154 kV用耐張形高分子絶縁アームの機械的特性

正員 泉 邦和 (電力中央研究所) 正員 高橋 毅 (電力中央研究所)
 正員 谷口 毅 (電力中央研究所) 正員 本間 宏也 (電力中央研究所)
 正員 畔柳 俊幸 (電力中央研究所) 非会員 岩崎 康彦 (シキボウ)

Mechanical Characteristics of Line Post Type Polymer Insulation Arm for 154kV

Kunikazu Izumi, Member, Takeshi Takahashi, Member, Takeshi Taniguchi, Member,

Hiroya Homma, Member, Toshiyuki Kuroyagi, Member, (CRIEPI),

Yasuhiko Iwasaki, Non-member (Shikibo)

This paper describes the mechanical characteristics of a 154 kV line post type polymer insulation arm which has both the functions of a steel arm and a porcelain insulator of a presently used transmission steel tower. The 154 kV line post type polymer insulation arm consists of polymer composite insulators called units which include two horizontal units with an open angle for responding to a longitudinal load of 40 kN and a suspension unit for responding to a vertical load. Its installation length is about 2.3 m.

Samples of the insulation arm were installed at different places of an electric wire, to form a truss structure and a lahm structure, for examining their mechanical characteristics. For the truss structure, it was clarified that neither remarkable bending stress nor torsional stress is generated in the FRP core, and that the mechanical force design of the insulation arm can be evaluated in reference to the axial force of the FRP core only. Furthermore, the buckling coefficient for evaluating the axial force of the insulation arm with the truss structure was experimentally identified. Moreover, it was clarified that a static load test for evaluating the mechanical force performance of the insulation arm against a longitudinal load is more severe than an impact load test at the same longitudinal load.

キーワード: FRP、高分子がいし、絶縁アーム、トラス構造、機械強度

1. まえがき

都市部の拡大に伴う電力需要の高密度化の傾向が高まる一方、種々の制約から年々、送電線用地の確保は困難な状況になりつつある。架空送電線について見れば、500kV、275kVに代表される基幹送電線と、配電用変電所への電力供給を担う60～150kV級送電線に大別されるが、都市やその周辺部への電力輸送力を確保するためには、60～150kV級架空送電線を対象としたコンパクト化技術の開発が有効であると考えられる。

架空送電線のコンパクト化のためには、2回線水平間隔の縮小が不可欠である。このためには、鋼管単柱鉄塔や狭根開き鉄塔などのスリム化鉄塔の採用による鉄塔敷地面積の縮小と現用送電線の鉄塔アームと磁器製がいしの機能を複合し、電線を直接、絶縁・支持できる絶縁アームの適用が極めて有効であると考えられる。

絶縁アームに関しては、送電機能研究委員会のもとで、

154kVなどの電圧階級の送電線用として磁器製長幹がいし4本を組構造とした耐張用アーム状がいし装置が試作され、その性能検証が報告されている⁽¹⁾。しかし、154kVの線路方向破壊荷重は約40kNで、十分な機械的性能を得るまでに至らなかった。

近年、欧米を中心に、耐機械力のための繊維強化型プラスチック(FRP)コアにその表面絶縁用として屋外用高分子絶縁材料を笠形状としたシリコンゴムなどで覆い、そのFRPコアの両端に取り付け用金具を設けた構造の複合がいし(以下、高分子がいしと略称)が磁器がいしの代替として適用され始めている⁽²⁾。この高分子がいしは、磁器がいしに比較し、軽量で耐汚損性能が良好であり、かつ機械的衝撃性能に優れていると言われている。海外の送電線において、この高分子がいしを比較的短い径間長の150kV級以下の架空送電線を対象に電線の水平絶縁支持として適用して、送電線のコンパクト化を図っている例も報告されている⁽³⁾。また、国内においても、軽量性に着目し径間中央の電線垂直間に高分子がいし製の相間スペースを

取り付け、ギャロッピングやスリットジャンプなどに起因した電線の異常振動を抑制して事故の軽減を図るための試験適用が報告されている^{(4) (5)}。

これらの高分子がいしの技術を積極的に活用し、同がいしをユニットとした絶縁アーム（以下、高分子絶縁アームと呼称）を開発すれば、架空送電線のコンパクト化への寄与は大きいと考えられる。しかし、電線を絶縁・支持する上から、電気絶縁性能とともに、機械的に十分な性能が必要となる。60～150kV級高分子絶縁アームについて見れば、154kV用絶縁アームが絶縁性能上、最長の高分子絶縁アーム長さを必要とするため、線路から受ける機械的ストレスが最も過酷であると考えられる。

本論文は、万一の電線破断時にも健全径間側の電線を支持できる機械的性能を有する154kV用耐張形高分子絶縁アームについて、その主要構成ユニットであるFRPコアならびにアーム構造を対象に機械的特性について述べたものである。

2. 所要性能

154kV用耐張形高分子絶縁アームの機械力、電気絶縁などに関する所要性能概要を表1に示す。高分子絶縁アームの線路方向最大使用張力は、使用電線ACSR410mm²1条を考慮し、40kNとした。

表1 154kV用耐張形高分子絶縁アームの所要性能

Table 1. Required performance of 154kV line post type polymer insulation arm

送電線	公称電圧	154kV
	使用電線	ACSR 410mm ² 、1条
絶縁アーム	想定最大荷重	40kN（線路方向）
	設計荷重	100kN（線路方向） （安全率2.5）
	汚損耐電圧	161kV（汚損度；0.12mg/cm ² ）

高分子がいしの一般的な構造は図1に示すように、耐機械力のためのFRPコアをシリコンゴムなどの笠形状高分子絶縁材製カバーで覆ったもので、FRPコアの所要長さは、主にカバーの汚損絶縁性能から決定される。このカバーの初期汚損耐電圧は、高分子がいしと同形状の磁器製長幹がいしに比較し、30～50%高いことが報告⁽⁶⁾されている。したがって、磁器がいしの汚損耐電圧設計曲線⁽⁷⁾をもとに、等価塩分付着密度0.12mg/cm²において表面漏れ距離1m当たり約30kVとした。所要汚損耐電圧は161kVであることから、所要表面漏れ距離は約5.4mとなる。一方、カバーの表面漏れ距離と実効長さの比は2.5程度であることから、所要長さは所要表面漏れ距離をもとに2.2mとなる。したがって、運転電圧（公称電圧の対地電圧）に対するFRPコアの単位長さ当たりの電圧は約40kVである。FRP

のガラス繊維方向の絶縁破壊電圧は2～4MV/m⁽⁸⁾であることから、運転電圧に対するFRPの絶縁性能は十分であると考えられる。

図1 高分子がいしの構造

Fig.1. Typical structure of polymer composite insulator

3. 基本構造と材料特性

<3.1> 絶縁アームの基本構造 耐張形高分子絶縁アームのFRP構成は、図2に示すように線路方向の荷重に対応するための開き角を有する2本の水平ユニットと、垂直方向荷重に対応するための吊りユニットで構成した。水平ユニットの開き角は鉄塔塔体幅を考慮し40度、吊りユニットと水平ユニットとの開き角は上相との所要絶縁距離を考慮し30度とした。

図2 耐張形高分子絶縁アームの基本構造

Fig.2. Basic structure of line post type polymer insulation arm

<3.2> モデルによる機械特性の実験的検討 前掲図2に示す構造をもとに電線の取り付け位置の最適化の検討を行った。供試したガラス繊維とエポキシ樹脂の主な諸元を表2に示す。また、供試モデルと電線の取り付け位置ならびに歪測定箇所を図3に示す。同図において、載荷位置①はトラス構造を、②はラーメン構造を模擬している。供試試料はガラス繊維強化型FRPで、外径7.9mm、内径4.95mm、ガラス繊維方向は軸方向のみで繊維体積率は約65%である。得られた載荷荷重と各部歪の関係を図4に示す。同図から、トラス構造では、載荷側の水平ユニットでは全ての歪が負を示しており、圧縮方向の軸力が作用している。また、反対側の水平ユニットでは全ての歪が正を示しており、引張方向の軸力が作用している。一方、ラーメン構造では、各水平ユニットにおいて電線側と塔体側では正負、逆の歪を示しており、モーメントが発生していることが分かる。また、破壊荷重はトラス構造で2.6kN、ラーメン構

造で2.4kNで、トラス構造の方が高い値を示した。これらの結果から、絶縁アームは、トラス構造で設計することが有利であることが分かった。

表2 ガラス繊維とエポキシ樹脂の主な諸元
Table 2. Main properties of glass fiber and epoxy resin

ガラス繊維	種類	Tガラス
	引張強度	4.75GPa
	引張弾性率	86GPa
	最大伸び率	5.5%
エポキシ樹脂	種類	ビスフェノールA型
	硬化剤	酸無水物硬化剤
	引張強度	70MPa

図3 絶縁アームモデルの歪測定位置
Fig. 3. Strain measuring positions on insulation arm model

〈3.3〉 シミュレーションによる機械特性の検討

図3のモデルを対象に、線路方向荷重に対する機械特性についてシミュレーションによる検討を行った。シミュレーションは、FRPコアについて梁要素を用い、塔体側は節点完全拘束とし、ヨーク部は剛体として有限要素法により実施した。線路方向荷重は1kNとし、荷重個所は、トラス構造については各水平ユニットの延長上の交点に、またラーメン構造については上記交点より塔体側に移動した位置とした。なお、FRPの材料定数は、 E_x :35GPa, E_y :10GPa, E_z :10GPa, ν_{xy} :0.35, ν_{yz} :0.3, ν_{zx} :0.35, G_{xy} :5GPa, G_{yz} :5GPa, G_{zx} :5GPa (ここで、 E ; 弾性係数、 ν ; ポアソン比、 G ; せん断弾性係数、 x, y, z ; それぞれ繊維の長さ方向、横方向、縦方向)を使用した。

得られた結果について、変形量を5倍に拡大して図5に示す。トラス構造の荷重位置の変位量は0.74mmで、ラーメン構造の変位量2.33mmより小さいことが分かった。荷重側の水平ユニットに作用するモーメントと軸方向位置との関係を図6に示す。トラス構造の場合、モーメントはほとんど発生していないが、ラーメン構造の場合、モーメントの発生が認められる。また電線側に相当する部分と塔体側に相当する部分でモーメントの符号が逆となる。すなわち、トラス構造においては、荷重側の水平ユニットには圧縮方向の軸力による変形が生じるが、ラーメン構造では各水平ユニットとも軸力およびモーメントによる複雑な変形が生じることを示している。これらの結果は、モデルによる実験結果と良い一致を示した。

図4 絶縁アームモデルによる機械力試験結果
Fig. 4. Mechanical force test result of insulation arm model

図5 絶縁アームの機械特性シミュレーション結果
Fig. 5. Result of simulation on mechanical characteristics

図6 水平ユニットのモーメント
Fig. 6. Moments of horizontal unit

＜3.4＞ FRPコアの構造と特性 前述の検討結果から、トラス構造の採用が有利であるとともに、同構造においては、高分子絶縁アームへの最大の荷重である線路方向荷重は、2つの水平ユニットへ圧縮・引張荷重が等しく印加される。そのため、FRPは圧縮、引張の両強度が等しいものが有利となる。そこで、フィラメントワインディング成形方法⁽⁹⁾により作製されたFRPパイプを試料として用い、ガラス繊維の配向角度と引張、圧縮強度の関係について実験的に検討した。ガラス繊維の体積含有率は約65%で、引張試験用試料は外径26mm、内径21mmで、試料長は44mm、圧縮試験用試料は試料長のみ異なり30mmである。

得られた繊維の配向角と強度の関係を表3に示す。配向角0度と90度を2:1の比率で配向したものは、引張ならびに圧縮強度が等しい結果が得られたことから、この構造をFRPコア構造として採用することとした。本基礎試験で得られた強度、弾性率をもとに、以下に述べる手順により154kV用高分子絶縁アームに用いるFRPコアを設計した。

表3 ガラス繊維配向角と強度の関係
Table 3. Relation between orientation and strength of glass fibers

繊維配向角 (度) (*1)	引 張		圧 縮	
	強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)
40	0.23	20	0.17	23
0+90(*2)	0.53	40	0.53	40

*1 ; FRPコアの軸方向に対する繊維配向角度
*2 ; 0度と90度の繊維比率 2:1

絶縁アームに使用するFRPコアは約2.2mと長尺となる

ことから、機械力設計には座屈破壊を考慮する必要がある。上述の0度と90度の繊維配向のパイプ構造のFRPコアの所要軸力は、トラス構造を条件に以下のオイラーの公式⁽¹⁰⁾から求められる。

$$W = n \pi^2 E I / L^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、W ; 軸力、n ; 座屈係数、E ; 引張または圧縮弾性係数、I ; 断面2次モーメント、L ; コア長
ただし、パイプタイプの場合、

$$I = \pi (D_o^4 - D_i^4) / 64$$

ここで、D_o、D_i ; コアの外径、内径

一方、水平ユニットの所要軸力は(2)式より求められる。

$$W = (P/2) \sin^{-1}(\theta/2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、P ; 水平ユニットの最大荷重(最大使用張力に安全率2.5倍を考慮)、θ ; 水平ユニットの開き角
上記(1)、(2)式において、n = 2 (片端固定⁽¹⁰⁾)、E = 40GPa、L = 2.2m、P = 100kN (最大使用張力40kNに安全率2.5を考慮)、θ = 40° とし、D_oを製造上の制約から80mmとすれば、内径は66mmとなる。

なお、端末金具の構造については、図7に示すように、上記FRPパイプにインサート金具を設け、その内側をネジ付きとした端末金具を締め込み取り付けける構造とした。この構造により引張破壊荷重700kN以上を得ている。

図7 端末金具の構造
Fig. 7. Structure of metal end fitting

4. 154kV用高分子絶縁アームの機械力特性

＜4.1＞ 試験条件と結果 供試品は、図8に示すように端末金具付き単ユニットFRPを2本つなぎとして、極力トラス構造となるようにした。機械力特性の試験方法は図9に示すように、供試試料を鉄塔を模擬したベースに配置し、載荷部(電線取り付け部)の変位と各部の歪を測定した。載荷荷重は電線の線路方向とし、試験は線路方向荷重を徐々に増加させる静荷重試験と、荷重を徐々に増加させていき、裁断ボルトにより荷重を瞬時に開放すること

により衝撃荷重を加える衝撃荷重試験を実施した。試験状況を図10に示す。

図8 154kV用高分子絶縁アームの構造

Fig.8. Structure of 154kV line post type polymer insulation arm

図9 実規模機械力試験構成と歪センサの取り付け個所

Fig.9. Test equipment and strain measuring positions on full scale mechanical test

<4.2> 静荷重試験 载荷荷重と水平ユニットの鉄塔側取り付け部に発生した軸力の関係を図11に示す。軸力は(3)式をもとに算出した。

$$W = \mu A E \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 μ ；同円周上3個所の歪の平均値、 A ；コア断面積

载荷側水平ユニットならびに反対側水平ユニットの軸力は両方とも、载荷荷重に対してほぼ線形を示した。载荷荷重100kNにおける载荷側ユニットおよび反対側ユニットの軸力は各々140kN、150kNと同程度であった。トラス構造の線路方向荷重と水平ユニットの軸力との関係式(2)式をもとに、水平ユニットの開き角40°から、水平ユニットの軸

力は線路方向荷重の1.4倍と計算され、試験時に得られた水平ユニットの軸力と一致し、著しい曲げモーメントは発生していないことが検証された。また、吊りユニットのストレスは小さいことが分かった。载荷荷重と载荷部の変位の関係を図12に示す。载荷側では圧縮力が、反対側では引張力が加わり、基礎検討結果と一致した。また、変位量は100kN時に25mm程度とわずかであった。

図10 機械力試験状況

Fig.10. State of full scale mechanical force test

図11 静荷重試験時の荷重と軸力の関係

Fig.11. Relation between load and axial force in static load test

試験において得られた破壊荷重は150kNで、破壊箇所は载荷側水平ユニットの鉄塔部近傍での座屈破壊であった。この破壊荷重値から、前記(1)式中の座屈係数 n を求めると、約2.4となる。一般的に片端固定時で $n=2$ 、両端固定時で $n=4$ が使用⁽¹⁰⁾されているが、静荷重試験結果から、トラス構造の高分子絶縁アームは、座屈係数 n として2を考慮すれば安全側であることが分かった。

<4.3> 衝撃荷重試験 衝撃荷重印加時に得られた歪波形例を図13に示す。得られた歪波形ならびに加速度

のパワースペクトルから高分子絶縁アームの固有振動数は約30Hzであった。鉄塔ならびに線路の固有振動周波数は、各々1~4Hzならびに1~2Hz程度である⁽¹¹⁾ことから、鉄塔および線路との共振は発生しないものと考えられる。

図12 静荷重試験時の荷重と変位の関係

Fig.12. Relation between load and displacement in static load test

図13 衝撃荷重試験時の歪波形例

Fig.13. A strain waveform of FRP core in impact load test

また、衝撃荷重試験時と静荷重試験時に得られた歪をもとに、荷重40kN時において載荷側水平ユニットの電線取り付け部分近傍を対象に、(4)式で定義される増幅率M0、(5)式で定義される変位応答倍率Rを求めた。

$$M0 = \delta d / \delta s \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 δd 、 δs ；衝撃試験および静荷重試験時の軸力値

$$R = Dd / Ds \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 Dd 、 Ds ；衝撃試験および静荷重試験時の変位量

その結果、M0は0.54、Rは0.31といずれも1以下であることから、本論文で対象にしている高分子絶縁アーム構造の機械特性評価に際しては、衝撃荷重試験の必要はなく、静荷重試験のみで十分であると考えられる。

5. まとめ

現用送電鉄塔の鋼材アームと磁器がいしの機能を複合した高分子絶縁アームについて、154kV用耐張形同アームを対象に機械特性を検討し、以下の結果を得た。

(1) 耐張形高分子絶縁アームは取り付け長2.3mで、主な機械的構造は、線路方向荷重に対応するための開き角を有する2本の水平ユニットと垂直方向荷重に対応するための1本の吊りユニットから構成される。

(2) 同絶縁アームについて、電線の取り付け個所を変えてトラス構造とラーメン構造を構成し、その機械特性を実験ならびに解析により検討した結果、トラス構造を採用することにより、FRPコアに曲げやねじり力が発生せず、FRPコアの機械力設計においてその軸力のみで評価できることを明らかにした。

(3) トラス構造を有する絶縁アームの軸力設計に用いられる座屈係数は、片端固定時の係数2を考慮すれば安全側であることが分かった。

(4) 耐張形高分子絶縁アームの線路方向静荷重試験時のFRPコアの各部応力は、同じ荷重の衝撃荷重試験より大きいことから、機械的性能評価として静荷重試験で十分であることが明らかとなった。

終わりに、本研究にあたり、性能評価にご協力いただいた日本電炉(株)殿に、また種々ご指導いただいた(財)電力中央研究所横須賀研究所 吉田幸雄所長、渡辺泰夫部長、今城電力部長ならびに(株)シキボウ複合材料部 高橋幹雄部長に感謝致します。

(平成9年4月17日受付)

文 献

- (1)電力中央研究所送電機能研究委員会：「送電機能向上に関する研究報告(その1) 架空送電」(1965.9)
- (2)H.M. Shneider, J.F. Hall, G. Karady, J. Rendowden: "Nonceramic Insulators for Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, 4, 4, 2214~2221 (1989-10)
- (3)C.E. Williamson: "Transmission Line Developments up to 150kV in Eastern Australia", IEE Conf. Pub. 297, 173~177(1988)
- (4)大浦・伊藤・藤井：「275kV用非磁器製相間スベサの汚損耐電圧特性について」平成5年電学全大, 1339
- (5)小沢・大庭・板倉・高橋・畔柳：「275kV有機材相間スベサの汚損耐電圧特性」平成7年電学全大, 1633
- (6)谷口・高橋・本間・渡辺：「都市型コンパクト送電線の開発 その2」電力中央研究所研究報告W89047(1990.6)
- (7)電気協同研究会：「変電設備の耐塩設計」電気協同研究, 35, 3(1979.9)
- (8)市川・門谷：「複合材料の界面における絶縁破壊」静電気学会誌, 19, 2, 92~98(1995)

- (9)日本複合材料学会編:「複合材料ハンドブック」日刊工業新聞社(1989)
 (10)清家政一郎:「工学基礎 材料力学」共立出版(株)(1979.11)
 (11)電気学会 電気規格調査会標準規格:「送電用支持物設計標準」JEC-127-1979

泉 邦和

(正員) 1945年10月4日生まれ。68年3月関東学院大学工学部二部電気工学科卒業。64年(財)超高压電力研究所入所。77年電力中央研究所入所。89～90年米国コネチカット大学客員研究員。92年電気学会進歩賞受賞。主として、送変電機器の研究開発に従事。現在、送電線コンパクト化技術課題推進担当兼電力部上席研究員。

高橋 毅

(正員) 1947年7月24日生まれ。72年3月神奈川大学工学部二部電気工学科卒業。66年(財)超高压電力研究所入所。77年電力中央研究所入所。主として、送変電機器の汚損放電現象に関する研究に従事。現在、電力部主任研究員。

谷口 毅

(正員) 1944年5月3日生まれ。63年3月神奈川県立横須賀工業高等学校電気科卒業。同年(財)超高压電力研究所入所。77年電力中央研究所入所。主として、送配電線の塩害対策ならびに機器の新素材適用に関する研究に従事。現在、電力部主任研究員。

本間宏也

(正員) 1964年9月29日生まれ。87年3日立教大学理学部物理学科卒業。89年3月筑波大学大学院修士課程理工学研究科修了。同年電力中央研究所入所。94～95年米国コネチカット大学客員研究員。主として、屋外用高分子絶縁材料の研究開発に従事。現在、電力部主任研究員。IEEE会員。

畔柳俊幸

(正員) 1967年4月10日生まれ。93年3月横浜国立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年電力中央研究所入所。主として屋外用高分子材料の研究開発に従事。現在、電力部研究員。

岩崎康彦

(非会員) 1963年11月26日生まれ。88年3月京都工芸繊維大学大学院繊維学研究科繊維工学専攻修士課程修了。同年敷島カンバス(株)入社。主として、複合材料の研究開発および設計評価業務に従事。現在、敷島紡績(株)複合材料部勤務。