# 論文　連続繊維補強材の耐熱性状に関する研究

角田　敦[*1]・睦好　宏史[*2]・田邊　一仁[*3]・宮村　太輔[*4]

**要旨**：連続繊維補強材（以下 FRP ロッド）は炭素繊維、アラミド繊維等の連続繊維を樹脂で固めたものである。これらを鉄筋に代わる補強材として建築構造物に使用する場合に、火災時における耐火性能が要求される。本研究では、耐熱性の高い樹脂を選定し、これを適用した FRP ロッドの熱特性、高温下における引張強度特性、コンクリートとの付着特性、FRP ロッドを補強材としたコンクリート梁の曲げ強度特性を実験的に明らかにした。これらの一連の試験結果から、フェノール樹脂を適用した FRP ロッドは従来市販のロッドと比較して、耐熱性に優れていることが明らかとなった。

**キーワード**：連続繊維補強材，FRP ロッド，繊維，樹脂，耐熱性，強度

## 1. はじめに

近年、FRP ロッドは過酷な環境での鉄筋代替材料として実用化の段階にある。多くの研究成果[1~6]と土木構造物や火災の恐れのない建築構造物の基礎に多くの使用実績[7]が報告されている。市販されている FRP ロッドは鉄筋と比較し、高い引張強度、耐食性、軽量、非磁性、非導電性（炭素繊維以外）等の優れた特性を持つ反面、耐熱性が低いと言う欠点を有する。市販の FRP ロッドを建築構造物の上部構造部材に適用する場合、その耐熱性が低いので、適用することが困難であった。

FRP ロッドの耐熱性は主としてマトリックス樹脂の耐熱性に起因することから、工業的に取り扱い可能な耐熱性樹脂を選定し、これを用いて FRP ロッドを製作し、高温下における引張強度試験、FRP ロッドをコンクリート部材の補強材とした場合の付着試験、コンクリート梁の曲げ載荷試験行い、高温下における力学的特性を明らかにした。

## 2. 使用材料

### 2.1 繊維と樹脂材料

繊維材料は**表－１**に示すように、高機能繊維を代表し使用実績の多いアラミド繊維、炭素繊維とした。樹脂材料は**表－２**に示すように耐熱性が高く、連続繊維束を工業的に含浸硬化できる熱硬化性樹脂を調査選定した。

**表－１　繊維材料の力学特性**

| 繊維 | 強度 (MPa) | 弾性率 (GPa) |
|---|---|---|
| アラミド | 3500 | 110 |
| 炭素 | 7000 | 230 |

**表－２　樹脂材料**

| 樹　脂 | | 溶媒 |
|---|---|---|
| 記号 | 名　称 | |
| PH | フェノール | 水 |
| CP | ポリエステルアミド | アルコール |
| EP | エポキシ | なし |

### 2.2 成型方法

繊維を含浸硬化させるために溶媒や硬化時に溶媒蒸発や分解物を発生する樹脂を用いるため、FRP ロッド内にボイドが発生しにくい硬化シス

*1 有限会社文殊工学医学研究所 代表取締役　（正会員）
*2 埼玉大学 工学部 建設工学科 教授 工博（正会員）
*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻
*4 埼玉大学 工学部 建設工学科

テムが必要となる。そこで、連続繊維を引き揃えた直径 7 または 13mm の組紐を樹脂溶液に含浸し、溶媒や分解物を系外に排出しながら連続的に硬化させた。CP(ポリエステルアミド樹脂)、PH(フェノール樹脂)は当初硬化過程で発泡したが、温度・時間条件等を調整することにより解消できた。耐熱性の高いポリイミド樹脂は樹脂濃度が低すぎるため FRP ロッドを製作することができなかったので割愛した。

なお、新しく開発した FRP ロッドと比較するために、一般に用いられている異形鉄筋(SD13、降伏強度:345N/mm$^2$)も用いた。

## 3. 高温下における FRP ロッドの引張強度試験

### 3.1 実験概要

直径 7mm、長さ 800mm の FRP ロッドを内径 22mm、長さ 200mm 鋼製パイプに挿入し、さらにこの中に直径 1mm の鋼球と EP（エポキシ樹脂）を流し込み硬化させて、引張試験用供試体とした。

FRP ロッドの引張試験は「連続繊維補強材の引張試験方法（案）(JSCE-E531-1999)」に準拠し、アムスラー試験機で載荷を行った。熱間引張試験は電熱加熱したパイプに供試体を挿入し、規定温度に昇温後測定した。なお、各温度での供試体数は 3 体で、これらを平均した値を用いた。

### 3.2 試験結果と考察

**(1)FRP ロッドの熱特性**

**表－３　FRP ロッドの熱特性（℃）**

| 繊維 | 樹脂 | 硬化最高温度 | Tg | 減量開始温度 |
|---|---|---|---|---|
| アラミド | PH | 250 | なし* | 418 |
| | CP | 230 | 173 | 330 |
| | EP | 190 | 72 | 341 |
| 炭素 | PH | 250 | なし* | 401 |
| | CP | 230 | 185 | 330 |
| | EP | 190 | 73 | 295 |

＊Tg が高く、検出されない

PH を使用したロッドの Tg(ガラス転移点温度)および加熱減量開始温度は表－３に示すように、CP や EP に比較して高いことが確認された。

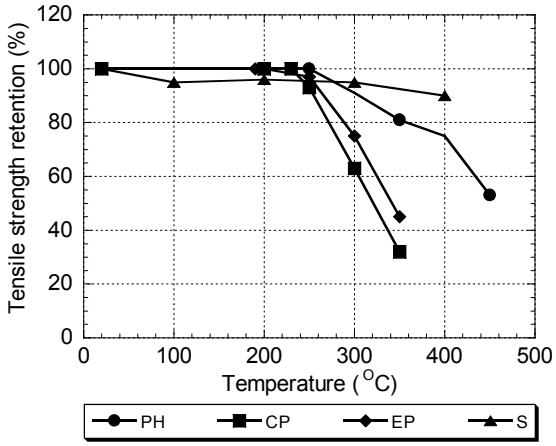
**(2) FRP ロッドの冷間引張強度**

表－４に直径 7mm の供試体の常温での引張強度を示す。図－１に示すように、PH を使用したロッドの引張強度保持率は CP や EP に比較して同等以上であることが確認された。

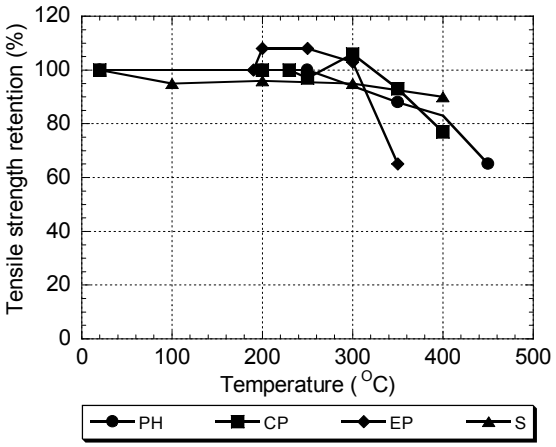
**表－４　常温での引張強度**

| 繊維/樹脂 | PH | CP | EP |
|---|---|---|---|
| アラミド | 57 , (919) | 60 , (968) | 69 , (1130) |
| 炭素 | 96 , (1550) | 106 , (1710) | 103 , (1660) |
| 鉄筋 | 43 , (345) | | |

＊耐力(kN) , (引張強度(N/mm$^2$))




**－アラミド繊維－**

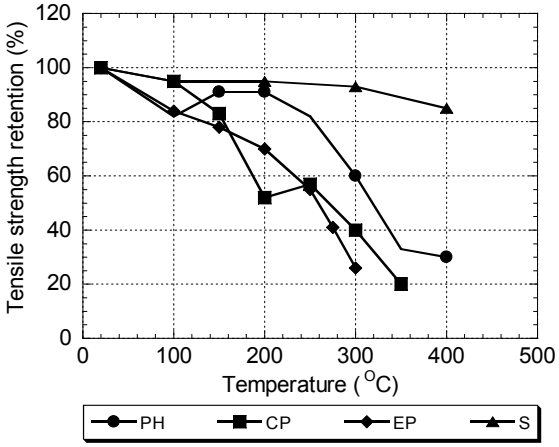



**－炭素繊維－**

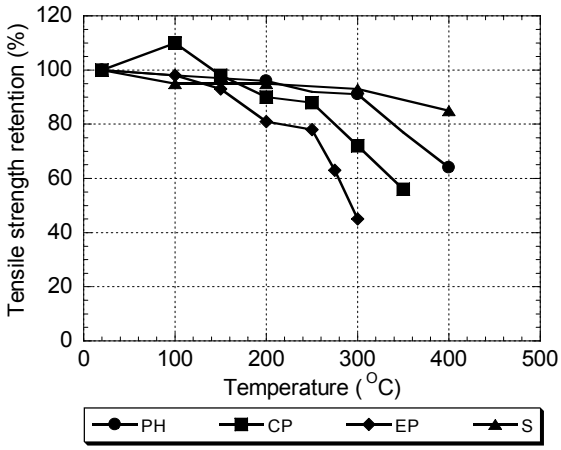
**図－１冷間引張強度保持率**

**(3) FRP ロッドの熱間強度**

図－２は直径 7mm のロッドの熱間における引張強度保持率を示したものである。PH を使用したロッドの高温における強度保持率が CP や EP に比較して高いことが確認された。炭素繊維ロッドは鉄筋(S)とほぼ同等の耐熱性[8)]を有することが明らかとなった。アラミドロッドの耐熱性がそれほど高くない理由は、アラミド繊維の耐熱性が低いことにある。




－アラミド繊維－




－炭素繊維－

**図－１熱間引張強度保持率**

## 4. 高温下における FRP ロッドとコンクリートとの付着特性

### 4.1 使用材料

付着強度試験は、繊維としてアラミドと炭素、樹脂として PH、CP、EP を組み合わせた 6 種類の直径 13mm のロッドと異形鉄筋について行った。試験時における昇温前のコンクリートの圧縮強度は 42 から 50N/mm$^2$ の範囲であった。

### 4.2 供試体要因

高温下における付着試験方法は引抜き試験よる連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(JSCE-E539-1999)に準拠して行った。補強材を供試体中央に垂直に配置し、付着区間はコンクリート中央部で 44mm とした。補強材の自由端側では自由端変位量を計測するために補強材をコンクリートから 26mm 突出させた。

### 4.3 試験方法

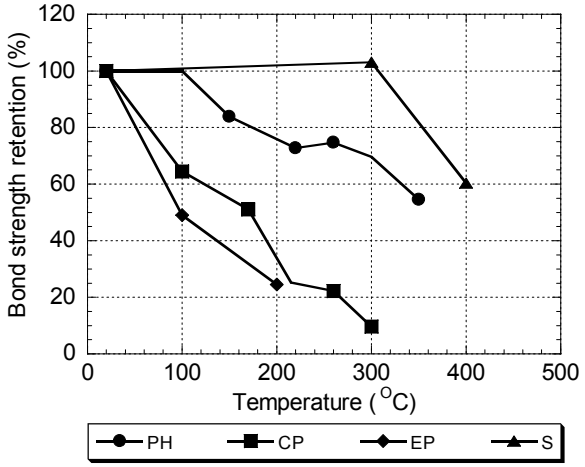
供試体の加熱はマントルヒーターに供試体を入れ加熱し、目標温度に達した時点で載荷装置に設置後、保温しながら油圧ジャッキにより引抜き試験を行った。試験は、補強材がコンクリートから 30mm 以上引抜けるか、もしくはコンクリートが割裂破壊し荷重が大きく低下するまで行った。計測項目は、荷重、自由端変位量、補強材温度、補強材のひずみで、ゲージ類は高温用を用い、変位計、ロードセルには熱が伝わりにくいように設置した。試験温度は常温から 400℃までの範囲である。

### 4.4 試験結果と考察

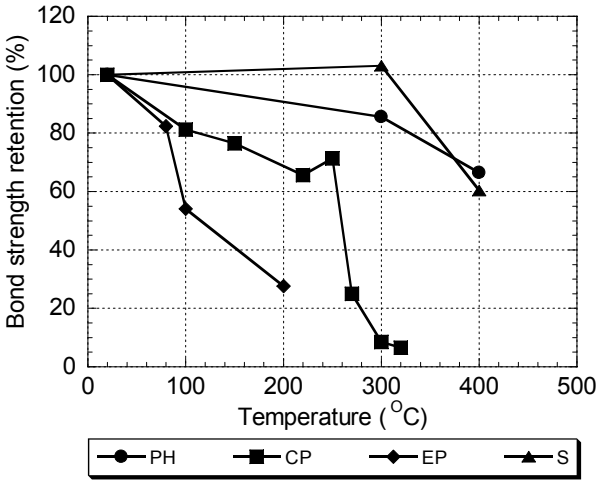
**表－5　常温での付着強度（N/mm$^2$）**

| 繊維/樹脂 | PH | CP | EP |
|---|---|---|---|
| アラミド | 8.53 | 7.17 | 8.95 |
| 炭素 | 10.8 | 10.9 | 13.7 |
| 鉄筋 | 17.0 | | |

表－５に各供試体の常温での最大付着強度を示す。図－３に示すように、コンクリート圧縮強度低下により鉄筋を含め、すべてのロッドで保持率の低下が認められる。PH を使用したロッドの高温における付着強度保持率が高いことが確認された。特に炭素繊維(PH)ロッドの付着強度保持率は鉄筋とほぼ同等であった。




－アラミド繊維－




**－炭素繊維－**

**図－3　付着強度保持率**

CP を使用したアラミド FRP ロッドは、昇温により徐々に付着強度が低下し、300℃以上では低下が急激であった。その理由は、アラミド繊維自体の耐熱性が炭素繊維より低いことに起因すると考えられる。EP を使用した FRP ロッドは EP の軟化により 80℃から急激に低下した。

## 5. 高温下における梁の曲げ特性

### 5.1 使用材料

主補強材には、直径 13mm のアラミド(EP)、アラミド(PH)、炭素(EP)、炭素(PH) 異形鉄筋を用いた。圧縮側補強材およびスターラップには異形鉄筋（D6）を用いた。実験時における昇温前のコンクリートの圧縮強度は 40～49N/mm$^2$ の範囲であった。

### 5.2 供試体要因

図－４に示すように、梁は全長 2000mm、断面 100mm×200mm の梁部材である。曲げ性状を明らかにするために、せん断破壊を防ぐスターラップ(D6)を支点内に 55mm ピッチ、支点外に 100mm ピッチで配筋している。

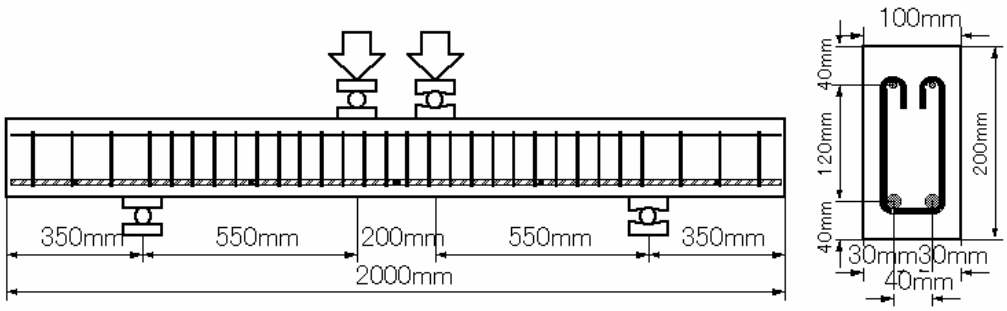
### 5.3 実験方法

梁の加熱は電熱ヒーターを全面に設置し、その上に断熱材を巻いて、ひび割れ防止のため、50℃／hr 以下に温度制御し各面を昇温した。梁が所定の温度に昇温後、温度を保持して油圧ジャッキによる静的 2 点載荷を行った。計測項目は主補強材温度、主補強材ひずみ、荷重、梁中央変位である。

試験温度は、鉄筋(S)が常温・300℃・400℃・450℃、アラミド(EP)(PH)と炭素(EP)は常温・200℃、炭素(PH)は耐熱性が高いと予想されるため常温・200℃・300℃・400℃・450℃である。

### 5.4 実験結果と考察

図－５に荷重－変位曲線を示す。異形鉄筋を用いた供試体では、昇温すると載荷前に上下面からひび割れを生じ、初期剛性の低下が確認された。しかしながら、終局耐力は温度の影響を

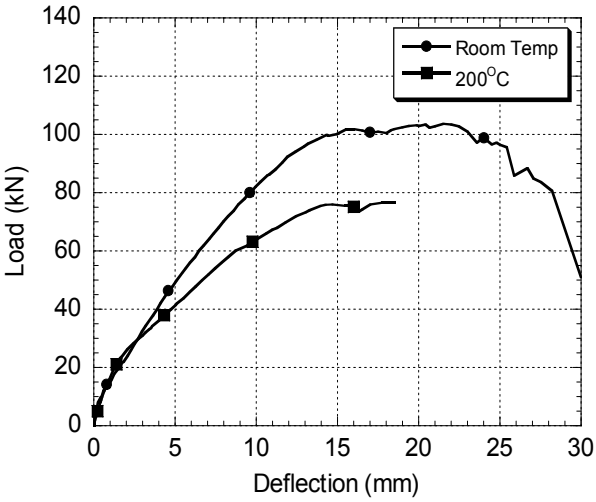



**図－４　梁供試体**

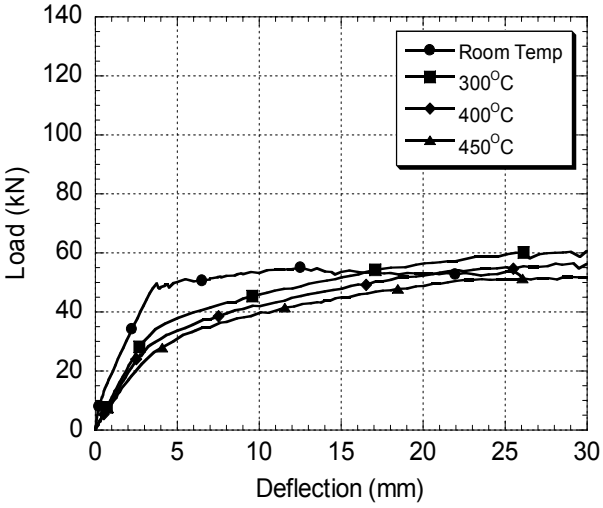
あまり受けず、常温と同等のであった。

エポキシ樹脂を用いた供試体では、図－５(2),(3)に示すように、200℃で大きく耐力が低下することが確認された。これは，Tg が低いエポキシ樹脂が軟化し、付着力が低下し，FRP ロッドのすべりを生じたためである。

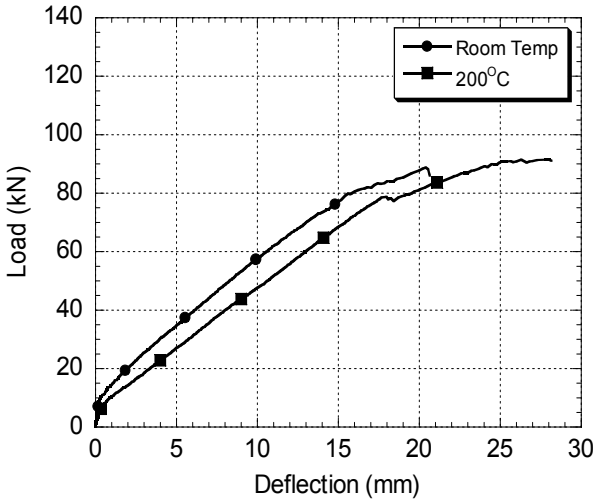
Tg の高い PH を使用したロッドは高温においても常温と同じ曲げ荷重を示すことが明らかとなった。特に繊維の耐熱性の高い炭素を用いた供試体では、終局耐力は 400℃の範囲で温度の影響をあまり受けず，常温と同等であった。



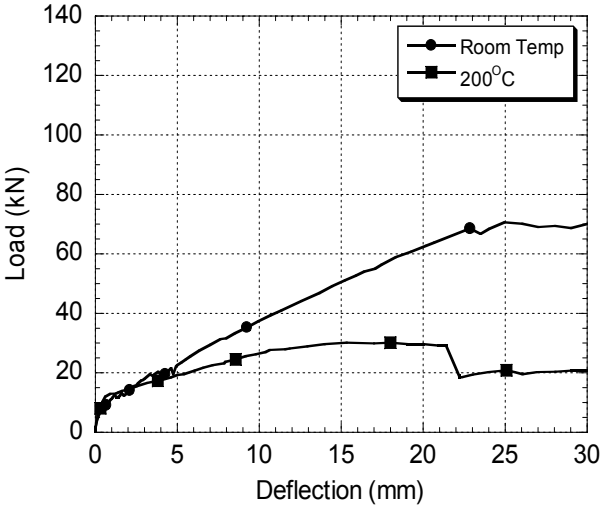

**図－５(3)　荷重－変位関係　炭素繊維（EP）**



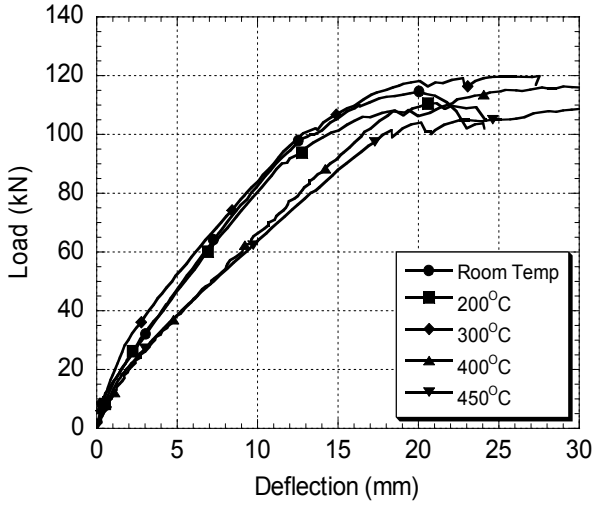

**図－５(1)　荷重－変位関係　鉄筋（Ｓ）**




**図－５(4)　荷重－変位関係　アラミド（PH）**




**図－５(2)　荷重－変位関係　アラミド（EP）**




**図－５(3)　荷重－変位関係　炭素繊維（PH）**

ただし、コンクリート熱膨張と FRP ロッドの軸直角方向の熱膨張差により、載荷前に主補強材に沿う方向にひび割れを生じた。そのため、400℃以上の温度領域では付着劣化に伴う、剛性の低下が見られる。

以上のことから、PH を適用した FRP ロッドの耐熱性は高く、特に炭素(PH)は鉄筋とほぼ同等の耐熱性を有することが明らかとなった。

## 5. 結論

本研究から得られた結果を以下に記す。今後さらに工夫すれば、本研究で開発した耐熱性ロッドを鉄筋と同じ設計体系で実用化できる期待が大きい。

(1) 引張強度において、耐熱性の高いフェノール樹脂を適用した FRP ロッドの冷間および熱間引張強度保持率は高く、特に炭素繊維ロッドは鉄筋とほぼ同等の耐熱性を有することが明らかとなった。

(2) 付着特性において、耐熱性の高いフェノール樹脂を適用した FRP ロッドのコンクリートとの熱間付着強度保持率は高く、特に炭素繊維ロッドは鉄筋とほぼ同等の耐熱性を有することが明らかとなった。

(3)梁の曲げ特性において、フェノール樹脂を適用した FRP ロッドの耐熱性は高く、特に炭素(PH)は鉄筋(S)とほぼ同等の耐熱性を有することが明らかとなった。

## 6. 謝辞

本研究に当たり、ファイベックス㈱、東レ・デュポン㈱、東レ㈱、東洋タイヤコード㈱、大日本インキ化学工業㈱、サカイ産業㈱、三國製薬工業㈱にお世話になり、感謝する次第である。

## 参考文献

1) 松原澄行、谷垣正治、蓮尾孝一：アラミド繊維による組紐状棒材の研究（熱特性）、三井建設技術研究所報告、第 17 号, pp.57-60, 1992

2) 坂下雅司、棚野博之、桝田佳寛、大野吉昭 : 連続繊維補強材の高温引張特性と載荷加熱時の梁曲げ変形挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 pp.1551-1556,1997.

3) ATSUSHI SUMIDA, TADASHI FUJIDSAKI, KEN WATANABE, TAKEHIKO KATO, Heat Resistance of Continuous Fiber Reinforced Plastics Rods, FRPRCS-5, Vol.1, pp.557-565, 2001.

4) 金津努：高温下における鉄筋コンクリート部材の力学的性状、コンクリート工学年次論文報告集 pp.433-436,1985.

5) 佐藤尚ほか：FRP を補強筋に用いたコンクリート部材の耐熱性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 pp.329-334,2003.

6) Thant ZIN, et al.：Investigation of Bond and Flexural Behavior of FRP Reinforced Concrete under High Temperature, コンクリート工学年次論文報告集 pp.357-362,2004.

7) ACC クラブ発行パンフレット

8) 構造材料の耐火性ハンドブック、日本建築学会、pp.91、2004