

電車線金具における FRP 脆性破壊現象の 実験的再現と防止策

菅原 淳* 柘田 吉弘**
伊藤 幹彌** 半坂 征則***

Experimental Reproduction and Preventive Measures of Brittle Fracture of FRP Material for Overhead Line Fittings

Atsushi SUGAHARA Yoshihiro MASUDA
Mikiya ITO Masanori HANSAKA

FRPs (Fiber-Reinforced Plastics) are often applied to overhead line fittings for the purpose of insulation. Since some brittle fracture cases had occurred on epoxy GFRP applied to cyclic current prevention type pull-off arms of OCS in operation, we attempted to reproduce this brittle fracture of FRP experimentally in order to confirm the phenomenon and propose preventive measures. We conducted experiments in three environments: in air, in distilled water and in nitric acid water solution. As a result, we could reproduce brittle fracture of FRP by loading static stress continuously in distilled water and nitric acid water solution. We propose to make the part of fittings containing FRP inside watertight to prevent brittle fracture through preventing water or acid solution from permeating into the fittings.

キーワード：電車線金具，エポキシ系 GFRP，脆性破壊，水，硝酸，荷重

1. はじめに

FRP（繊維強化プラスチック）は電車線路部材においてセクションインシュレータ、絶縁形や循環電流防止形の曲線引金具・振止金具、ポリマがいしの心材などに多用されている。それらのうち、循環電流防止形曲線引金具においてエポキシ系 GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）の脆性破壊が数例発生した。そこで、その現象を確認するため、実際の破壊例と FRP の脆性破壊に関する既存の知見を参考に脆性破壊の実験的再現を試み、その結果に基づいて防止策を検討した。

2. FRP の脆性破壊現象

2.1 電車線金具における発生例

循環電流防止形曲線引金具で生じたエポキシ系 GFRP の破壊例を図 1 に示す。以下、本稿ではエポキシ系 GFRP を単に FRP と略す。当該曲線引金具は同図上段に示す交差用で、赤い破線で囲んだ循環電流防止部分の

心材（強度部材）として用いられていた FRP が破壊したものである。

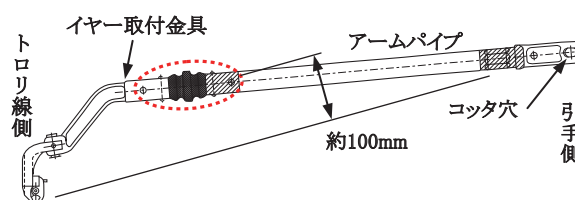


図 1 循環電流防止形曲線引金具における FRP の脆性破壊例

* 電力技術研究部 集電管理研究室
** 材料技術研究部 防振材料研究室
*** 材料技術研究部 防振材料研究室
(現 研究開発推進部)

特集：電力技術

FRPは繊維で強化されているため、外力で強制的に破壊した場合、一般に破面は繊維がささくれ立った様相を示す。しかし、本例の破面は大部分が割れたように平滑である。循環電流防止形曲線引金具において、破面の様相が似ているFRPの破壊が、交差用のみならず弓形のものも含め数例発生した。破面の様相から、これは「FRPの脆性破壊」として知られる現象と考えられる。脆性破壊とは、ガラスや磁器等で見られる、もろく割れるような破壊形態のことを指す。

2.2 FRPの脆性破壊に関する既存の知見

FRPの脆性破壊現象は、ポリマがいしの心材における例が既に知られている。スウェーデンの電力コンサルタント会社STRI社は、ポリマがいしの劣化と損傷に関して文献1)をインターネットで公開している。その中でポリマがいしのFRP心材における脆性破壊(Brittle Fracture)を挙げており、下記の1項目あるいは複数項目によって特徴づけられると述べている。

- ・ 破面は平滑で、大部分は心材の軸に垂直である。
- ・ 面が平滑な段差を形成する場合がある。
- ・ 繊維と樹脂が同一平面で破断している。
- ・ 破面はきれい(細かなガラスや樹脂の粒子がない)、または、概して繊維状を呈する破面の残りの部分は一般に小さい。

同文献には破面例の写真も示されているが、図1の破面はこれと酷似しており、FRPの脆性破壊を特徴づける上記各項目もほぼ該当する。従って、2.1節で示した循環電流防止形曲線引金具におけるFRPの破壊はこの脆性破壊と考えられる。

ポリマがいしのFRP心材の脆性破壊は、他にも複数の文献で言及されている^{2) 3) 4)}。それらの文献はいずれも、脆性破壊は酸によって生じやすくなり、その酸の由来は酸性雨、あるいは放電により水分と空気中の窒素が反応して生じる硝酸と述べている。さらに文献3)には応力腐食の類であるとの言及もある。そこで筆者らも、既存の知見を参考にしてFRPの脆性破壊を実験的に再現し、現象を確認するとともに、その結果に基づき防止策を検討することとした。

3. FRPの脆性破壊再現試験

3.1 基本方針

図1に示す循環電流防止形曲線引金具では、FRP部はトロリ線と引手部コッタ穴を結ぶ軸、つまり横張力が加わる軸から約100mm離れているため、架設時にFRPには引張と曲げの荷重が常時加わる。そこで、試験ではFRPに引張と曲げの静的荷重を同時に所定期間連続負荷することとした。試験環境は2.2節で述べた既存の知

見を参考に、空气中、蒸留水中および硝酸水溶液中(濃度1mol/L)とした。以下、蒸留水と硝酸水溶液を合わせて環境液と呼ぶ。また、硝酸水溶液は硝酸と略す。

3.2 供試材料

供試FRPは、図1に示す循環電流防止形曲線引金具に用いられているのと同じものである。樹脂は酸無水物硬化エポキシ樹脂、繊維は電気用ガラスロービング(Eガラス)、表面処理は連続引抜き成形後、表面を常温硬化ポリウレタン塗料により塗装してある。形状は丸棒(長さ150mm、直径17.8mm)である。

当該循環電流防止形曲線引金具におけるFRP部の組立状態を図2に示す。上記FRP丸棒の両端50mmをイヤー取付金具およびアームパイプに挿入してエポキシ系接着剤で接着した後、リベット穴を共明けし直径4mmのステンレス鋼製リベットを挿入して組み立てている。リベットの固定はかしめのみで、接着剤は併用していない。

試験ではこの組立状態を模擬するため、図3に示すFRPホルダーをステンレス鋼(SUS304)で製作し、供試FRPの両端にエポキシ系接着剤で接着した後、直径4mmのリベット穴を明け、ステンレス鋼製のリベットを挿入して試験体とした。FRPホルダーの他端には、次節で述べるアームを取り付けるため、M16のねじが設けてある。なお、環境液が直接FRPに触れる条件を設定するため、ナイロン6製の外装は模擬しなかった。ま

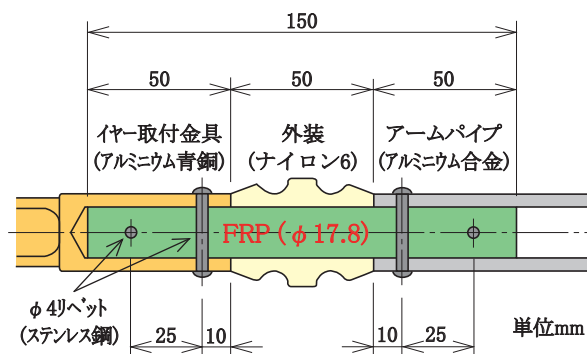


図2 循環電流防止形曲線引金具におけるFRP部の組立状態例

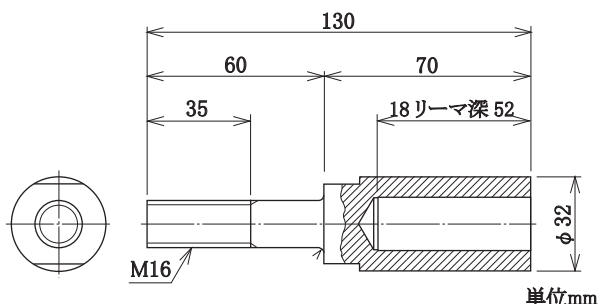


図3 脆性破壊再現試験用FRPホルダー

た、リベットは挿入するのみとし、かしめは行わなかった。組立後の試験体を図4に示す。

3.3 試験方法

試験の概略を図5に示す。FRPホルダー端部のねじにアームを取り付け「コの字形」にし、上下両アームの先端に引張荷重を加えることにより、FRPに引張と曲げの静的荷重を同時に連続負荷した。本章冒頭に述べたとおり、図1に示した曲線引金具では、トロリ線と引手側コック穴を結ぶ線からFRPまでの距離、即ちFRPに対するモーメントの腕は約100mmなので、試験体の中心軸とアームの荷重負荷点の距離は100mmとした。荷重の連続負荷はクリープ試験機（㈱東洋精機製作所製200LR形）を用いて行った。同試験機は最大6個の試験片を取り付けることができ、試験を同時に行うことができる。

試験片への環境液の与え方を図5に併記する。試験体下側のFRPホルダー部にカップを取り付け、環境液を注入した。液面は、FRPが直接液に触れる高さ（図5中「高液面」）のほか、硝酸についてはFRPホルダーの端部より低くして、リベット穴からの浸入の影響を調べる試験も行った（同「低液面」）。試験温度は $23 \pm 1^\circ\text{C}$ とした。クリープ試験機における試験状況を図6に示す。

試番一覧を表1に示す。各試番ごとに、連続負荷荷重を負荷期間にわたり連続的に負荷した。硝酸については比較のため、荷重を負荷せず試験体全体を硝酸に浸漬する試験も行った（試番1～3）。

各試番後の劣化状態を評価するため、50kN引張試験機（㈱島津製作所製オートグラフAG-I 50kN形）を用いて、図5と同じ形態、つまり試験体にアームを取り付けた「コの字形」の状態で上下両アームの先端に引張荷重を加えFRPを破壊し、その際の最大荷重と破壊状態を調べる試験を行った（以下、破壊試験と略す）。引張速度は5mm/分である。比較品とは、試験の履歴がない試験体の強度を調べるため破壊試験を行ったものである。

3.4 試験結果

破壊試験の最大荷重を表1に併記するとともに図7に示す。試番6～15は試験開始1日後に、試番5は1週間後に、試験体の変形がクリープ試験機のストローク上限（試験開始から+20mm）に達したため、以降は定荷重でなく定変位の状態で試験を継続した。また、試番10、11はクリープ試験機での試験中に、試番9、14は破壊試験の準備中に破壊したため、破壊試験最大荷重が得られなかった。以下、試験条件ごとに結果を述べる。

(1) 比較品

破壊試験後の状態を図8に示す。繊維に沿って裂ける



図4 脆性破壊再現試験の試験体

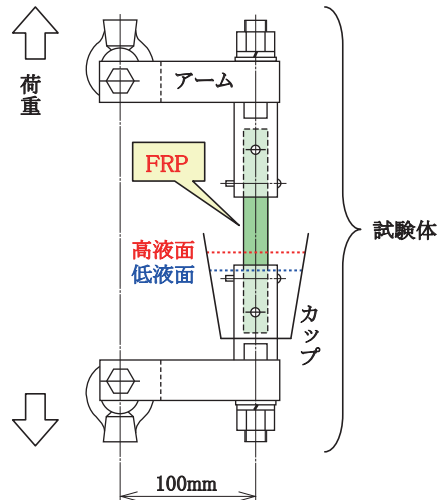


図5 脆性破壊再現試験概略図

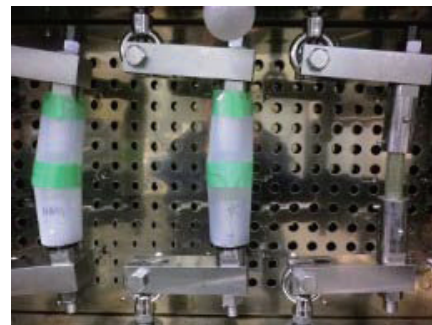


図6 脆性破壊再現試験状況

表1 脆性破壊再現試験の試番一覧と試験結果

試番	試験環境	連続負荷荷重	荷重負荷期間	液面	破壊試験最大荷重
比較品					4.51kN
					4.50kN
1	硝酸	なし	1日	(浸漬)	4.36kN
2			1週間		3.59kN
3			1週間		3.54kN
4	空気	1.96kN	2週間	—	4.55kN
5				2.94kN	—
6	蒸留水	1.96kN	1週間	高	0.64kN
7					3.81kN
8					2.02kN
9	硝酸	0.98kN	1日	高	破壊(2)
10			1週間		破壊(1)
11		1.96kN	1週間		破壊(1)
12		0.98kN	1日		1.17kN
13		1.96kN			0.19kN
14	0.98kN	破壊(2)			
15	1.96kN	1週間	低	0.11kN	

破壊(1)：試験期間中に破壊

破壊(2)：破壊試験準備中に破壊

特集：電力技術

ような破壊様式であり、図1の脆性破面とは明らかに異なる。

(2) 硝酸に浸漬、荷重無負荷

硝酸に浸漬したのみで荷重を与えていない試番1～3の破壊試験最大荷重は、1日浸漬した試番1は比較品に比べほとんど低下しておらず、1週間浸漬した試番2、3でも比較品の80%程度までの低下にとどまっている。試番1～3の引張破壊試験後の破面を図9に示す。破壊はいずれもリベット穴の箇所が生じていることから、断面積が小さいためと考えられる。破面の大部分はガラス繊維がささくれた状態であり、部分的に脆性破壊的な部分が見られる程度である。従って、荷重が加わっていない状態では硝酸が存在しても脆性破壊はほとんど生じないと考えられる。

(3) 空气中

破壊試験最大荷重は、連続負荷荷重が1.96kNの試番4は比較品に比べほとんど低下していないが、2.94kNの試番5は80%強まで低下しており、連続負荷荷重の履歴の影響が考えられる。試番4、5の破壊試験後の状態を図10に示す。いずれも脆性破壊を生じている可能性は低いと考えられる様相である。

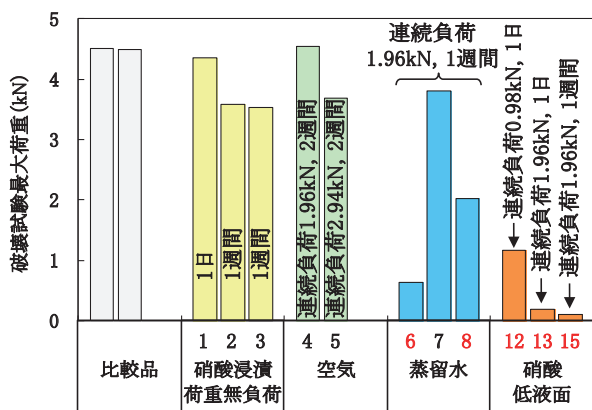


図7 破壊試験の最大荷重

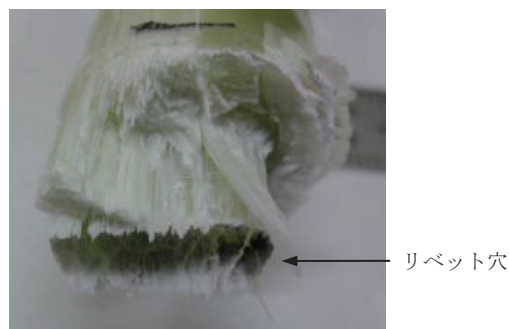
グラフの棒の下の数字は試番を示すうち、赤字は脆性破壊と考えられる試番を示す



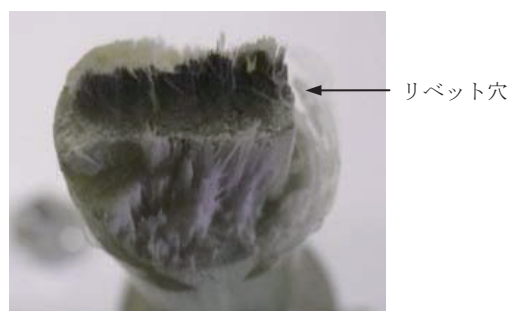
図8 比較品の破壊試験後の状態

(4) 蒸留水中

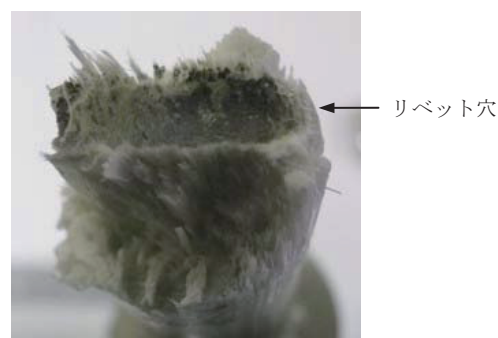
蒸留水中での試番6～8の破壊試験最大荷重は、いずれも比較品から明らかに低下している。破壊試験後の状



(a) 試番1 (1日浸漬)

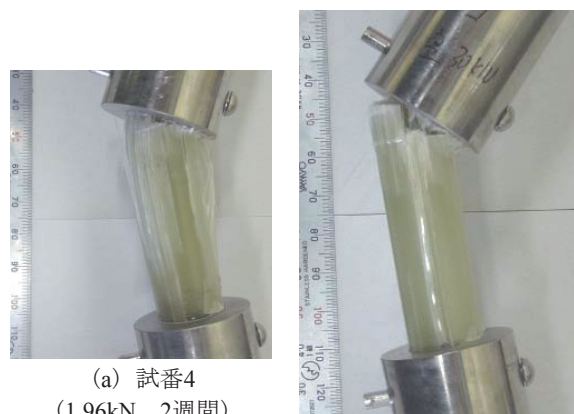


(b) 試番2 (1週間浸漬)



(c) 試番3 (1週間浸漬)

図9 試番1～3 (硝酸に浸漬、荷重無負荷)の破壊試験後の破面



(a) 試番4 (1.96kN, 2週間)

(b) 試番5 (2.94kN, 2週間)

図10 試番4、5 (空气中)の破壊試験後の状態

態を図 11 に示す。破壊試験最大荷重が試番 5（空气中）と同程度の試番 7 は破壊部において繊維方向に裂けているのが認められるが、破壊前最大荷重が著しく低下している試番 6、8 の破面は、ガラス繊維のささくれが見られる部分と平滑で脆性破壊の様相を呈している部分とが混在している。従って、水分が存在する状態で荷重が加わり続けると、脆性破壊に類似した破壊が発生し、強度が低下する可能性が考えられる。試番 6～8 の破壊はいずれもクリープ試験機における試験で上側、つまり蒸留水と直接接していない箇所が生じたが、水に接触していない部分でも FRP 内を拡散して水が到達していると推定される。



(a) 試番6 (1.96kN, 1週間)



(b) 試番7 (1.96kN, 1週間)



(c) 試番8 (1.96kN, 1週間)

図 11 試番 6～8（蒸留水中）の破壊試験後の状態

(5) 硝酸中

前述のとおり、試番 9、10、11、14 は破壊試験最大荷重は得られていない。これら 4 試番の破壊箇所はいずれも試験時の下側、つまり硝酸と接触していた側であった。破面は 4 試番いずれも脆性破壊の様相を呈していた。試番 10 の破壊状態を図 12 に示す。

試番 12、13、15 の破壊試験最大荷重は比較品から大きく低下しており、試番 13、15 は低下が特に著しい。試番 12、13 の破壊試験後の破面を図 13 に示す。いずれもほぼ全面にわたって脆性破壊の様相を呈しており、脆性破壊は試験で再現できたと考えられる。また、これら 3 試番の硝酸の液面は低液面であり、リベット穴から

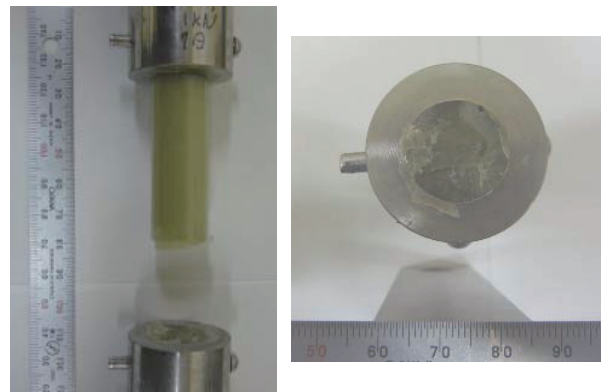
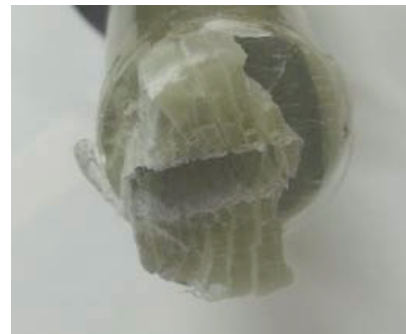


図 12 試番 10（硝酸中、試験中に破壊）の破壊状態 (0.98kN, 1週間)



(a) 試番12 (0.98kN, 1日)



(b) 試番13 (1.96kN, 1日)

図 13 試番 12、13（硝酸中）の破壊試験後の破面

の硝酸の浸入でも脆性破壊は生じると考えられる。

4. まとめと脆性破壊防止策

3.4節で述べたFRPの脆性破壊再現試験の結果をまとめると次のとおりとなる。

- ・硝酸中で荷重を同時に作用させることにより、脆性破壊が再現した。
- ・蒸留水中で荷重が同時に作用することでも、脆性破壊に類似した現象が発生した。FRP中を水が拡散し、水と直接接触していない箇所でも現象が発生する可能性がある。
- ・硝酸へ浸すのみで荷重の負荷がない場合、脆性破壊は生じにくい。
- ・空気中では脆性破壊の可能性は低い。

以上から、常時荷重が加わる箇所で使用されるFRPの脆性破壊を防止するには、酸および水との接触を避けることが有効と考えられる。

例えば本件で想定した図2のような循環電流防止形曲線引金具におけるFRP部の構造では、図14に示すように異種材料の合わせ目やリベット穴など、液体が浸入する可能性がある箇所に、シール剤で防水を施すことが防止策として考えられる。

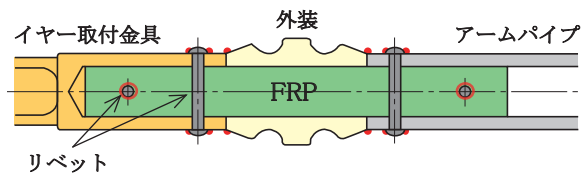


図14 FRP部の防水案
赤色部が防水シール部分

謝辞

株式会社電業には供試FRPをご提供頂き、また、FRPとFRPホルダーの接着およびリベット穴の共明けでご協力頂いた。ここに御礼申し上げます。

文献

- 1) Guide for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators, STRI Guide 5, STRI AB, 2005
STRI社ホームページ <http://www.stri.se/>
(参照日：2015年11月5日)
- 2) 小林哲, 松崎豊, 新子谷悦宏, 木股隆三：架空送電線用複合がいしの開発（その2）, 古河電工時報, 108号, p.55, 2001
- 3) Kuhl, H.: FRP Rods for Brittle Fracture Resistant Composite Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 2, pp. 182-190, 2001.
- 4) 近藤邦明：高分子がいしの電気絶縁特性に関する基礎研究, 名古屋工業大学博士論文, 1997