

## (38) 局部的に高熱損傷を受けたGFRP材料の引張挙動の変化特性に関する一検討

橋本 国太郎<sup>1</sup>・日比 英輝<sup>2</sup>・北根 安雄<sup>3</sup>・西崎 到<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）  
E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 株式会社ヒビ（〒503-1337 岐阜県養老郡養老町直江613-1）  
E-mail: hidekey@hibi-frp.co.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）  
E-mail: kitane.yasuo.2x@kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 一般財団法人土木研究センター（〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4）  
E-mail: nishizaki@pwrc.or.jp

近年、ガラス繊維を用いた GFRP 部材が水門、歩道橋、遊歩道および橋梁検査路などの比較的小型の土木構造物の主部材に適用されている。これらの土木構造物の中でも特に歩道橋や遊歩道では、例えば、たばこの不始末の火や花火などにより、局部的に高温の状態にさらされることが起こり得る。そのような高温にさらされた場合、GFRP 表面ではどの程度の温度が発生しているのか、また、その高温により、どれくらいの範囲で機械的性質がどの程度変化するのはあまり明確になっていない。そこで本研究では、花火によって高温にさらされる場合を想定し、GFRP 試験片に高温を与え、その後引張試験を実施し、それによる GFRP 材料の引張挙動の変化を検討した。その結果、高温部の表面状態や高温による低下の程度を定量的に把握することができた。

**Key Words:** GFRP, high temperature, local damage, tensile strength

### 1. はじめに

近年、ガラス繊維を用いた GFRP 部材を主部材として使用した土木構造物が建設され始めており、小型の水門、歩道橋や公園などの水辺を渡るための遊歩道などに活用されている事例が多くみられる。

このような GFRP 構造物では、現在までに、高熱による損傷による事故、または、使用に対する危険性が発生するなどの事例報告（例えば、不審火などに起因する小火など）はない。しかし、多種ある FRP 構造物の中でも不特定多数が供用する歩道橋や公園内の遊歩道などにおいては、たばこの不始末や花火遊びのような高熱（例えば 800 度以上）による人為的損傷を及ぼす可能性も考えられる。

一方、高温や極低温が作用したときの FRP 材料の特性変化に関する研究<sup>1)3)</sup>はいくつか見られるものの、極低温の場合は宇宙空間や超電導などで FRP 材料全体が極低温となった場合を想定しており、また、高温の場合も試験体全体を高温として実験している検討が多く、本研究

で着目するような局部的に高熱の炎にさらされ損傷を受けるような場合の検討はほとんど行われていない。また、土木構造物で使用されている FRP の耐火性を主として検討した文献はあまり見られないが、例えば文献 4) で示されているように、FRP 床版の性能試験の一つとして、試験体に対して局部的に高熱の炎を与える試験（JIS A 1322<sup>5)</sup>）によって、耐火性能の把握などはされている。しかし、これらの検討では、JIS などの規格に従って実施されている性能試験であるため、上述したように熱損傷程度と残存強度に関する詳細な検討はこれまであまり実施されてきていない。そこで、本研究では、上述したような歩道橋や遊歩道などに使用される GFRP 部材に、たばこの火の不始末や点火された花火が放置されたような事故を想定し、局部的な高熱により損傷した GFRP 材料の外観と強度の関係性を探るため簡易な実験を行い、その残存強度の検討を実施した。また将来的には、これらの損傷状態から残存強度を評価する方法、防火のために難燃性を付与した場合の効果や損傷した場合の補修方法の検討などを行う予定である。

## 2. 実験方法

本研究で行ったFRPに高熱付与する実験の詳細を以下に示す。

GFRP 板材の平面上に点火させた手持ち花火を直置きし、花火が自然消火するまで放置した後、GFRP 板の外観観察、板厚の変化および損傷前後の強度比較を行うこととした。また、いたずらによる過酷な状況を想定し、同位置での燃焼回数を5回とし、燃焼回数毎に表面観察および板厚測定を行い、最終回数後に引張強度を確認することとした。実験用試験体は、燃焼回数毎の板厚測定が容易にできるように、予め1枚の成形板の連続した箇所からJIS K7164<sup>6)</sup>に基づく25mm×250mmの大きさで花火の燃焼有効長が十分確保可能な7体を切り出した。燃焼実験の際には、都度、切り出し前の一枚板形状になる

ように出来るだけ隙間なく整え養生テープで拘束し、板厚測定時には、拘束を解くといった繰り返し作業を行った。また、7体の試験体番号を燃焼進行方向順にNo.1からNo.7とした。

試験体は、図-1で示すように、#600目付のガラスロービングクロス16層を不飽和ポリエステル樹脂で積層したFRP層の上下面に、厚さ500 $\mu$ mのゲルコートガラスチョップドストランドマット#380により、ハンドレイアップで一体成形した厚さ8mmのGFRP板材である。燃焼材に使用した花火は、図-2に示す有効燃焼長約85mm、火薬質量約2gのごく一般的な手持ち花火を使用した。花火の有効燃焼長は、図-3に示すように燃焼前の長さから燃焼後の残分の長さを差し引きして確認した。また、これに仕込まれている火薬は、磁器るつぼに移し取り、図-4に示す通り化学天秤にて計測した。火薬の原材料と

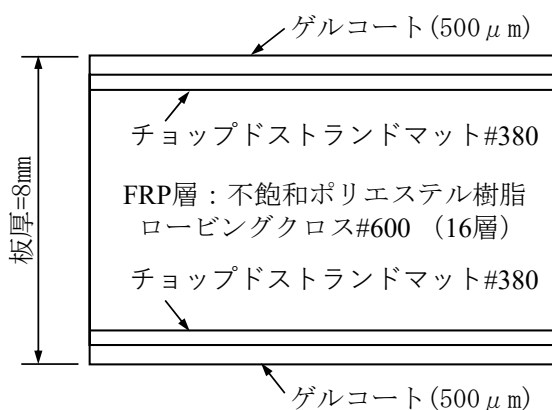


図-1 GFRP 板材の断面構成

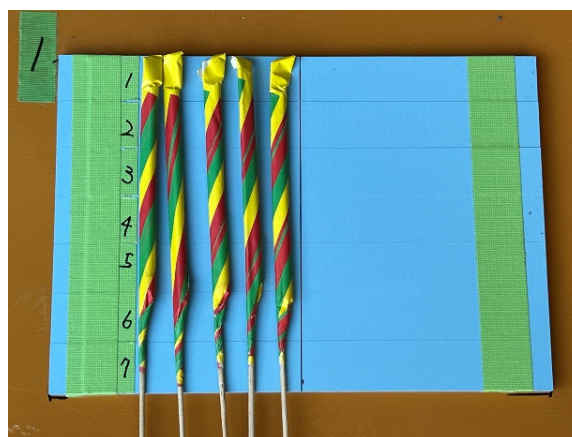


図-2 手持ち花火と試験体



(i) 燃焼前の長さ



(ii) 燃焼後の残分

図-3 有効燃焼長の確認



(i) 磁器るつぼの質量計測



(ii) 移し取った火薬



(iii) 火薬+磁器るつぼの質量計測

図-4 火薬の質量計測

しては、可燃材に硫黄や木炭の他、レッドガム、ヴィンソルレジジンなどの樹脂類、アルミニウム、マグネシウムなどの金属類が、酸化剤には硝酸カリウム、硝酸バリウム、過塩素酸カリウムが一般的に使用されている。また、色火剤のストロンチウム、バリウム、ナトリウムなどの化合物やオイルレッド、オイルイエローなどの発煙色剤が使用されている。

### 3. 実験結果

#### (1) 外観観察

花火で燃焼させた後の試験体は、燃焼回数毎にポリプロピレン製ブラシで焼け滓を取り除き、アセトンを含ませたウェスで軽く表面を清掃した後に、損傷部の外観観察を行った。図-5に燃焼中、燃焼後および清掃後の試験体の状態を示す。燃焼回数毎に試験体の損傷状態を目視観察すると、図-6で示す燃焼回数毎の試験体の状態のように、1回目の燃焼後では、燃焼範囲全体にゲルコート表面の焦げ跡と一部ピンホールが見受けられたが、繊維の露出は確認できなかった。2回目の燃焼後では、燃焼幅、長さ共に焦げ跡の範囲が広がり、燃焼長さ方向の中

央部にあたる試験体 No.4 と No.5 に、ゲルコート直下層のチョップドストランドマットの露出が明確に確認された。3回目の燃焼後は、更に焦げ跡の範囲は広がり、No.3 と No.6 にもチョップドストランドマットの露出を確認した。また、No.4 と No.5 には清掃時に取り除かれたチョップドストランドマット直下層のロービングクロス露出を確認した。4回目以降は、焦げ跡の範囲はさほど広がらなくなったが、ロービングクロス露出は燃焼進行方向に広がり No.3 と No.5 にも確認でき、燃焼回数 5 回後は、特に試験体 No.4 と No.5 にロービングクロス平織形状が顕著に現れた (図-8(a))。

#### (2) 板厚測定

板厚の測定は、燃焼前と燃焼回数毎に引張試験体 1 体の幅 25mm に対して、損傷部 3 点をマイクロメーターで測定した。図-7で示す燃焼回数毎の板厚変化グラフで判るように、花火の燃焼有効長の中央付近にあたる試験体 No.4 および No.5 の板厚の減少が大きい。これは、外観観察でロービングクロスが顕著に現れていた個所とも一致している。しかし、ロービングクロスが露出するまでには、少なくともゲルコート層とチョップドストランドマット層の合計厚さ 1mm 以上の板厚減少が必要になる

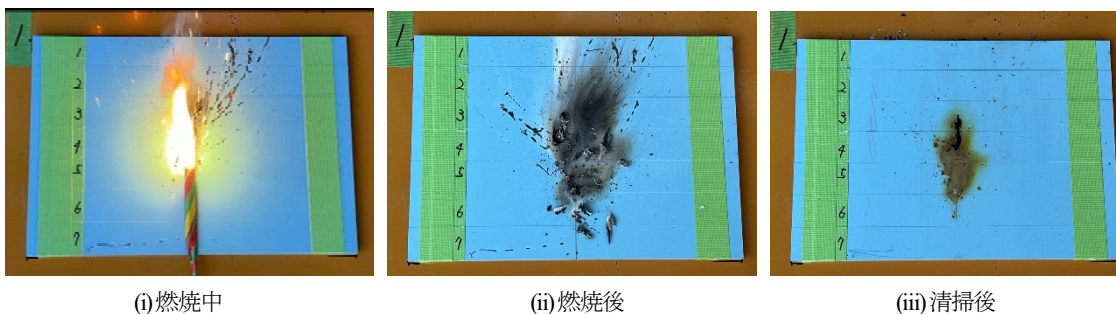


図-5 花火の燃焼状況と清掃後の試験体

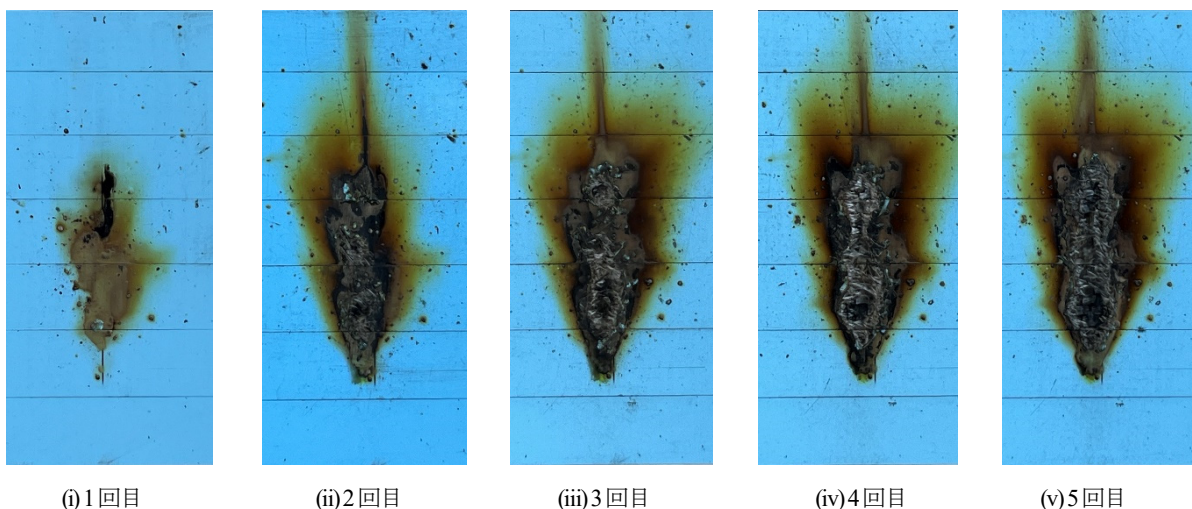


図-6 燃焼回数毎の試験体の状態

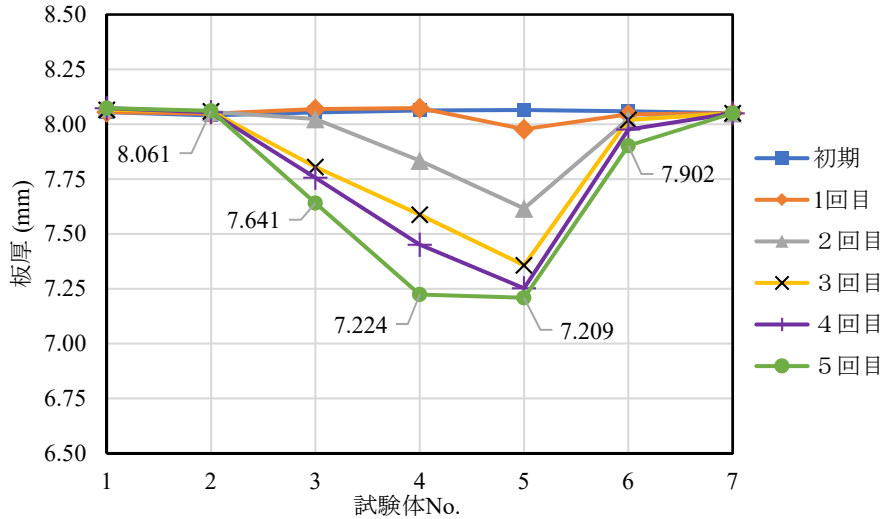
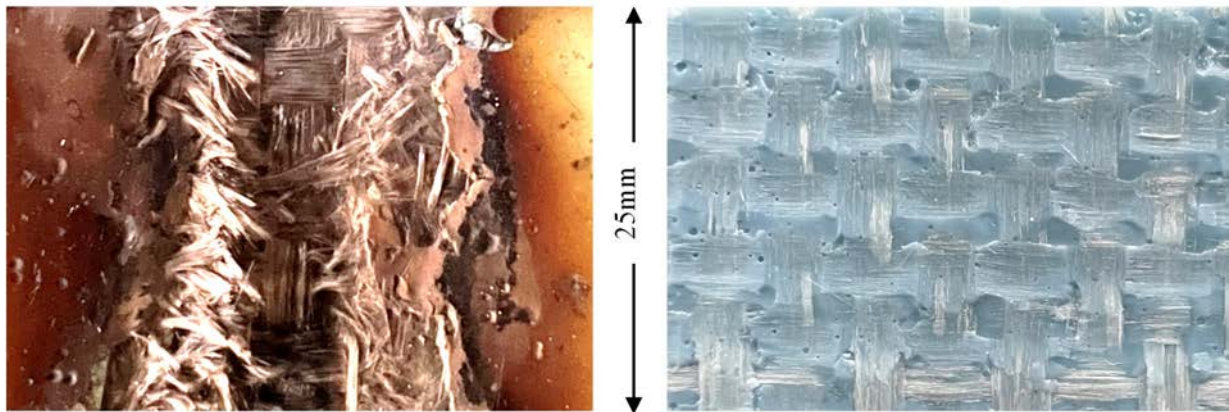


図-7 板厚変化グラフ



(a) 燃焼後の試験体損傷部 (試験体 No.5)

(b) 健全な FRP 板材のロービングクロス層間面

図-8 燃焼後の損傷部と健全な FRP 板の層間面

はずだが、測定上では、そこに到達していないにもかかわらず、ロービングクロスが顕著に確認できた。その要因としては、圧縮成形されたロービングクロスに含浸していたマトリックス樹脂が燃焼されたことで、接着力を失い膨張したロービングクロスの厚みも加算されたためと考えられる。燃焼回数5回後の試験体 No.5 の損傷部と健全な FRP 板のロービングクロス層を層間剥離させた表面との状態比較を図-8 に示す。

### (3) 引張強度

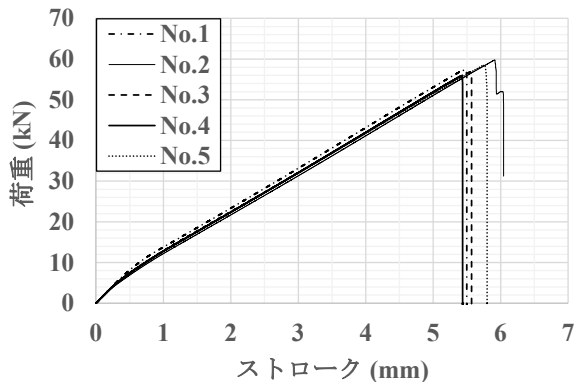
初期値用試験体 5 体と花火を繰り返し 5 回燃焼させた後の引張強度試験結果値を表-1 に、载荷中に得られた荷重-変位関係を図-9 に示す。なお、表中の引張強度算定にあたって使用した断面積は初期 (損傷前) の板厚を用いた。また、燃焼後の試験体のうち、板厚の減少が認め

られない試験体 No.1 と No.7 は比較対象外とした。なお、燃焼後の試験体損傷部にひずみゲージを貼付することが困難なため引張荷重とストローク変位のみ測定とした。

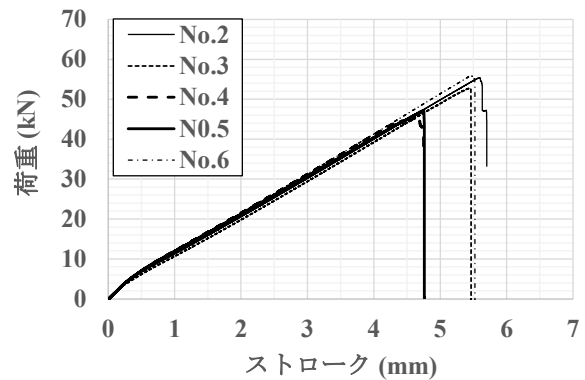
表-1 および図-9 より、初期値用試験体 5 体の強度平均値と燃焼回数 5 回後の損傷した 5 体の試験体の強度を比較すると、損傷部全体の平均値では 10% 程度の強度低下が認められ、ロービングクロスの露出が顕著に現れ、かつ、板厚の減少量が大きかった試験体 No.4 と No.5 では、20% 前後の強度低下が認められた。これは、図-10 に示す燃焼後の No.4 と No.5 の破壊位置からも燃焼部位の損傷によるものと判断できる。また、引張強度は損傷前の板厚から算定しているものの、前節の結果より、板厚は最大 10% 程度の減少にもかかわらず、20% 程度の強度低下であるため、板厚減少以外の原因 (例えば、燃焼部表面の樹脂や繊維の劣化など) で強度低下が起きていると

表-1 引張強度試験結果値

初期値用試験体		燃焼回数 5 回後の試験体		
試験体 No.	引張強度 (MPa)	試験体 No.	引張強度 (MPa)	低下率 (%)
1	285	2	274	4.4
2	296	3	260	9.1
3	281	4	225	21.3
4	277	5	233	18.5
5	291	6	277	3.1
平均値	286	平均値	254	11.2



(a) 初期値用試験体



(b) 燃焼回数 5 回後の試験体

図-9 荷重-変位関係

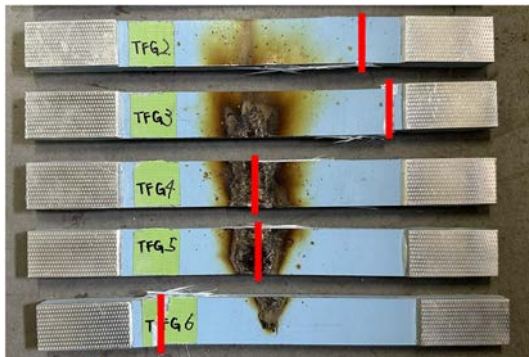


図-10 燃焼後の試験体の引張破壊位置

考えられる。一方、表面の焦げ跡が残った程度の No.2 と試験体幅の 1/4 程度にチョップドストランドマットの露出が確認された No.6 では、強度低下はほとんど認められず、板厚の減少量が小さくなるにつれ強度低下率も小さくなっているといえる。

最後に、図-9 の荷重-変位関係の傾きから、剛性に関してはほとんど変化が見られない結果となっている。これは、局部的に損傷しているため、試験片全体の剛性にはあまり影響を与えなかったためと考えられる。

#### 4. まとめ

FRP 部材に点火された一般的な手持ち花火が放置された場合を想定し、熱により損傷した FRP 板材の外観と強度の関係性を検証した実験結果では、表面保護層に焦げ跡が残る程度、または、損傷深さが FRP 層まで到達しておらず、保護層直下層のチョップドストランドマットの露出程度であれば強度低下はほとんど認められず、供用中の構造物において大事故に繋がる原因とはならないといえる。すなわち、手持ち花火を FRP 板材の同位置上に 2 度繰り返し燃焼させる程度では、強度低下による危険性は考えられない。ただし、表面保護層の仕様や厚みに

よっては結果が異なる場合もある。また、損傷部の焦げ跡による景観上への対策や表面保護層の欠損による FRP 層の部分的な劣化促進を防止するためには、損傷部の表面保護層を再構築する必要がある。

次に、より過酷な条件を想定した繰り返し燃焼回数 5 回後の結果より、板厚減少量が比較的大きく、ロービングクロスの露出が顕著に現れた箇所には明確な強度低下が認められたことから、万一、供用中の FRP 構造物に同条件のような損傷が発見された場合には、構造物全体に対する損傷度合いなども十分吟味した上で、必要に応じ適切な補修方法により損傷部を健全な状態へ回復させる必要がある。また、あらかじめ耐熱性が求められる場合には、耐熱性に優れたマトリックス樹脂の使用や耐熱塗料による表面保護を施すなどの対策方法がある。

本実験では、FRP への高熱による損傷の影響を手持ち花火により検証したが、試験体数が少ないことから、今後は試験体数を増やした実験を実施すること、また、熱量と時間に対する損傷度合と範囲、使用限界などについて、より詳細に追跡していくこととしている。

#### 謝辞

本研究は、土木学会・複合構造委員会・FRP 複合構造

の設計・維持管理に関する調査研究小委員会で実施された内容の一部である。本委員会で貴重な意見・議論をしていただいた委員の方々に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 鎌田 謙, 福土慶滋, 永井又男: 極低温用 FRP の開発と評価, 日本複合材料学会誌, Vol.13, No.4, 1987, pp.151-156
- 2) João R. Correia, Marco M. Gomes, José M. Pires, Fernando A. Branco: Mechanical behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer composites at elevated temperature: Experiments and model assessment, *Composite Structures*, Vol. 98, pp.303-313, 2013.
- 3) 林 巖, 北根安雄, 佐藤頭彦, 杉浦邦征, 西崎到, 日比英輝: ハンドレイアップ成形 GFRP 材の引張特性に関する温度依存性, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.886-894, 2020
- 4) 久保圭吾: FRP 合成床版, コンクリート工学, Vol.52, No.1, pp.108-114, 2014
- 5) 日本規格協会: JIS A 1322, 建築用薄物材料の難燃性試験方法, 1966
- 6) 日本規格協会: JIS K7164, プラスチック—引張特性の試験方法—第 4 部, 等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件, 2005.
- 7) 日本煙火協会: 花火入門, 2022.

(Received August 25, 2023)

## A STUDY ON CHARACTERISTICS OF CHANGES IN TENSILE BEHAVIOR OF GFRP MATERIALS SUBJECTED TO LOCALIZED HIGH TEMPERATURE DAMAGE

Kunitaro HASHIMOTO, Hideki HIBI, Yasuo KITANE and Itaru NISHIZAKI

Recently, glass fiber reinforced plastic (GFRP) components have been applied to the main components of relatively small civil engineering structures such as water gates, pedestrian bridges, promenades, and bridge inspection walkways. Among these civil engineering structures, pedestrian bridges and promenades, in particular, can be exposed to locally high temperatures due to, for example, cigarette fires and fireworks. It is not clear how much temperature is generated on the surface of GFRP when exposed to such high temperatures, and to what extent and to what degree the mechanical properties change due to such high temperatures. In this study, GFRP specimens were subjected to high temperatures and then subjected to tensile tests to investigate changes in the tensile behavior of GFRP materials, assuming that they are exposed to high temperatures due to fireworks. As a result, it was possible to quantitatively understand the surface condition of the high-temperature area and the degree of degradation due to high temperature.