

電車線金具におけるFRPの脆性破壊防止策の提案

電力技術研究部 集電管理研究室
室長 菅原 淳

1. はじめに

FRP(エポキシ系GFRP)は電車線金具にも絶縁目的で多用されているが、ガラス繊維で強化されているにもかかわらず、強度が低下して、もろく割れるような破壊(脆性破壊)を生じることがある。そこで、現象確認のためFRPの脆性破壊を試験で再現させることを試み、その結果に基づいて防止策を提案した。

2. FRPの脆性破壊現象

電車線金具におけるFRPの脆性破壊例を図1に示す。これは、同図上段に示す循環電流防止形の曲線引金具で生じたものである。破線で囲んだ絶縁部分の心材(強度部材)としてFRPが用いられている。FRPを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が、図1下段の写真では破面の大部分がもろく割れたように平滑である。

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。図2は文献に示された破面の例で、図1の破面と酷似している。ポリマがいしにおけるFRP心材の脆性破壊は酸によって生じやすくなるとされ、その酸は酸性雨、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に由来する旨、複数の文献で言及されている。そこで、ポリマがいしの知見を参考に、脆性破壊の再現試験を行うこととした。

3. 脆性破壊再現試験

3.1 試験方法

図1に示す循環電流防止形曲線引金具では、FRP部は横張力が加わる軸から約100mm離れており、架設時にFRPには引張荷重と曲げ荷重が常に加わる。そこで、試験はFRPに引張荷重と曲げ荷重を同時に加え続けるものとした。試験環境は空气中、蒸留水中および硝酸水溶液中(濃度1mol/L、以下硝酸と略)とした。

供試FRPも、図1の曲線引金具に使用されているも

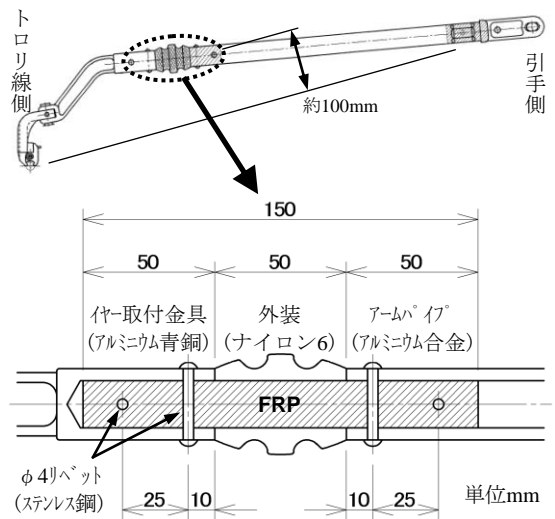


図1 循環電流防止形曲線引金具におけるFRPの脆性破壊例

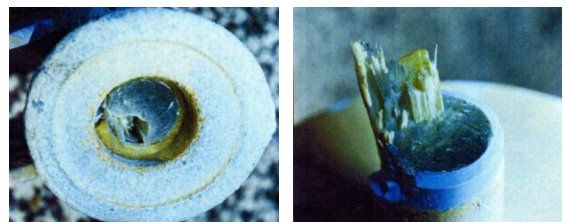


図2 ポリマがいしのFRP心材の脆性破壊例 (出典: STRI Guide 5, STRI AB, 2005)

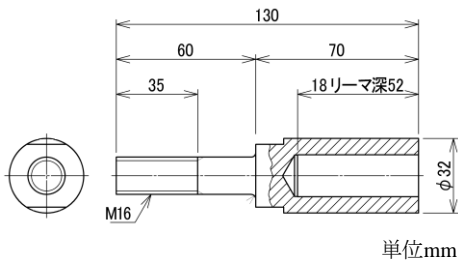


図3 脆性破壊再現試験用FRPホルダー



図4 脆性破壊再現試験の試験体

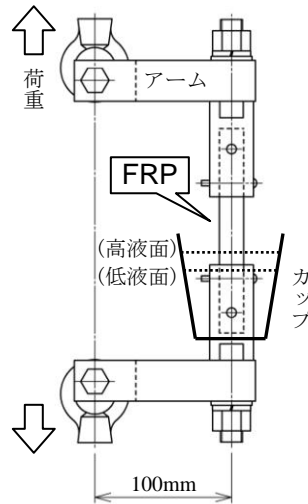


図5 脆性破壊再現試験概略図

のとした(直径17.8mm,長さ150mm)。図1の曲線引金具では,FRPを金属部分に挿入しエポキシ系接着剤で接着した後,リベット穴を明け,直径4mmのステンレス鋼製リベットを併用して固定している(図1中段参照)。本試験ではその構造を模擬し,図3に示すFRPホルダーをステンレス鋼で製作し,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。ただし,外装は取り付けず,また,リベットのかしめは行わなかった。試験体の外観を図4に示す。

試験の概略図を図5に示す。試験体の両端にアームを取り付け,アームの他端に上下方向に荷重を加えることにより,FRPに引張荷重と曲げ荷重を同時に加えた。蒸留水中および硝酸中の試験は,試験体下部にカップを取り付け,その中に液を注いで行った。硝酸については,リベット穴からの浸入を想定した低液面での試験も行った。各試験ごとに所定荷重を所定期間加え続けた後,図5の状態からFRPが破壊するまで荷重を加える試験を行い,破壊前最大荷重を調べて強度低下を評価した。また,破壊後の状態を観察した。試験一覧を表1に示す。比較品とは試験体をそのまま破壊試験に供したもので,試験番1~3は,試験体に荷重を加えずに硝酸に浸した後,破壊試験を行ったものである。試験状況を図6に示す。

3.2 試験結果

破壊試験の破壊前最大荷重を表1に併記する。試験番10,11は荷重を负荷し続けている期間中に,試験番9,14は破壊試験の準備中に破壊したため,破壊前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7に示す。繊維に沿って裂けるような破壊様式であり,図1や図2の脆性破

表1 脆性破壊再現試験の試験一覧と試験結果

試験番	試験環境	荷重	試験期間	液面	破壊前最大荷重
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					3.54kN
4	空気	1.96kN	2週間	—	4.55kN
5				—	3.68kN
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					破壊(1)
12			1日		1.17kN
13					0.19kN
14	蒸留水	0.98kN	1週間	低	破壊(2)
15					

破壊(1): 試験期間中に破壊

破壊(2): 破壊試験準備中に破壊

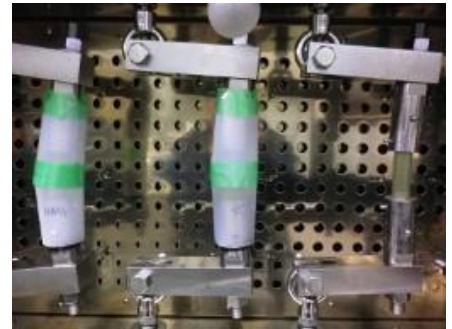


図6 脆性破壊再現試験状況



図7 比較品の破壊試験後の状態



図8 試番1~3(硝酸に浸漬, 荷重無負荷)の破壊試験後の破面

面とは明らかに異なる。

(2) 硝酸に浸漬, 荷重無負荷

破壊前最大荷重は, 硝酸に1日浸した試番1は比較品からほとんど低下しておらず, 1週間浸した試番2, 3でも80%程度の低下にとどまっている。試番1~3の破壊試験後の破面を図8に示す。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面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

破壊前最大荷重は, 試験荷重が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%強に低下しており, 荷重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9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。

(4) 蒸留水中

試番6~8の破壊前最大荷重は, いずれも比較品から明らかに低下している。破壊試験後の状態を図10に示す。破壊前最大荷重が試番5(空气中)と同程度の試番7は破壊部にガラス繊維のささくれ

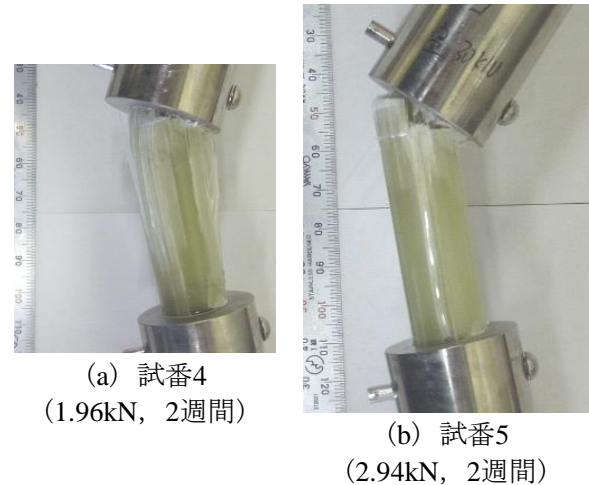


図9 試番4, 5(空气中)の破壊試験後の状態

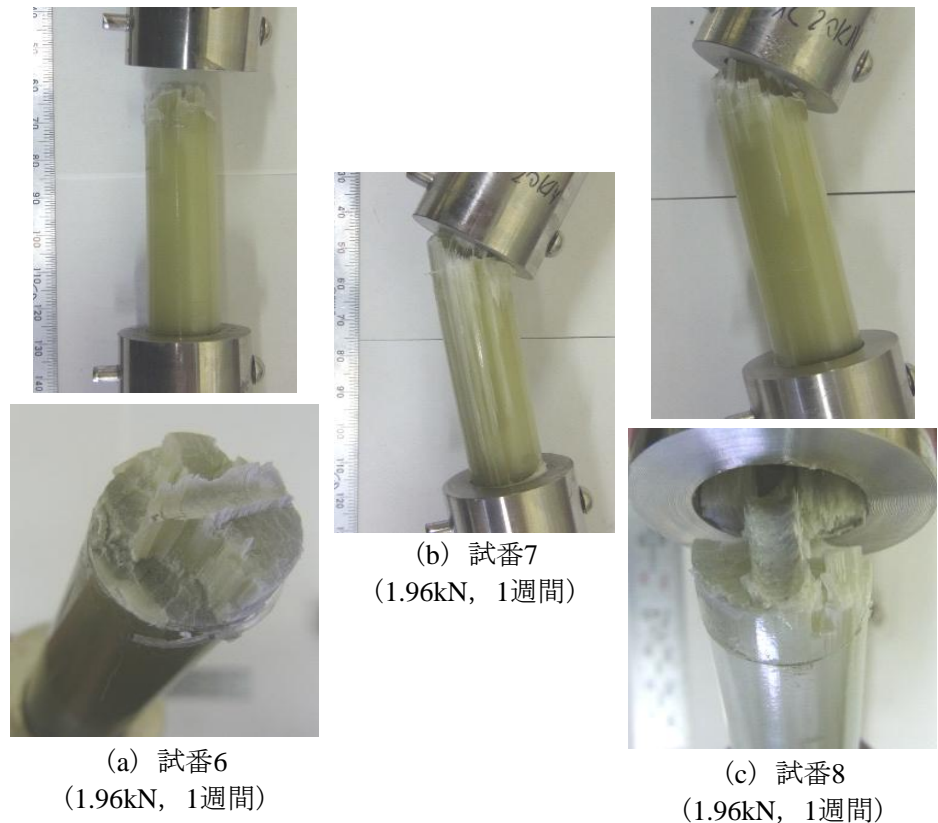


図10 試番6~8(蒸留水中)の破壊試験後の状態

が多いが、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現象が発生し、強度が低下する可能性が考えられる。試番6~8の破壊はいずれも試験時の上側、つまり蒸留水と直接接触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。

(5) 硝酸中

前述のとおり、試番9, 10, 11, 14は破壊試験による破壊前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試番いずれもぜい性破壊の様相を呈していた。試番10の破面を図11に示す。

試番12, 13, 15の破壊前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12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

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。本件で想定した循環電流防止形曲線引金具等では、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、シーラ剤で防水を施すことが対策として考えられる。

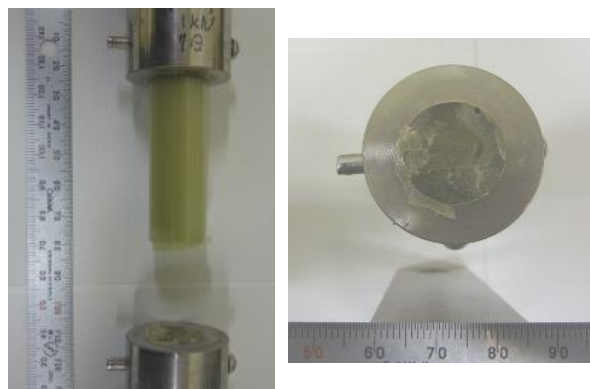


図11 試番10(硝酸中、試験中に破壊)の破壊状態 (0.98kN, 1週間)



(a) 試番12 (0.98kN, 1日)



(b) 試番13 (1.96kN, 1日)

図12 試番12, 13(硝酸中)の破壊試験後の破面