AE センサによる CV ケーブル用プレハブ接続箱の部分放電検出

正 員 中 西 豊 (関西電力)

正 員 中 谷 洋 一 (関西電力)

正 員 飯 住 昌 弘 (古河電工)

非会員 粕 谷 正 春 (古河電工)

The Partial Discharge Detection by AE Sensors for The Prefabricated Joints for XLPE Cables

Yutaka Nakanishi, Member, Youichi Nakatani, Member (The Kansai Electric Power Company Inc.), Masahiro Iizumi, Member, Masaharu Kasuya, Non-member (The Furukawa Company Ltd.)

The present paper describes detection by the AE (acoustic emission) sensor of partial discharge in the prefabricated joint, one of the accessories for XLPE cables, which is composed of factory-formed parts. Since the prefabricated joint can be installed in a short time, an increasing number of such joints have been used on power transmission line. However, the interface between the parts of prefabricated joint tend to exhibit weak points because of the structure peculiar to this type of joint.

We provided the AE sensor for practicability in comparison with conventional electrical defect detection methods. In course of the present study, a method for locating a defect using multiple signals from the AE sensors was developed and its validity was evaluated by the dielectric breakdown test.

キーワード：部分放電，AE センサ，XLPE ケーブル，プレハブ接続箱，ゴム・ストレスコーン

1. ま え が き

日本国内において、66 kV 級 CV ケーブルの中間接続箱には、テープ巻き方式、154 kV 以上には、モールド方式が主に使われているが、近年、施工時間の短縮からプレハブ方式が一部 154 kV に使われ、更に 275 kV 級が開発⁽¹⁾され、導入が計画されている。このプレハブ型接続箱の絶縁破壊を防止する方法として、AE センサによる接続箱の部分放電検出について検討した。

検討の第一ステップとして実線路への導入実績の多い、66、77 kV 級プレハブ接続箱の過去の初期破壊事故⁽²⁾の要因分析を行った。結果を図 1 に示す。主要因

は現場組立作業時に部品間の界面に発生する欠陥であることがわかる。このような絶縁破壊事故は組立中に検査を行っているにもかかわらず発生している。

このことは組立後の非破壊検査によりこのような絶縁破壊事故が防止できる可能性があることを示している。

非破壊検査手法には、X 線欠陥位置評定⁽³⁾および電氣的部分放電測定⁽⁴⁾などがある。X 線法は接続部構成材のエポキシが検出レベルを低下させるためプレハブ型接続箱への実用化には至っていない。また、電氣的部分放電測定は、直流耐電圧試験時の雑音判別の難しさが課題となり、実線路適用には至っていない。

そこで今回、部分放電により発生する音響信号を

図1 初期破壊事故要因
Fig. 1. Factor of initial breakdown.

AEセンサで検出する手法について検討した。模擬欠陥を設けた77kVのプレハブ型終端接続箱を試料とし、直流および交流課電を行い、模擬欠陥で発生した部分放電をAEセンサで検出可能であることを確認した。

更に、このような測定では、雑音と信号の判別は測定者スキルに依存することが多く、測定の汎用化、信頼性の問題点となっている。このため、実線路環境下での雑音測定および接続箱などへの人為的雑音の測定結果を基にパーソナルコンピュータを用いた雑音除去可能なAEセンサ部分放電測定システムを構築し、実用可能なことを確認した。

2. AEセンサによる部分放電検出原理

図2にプレハブ接続箱の基本構造を示す。プレハブ型接続箱は、その特徴として、各部品が品質管理されている。反面、弱点として図1からわかるように、組立時の界面欠陥（ゴム・ストレスコーンとエポキシユニット界面A）およびゴム・ストレスコーンとケーブル界面B）として、ボイド、ギャップの発生が考えられる。

界面および界面近傍の欠陥より部分放電が発生した場合、部分放電により発生するAE波は、軸円筒形状に位置するエポキシ導管およびその内部に埋込まれた低圧電極に至る。従って、AE波は、電極に取付けたAEセンサによって検出できると考えられる。

図2 プレハブ型接続箱
Fig. 2. Prefabricated joint.

PZT: チタン酸ジルコン酸鉛圧電素子

図3 AEセンサの構造例
Fig. 3. Example of AE sensor structure.

AEセンサとしては一般的なシングル型、および雑音分離により感度を上げたディファレンシャル型がある。AEセンサの構造を図3に示す。AE波（弾性波）を電気信号に変換する素子PZTが金属ケースに収納されており、このケースにより外来電気雑音を遮蔽できる構造となっている。更に、受波面はアルミナにより被測定物と電気的に絶縁されている。センサの相対感度は約-30dBである。また、測定対象によりセンサ共振周波数を選択する必要があるが、図1の主要因である界面欠陥（ボイド、ギャップなど）を対象とした場合、形状により部分放電に伴うAE波の発生周波数スペクトルは変化するが、20~100kHzでよいという報告⁽⁶⁾がある。

AE測定の検出性能は、被測定物の伝搬特性や減衰特性に大きく依存する。更に、減衰は、理想的な平面波について一般的に(1)式で表されると考えられる。

$$P_x = P_0 e^{-\alpha_0 x} \quad \dots \dots \dots (1)$$

P_0 : 最初の音圧, x : 伝搬距離, P_x : 距離 x だけ伝搬後の音圧, α_0 : 減衰定数(NP/m) (1 NP/m=8.69 dB/m)

プレハブ型接続部の構成材のうち、減衰の大きいゴムおよびエポキシについて、音響定数の測定を行った。結果を表1に示す。減衰定数 α_0 が大きい場合、検出性能は低くなる。このため、検出可否は、センサの取付位置により決まる。発生源近くにセンサを取付けることができれば高感度に測定ができるが、接続部本来の諸性能を低下させることなく取付けできる場所

表 1 音響定数測定結果
Table 1. Results of measurement of acoustic constant.

	ゴ ム	エポキシ
伝搬速度 (m/s)	1,300	2,500
減衰率 (dB/m)	0.4	0.2

は限られる。また、センサを電界の加わる場所に取り付けると、センサ自体が放電を起こし、誤検出する。

図 2 に示す配置で、275 kV 級の場合では、最長伝搬距離で、金属部 100 mm、エポキシ部 50 mm、ゴム部 100 mm 程度が考えられ、この間の減衰は、センサも含め 90 dB 程度である。また、検出可能な AE センサ感度は $10 \mu\text{V}$ 程度と考えられる。従って、部分放電により発生する音響信号がセンサ出力換算で 0.3 V 以上あれば検出可能である。

3. 部分放電検出感度の検証

図 1 に示されたような要因から想定される各種模擬欠陥に対し、AE 測定法による部分放電検出の感度を検証した。

〈3・1〉 実験方法 試料は、プレハブ接続箱を模擬した 77 kV プレハブ型ガス終端 (EB-GS) を用いた。概要図を図 4 に示す。なお、センサは、電気的影響の受けない低圧電極内部に所定の面圧を確保する方法⁽⁶⁾で 4 箇所埋込まれている。

試験測定回路を図 5 に示す。アンプ Gain は、最大 90 dB である。なお、実験では AE 信号が部分放電により発生したことの確認および感度比較のため、従来の電気式同調法による測定も同時に行った。

〈3・2〉 試験結果

(1) 界面上ボイド欠陥 プレハブ型接続箱には二つの界面があり、この界面による検出感度の差を確認するため、エポキシ套管とゴム・ストレスコーンとの界面 A、およびケーブル絶縁体とゴム・ストレスコーンとの界面 B に、スプリング加圧による潰れやシリコン油充填による影響を受けにくい大きさ $\phi 10 \text{ mm} \times t 3 \text{ mm}$ のボイドを作り、部分放電時の AE 信号を測定した。AE 測定結果を表 2 に示す。

表 2 に示すように界面 B では、欠陥とセンサ間の距離の増加とゴム材による AE 波の減衰により検出感度の低下が見られるが検出可能であることがわかる。また、今回のボイドでの部分放電発生量は安定しており、波形の判別は十分にできた。印加電圧波形に対すると AE 波形の写真を図 6 に示す。同図において、印加電圧のピークを過ぎても AE 波形が見られるのは、

図 4 試料 (77 kV EB-GS)
Fig. 4. Sample (77 kV EB-GS).

図 5 試験回路
Fig. 5. Test circuit.

表 2 部分放電量とセンサ出力ピーク
Table 2. Partial discharge and sensor output peak.

模擬欠陥位置	電圧 (kV)	放電量 (pC)	出力 (μV)	雑音 (μV)
界面 A	界面中央	100	20	9
界面 B	界面中央	45	200	4
	界面先端	100	20	5

図 6 AE 波形と交流電圧波形
Fig. 6. AE waveform and AC voltage waveform.

図 7 ストッパリング引っかかり状態概要
Fig. 7. Caught stopper ring.

図 8 部分放電量とセンサ出力ピーク
Fig. 8. Partial discharge and sensor output peak.

AE 波形が減衰振動波であるためである。

なお、この測定では測定環境が良かったためセンサの検出感度が向上している。

(2) ストッパの引っかかり模擬欠陥 過去の事故のうち、ストッパの引っかかりを模擬した欠陥で検出感度の確認を行った。正常な場合、ゴム・ストレスコーンの先端の指定位置にストッパリングが納まる構造となっているが、このストッパリングが傾いて指定位置に納まらずゴム・ストレスコーンの正しい装着を阻害することがある。このストッパリングの引っかかり状態を模擬できる特殊な形状のストッパリングを用い欠陥状態を作り測定を行った。ストッパリングの引っかかり状態を正常状態と比較して図 7 に、この模擬欠陥での放電電荷量と AE センサ出力の関係を図 8 に示す。両者がほぼ比例関係にあることがわかる。AE 出力と部分放電電荷量の関係は、欠陥とセンサ間の距離や構造により異なるが、後述する方法などで欠陥位置の推定が可能である場合、事前のデータベースとの比較から放電電荷量の推定は可能と考える。詳細については、現在検討中である。

(3) ケーブル曲がり模擬欠陥 プレハブ型接続部では、接続部内のケーブルが曲がると界面に隙間ができる。これを模擬して、ケーブル曲がり状態で接続箱の組立を行い、測定した。

この模擬欠陥では、直流耐電圧試験時の検出可否についても検討した。試験手順を図 9 に、ケーブル曲が

図 9 試験手順
Fig. 9. Test procedures.

図 10 ケーブル曲がり状況
Fig. 10. Appearance of crooked cable.

表 3 部分放電量とセンサ出力ピーク
Table 3. Partial discharge and sensor output peak.

	電圧 (kV)	放電量 (pC)	出力 (μ V)	雑音 (μ V)
直流課電	-150	20	6	2
交流課電	180	20	10

図 11 絶縁破壊状況
Fig. 11. Cable subsection to dielectric breakdown.

り状態を図 10 に示す。試験結果を表 3 に示す。直流耐電圧試験後の交流課電による測定では、180 kV で検出し、4 分後に界面 A で絶縁破壊に至った。

この絶縁破壊値は正常組立時の 60% 程度である。破壊状況を図 11 に示す。破壊点は、後述する方法で行った欠陥位置標定結果と一致していた。

(4) シリコン油無塗布欠陥 プレハブ接続箱では、潤滑材として界面にシリコン油を塗布している。シリコン油を塗布せずに組立てると、過去の事故の主要因である面圧不足⁽⁶⁾となることが想定され、これを模擬欠陥とした。試験手順は図 9 と同様とし、健全性確認後、界面 A に塗布してあるシリコン油を除去し組立、測定を行った。結果を表 4 に示す。

直流耐電圧試験時の部分放電発生電圧は、-150 kV、消滅電圧は -100 kV である。なお、竣工試験のスペック -177 kV × 1 時間は、問題なく終了し、その後、交流課電で 210 kV × 4 分で界面 A において絶縁破壊を起こした。この欠陥では、交流課電時の測定より、直流課電時の測定のほうが安定して検出できた。交流絶縁破壊直前の AE 波形と電気測定波形例を図 12 に示す。発生頻度が増大したため、電気方式および AE 方式共に波形と波形の間隔が短くなっていることがわかる。

(5) 欠陥位置標定 測定された部分放電波形が想定した模擬欠陥によるものか、他の原因によるものかを確認する手法として、部分放電発生位置標定結果

表 4 部分放電量とセンサ出力ピーク
Table 4. Partial discharge and sensor output peak.

	電圧 (kV)	放電量 (pC)	出力 (μV)	雑音 (μV)
直流課電	-177	未測定	10	2
交流課電	210	20	10

図 12 交流絶縁破壊直前の波形
Fig. 12. Waveforms observed immediately before AC dielectric breakdown.

図 13 ボイド模擬欠陥とセンサ配置
Fig. 13. Simulated void and sensor location.

図 14 欠陥位置標定結果
Fig. 14. Result of defect location detection.

と絶縁破壊試験後の絶縁破壊点などが一致するか否かの相関を確認し、測定された AE 波形が部分放電信号であることを検証するため、欠陥位置標定について検討を行った。

部分放電発生位置は、低圧電極の周囲 4 方向に配置した各センサの AE 信号と電気信号との時間差から推定できる。各信号波形から求めた時間差を入力させ、伝搬速度を考慮し、欠陥位置をディスプレイ表示できるパーソナルコンピュータ用プログラムを開発した。

更に、これを<3・2>節で述べた界面上ボイド欠陥のデータを用いて検証を行った。ボイド欠陥の位置とセンサ配置の関係を図 13 に、位置標定結果を図 14 に、出力波形を図 15 に示す。模擬欠陥の設定位置と標定結果が一致していることから欠陥位置標定は十分精度で行えることが検証できた。

図 15 AE センサ出力信号と電気信号
Fig. 15. AE sensor output signal and electrical signal.

4. 雑音判別の検討

部分放電測定のような微弱な信号を取扱う測定では信号と雑音の判別が重要である。このため、接続部近傍での人為的雑音および実線路での環境雑音の測定を行った。人為的雑音は図 4 に示す試料を用いて測定した。実線路の環境雑音は、関西電力(株)管内の小曽根

図 16 ボイド欠陥による部分放電測定波形
Fig. 16. Partial discharge waveform generated from void.

図 17 ケーブルをたたいた場合の雑音波形
Fig. 17. Noisewaveform generated by hitting cable.

図 18 自動車通過時の雑音波形
Fig. 18. Noise waveform generated by car.

電力所構内の 77 kV の中間接続箱および気中接続箱で測定した。

雑音の波形と部分放電の波形とを比較して図 16～図 18 に示す。図 16 は部分放電の波形、図 17 は人為的な雑音波形、図 18 は実線路における環境雑音波形の一例である。プレハブ型接続箱において、前章までに述べたような欠陥の場合、部分放電に伴う AE 波形長は 5 ms 以下で、これに対し、今回、実測された雑音は 10 ms 以上のものが多く見られた。このことから AE 測定時に観測された波形の長さを比較することにより、雑音と部分放電の判別は可能であると考えられる。

更に、環境雑音測定における雑音波の発生頻度が、部分放電波形と比べ単発的な発生であることから判

別可能と考えられる。

これらの結果から、波形形状と頻度などの特徴を組み合わせることで、雑音と部分放電に伴う波形との識別は可能であると考えられる。更に、部分放電波形と印加電圧の位相との関係や電圧依存性を組み合わせることで精度良く雑音の判別が可能であると考えており、環境の異なる場所での雑音測定を含め検討中である。なお、気中終端接続箱などの測定において、試料およびセンサに直接、雨が当たる場合は、発生頻度が多大となるため、部分放電波形の判別は困難であることがわかった。

5. 計測システムの長期安定性試験

AE センサによる部分放電測定システムの長期安定性を確認するため、ボイド欠陥を設けた 154 kV プレハブ型接続箱に適用し、長期課通電監視を行っている。このシステムは放電検出時のみ、AE 測定を行い、放電未検出時は課電電圧 (kV)、試料温度などのデータを収録するパソコンを用いた自動監視システムである。本システムは、約 3 箇月の間、部分放電の発生、消滅に対応し、問題なく計測されることが確認できた。

更に試料接続箱は、初期に約 350 pC の部分放電発生後、部分放電開始電圧の低下などは見られるが、約 1,000 時間経過しても、破壊しないことが確認されている。

また、試験場内はほかに種々の課電試験も行われており雑音レベルは最大 300~400 pC 程度であるが、測定への影響のないこと、および 3,000 A までの通電試験においても何ら影響されことなく測定可能であることも確認できた。試験線路を図 19 に示す。

図 19 長期課通電試験線路
Fig. 19. Long term testing circuit.

6. ま と め

AE センサによるプレハブ型接続箱の組立不良に伴う界面欠陥による部分放電検出について検討した。その結果、以下のことが確認できた。

- (1) 接続部欠陥の部分放電に伴う AE 波検出は、直流、交流課電共に可能である。
- (2) AE 波の波形形状から雑音判別が可能である。
- (3) 四つのセンサ出力と電気信号の時間差より欠陥の位置標定が行える。
- (4) 連続監視システムの長期安定性が確認できた。

以上の結果より、AE センサによる竣工試験 (DC) 時の部分放電検出および部分放電の連続監視が可能であることが確認できた。今後、実用化に向けて更に実証試験などによる検証が必要と考えられる。

(平成 4 年 3 月 2 日受付, 同 4 年 6 月 15 日再受付)

文 献

- (1) 中西・井上・吉川, 他「275 kV ケーブル用プレハブ式中間接続箱の開発」, 平 4 電気学会全大, No. 1471
- (2) 電気学会技報, No. 266 号
- (3) 小川・原田・佐久間, 他「モールド接続部の透過 X 線法による欠陥検出の精度向上」, 昭 63 電気学会全大, No. 1309
- (4) 松木・丸山・藤沢, 他「高周波部分放電測定の基礎検討 その 1」, 平 4 電気学会全大, No. 1414
- (5) 電気学会技報 (II 部), No. 164
- (6) ASTM E 650-78
Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Contact Sensors
- (7) 朴・金・韓, 他「エポキシ-ゴム界面の圧力特性」平 3 電気学会電力・エネルギー部門全大

中 西 豊 (正員)

事。

昭和 22 年 3 月 23 日生。44 年 3 月大阪府立大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。現在、総合技術研究所に所属し、送電関係の研究に従事。

中 谷 洋 一 (正員)

昭和 31 年 4 月 25 日生。50 年 4 月関西電力(株)入社。51 年 3 月科学技術学園高校卒業。58 年大阪大学工学部選科生修了。現在、総合技術研究所に所属し、地中送電技術に関する研究に従事。

飯住 昌 弘 (正員)

昭和39年3月9日生。61年3月東海大学工学部電気工学科卒業。同年4月古河電気工業(株)入社，千葉研究所に勤務。平成元年11月同社電力事業部電力技術部に勤務，現在に至る。主として，超高圧CVケーブルの付属品およびその周辺技術の設計，研究開発に従事。

粕谷 正 春 (非会員)

昭和30年6月27日生。49年4月古河電気工業(株)入社。53年3月神奈川大学第二工学部電気工学科卒業。現在，千葉研究所に所属し，電力ケーブルに関する研究開発に従事。