	井上 晋
大阪工業大学	正会員 工博	三方 康弘

Abstract : When a pre-tensioned prestressed concrete member is exposed to fire, the introduced prestress may decrease due to the reduction in bond strength between prestressing strand and concrete. In this study, fire resistance tests of bond strength specimens with different cover and diameter of prestressing strand were done under three types of heating curves in order to examine the maximum experienced temperature of the strand. After that, bond strength tests were carried out to investigate the effects of high temperature on residual bond strength characteristics between concrete and prestressing strand.

Key words : Bond strength, Prestressing strand, Fire, High-temperature history, Anchorage length

1. はじめに

近年、都市内高架橋における火災事故が多数報告されている。コンクリート橋が火災を受けた場合、ひび割れの発生や爆裂によるコンクリート表面のはく落といった損傷は生じるものの、かぶりが鋼材を保護する性能を有していることから、鋼橋のように崩落に至る可能性は比較的少ない。しかしながら、損傷の程度と残存耐荷力の関係を把握しておくことは重要であり、とくにプレテンション PC 部材が火災を受けた場合の被災後の供用性判定に際しては、鋼材とコンクリートの付着の低下に伴うプレストレスの減少を的確に把握しておく必要がある。

本研究では、その基礎的資料を得ることを目的として、PC 鋼より線のかぶりを 30, 50, 70mm と変化させた付着強度供試体に対し、最高温度を 700℃ に設定した Eurocode¹⁾ の EX 曲線 (外部火災曲線) ならびに最高温度を 900℃, 1100℃ に設定した HC 曲線 (炭化水素火災曲線) を用いて耐火試験を実施し、各かぶり位置での鋼材の受熱温度を測定するとともに、残存付着強度を引抜き試験により求め、受熱温度と付着強度の関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体形状

本研究に使用した付着強度試験供試体の概要を図-1 に示す。供試体断面寸法は、7 本より PC 鋼より線 (SWPR7BL) の径 ($\phi 12.7$, $\phi 15.2$) とかぶり (30, 50, 70mm) の組合せにより決定し (要因により断面寸法 x は異なる), 長さは全て 100mm の一定とした。なお, x は 72.7, 112.7, 152.7mm (径: $\phi 12.7$, かぶり: 30, 50, 70mm) と 75.2, 115.2, 155.2mm (径: $\phi 15.2$, かぶり: 30, 50, 70mm) の 6 要因である。また, PC 鋼より線は断面中央に配置し, その付着長を 4 ϕ^2 とした。コンクリートには早強ポルトランドセメントを使用し, 設計基準強度は 50N/mm² (W/C=49.7%) とした。また, 供試体は打設翌日に脱型し, 約 30 日散水養生を行った。

供試体の数は要因の組合せごとに各 9 体, 計 54 体を耐火試験方法 (EX シリーズ, HC900 シリーズ,

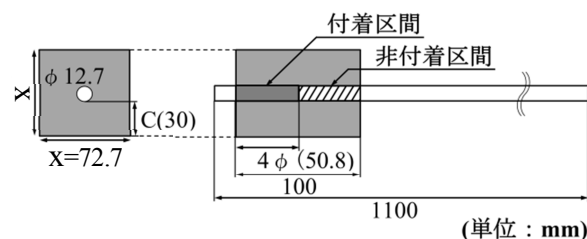


図-1 供試体概要
($\phi 12.7$ mm, かぶり 30mm の場合)

HC1000 シリーズ) ごとに作製した (総計 162 体)。また、比較のために耐火試験を実施しない供試体 (N シリーズ) も 54 体作製した。

2.2 耐火試験

耐火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℃ 受熱したことを考慮して最高温度を 700℃ に想定した。また、タンクローリーの炎上を想定し、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。最高温度 700℃ の火災曲線は EX 曲線の式 (1)¹⁾、最高温度 1100℃ の火災曲線は HC 曲線の式 (2)¹⁾ を使用し、900℃ の曲線は HC 曲線と近似させた曲線 (係数 1080 を 880 に変更) を使用した。また、加熱時間はいずれも 30 分間とした。これらの火災曲線を図-2 に示す。

$$\theta = 20 + 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) \quad (1)$$

$$\theta = 20 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (2)$$

ここに、 θ : 温度(℃), t : 時間(min)

なお、試験に際しては、桁下からの火災を想定し、付着強度試験供試体は底面からのみ加熱した。また、同形状の供試体 9 体のうち 1 体に熱電対を設置し PC 鋼より線の受熱温度を測定した (図-1 中の非付着区間下面)。EX シリーズは材齢 30 日以降、HC の各シリーズは 60~90 日以内に耐火試験を行った。

2.3 付着強度試験

付着強度試験は、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)」²⁾ に準じて行った。試験は N シリーズでは 30 日以降、耐火試験を行った供試体では材料試験も併せて耐火試験実施後 2~14 日で実施した。

3. 実験結果

3.1 耐火試験結果

加熱後のコンクリート諸強度の試験結果を表-1 に示す。なお、N シリーズの圧縮強度は材齢 30 日の強度である。これにより、加熱すると諸強度が低下することに加え、HC シリーズのように加熱温度が高い場合は、N シリーズと EX シリーズの差と比較して、小さな温度差でも強度低下率に大きく差が生じることがわかる。これは高温履歴を受けることで、内部の温度上昇に伴い水蒸気圧が上昇し、コンクリート表面および内部に微細なひび割れが発生したことによるものと考えられる。また、圧縮および引張強度と比較して曲げ強度やヤング係数が著しく低下しているが、後者についてはひび割れの影響が大きいことに加え、曲げ強度については供試体の形状に違いがあることも一つの要因と考えられる。

次に、各供試体内の鋼材位置での最高受熱温度を表-2 に、時間の経過に伴う炉内温度と鋼材の受熱温度の推移の一例を図-3 に示す。表-2 より、かぶり厚が小さいほど、また加熱温度が高いほど鋼材位置の最高受

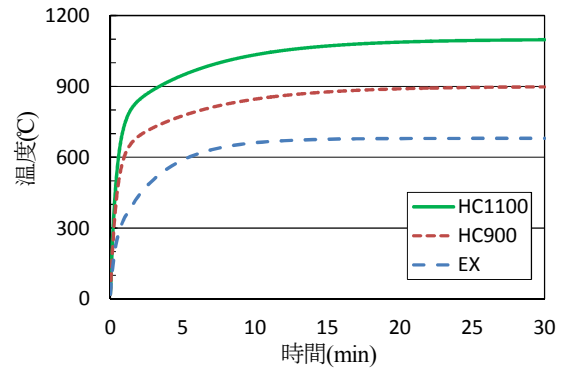


図-2 実験で使用した火災条件ごとの温度-時間関係

表-1 加熱後のコンクリート諸強度

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
Nシリーズ	34.5	3.89	3.06	29.3
EXシリーズ	25.0	1.46	1.75	8.71
HC900シリーズ	11.7	0.45	1.19	1.01
HC1100シリーズ	2.37	0.09	0.81	— ^{*)}

(注) 材料試験用供試体は炉内に入れ加熱したため、全方向から加熱を受けている

*1) 供試体表面の損傷により、ひずみ計測機器取付不能

表-2 各かぶり位置での鋼材の最高受熱温度

供試体名	最高受熱温度 (℃)		
	かぶり 30mm	かぶり 50mm	かぶり 70mm
EX-φ 12.7	160(45)	102(60)	78(58)
EX-φ 15.2	151(55)	118(60)	78(52)
HC900-φ 12.7	353(34)	162(61)	113(96)
HC900-φ 15.2	245(43)	— ^{*)}	103(126)
HC1100-φ 12.7	350(43)	197(75)	152(95)
HC1100-φ 15.2	312(51)	— ^{*)}	131(129)

(注) 括弧内は最高受熱温度に達する時間 (分) を表す

*1) 熱電対破損のため、データなし

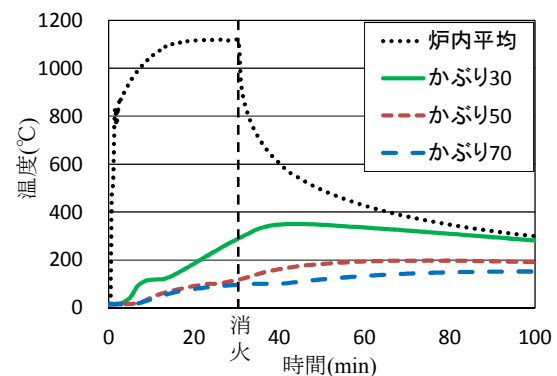


図-3 時間の経過に伴う炉内温度と鋼材受熱温度の推移 (HC1100, φ 12.7mm)

熱温度は高くなる傾向が見られた。なお、かぶり 30mm, HC900-φ12.7 供試体の最高受熱温度が最も高くなっており、加熱温度およびかぶりが同条件のφ15.2 供試体と比較して 100℃以上の相違がある。これは、同表からわかるように、かぶり 30mm の供試体において HC900-φ12.7 は最高受熱温度に達する時間が最も早いことから、加熱面に比較的大きなひび割れが早期に生じ、鋼材近傍のコンクリートの受熱温度がより高くなったためと考えられる。また、図-3 より、炉内温度の急激な上昇に対し鋼材の受熱温度は緩やかに上昇していること、消火後に鋼材が最高受熱温度に達していることから、コンクリートを介して熱が伝わるにはある程度の時間を要することがわかる。

3.2 付着強度試験結果

試験により得られた付着強度(供試体9体の平均値)を表-3に、また、高温履歴を有する供試体のNシリーズに対する付着強度残存率とかぶりの関係について、用いたPC鋼より線の各径ごとに図-4に示す。表-3に示すように、各かぶりおよび径で比較を行うと、より高い温度履歴を有する供試体ほど、平均付着強度が低下する傾向が見られたため、コンクリートとPC鋼より線間の付着特性には鋼材の最高受熱温度が大きく影響していると考えられる。

次に、図-4の付着強度残存率に着目すると、φ12.7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、両径ともにより高い温度履歴を受けた供試体ほど付着強度残存率は小さくなり、EXシリーズでおよそ50%程度、HC900シリーズで約40%、HC1100シリーズで約30%となっていることがわかる。

付着強度から算出した各供試体の必要定着長の一例を図-5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な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³⁾に、φ15.2までのPC鋼より線の定着長は65φとしてよいと記されているが、本実験の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る結果が得られた。また、EXシリーズについてはかぶり30mmの供試体のみ、この規定を上回る値を示しているため、一般的な火災を想定する場合には

表-3 平均付着強度

供試体	平均付着強度 (N/mm ²)	供試体	平均付着強度 (N/mm ²)
N-φ12.7-30	6.15	HC900-φ12.7-30	2.70
N-φ12.7-50	7.52	HC900-φ12.7-50	4.79
N-φ12.7-70	10.14	HC900-φ12.7-70	4.06
N-φ15.2-30	5.59	HC900-φ15.2-30	2.28
N-φ15.2-50	13.49	HC900-φ15.2-50	5.26
N-φ15.2-70	15.89	HC900-φ15.2-70	6.98
EX-φ12.7-30	3.47	HC1100-φ12.7-30	1.77
EX-φ12.7-50	5.81	HC1100-φ12.7-50	2.71
EX-φ12.7-70	8.68	HC1100-φ12.7-70	3.03
EX-φ15.2-30	2.97	HC1100-φ15.2-30	1.70
EX-φ15.2-50	6.07	HC1100-φ15.2-50	2.58
EX-φ15.2-70	7.77	HC1100-φ15.2-70	4.96

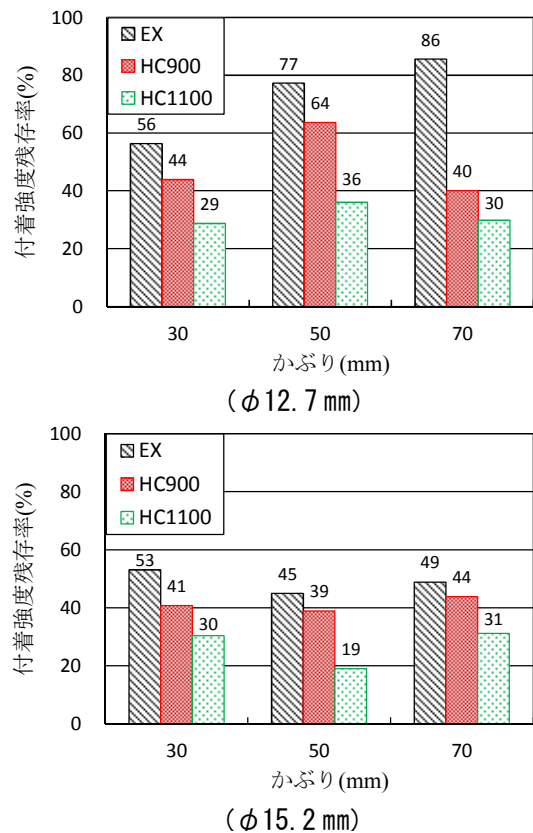


図-4 付着強度残存率-かぶり関係

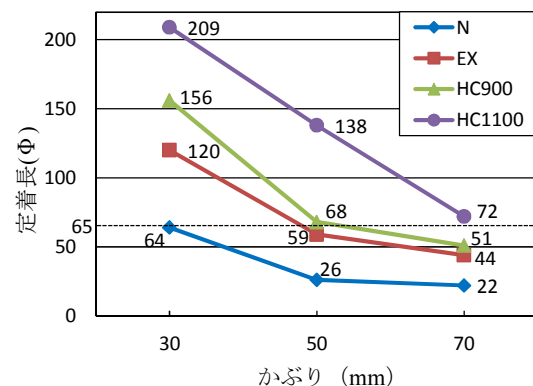


図-5 定着長算出結果 (φ15.2 mm)

50mm 以上のかぶりが必要であると考えられる。

付着強度試験から得られた付着応力度－自由端変位関係について、径がφ12.7の供試体をかぶりごとに図-6に示す。各かぶりにおいて高温履歴を受けた供試体のうち、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ほぼ同様の挙動を示していることがわかり、初期状態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、最高温度700℃の加熱を受ける場合、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⁴⁾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の両シリーズは自由端変位が载荷初期からなだらかな勾配で増加している。かぶりが大きくなるにつれその勾配は増大する傾向にあるが、微小な変化であり、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。これは高温履歴により、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トの脆弱化が著しくなることによるものと考えられる。また、HC900とHC1100のシリーズ間で、温度差による初期剛性の違いはかぶり50mmを除き見られないことから、受熱温度がある一定温度に達すると、付着抵抗の粘着成分の低下に加え、コンクリート強度の低下が初期剛性に及ぼす影響は顕著になると考えられる。また、φ12.7、かぶり30mmのHC900およびHC1100供試体に着目すると、表-2より最高受熱温度はその差が比較的少なく、同等の温度履歴を有していると判断できる。両供試体は加熱温度に違いがあるが、付着強度は同程度であり、図-6において同様の挙動を示したと考えられる。

4. まとめ

高温での加熱によりコンクリートとPC鋼より線の付着特性は大きく変化する。付着強度残存率には鋼材の受熱温度が大きく影響し、本研究ではEXシリーズで約50%、HC900シリーズで約40%、HC1100シリーズで約30%となった。また、HCシリーズのような高温履歴下ではコンクリートと鋼材間の粘着成分およびコンクリートの強度が低下することで付着応力度－自由端変位関係の初期剛性は著しく低下する。

EXシリーズについてはかぶり30mmの供試体のみ、定着長の規定を上回る値を示しているため、一般的な火災を想定する場合には50mm以上のかぶりが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Eurocode1 : Actions on structures - Part 1 - 2 : General actions - Actions on structures exposed to Fire, pp. 24-25, 2002. 11
- 2) コンクリート標準示方書 [規準編] (土木学会規準および関連規準) : 土木学会, pp. 279-282, 2010. 11
- 3) コンクリート標準示方書 [設計編 : 本編] : 土木学会, pp. 237-239, 2008. 3
- 4) 小林和夫 : コンクリート構造学 (第4版), 森北出版 (株), pp. 37-40, 2009. 2

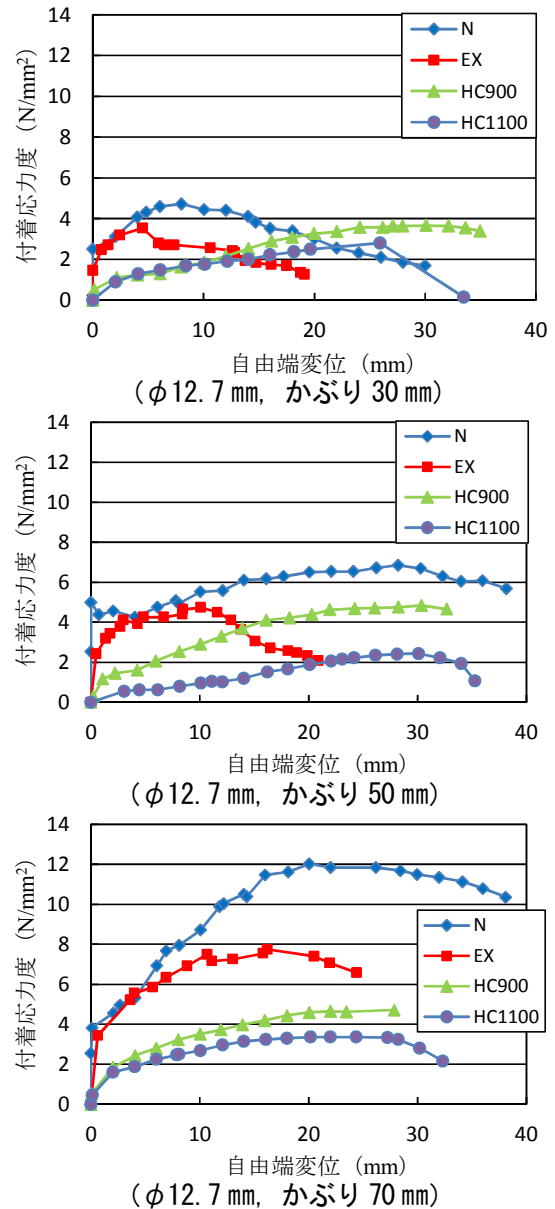


図-6 付着応力度－自由端変位関係