

鉄塔基礎の形状及び劣化の調査方法に関する研究

STUDY OF ESTIMATION FOR FIGURE AND DAMAGE OF A STEEL PYLON FOUNDATION

松山公年*・太田資郎*・藤原鉄朗*・金本康宏*・宋 泰徹*・小芦武尚**・伊藤良雄**

Kimitoshi MATSUYAMA, Shirou OOTA, Tetsuro FUJIWARA, Yasuhiro KANEMOTO, Techoru SON,
Takehisa KOASHI and Yoshio ITOU

Steel pylons have been constructed since 1930 and used to supply electricity to industry. Details of the foundations of many steel pylons built early on are unknown. In case of renewal and neighborhood construction, we need to know what type of structure is used for their foundation. We applied twelve kinds of nondestructive techniques to the steel pylon foundation. We employed radar, acoustic emission, ultrasonic integrity tests and so on. We studied their applicability to investigate steel pylon foundation. We also evaluated deterioration of foundation concrete with nondestructive tests and tests with core samples. This paper shows the techniques and applicability of nondestructive tests for steel pylon foundation.

Key Words : steel pylon foundation, nondestructive test, radar, AE, integrity test

1. はじめに

我が国では、これまで電力エネルギー需要に応えるため、電力会社が水力発電所、火力発電所、原子力発電所を建設してきた。これらの発電所の建設と同時に、電力消費地へ電力を送るため、送電線の設備が進められた。さらに、各発電所の大規模化に伴い、大容量送電設備の整備も進められた。送電線は発電所と変電所を結ぶ重要な設備であり、これら設備の整備が進められている。一方、建設後数十年を経た送電設備に対して、高圧化と大容量化に伴う施設の更新や宅地開発等の近接工事に対する設備の安全確保などの問題が生じており、既設送電設備を効率的かつ的確に維持・管理する必要性が高まりつつある。

とくに、昭和40年代半ば以前に建設された鉄塔設備は、設備増強による建替えや老朽化に対する補強や、立地箇所周辺開発による環境変化などに直面することが多く、既設基礎の形状や劣化状況を把握することが重要になっている。

送電線鉄塔基礎の形状や劣化などを調査する際には、ハンドオ-ガ-又は探針棒で数箇所の寸法確認することによ

り、基礎型を推定したり、開削で試掘を行い、部分的に基礎形状を把握する方法が行われている。これらの方法は調査精度、安全性、経済性、施工性に問題があり、調査方法の改善が求められている。

そこで、非破壊試験技術を駆使した鉄塔基礎構造及び劣化を効率的に調査する手法を開発することを目的として本研究を開始した。平成11年度は、まず既設鉄塔の年代別特徴・構造について整理した。次に、既設鉄塔基礎に対して12種類の非破壊試験を実施し、これらの適用性を評価した。

2. 既設鉄塔基礎構造の変遷と維持更新の課題

(1) 基礎構造の変遷

鉄塔基礎は鉄塔の安全性に対し重要な役割を持つ。地震や風水害等による被害調査結果によると、基礎が不完全なため傾斜又は倒壊した鉄塔が多数あり、その都度、地盤に適合した基礎型の設計手法の改良が進められてきた。

送電用鉄塔では、普通基礎と言われる逆T字型基礎(図-1)が広く使われてきた。一般構造物と異なり、鉄塔基礎では圧縮力の外に、圧縮力に近い大きな引揚力を受けるため、良好な地盤では圧縮力に対しても引揚力に対しても合理的な、この種の基礎形式が採用されている。しかしながら、時代と共に送電設備の大容量化や立地環境の変化

* 中央研究所 維持管理・リニューアル部

** 電力事業本部 建設事業部

により、使用される鉄塔基礎型も多様化することとなり、戦後から現在までの年代別特徴の概要は以下のように整理される。

1) 第二次大戦後～昭和30年代初期

この時期の送電線は、通過する地点が地盤条件の良い所を選定することが可能であったため、逆T字型基礎が標準型として広く採用された(図-1)。一部鉄筋コンクリートを採用したが、一般には無筋のコンクリートが殆どであった。軟弱地盤では、床板面下に杭が打込まれ、松杭が用いられた。その他にも、山岳地帯等、運搬の困難な場合や比較的良質な地盤の箇所では、鋼材のみで形成される鋼材基礎(土壌基礎・半土壌基礎)が採用された。また、河川敷の湧水が多く砂利層がある所では、井筒基礎が用いられた。

2) 昭和30年代中期～30年代末期

都市開発が急速に進められ、河川敷や埋立地の低湿地あるいは軟弱地盤に送電線が建設される場合が多くなった。また送電線の大容量化によって基礎に作用する荷重が増大して、逆T字型基礎以外の杭基礎が使用されるようになった。杭材として既製コンクリートパイプ(RC)や鋼管が使用され始めた(図-2)。

3) 昭和40年代初期～現在

送電線は、275kV鉄塔の多導体太線化や500kV鉄塔等さらに大容量、大型化が進められた。これに併せて鉄塔基礎設計の充実が図られ、地質の調査方法や大型基礎の設計手法の開発が進み、鉄塔基礎に関する技術は著しく進歩した。

40年初期にマット基礎(図-3)が採用されたのを契機に、つなぎ梁基礎やロックアンカ-基礎等、現在に至る鉄塔基礎の型・構造ならびに設計手法がほぼ確立された。また、杭基礎の杭材として従来のRCパイプや鋼管の他に、PCパイプや場所打ちコンクリート杭等、施工環境により使い分けられるようになった。63年からは、UHV1000kV送電線の建設が始まるが、鉄塔基礎は従来の基礎に比較し格段に大型化すると共に、建設位置が険しい山岳地や平野部の軟弱地盤となる事が多く、これに対応するため、急峻な傾斜地に適した深礎基礎や軟弱地盤での杭基礎の設計施工方法が著しく進歩し今日に至っている。

(2) 維持更新の課題

既設鉄塔設備のうち、昭和40年代半ば以前に建設された鉄塔設備は、設備増強による建替えや老朽化に対する補強、立地箇所周辺開発による環境変化などに直面することが多く、既設基礎の形状や劣化状況を把握することが重要になっている。以下に送電設備の維持更新に関する課題を示す。

1) 設備の維持管理における課題

昭和40年代半ば以前に建設された設備は、竣工図書の不

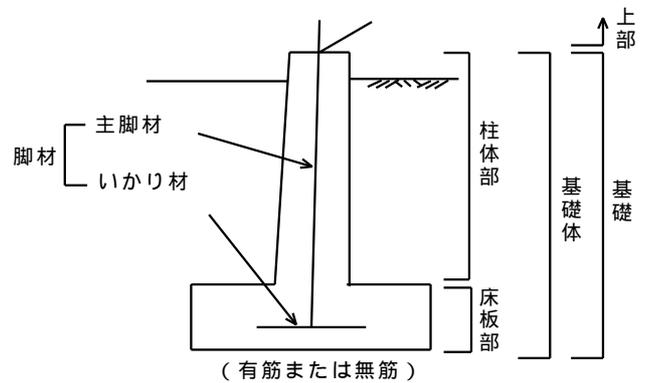


図-1 逆T字型基礎

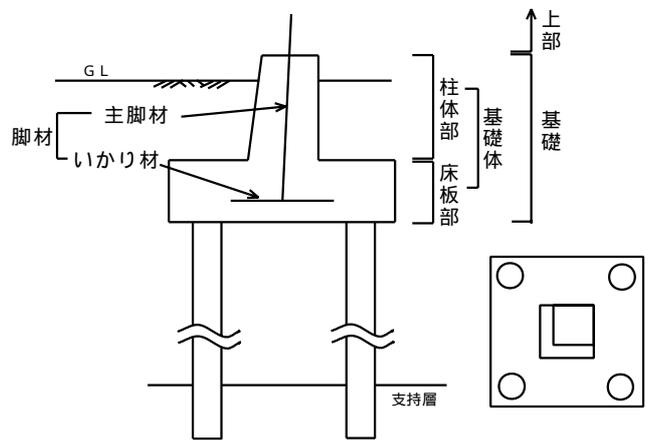


図-2 杭材を用いた逆T字型基礎

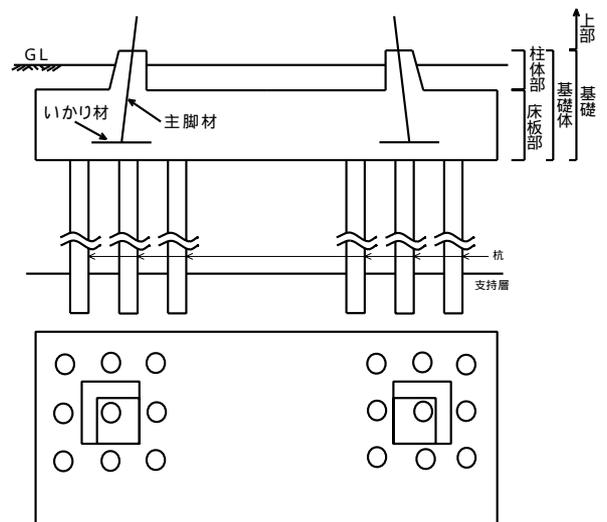


図-3 マット基礎

備や紛失により、設備台帳に不備なものがある。地上構造物は、目視調査によって台帳の不備を補っているが、地中構造物である鉄塔基礎は調査費用や立地環境によって未調査の部分が多い。

2) 補強・建替時の構造検討時の課題

設備増強(太線化)工事では、経済性の面から既設基礎を流用し既設設備の有効利用を図ることがある。また、都市部の建替工事では新線路を設ける余地が無く、現位置で建替施工を行うことが多い。このような既設基礎を流用あるいは撤去、新設を検討する場合に基礎形状や劣化状況を調査する必要がある。

3) 鉄塔立地箇所周辺開発時の課題

構造物建設に伴う切土・盛土施工時の既設基礎への影響や安全性を検討する場合、鉄塔基礎の形状・劣化調査を実施する必要がある。

3. 実鉄塔基礎適用試験の実施

(1) 試験対象

試験対象は、つくば学園都市に位置する通産省資源環境技術総合研究所内の学園中線No.6鉄塔である(写真-1)。鉄塔基礎の構造形式は、逆T字型基礎で主脚材の深さは不明である。図-4に管理台帳に記録されている基礎の寸法を示す。周辺地盤は関東ロームである。



写真-1 学園中線No.6鉄塔

(2) 試験項目

実鉄塔基礎適用試験では、以下に示す調査項目別に試験を行なった。

- 地表からの試験
- ボーリング孔を利用した試験
- 基礎コンクリートの劣化に関する試験

実鉄塔基礎適用試験で実施した試験項目を表-1に示す。本適用試験で実施した非破壊試験は12種類である。

(3) 地表からの試験

地表からの試験では、以下に示す3種類の試験を実施し

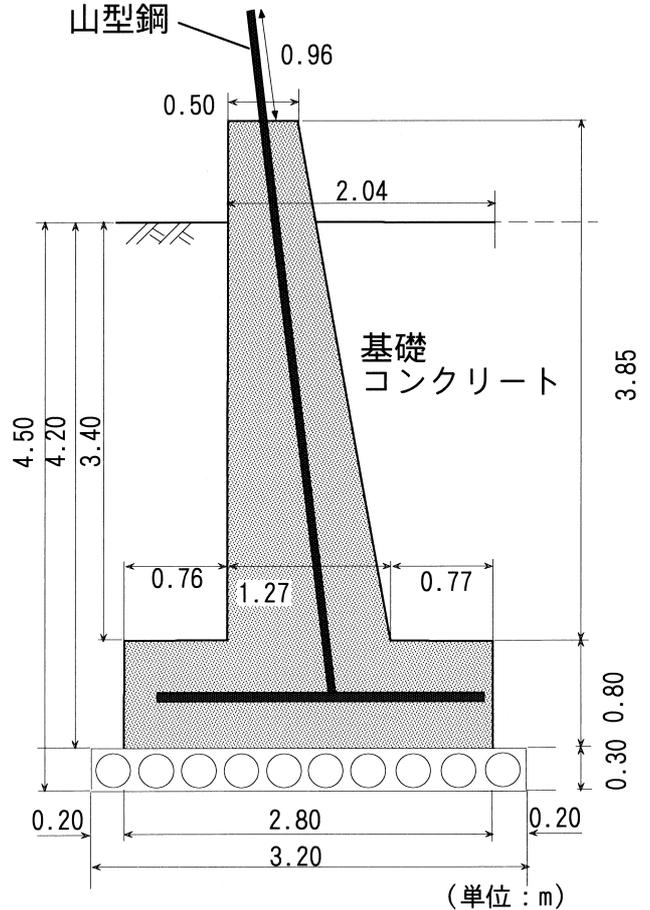


図-4 管理台帳に記されている基礎の断面寸法

た。図-5に各手法の概要を示す。

- 衝撃反射法
- 超音波法
- 電気探査

1) 試験内容

衝撃反射法は通常IT法と称される調査技術である。本手法は、基礎の上面をハンドハンマーで軽打し、低ひずみを生じさせ、基礎底面からの反射を加速度計で検出することで、基礎の根入れ深さ等を把握する技術である。

超音波法は、鋼材の厚さや欠陥を検査する技術である。今回の調査では、本技術により基礎コンクリートに埋設されている鉄塔の主脚材の長さを計測することを試みた。

電気探査法は、探査対象領域の比抵抗分布断面を画像化する技術である。今回の調査では、コンクリート基礎が周辺地盤と比抵抗が異なると想定して、比抵抗分布から基礎形状を把握することを試みた。測定は、地表面に金属製電極棒を一定間隔で配置し、電流電極から電流を印加し、電位電極で電位差を観測した。

2) 試験結果

衝撃反射法において拡底部が存在する場合、図-6に示

表 - 1 鉄塔基礎形状・劣化試験一覧

		基礎コンクリート				アンカーアングル		
		形状・寸法	損傷	強度・劣化	鉄筋	寸法(長さ)	損傷	発錆
現場での非破壊試験	衝撃反射波法 (IT)	○	○					
	超音波法 (透過法)			○				
	超音波法 (反射法)					○	○	
	地中レーダ (RC)					鉄筋・かぶり		
						○		
	地中レーダ (NK)			○				
	ポアホールレーダ法	○						
	磁気探査法					○		
	衝撃弾性波探 (AE)	○	○					
	自然電位法				○(腐食)			○
	硬度反発度法			○				
	弾性波法 (浅層地盤)	○						
電気探査法 (//)	○							
コアによる圧縮試験				○				
ボーリング調査 (地質)		○						

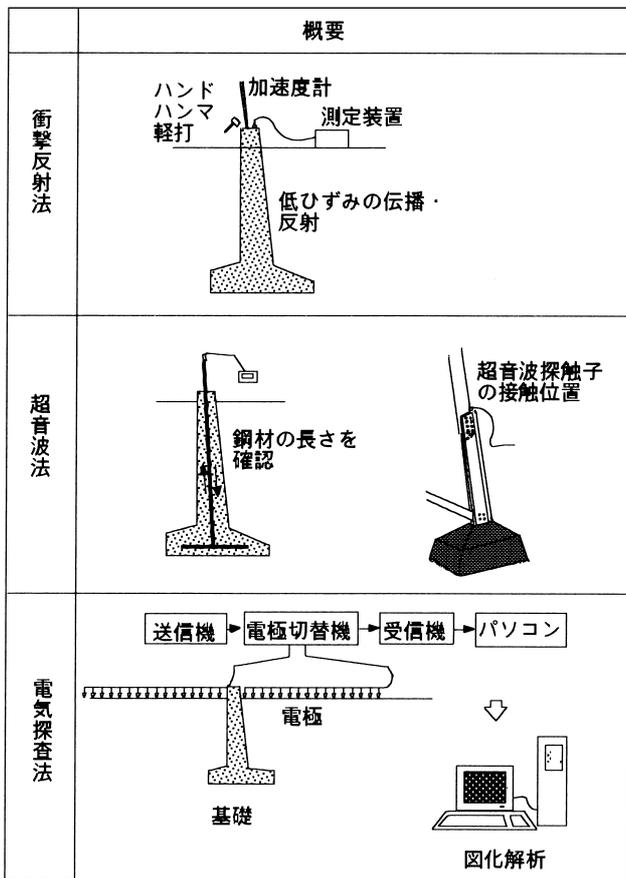


図 - 5 各手法の概要

す波形データが得られることが知られている²⁾。この例と今回の調査の結果得られた波形データ(図 - 7)と比較した場合、基礎の根入れ深さが - 4.8mであり、拡底部上面も不明瞭ではあるものの - 3.6m付近であることが確認できる。この値は、先に示した基礎の図面と比較すると10~20cmの誤差を有しているものの、概して正しい値を示している。また、今回の調査では、基礎中の弾性波の伝搬速度を3800m/sと仮定しているが、衝撃反射法の弾性波伝搬速度は、地盤や基礎の状態により3500~4000m/sの幅があることが知られている。このことから、本手法の探査精度は、10%程度の誤差を含むと判断される。

超音波法は、コンクリート基礎の形状ではなく、基礎と鉄塔を連結する主脚材(山形鋼)の長さを計測するものである。これに類似した計測事例にはロックボルト長さの計測がある³⁾。図 - 8、図 - 9は、上部鉄塔を構成する山形鋼とコンクリート基礎に埋設された山形鋼の長さをそれぞれ計測した結果である。空气中に山形鋼が露出した状態であれば、長さ4.5mでも長さ計測が可能であったが、基礎に埋設された山形鋼では底面からの反射を確認することはできなかった。これは、鋼材とコンクリートの音響インピーダンスの差が小さいことに起因し、超音波計測器の性能向上によってある程度改善できると判断した。

電気探査結果の比抵抗分布を図 - 10に示す。コンクリート基礎周辺の地盤は更新世の砂・シルト及び埋め土からなり、地下水位は浅い(約G.L-1.5m)。コンクリート基礎は相対的な高比抵抗として把握されることが期待されたが、

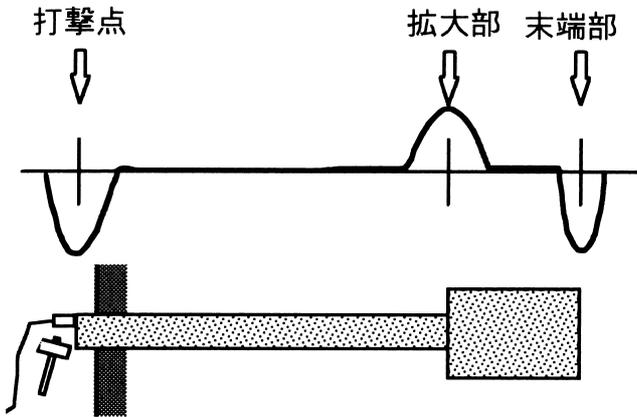


図 - 6 衝撃反射法の計測データ

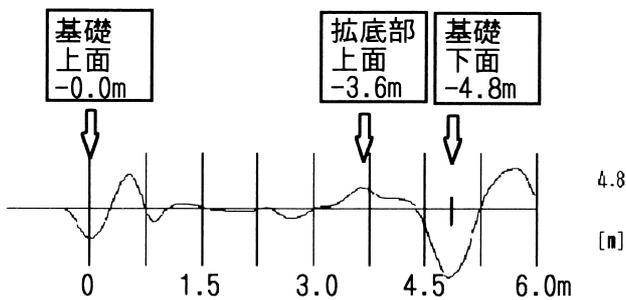


図 - 7 鉄塔基礎で得られた反射波形

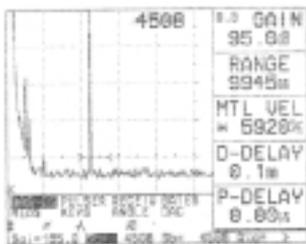


図 - 8 気中山形綱

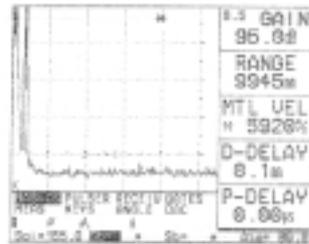


図 - 9 基礎埋設山形綱

今回の測定結果では、逆に低比抵抗分布が認められ、基礎境界との対応もあまり明確ではない。この原因としては、電流電極からの電流が、高比抵抗の基礎よりも、その周辺の含水した低比抵抗の埋土中を選択的に流れたことが考えられる。

3) 地表面からの試験方法の適用性

実際の鉄塔基礎を対象に、地表面から形状を把握する手法を検討した結果、衝撃反射法は根入れ深さ、超音波法は主脚材の深さの把握に適用可能性を有していることが明らかになった。今後、計測器の改良、センサ配置の改善などの検討を実施するなかで、調査精度の向上を図る必要がある。

(4) ボーリング孔を利用した試験

ボーリング孔を利用した試験では、以下の3種類の試験

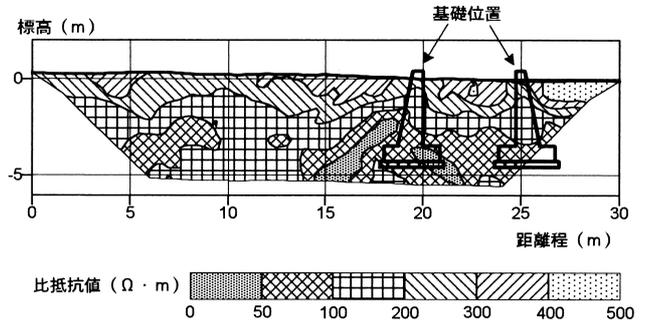


図 - 10 電気探査結果

を実施した。なお、ボーリング孔は基礎コンクリートに隣接した位置に設置した。

孔内弾性波法

ポアホールレーダ法

磁気探査法

1) 試験内容

孔内弾性波法は、AEセンサを取付けた治具をボーリング孔内に挿入した状態で、基礎コンクリート頭部をハンマーで打撃し、伝搬した打撃波の到達時間を測定した。治具には、AEセンサを1m間隔で4個設置しており、この治具を25cmずつ順次挿入し、打撃を行なった。打撃時にAEセンサが受振する波形を記録し、深さ方向における打撃波到達時間の分布を把握した。

ポアホールレーダ法では、長さ70cmのアンテナ(中心周波数は600MHz)を用いた。レーダ波をパルス状に発生するパルスジェネレータは、100MHzのものを使用した。アンテナが送信したパルスレーダの反射波を受信し、レーダ反射画像を作成した。

磁気探査は、磁場の空間的变化(磁気傾度)を測定するものであり、コイルの断面を横切る磁力線の変化に応じて、コイルの両端に誘導起電力が生じることを利用している。両コイル型磁気傾度計が鉄類を通過した時に生じる起電力を測定し、その異常波形から鉄類の位置を求めた。

2) 試験結果

孔内弾性波法で得られた打撃波の到達時間差の分布を図-11に示す。図-11に見られるように、GL-4.0m付近の拡底部において打撃波の到達時間が最小になった。

また、図-12にポアホールレーダ計測画像を示す。アンテナを基礎側に向けた画像と反対側に向けた画像を比較すると、アンテナを基礎側に向けた画像に強い反射が確認された。また、GL-2.2m付近から地層の違いによる反射画像の変化が見られた。GL-4.2mから見られる斜め方向の反射画像は孔内水面からの反射である。

磁気探査の結果を図-13に示す。GL-3.8m付近で強い

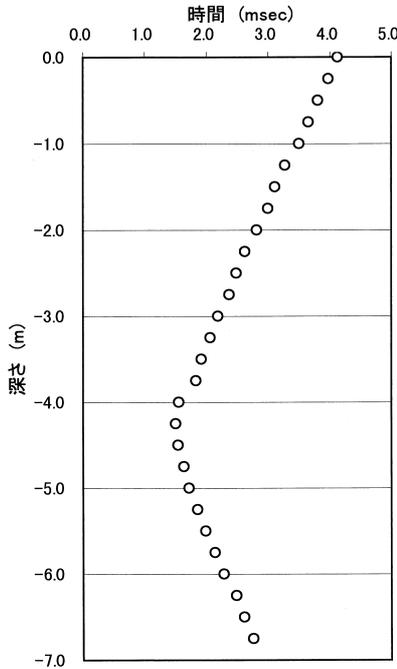


図 - 11 孔内弾性波測定結果

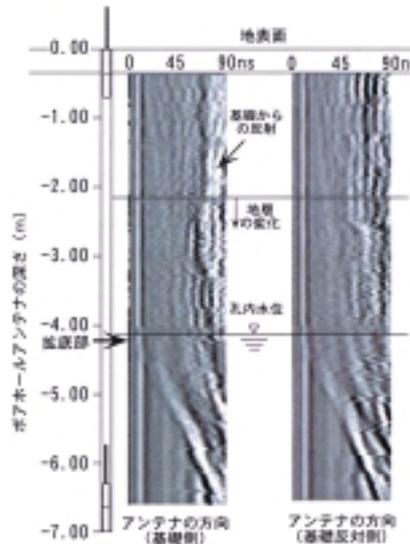


図 - 12 ポアホールレーダによる画像

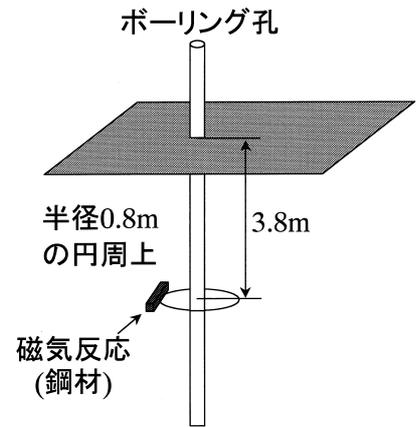


図 - 13 磁気探査調査結果

磁気反応が見られ、鋼材の存在が確認された。

3) ボーリング孔を利用した試験方法の適用性

表 - 2 に 孔内弾性波法、ポアホールレーダ法、磁気探査法で得られる基礎の情報と課題を整理する。孔内弾性波法は、基礎下端又は拡底部の位置を把握するのに有効である。また、ポアホールレーダは基礎形状に関する情報が得られるが、地層の変化と孔内水位の影響を受けるので、これらの影響を低減する方法を検討する必要がある。磁気探査は、基礎に鋼材がある場合、その位置を知ることが可能であるが、鋼材の方向は不明で鉄塔基礎のように計測器周辺の磁場が不安定な場合には、測定結果がばらつくことがあるので注意が必要である。

表 - 2 各試験手法で得られる情報と課題

手法名	得られる情報	課題
孔内弾性波法	基礎拡底の位置	初動以後の波形の判読による、基礎形状に関する情報の抽出
ポアホールレーダ法	基礎の長さ	地下水位及び孔内水位の影響の除去による、基礎形状に関する情報の高精度化
磁気探査法	基礎(鋼材)の位置	磁場の乱れに起因する計測データの不安定化の低減

以下の通りである。

a) 試料採取および一軸圧縮強度試験

コアは、図 - 14 に示すように基礎コンクリートの地上部および地中部の 2 箇所から採取した。コアの直径は 100mm である。これらのコアを 100mm × 約 200mm の寸法に成形し、一軸圧縮強度試験に供した。

b) 基礎コンクリート中の超音波伝搬速度測定

露出させた基礎コンクリートの両側に超音波の発振子と受振子を配置し、基礎コンクリート中の超音波伝搬時間を測定した。測定した超音波伝搬時間と超音波伝搬距離から、超音波の伝搬速度を算出した。超音波による測定は、基礎天端から 10 ~ 80cm の範囲で実施した(図 - 14)。

c) シュミットハンマーによる反発度測定

シュミットハンマーにより基礎コンクリートの反発度を

(5) 基礎コンクリートの劣化に関する試験

鉄塔基礎の地上部及び地中部におけるコンクリートの供用状態の違いによる、コンクリートの品質の相違を明らかにする目的で、鉄塔基礎コンクリートの非破壊試験とコア試料による材料試験を実施した。

実験対象は施工後約 25 年が経過したコンクリート基礎であり、内部に鋼材(アングル)が配置されている。また、基礎の上部 40cm は地上に露出している(図 - 14)。

1) 試験内容

試験に際して、基礎周辺を深さ約 1 m 掘削し、基礎コンクリート面を露出させた。本実験で実施した試験項目は、

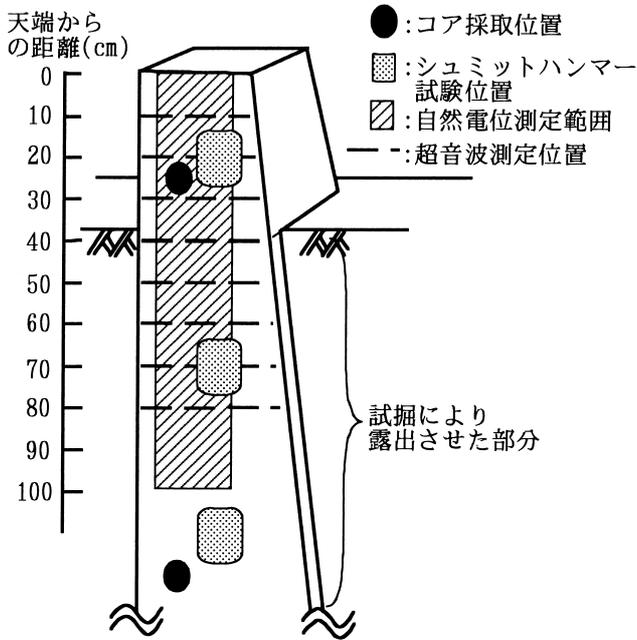


図 - 14 基礎コンクリートおよび試験位置

測定した。測定は基礎コンクリートの地上部および地中約20～40cm部、地中60～80cm部の3箇所で行った(図 - 14)。それぞれの箇所で反発度を20点測定し、その平均値を求めた。

d) コンクリートの含水率測定

基礎コンクリートの地上部および地中部から採取した試料に対して含水率測定試験を行った。

e) 自然電位測定

露出させた基礎コンクリート面にセンサ(鉛照合電極)を走査させ、基礎コンクリートの自然電位を測定した。電位の測定間隔は5cmであり、40×100cmの範囲で測定を行った(図 - 14)。

2) 試験結果

一軸圧縮強度試験結果を表 - 3に示す。コア供試体の一軸圧縮強度は、地上部で採取したコア供試体の強度が低く、地中部で採取したコア供試体の強度が高い。超音波による基礎コンクリート中の伝搬速度測定結果を図 - 15に示す。超音波伝搬速度分布は、平均的には4000m/s程度であり、一般のコンクリートの伝搬速度と同程度である。また、超音波伝搬速度は、地上部で小さく、地中部で比較的大きい。シュミットハンマーによる基礎コンクリート反発度測定結果を表 - 4に示す。反発度は地上部で大きく地中部で小さい。

また、コンクリートの含水率測定試験結果を表 - 5に示す。含水率は、地上部で採取した試料で小さく、地中部で採取した試料で大きい。自然電位測定結果を図 - 16に示す。自然電位は、地中部で測定した電位が地上部で測定し

表 - 3 コア試料の一軸圧縮試験結果

	一軸圧縮強度 σ_c , N/mm ²
地上部	14.9
地中部	22.3

表 - 4 反発度測定結果

	反発度平均値
地上部	37.8
地中約20～40cm	31.2
地中約60～80cm	23.9

表 - 5 含水率測定結果

	含水率
地上部	0.086
地中部	0.093

た電位よりも低い。本実験で基礎コンクリートのはつり調査は実施していないので、鋼材の腐食状態は不明である。

3) 試験方法の適用性

本実験で実施した各試験結果は、いずれも基礎コンクリートの地上部と地中部とで異なる傾向を示している。この自然電位の分布が地土部と地中部で異なる原因としては、基礎コンクリート中の含水率の相違が挙げられる。表 - 5に示したように基礎コンクリートの含水率は、地上部で小さく、地中部で大きい。図 - 16の自然電位測定結果における地上部と地中部での測定値の変化は含水率の影響によるものと考えられる。地上部のコンクリートは外気に曝されており、乾湿繰り返しを受ける状態にある。一方、地中部のコンクリートは土で覆われており湿潤状態にあるため、地上部のコンクリートに比べ養生状態が良い。これらの養生、供用状態の違いが、圧縮強度の差として現れたと考えられる。

また、超音波の伝搬速度は一般にコンクリートの密度に相関があると言われており、地中部のコンクリートの密実性が反映されたものと考えられる。

本実験対象コンクリートの表面は、地上部で平滑であり、地中部で粗い状態であった。地上部のシュミットハンマーによる反発度が地中部より大きな値を示したことは、上記コンクリートの表面状態の影響を受けたものと考えられる。

本実験で、基礎コンクリートの品質は地上部と地中部で異なる場合があることを確認した。基礎コンクリートの品

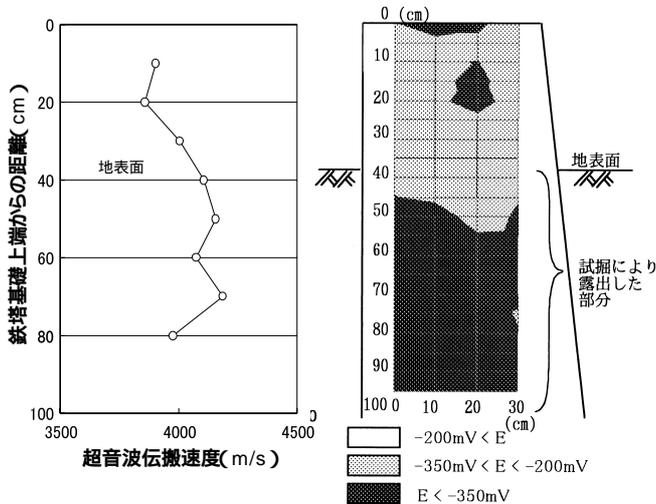


図 - 15 超音波伝搬速度分布

図 - 16 自然電位測定結果

質を調査する場合、試験を実施する位置によっては結果が異なる場合があるので注意する必要がある。

4. まとめ

鉄塔基礎に対して、本検討で実施した試験方法の適用性を以下に示す。

(1) 地表からの試験

衝撃反射法により基礎コンクリートの深さを測定する方法が有効である。また、主脚材の深さを測定するには、超音波法が性能向上により適用可能と判断した。

(2) ボーリング孔を利用した試験

ポアホールレーダ法および孔内弾性波法により、基礎底部の位置を把握することが可能である。

(3) 基礎コンクリートの劣化に関する試験

超音波法によるコンクリート中の伝搬速度分布を把握することにより、基礎コンクリートの地上部および地中部の強度の違いを把握することが可能である。

5. 今後の課題

本検討により鉄塔基礎形状および劣化に関する試験方法の適用性について、ある程度評価を行うことができた。今後は、各試験方法の精度向上に関してさらに検討する必要がある。地表からの試験では、超音波法の主脚材深さ測定の性能向上を図る必要がある。また、ボーリング孔を利用した調査では、基礎形状を把握する可能性についてさらに検討する必要がある。

さらに、鉄塔基礎調査に最適な試験方法の組合せを評価し、実務レベルに使用できる鉄塔基礎調査マニュアルを作成する予定である。

謝辞：本試験・検討を実施するにあたり、東京電力株式会社土浦工務所送電グループの方々に、ご理解とご協力を頂きました。ここに記して、お礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 物理探査学会：物理探査ハンドブック、p.254、平成11年3月
- 2) 建設省土木研究所：共同研究報告書 橋梁基礎構造の形状および損傷調査マニュアル(案)整理番号236 平成11年12月
- 3) 近藤春彦他：アンカー等長さ計測手法の開発、第23回日本道路会議一般論文集3017、平成11年10月
- 4) 建設省土木研究所ほか：橋梁基礎構造の形状および損傷調査マニュアル(案)、1999.12
- 5) 魚本・加藤・広野著：コンクリート構造物の非破壊検査、森北出版、1990
- 6) 小林・米沢・出頭著：鉄筋腐食の診断、森北出版、1993