

## 地中埋設支線ロッドの 超音波探傷技術の開発

Development of ultrasonic flaw detection  
method of the buried stay-rod



甲山 貴章\*



貴志 俊英\*



山本 浩志\*

It is not possible to check visually the status of buried stay-rod. Therefore, we have made the corrosion estimation equation of stay rod, and maintained the stay-rod by applying the equation, which was calculated the potential and ground-resistance of stay-rod. However, there were many rods free of corrosion than estimated to dig up the rod.

In the present case, we have performed a simulation and field test of ultrasonic flaw detection to the stay-rod. As a result, we have confirmed that it is possible to diagnose the status of the buried stay-rod in the ground by applying the ultrasonic flaw detection method.

●キーワード：支線ロッド、腐食推定式、超音波探傷方法

### 1. はじめに

支線は電車線、き電線等の線条が電柱等に引留まった箇所において電線の張力と均衡するように張られた線条である(図1)。支線ロッドは、支線に接続された棒状の鋼材で地中に埋設されており、目視による腐食状態確認ができない。そのため、埋設されたままの状態、劣化状態を把握する手法が求められてきた。

本件では、超音波の一種であるSH波を使用し、支線ロッドの超音波探傷方法について研究を行った。その中で支線ロッドに対して斜角を持たせたSH波や、探触子の支線ロッド接触面への曲面加工等のシミュレーションを実施した。また、シミュレーション結果に基づいたフィールド試験を実施し、地表から地中にある支線ロッド端部の反射が得られることを確認した。この結果から、地中埋設支線ロッドに対する超音波探傷方法が確認できたため、以下に報告する。

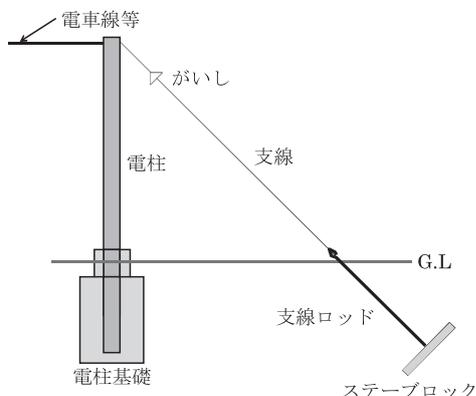


図1 支線設備例

### 2. 支線ロッドの腐食メカニズム

図1に示すように、支線と接続された支線ロッドは、先端にステープブロックと呼ばれるコンクリートブロックが接続された状態で埋設されている。ステープブロックは、地中2m程の深さに埋設されており、ブロックにかかる土圧と張力がががり合うことで電柱に曲げ応力が発生することを防いでいる。

支線ロッドのような金属体が、土壌などの電解質中に置かれると、電池が構成され表面には腐食が進行する。土壌中の金属の電位は決まっており、2種類の金属が接続された状態で埋設されると、土壌中での電位が低い方(負極側)の金属は腐食が進行し、電位が高い方(正極側)の金属は防食される。支線ロッドは鋳鉄でできており、表面には亜鉛メッキが施されている。亜鉛の土壌中の飽和硫酸銅電極基準電位(以下、電位という。)は $-1100\text{mV}$ 程度であり、鋳鉄の電位は $-500\text{mV}$ 程度である<sup>1)</sup>。そのため、亜鉛メッキが負極となり、支線ロッド本体は防食される。また、支線ロッドの接続されたステープブロックは、コンクリート内部に施された配筋の影響で土壌中の電位が $-200\text{mV}$ ~ $-300\text{mV}$ と高い。そのため、埋設環境によっては、支線ロッドを負極とした、従来よりも電位差の大きな、コンクリートマクロセル腐食という激しい腐食を示すこともある。

また、埋設された鋼材は土壌の種類・酸素含有量によっても異なる電位を示す。そのため、支線ロッドが粘土層と砂層に跨って埋設されるような場合には、その土壌境界付近において電池が構成され、局部腐食を生じる場合がある。

## 3. 支線ロッドの超音波探傷

現在の支線ロッド保全管理は、1994年に発生した支線ロッドの腐食破断事故の際に実施した支線ロッドの抜取調査の結果より求めた腐食量推定式を元を実施している。この式では、支線ロッドの電位測定および接地抵抗測定の結果を使用して推定を行っている。しかし、設備の重要性から、安全側に余裕を持たせ最大腐食量を推定して管理を行っている。そのため、実際に取替を行うと推定値よりも腐食の進んでいないものが多くみられる。そこで、支線ロッドの実際の劣化状態を把握した効率的な取替を目指し、超音波による支線ロッドの探傷方法について検討を行った。

### 3.1 シミュレーション解析

超音波による鋼管の腐食探傷は、一般的に実施されている<sup>2)</sup>。しかし、支線ロッドの直径は19~25mm程度であり、鋼管に比べて径が小さい。そのため、探触子と支線ロッドが点接触となり、支線ロッドの探傷時に超音波の強度が低下することが予想された。そこで、実物を使用した試験の前に、超音波が支線ロッドを伝搬して、端部まで届くことの確認および探傷に最適な探触子の条件を探るために超音波シミュレーションによる検討を行った。使用する超音波はSH波とし、土壌による減衰を抑制するため、図2に示すように、支線ロッドの表層から若干深い位置を超音波が伝搬するような屈折角で支線ロッドに超音波を入射させることとした。また、図3(a)に示すように一般的に使用される超音波探触子の接触面は平面である。これに対し本件では、支線ロッドに入射する超音波の強度向上を目的として、図3(b)に示すように探触子の接触面を支線ロッドの曲面形状に合わせて加工することとした。また、振動子の面積が同等で形状が正方形のものと同様に支線ロッドの軸方向に長い長方形のものを作製し、振動子形状および探触子接触面の形状が異なる場合についてシミュレーションを行った。シミュレーション条件を図4に、この時のシミュレーション結

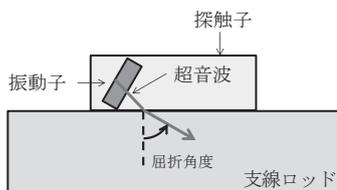


図2 探触子の取り付け方法

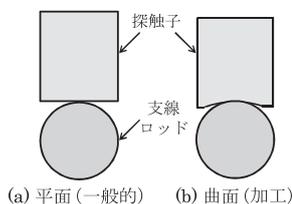


図3 探触子接触面の形状

振動子形状	探触子取り付け姿図			
	横方向		断面方向	
正方形振動子 20x20 単位mm	振動子 探触子 支線ロッド	ケース1	ケース2	
長方形振動子 40x10 単位mm	振動子 探触子 支線ロッド	ケース3	ケース4	

図4 振動子・探触子形状を変えた場合のシミュレーション条件

表1 シミュレーション結果（振幅比の比較）

解析ケース	条件		振幅比 (%)	対ケース1
	振動子寸法 (mm)	探触子接触面形状		
ケース1	20×20	通常(平面)	4.9	
ケース2	20×20	曲面加工	10.7	2.2倍
ケース3	40×10	通常(平面)	11.3	2.3倍
ケース4	40×10	曲面加工	12.6	2.6倍

※ 振幅比は、入射波に対する端部反射波の比率

果を表1に示す。シミュレーションの結果、振動子は軸方向に長い長方形形状で、探触子接触面は曲面加工を施した場合（ケース4）の振幅比が最も大きい。よって、この条件のときに入力した波が最も効果的に伝搬していると考えられるため、この探触子を採用した。

支線ロッドは、ロッド径ごとに長さが決まっている。ロッド径および露出部の長さは測定できるので、これらの値から土中の端部位置が推測できる。その結果、測定波形から端部反射を特定することができる。探触子～端部反射の間に別の反射波がある場合は、その部分には腐食が発生していると推測される。端部反射は全てのロッドに発生する反射であるため、その波高値を経路上の腐食に対する腐食深さの評価指標とした。測定する際に腐食さずの鋭さが反射波に及ぼす影響を確認するため、腐食深さを固定し、腐食幅を変化させた腐食モデルを作成し、シミュレーションを行った。腐食モデルの例を図5に、シミュレーションの結果を表2に示す。

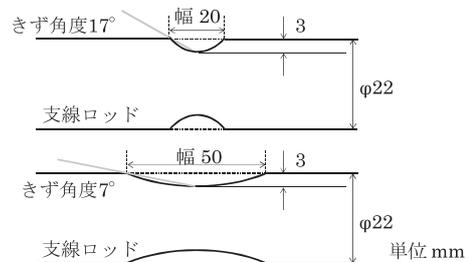


図5 模擬腐食寸法および、きず角度

表2 きず角度の反射波への影響測定結果

模擬腐食幅	20mm	50mm
きず角度	17°	7°
きず部反射波/送信波	8.6%	2.4%
端部反射波/送信波	2.9%	8.8%

これまでに実施してきた支線ロッドの抜取確認の結果から、腐食きずには支線ロッドの円周方向に対して一様に腐食する場合と、片側から腐食する場合の2通りがある。そこで、腐食形状が反射波に与える影響を確認するため、図6に示す残存断面積が同等で腐食形状が異なるモデルに対してシミュレーションを行った。表3にシミュレーションの結果を示す。これより、片側腐食よりも一様腐食の方が、腐食きずからの反射が大きくなるという結論を得た。

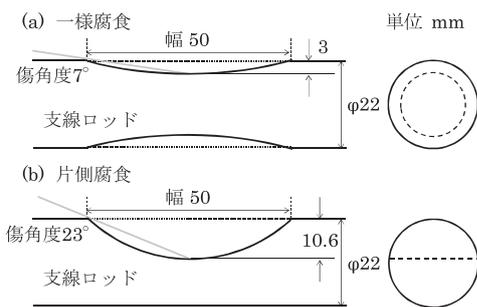


図6 腐食形状および、きず角度

表3 腐食形状の違いによる反射波への影響測定結果

模擬腐食形状	片側腐食	一様腐食
きず部反射波/送信波	1.6%	2.4%
端部反射波/送信波	9.6%	8.8%

### 3.2 工場内試験

3.1節で実施したシミュレーション結果を基に探触子の試作を行い、支線ロッドの露出状態、埋設状態に対して試験を実施した。埋設状態では土壌との接触により超音波の減衰が激しい。そこで、入射する超音波の強度を強くするために、探触子を送信用、受信に分割し、受信波を増幅させるとともに、同期させた超音波を2箇所から入射させる方法を考案した。この方法による超音波の強度向上の効果を確かめるため、図7に示すように、探触子を片側に配置した場合と両側に配置した場合について試験を行った。試験体には、新品

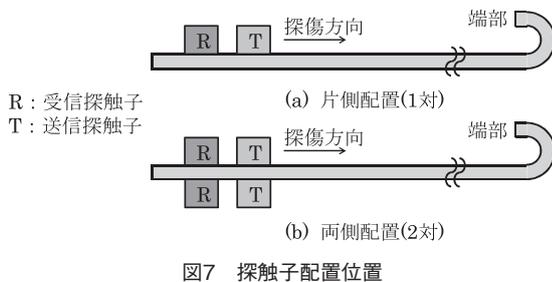


図7 探触子配置位置

表4 探触子配置位置とゲイン値の変化 (φ25)

	端部からの反射エコー高さを測定器上で80%に調整したときのゲイン値(dB)	
試験体	片側配置	両側配置
棒鋼	23.1~25.1	17.2~19.1
支線ロッド	22.6~29.5	19.5~25.4

の棒鋼、支線ロッドを使用した。表4にこのときのゲイン値の変化を示す。この結果から、支線ロッドの両側に探触子を配置して測定した場合の方が、低い増幅率で測定できることを確認した。よって、送信用、受信用の探触子2対を支線ロッドの両側に配置した探傷方法が、減衰率の大きな埋設状態のロッドに対しても有利に測定できると考えられる。このとき、棒鋼の測定よりも支線ロッドの測定の方がゲイン値が大きい。これは、支線ロッドの曲がり部分で超音波が反射したり地中へ漏洩したりすることにより減衰したものと考えられる。ただし、超音波が減衰したときでも支線ロッドの端部反射は捉えられており、全長に亘り超音波の伝搬が確認できるため十分探傷可能である。

埋設環境を赤土、黒土と変化させて試験を行った際に端部反射の振幅比を80%に調整した場合の、埋設深さとゲイン値の関係を図8に示す。浅い箇所は低感度での測定が可能である。このとき、端部反射を基準に腐食状況を評価するためには、端部の振幅比を揃える必要がある。図9に端部反射

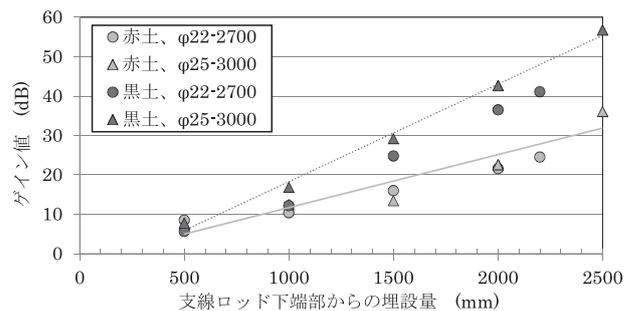


図8 各種埋設環境に対する埋設深さとゲイン値の関係

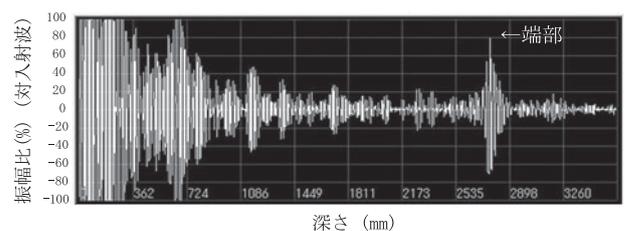


図9 探傷図形 (赤土、補正なし)

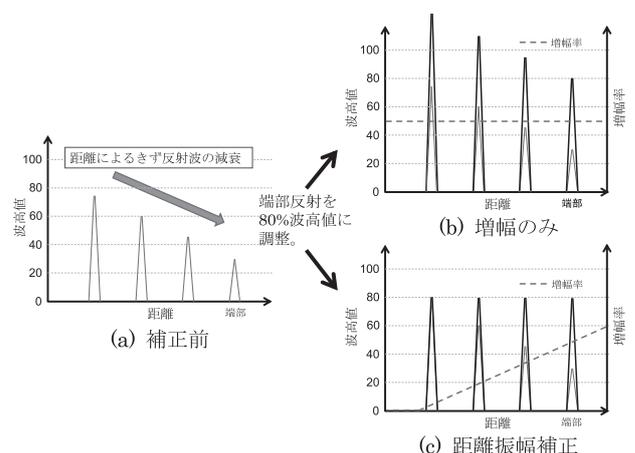


図10 距離振幅補正 (DAC)

の振幅比を80%に調整したときの探傷図形を示す。従来の探傷感度の増幅方法では、図10 (b) に示すように波を一律に増幅するため、端部反射を基準に増幅をかけた場合には、浅い部分に対して過剰に反射波を増幅することになる。そのため、本来きずがないはずの部分に反射があるように見える。そこで、図10 (c) に示す距離振幅補正 (DAC) を使用することとした。この補正は、浅い部分には小さな増幅を、深い部分には大きな増幅を与える、増幅率に傾斜を持たせた補正である。図9の探傷箇所と同一箇所、距離振幅補正を伴った測定を行った結果を図11に示す。距離振幅補正を行った結果、浅い部分に生じていた反射波が消え、支線ロッドのきずの位置、大きさが視覚的に捉えられるようになった。

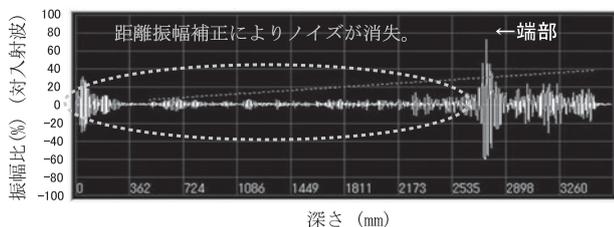


図11 探傷図形 (赤土、距離振幅補正後)

### 3.3 フィールド試験

工場内試験においてテストピースに対して、端部反射および、腐食きずの検出が可能であることを確認した。そこで、同様の測定方法を使用して、仙台支社および水戸支社の管内にてフィールド試験を実施した。結果を図12、図13に示す。図12では、推測した位置に端部反射と思われる反射エコーが確認できた。このとき、測定経路上に大きな反射波があり、局部腐食が発生していると推測できる。これに対し図13では、端部と推定した位置に明確な反射が確認できなかった。この

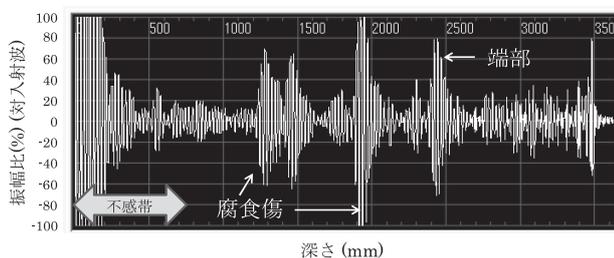


図12 探傷図形1 (経年21年、接地抵抗41Ω)

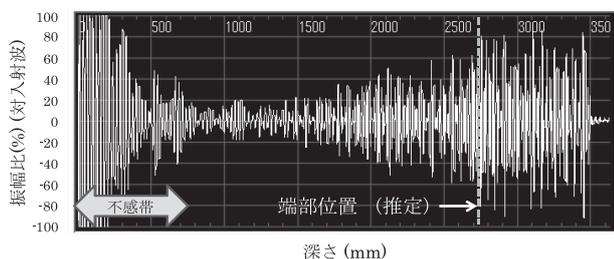


図13 探傷図形2 (経年29年、接地抵抗7Ω)



図14 探傷図形2の測定箇所の外観

とき、図13の測定箇所の支線ロッドの地際部分の外観は図14に示すようであり、当該のロッドには、地際部分に激しい腐食が確認できる。このことから、この支線ロッドは埋設部全体が腐食しており、超音波の減衰が大きくなったため、端部反射が確認できなかつたと推測された。(これらに関しては、実際に支線ロッドを掘り起こし、シミュレーション結果と腐食状況、腐食きず箇所の照合を行い、状態判断の精度を向上させる予定である。)

## 4. まとめ

超音波による支線ロッド地中埋設部部分の探傷技術の開発を行った。その結果、以下の方法により支線ロッドの端部反射が捉えられることを確認した。

- ・超音波 (SH波) を探傷面に対して斜めに入射する。
- ・探触子の接触面には、曲面加工を施す。
- ・探触子は送受信で分割し、一対ずつロッドの両側に配置する。
- ・受信波に対して、距離振幅補正を行う。

このとき、反射波の波高値の違いにより腐食の深さを半定量的に判定することが可能である。

2014年度に、本件で確立した探傷方法を使用した探傷装置を試作し、その中で探傷結果に対して取替の要否評価を行う探傷システムを構築する予定である。また、これを使用したフィールド試験を重ねると共に、実際に測定箇所の支線ロッドを掘り起こし、探傷システムの検証を行っていく。

この結果を踏まえて、本測定手法を支線ロッドの個別検査へ適用することで、予測値ではない実測値による支線ロッド管理の実用化を図りたい。

### 参考文献

- 1) 東京電蝕防止対策委員会;「新版 電食防止対策の手引き [第22版], p46, 2010.1.
- 2) 甲山貴章、村上丈一; 鋼管支持物腐食判定手法の研究、S2-7-5、J-Rail2013、2013