

論文 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

佐藤 尚^{*1}・睦好 宏史^{*2}・田邊 一仁^{*3}・角田 敦^{*4}

要旨：連続繊維補強材(以下 FRP ロッド)は炭素、アラミド等の繊維が樹脂により固められたものである。これらを鋼材に替わる補強材としてコンクリート構造物に用いる場合、火災時における耐火性能が問題となることが考えられる。本研究は、高温下において、これまで用いられてきた FRP ロッドの付着性状、ならびに FRP ロッドを補強材に用いた部材の力学的性状を実験により明らかにした。さらに、高温下において劣化しない樹脂を用いた新しい FRP ロッドを開発し、これらについても同様の実験を行い、高温下における FRP ロッドの力学的性状を明らかにしたものである。

キーワード：連続繊維補強材，樹脂，付着強度，耐火，FRP ロッド

1. はじめに

近年、連続繊維が樹脂により固められた FRP ロッドは軽量かつ高強度で腐食しない等の特徴を有し、また非磁性であることから鉄筋に替わるコンクリートの補強材やプレストレスコンクリートの緊張材として使用されている。例えば、大強度陽子加速器等の実験施設では鉄筋が磁性化することにより、FRP ロッドの使用が計画されている。このようなコンクリート構造物に FRP ロッドを主補強筋として用いる場合、火災などによる耐火性能が問題となる。これまでの報告によれば高温下(約 80℃)になると FRP ロッドの付着性能が劣化することが明らかにされている¹⁾。この原因として、樹脂のガラス転移点温度が低いことによる樹脂の熱劣化、またはコンクリートと繊維の熱膨張係数の相違による付着劣化が考えられる。しかし、これまでの研究では、如何に FRP ロッドの高温下における付着性能を改善するか等についてはほとんど行われていない。本研究では、まず、既に製品化されている 3 種類の FRP ロッドを用いて、コンクリート強度、温度を主な要因として付着試験およびこれを補強材に用いたはりの曲げ載荷試験を

行い、高温下における FRP ロッドの付着性状とはりの曲げ性状を明らかにした。さらにガラス転移点温度が高い樹脂を用いて新たに FRP ロッドを開発し、同様の実験を行い、新しい樹脂を用いた FRP ロッドの高温下における付着試験とこれを補強材に用いたはりの曲げ性状を明らかにした。

2. 高温時における連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験

2.1 使用材料

実験に用いた FRP ロッドは炭素繊維およびアラミド繊維をエポキシ樹脂により硬化させたもので炭素繊維は表面形状の異なる 2 種類(組紐、より線)を用いている。アラミド繊維は組紐状のものを用いた。また、比較のために通常一般に用いられている異形鉄筋(D13, 降伏強度:345N/mm²)を用いた。これらの材料特性を表-1 に示す。コンクリートの骨材の最大寸法は 20mm で、強度を 40,50,60(N/mm²)の 3 通りとした。

2.2 供試体要因

高温下における付着試験方法は引抜き試験に

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (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 工学部 建設工学科

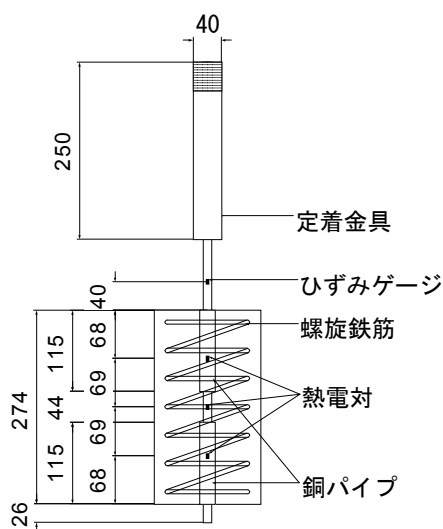
*4 東レ・デュポン(株) ケブラー技術開発部 主幹

表－1 補強材の材料特性

シリーズ	補強筋			公称径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	引張強度 (kN/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	熱膨張係数 (*10 ⁻⁶)
	繊維	樹脂	表面形状					
S	鉄筋			12.7	126.7	0.49	205.8	12.0
CF-EP	炭素	エポキシ	より線	12.5	76.0	1.86	143.0	0.6
C-EP	炭素	エポキシ	組紐	14.7	170.0	2.07	156.8	0.6
A-EP	アラミド	エポキシ	組紐	12.7	127.0	1.40	68.6	-2.0

(※コンクリートの熱膨張係数 10*10⁻⁶)

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²⁾。付着試験に用いた供試体の形状、寸法を図－1に示す。補強筋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。この付着区間長は補強材が破断する以前に付着破壊が生じる長さとして設定した。また、付着区間の上下に設けた非付着区間は銅パイプにより付着を切っている。コンクリートの割裂破壊防止のために螺旋鉄筋として D6 を径 100mm、ピッチ 40mm で配置した。補強筋の自由端側では自由端変位量を計測するために補強筋をコンクリートから 26mm 突出している。FRP ロッドの定着具は鋼製の円筒にロッドを挿入し樹脂で固めたものである。



図－1 供試体形状、寸法 (mm)

2.3 試験方法

供試体の加熱はマントルヒーターを用い 450℃雰囲気下において所定の温度まで加熱し、目標温度に達した時点でフレームに設置後、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継続した。計測項目は、荷重、自由端変位量、補強筋温度、補強材のひずみであり、ゲージ類は高温用を用い、変位計、ロードセルには温度が伝わりにくいように設置した。ここで、供試体の加熱温度は常温(約 15℃)のほかに、100℃、150℃、200℃、300℃の 4 通りである。

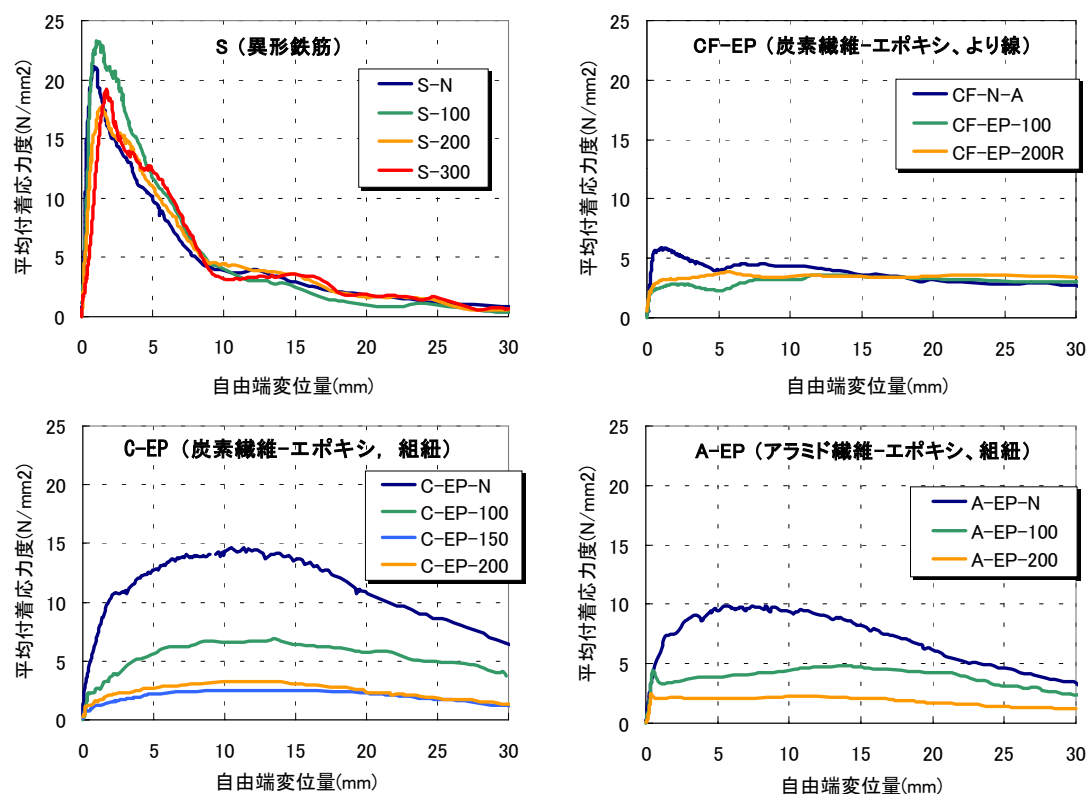
3. 実験結果と考察

3.1 高温下における FRP ロッドの付着性状

引抜き試験により得られた鉄筋、CFRP (炭素-より線)、CFRP (炭素-組紐)、AFRP (アラミド-組紐) の平均付着応力度－自由端変位量関係を図－2 に示す。平均付着応力度は引抜き荷重を付着区間の付着総面積で除すことにより求めている。

S シリーズ (異形鉄筋) では自由端変位量がおおよそ 2mm を超えたあたりから付着強度は大きく低下しはじめ、10mm ではほとんどの供試体で 5N/mm² まで低下している。鉄筋は引張力に対して主に節によって付着力を発揮しており、今回用いた異形鉄筋の節間隔は約 10mm である。最大付着応力以降は節がコンクリートを徐々に削ることで付着が切れ、付着応力が低下している。鉄筋の熱膨張係数はコンクリートのそれと同等であるため、高温化においてもコンクリートと鉄筋は同程度膨張する。従って高温下においても付着性状は常温と大きな違いはなく、温度によるコンクリートの圧縮強度の低下が付着強度に影響していると考えられる。

CF-EP シリーズは、図中の CF-EP-200R は 200℃の状態ではコンクリートの自重で引きぬ



図ー2 平均付着応力度－自由端変位量関係（シリーズー試験温度[°C]（N：常温））

けてしまう結果となったため急遽冷却し冷間試験とした。常温では、自由端変位量1～2mmにおいて荷重が最大値をとり、その後、一定荷重を保ちつつ引き抜けが生じている。常温の付着応力度は鉄筋の場合のおよそ 1/5 程度であり、200℃では含浸されている樹脂の軟化によってすべてのコンクリート強度で付着強度は常温の50%まで低下している。この原因として樹脂が熱により軟化し、ロッドの形状を維持できなくなったことによると思われる。

C-EP シリーズでは最大付着応力後はなだらかな低下を示している。温度の影響が顕著であり、200℃になると常温の 20%以下の付着力となっている。すなわち、コンクリート強度よりも温度による樹脂の軟化が付着力の低下に影響しているといえる。

A-EP シリーズも常温では最大荷重後にはなだらかな付着力の低下をみせている。しかし、高温時には最大付着応力度以降、およそ $1\sim 2\text{N/mm}^2$ の付着応力が維持され、徐々に低下している。このことから 200℃における付着力

が $1\sim 2\text{N/mm}^2$ であることがわかる。200℃では樹脂による結合力がほぼ失われ表面が軟化してしまっていることから付着部分において繊維自体が剥がれることによりほぼ同時に付着区間全体の付着が切れたと考えられる。

以上の実験結果から、高温時における付着強度の低下をもたらす原因は、鉄筋は温度上昇によるコンクリート圧縮強度の低下、FRP の場合は樹脂の軟化による付着性状の劣化と考えられる。

3.2 耐熱性樹脂を用いた FRP の付着試験

3.1 で述べたように従来の FRP ロッドを補強材に用いたコンクリート部材では高温下において、樹脂が劣化することにより付着性能が低下することが明らかとなった。ここではエポキシ樹脂よりも耐熱性の高い CP 樹脂、フェノール樹脂を用いた FRP ロッドを新たに作製した。樹脂の耐熱性を示す一つの指標としてガラス転移点温度(T_g)が挙げられる。これは樹脂の弾性係数が急激に低下する温度であり、今回の実験で用いたエポキシ樹脂の T_g はおよそ 130℃である。

表-2 CP 樹脂, フェノール樹脂を用いた FRP ロッドの材料特性

シリーズ	補強筋			公称径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	引張強度 (kN/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	熱膨張係数 (*10 ⁻⁶)
	繊維	樹脂	表面形状					
A-CP	アラミド	CP	組紐	7.5	44.2	1.40	68.6	-2.0
A-PH	アラミド	フェノール	組紐	7.5	44.2	1.40	68.6	-2.0

これに比較して CP 樹脂は 250℃, フェノール樹脂は 300℃である。表-2 にこれらの樹脂を用いた補強筋の材料特性を示す。なお、今回はアラミド繊維を用いたロッドについて述べることにする。新しく作製した FRP ロッドの付着試験は、コンクリート強度を一定とし(40N/mm²), さらに、温度の影響を詳しく検討する点から 50℃間隔で試験温度を設定した。その結果を図-3 に示す。

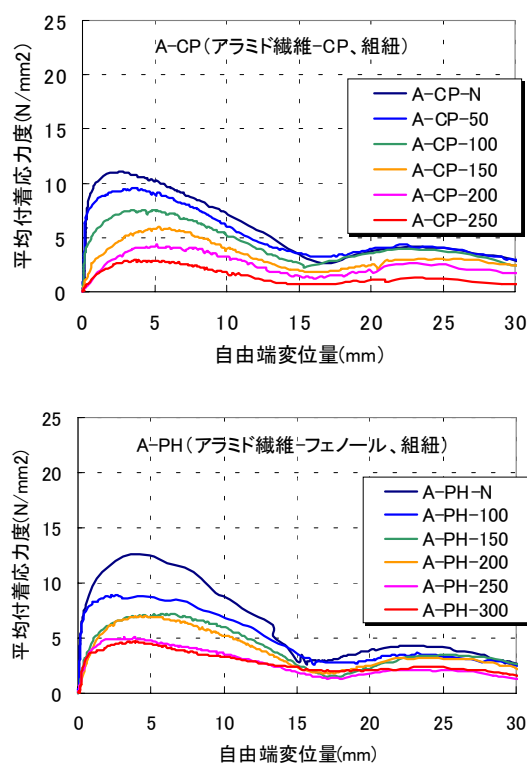


図-3 平均付着応力度-自由端変位量

A-CP シリーズは、温度が 50℃上昇するに伴い、付着力はおよそ 1.6N/mm² 低下を示し、ほぼ直線的低下傾向を示した。A-PH シリーズでは付着力の低下度合いがさらに小さなものとなり、50℃の上昇で 1.3N/mm² 低下する結果となった。これまでの樹脂では 100℃で常温の半分以上まで低下していたが、耐熱性樹脂を用いた場合

には 100℃で常温の 7 割の付着力を保持している。エポキシ樹脂を用いた従来の FRP ロッドによる試験で見られた、高温下での付着力がほぼ一定に推移する挙動は現れていない。すなわち、これは CP 樹脂, フェノール樹脂がエポキシ樹脂よりも耐熱性に優れているために表面樹脂軟化の度合いが抑制され、繊維の結束力が保たれたために表面形状も保持されたためであると考えられる。

温度による付着強度の低下率を見るため、常温の付着強度に対する各温度での付着強度の割合を補強筋別に図-4 に示す。

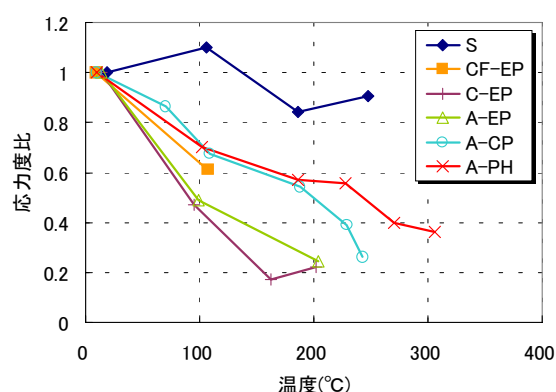


図-4 応力度比-試験温度

鉄筋は 250℃においておよそ 15%程度の低下となっているが、従来の FRP ロッド(C-EP, A-EP)ではエポキシ樹脂の軟化により温度が 100℃の時に約 50%, 200℃では約 20%まで低下している。これらと比較して、CP 樹脂, フェノール樹脂を用いて新しく開発した FRP ロッドは 200℃の時に常温の約 60%の付着力を保持することが可能となった。すなわち、樹脂の耐熱性を向上させることにより FRP ロッドの高温時における付着性状が向上することが明らかとなった。

4. FRP ロッドを主筋に用いた RC 梁の高温下に

おける曲げ性状

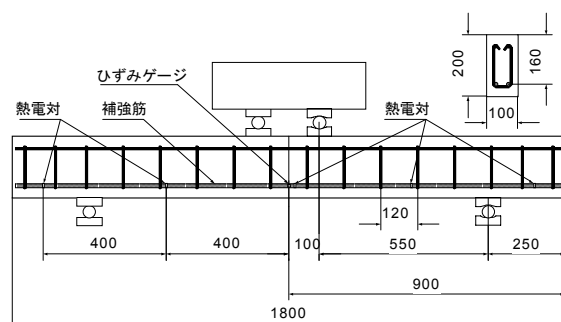
FRP ロッドの高温下における付着性状がある程度明らかとなったので、ここではFRP ロッドを主筋に用いたコンクリート梁の高温下における曲げ性状を実験により明らかにすることにする。

4.1 供試体

主筋には鉄筋(S)、エポキシ樹脂、CP 樹脂、フェノール樹脂を用いたアラミド繊維ロッドを用いた。せん断補強筋には鉄筋(D6)を用いた。スパン 1300mm、荷重点間は200mmとしている。表－3 に実験要因、図－5 に実験に用いた梁供試体の形状・寸法を示す。

表－3 供試体要因

シリーズ	主筋			公称径 (mm)	膨張係数 (*10-6)	温度
	繊維	樹脂	形状			
S	鉄筋(D13)			異形 12.7	12.0	常温、 200℃
A-EP	アラミド	エポキシ	組紐	9.0	-2.0	
A-CP	アラミド	CP	組紐	7.5		
A-PH	アラミド	フェノール	組紐	7.5		



図－5 供試体形状、寸法 (mm)

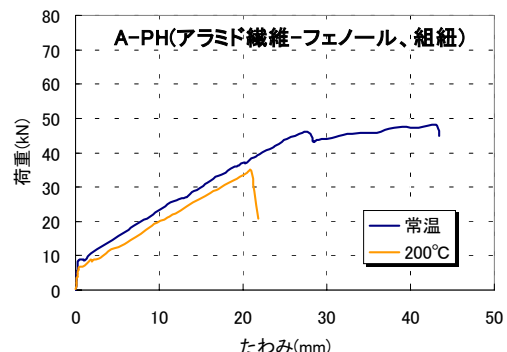
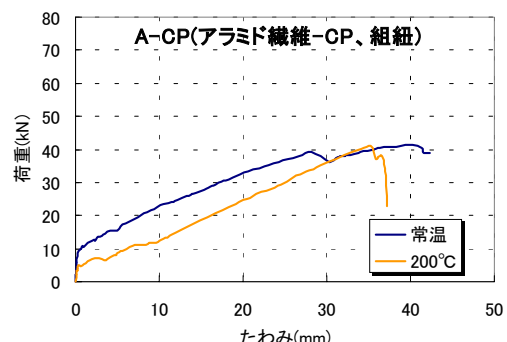
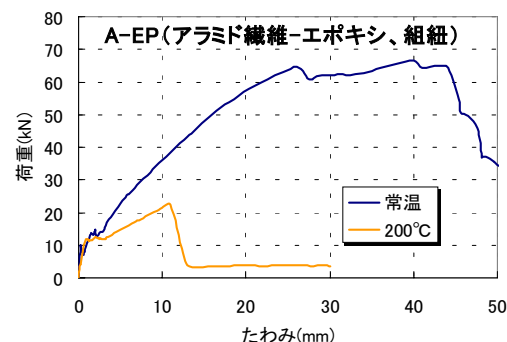
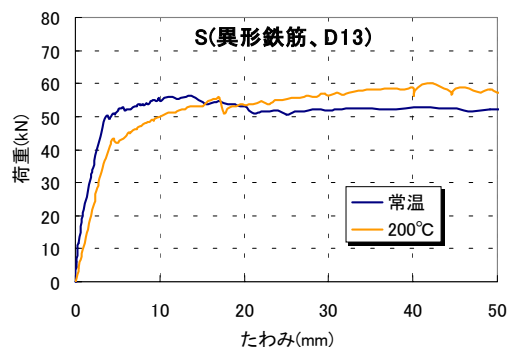
4.2 試験方法

梁供試体を所定の温度まで加熱するためにリボンヒーターを供試体全長に渡り巻き付け、市販のガラスウールにより放熱を極力防ぎながら加熱を行い目標温度に達した時点でこれらを全て取り除いた後、2 点荷重による曲げ試験を行った。計測項目は主筋温度、主筋ひずみ、荷重、梁中央変位である。

4.3 実験結果

図－6 に全供試体の荷重－変位 (スパン中央) 関係を示す。

鉄筋を用いた梁では常温および 200℃において曲げ性状の違いはほとんど見られなかった。エポキシ樹脂を用いた A-EP は常温では最終的に曲げ圧縮破壊となったが、200℃では、変位が 10mm を超えた時に急激に耐力が低下した。これは熱による樹脂の軟化により、主筋である FRP とコンクリートの付着が劣化したことによりひび割れが分散して発生せず、主に荷重点下



図－6 荷重－変位関係

のひび割れが開口し、圧縮縁に到達すると同時に急激に荷重が低下した。載荷終了後、コンクリートをはつり、主筋の様子を観察した結果、やはり端部において主筋のすべりを確認した。図-7 は鉄筋と A-EP シリーズのひび割れ図を示したものである。破線は加熱により生じたひび割れを表す。EP-200 には、加熱によって主筋に沿ったひび割れが生じているが、これは A-EP シリーズの補強筋は軸直角方向に正の熱膨張係数を持ち、更にかぶりが小さかったことが原因であると考えられる。

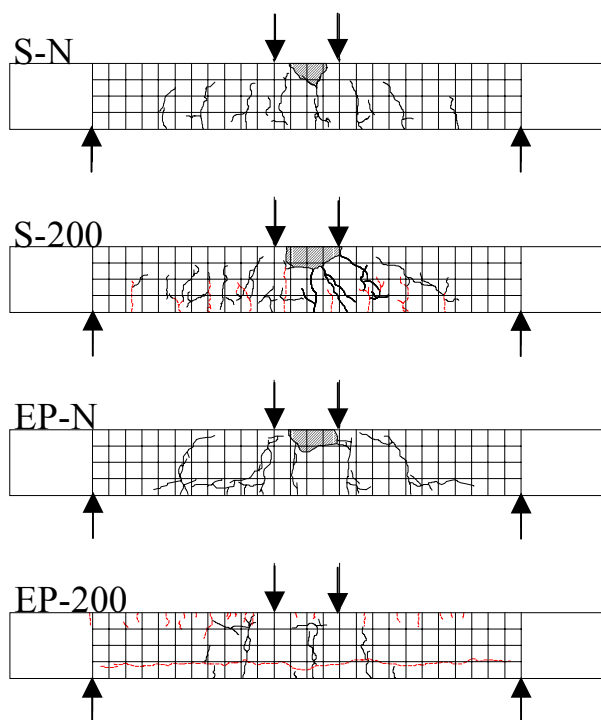


図-7 ひび割れ図 (S, A-EP シリーズ)

CP 樹脂を用いたアラミド繊維ロッドで補強したはりでは、終局破壊性状はせん断破壊となった。これは、ロッドの曲げ剛性が従来のロッドよりも小さいために、ダウエル効果が発揮できなかったことによると推察される。

フェノール樹脂では常温で曲げ圧縮破壊に至ったが、200℃の場合には曲げ引張(破断)破壊となった。これは FRP ロッド自体に問題があったと考えられる。複合材料にとってボイドは大きな欠点であり、フェノール樹脂は硬化の際に分解物が多量に発生するためボイドが発生しやす

い。この事実がフェノール樹脂を FRP ロッドに適用することを困難にしており、高温下での FRP ロッドに十分な強度がなかったことが原因であると考えられる。今後は樹脂の含浸方法等を検討することが必要である。

5. 結論

本研究から得られた結果をまとめる。

- (1) FRP の付着強度には結合材である樹脂の影響が大きく、温度に対する付着強度の低下割合も大きい。
- (2) 耐熱性樹脂を用いて作製した FRP ロッドでは、樹脂の耐熱性向上により高温時の付着強度を向上させ、その低下の割合は現在の FRP の半分まで抑えることを可能にした。
- (3) FRP を主筋に用いた RC 梁において高温時の主筋のすべりを抑えるためには、耐熱性の高い樹脂により付着を確保し、現行の FRP ロッド程度の曲げ剛性を持つものでなければならない。

参考文献

- 1) 清水建設株式会社技術研究所：防耐火 WG 付着特性 SWG 活動成果, 連続繊維補強材の高温時付着試験報告書, 2000.3
- 2) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), 1996 年, pp.143~pp.147
- 3) 連続繊維を利用したコンクリート系複合材料(CCC)研究会：土木・建築分野の繊維強化複合材料, シー エム シー, 1998
- 4) 棚野博之, 坂下雅司：載荷加熱における連続繊維補強コンクリートはりの曲げ変形挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.505, pp.161~pp.168, 1998.3
- 5) 安部武雄ほか：高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.515, pp.163~pp.168, 1999.1