

地中レーダによる水路トンネル調査システムの実用化研究

STUDY FOR PRACTICAL USE OF WATER CONDUIT SURVEY SYSTEM BY MEANS OF GROUND PENETRATING RADAR

久保田英夫*・稲垣正晴**

Hideo KUBOTA, Masaharu INAGAKI

Our company possesses 730km water conduits, about 70% of which aged more than 50 years. It has been cited that instead of conventional way such as boring, development of new investigation method is necessary to maintain the conduits more properly.

Primary system using ground penetrating radar was developed and proved effective for this use in terms of maximum surveyable depth and accuracy. GPR system would non-destructively and continuously report the conditions behind lining concrete in a short period. Furthermore, by studying electric permittivity of concrete and getting more analytical knowledge through investigations, the system has been practically improved.

Key words: water conduit, ground penetrating radar, electric permittivity, non-destructive maximum surveyable depth

1. まえがき

東京電力で管理する水力発電所の水路トンネルは総延長約 660kmであり、経年50年以上の水路は約70%を占めている。これら経年水路トンネルにおいては、「トンネル背面空洞の存在」、「コンクリートの材質不良」、「覆工コンクリートの厚さ不足」などに起因した落盤や上部地表面陥没が過去に数回発生している。このため、長期発電停止の機会を利用して、計画的に水路トンネル内部からのボーリング調査を実施し、事故に直接関連する要因の定量的把握に努めているが、発電停止期間と調査予算の制約からボーリング箇所は100mから200m区間に1箇所程度が限度であり、トンネル状況をマクロ的に想定せざるを得ないのが実情である。そこで、よりの確な設備診断と改修計画を行うため、連続的かつ短時間に調査できる非破壊検査法として、地中レーダー法に着目し、昭和60年度から61年度にかけて同手法の適用性の検討や現場実証試験などを行った結果、水路トンネルの覆工コンクリート厚さおよび空洞深さなどの調査には、非常に有効なシステムであることが確認された。その後、同システムを実際の水路トンネル調査に適用し、データを蓄積しながら、調査対象物の電気的特性の分析、探査深度および精度向上のためのシステムの改良、実用性向上のための周辺機器の整備などを行うとともに、調査結果の解析に関する知見を広げてきた。その結果、現在では覆工コンクリート厚さ、空洞深さのみならず、崩積土や滞水層等の背面状況も把握できるようになり、ほぼ実用レベルに達したと考えられる。ここでは、地中レーダーによる水路トンネル調査システムの開発と実用化研究の経過、現場適用結果とそれに基づく探査深度や精度の分析などについて述べることにする。

* 正会員 東京電力(株)工務部工務土木課

** 正会員 ジオ・サーチ(株)第一物理探査部

2. 地中レーダーによるトンネル調査システム

2.1 地中レーダーの原理

地中レーダーは、空中を約30万km/sの速度で伝播する電磁波を調査対象物に向けてアンテナから放射し、伝播速度の異なる物質（比誘電率で定義される）の境界面で電磁波が反射するのを利用して、対象物の厚さを測定するものである。水路トンネル探査用として採用した電磁波は中心周波数1GHz（ 10^9 Hz）、パルス幅30cmの比較的高周波のUHF波である。

トンネル覆工に向けた電磁波が反射する状況は、図-1に示すとおりであり、この反射パターンの時系列トレースをアンテナ走行により連続的に取得することにより、図-2に示す濃淡表示記録を得ることができる。

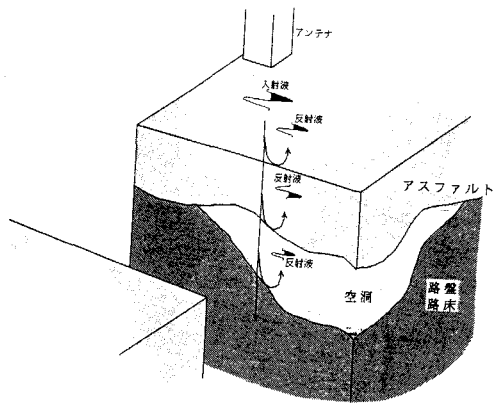


図-1 反射波の発生状況

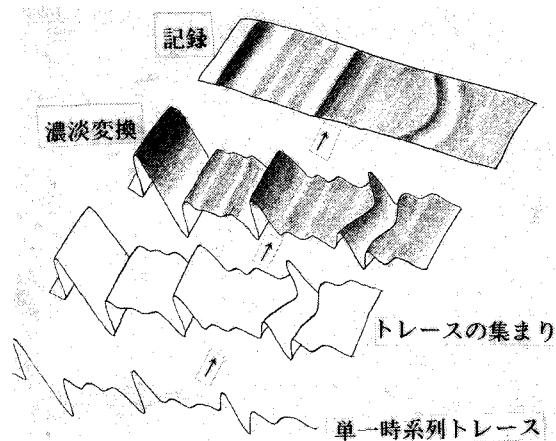


図-2 反射波の記録

この記録から、層境界を示す連続的な反射信号列を判読し、層構造を決定することができるが、電磁波の速度はその物質の比誘電率によって異なることから、層厚については、コアボーリング等による実測値との比較により求めた基準比誘電率を用いて算定する必要がある。

2.2 トンネル調査システムの構成

本調査システムは、地中レーダー装置とそれを搭載する走行装置より構成される。

全体のシステム構成は、図-3に示すとおりである。

また、走行装置については、トンネル断面の大きさに応じ、表-1のとおり3種類の仕様を設定している。本システムによる調査は、運転手・計測員・アンテナ操作員・補助員の4人構成が基本となる。

写真-1に大口径水路トンネル内での調査状況の一例を示す。

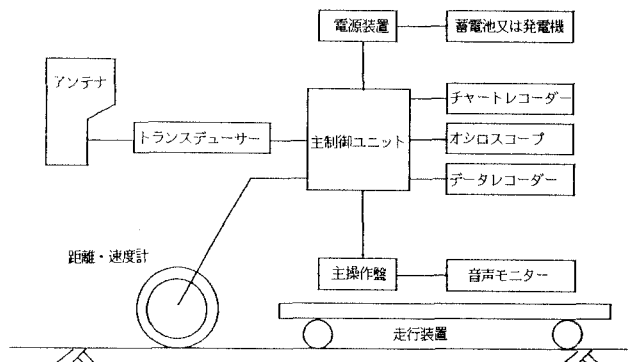


図-3 システムの構成

表－１ 主な構成要素の機能

走行装置	小口径型	中口径型	大口径型
駆動方式	電気駆動装置	ディーゼル車	トラック
トンネル高	1.5m～2.5m	2.5m～5.0m	5.0m～8.0m
計測速度	1～2km/時	2～3km/時	3～5km/時
調査延長	連続5km	連続10km以上	連続10km以上
アンテナ保持	電波吸収装着式	ブーム式	ブーム式

３．水路トンネル調査システムの実用化研究

昭和61年度までの地中レーダーの適用性研究の結果、水路トンネルの非破壊検査法として、地中レーダーの有効性が示された。しかし、これを本格的な実用システムとするためには課題があり、その解決のため下記の項目を設定し研究開発を実施した。

- ・ 探査深度増大のため、電磁波の高出力化・長波長化を行う。
- ・ 探査精度向上のため、調査対象物の比誘電率の詳細分析を行う。
- ・ 識別能力向上のため、データ解析の蓄積と解析方法の体系化を行う。
- ・ 作図の自動化のため、調査結果の分析評価方法の構築とデータ処理のシステム化を行う。
- ・ システムの汎用性を増すため、発電所設備実態に基くシステムの小型化、軽量化を行う。



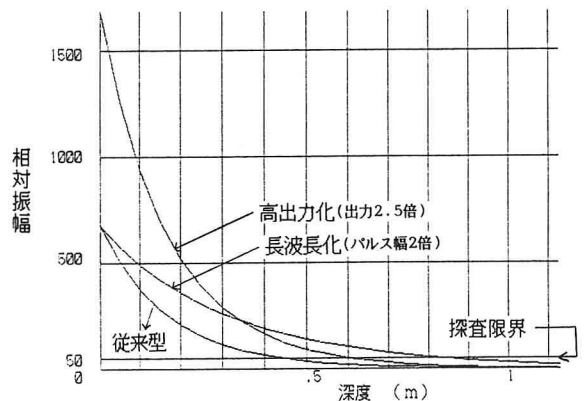
写真－１ 調査状況

３・１ 電磁波の高出力化・長波長化の検討

覆工巻厚の大きいトンネルに適用するためには、探査深度を増大させる必要があり、これには、電磁波の高出力化あるいは長波長化という方法が考えられる。

このため、高出力化・長波長化した場合の効果と問題点を室内および現場試験により確認した。

図－４は、その結果の一例として、背面に空洞がある場合のコンクリート版厚とコンクリート背面からの反射波強度の関係を示すものである。これにより、高出力化より長波長化の方が探査深度増大の効果が高いことが判る。また、レーダー記録から高出力化した場合には、異なる経路を通った不要な反射波の重複により反射面を特定することが難しくなるなどの問題点も明らかになった。なお、長波長化した場合、原理的に分解能を低下させることになるが、試験の結果、従来の２倍の２ナノ秒(60cm)までは、実用上ほとんど影響がないことが確認された。



図－４ コンクリート中を伝播する電磁波強度の変化

３・２ 調査対象物の電気的物性（比誘電率）の詳細分析

地中レーダー調査において最も精度を左右するのは、測定対象物の電気的特性である。特に、所定の精度を要求される水路トンネルの覆工コンクリートについては、電気的特性に影響を及ぼす含水状態などの因子

に関して分析した。

図－5は、水路トンネルの覆工コンクリートをサンプリングし、比誘電率と含水率との関係を示したものであるが、これにより、比誘電率は、含水率により大きく影響を受けるが、その変動の程度は、地中レーダーとボーリングの比較データのばらつきを説明できる程大きくないことが判明した。

3・3 解析実例の蓄積による解析方法の体系化

地中レーダーは、放射された電磁波が、発散・吸収・回折などの物理的作用を遍歴して観測されるので、層構成が複雑な場合、反射波強度の定量的考察が難しい。特に、覆工／地山もしくは覆工／空洞／地山という比較的単純な図式だけではなく、崩積土や滞水層などの層も存在しており、探査記録の解析には、理論的アプローチを含む入念な考察が必要となる。

このため、調査実施時に、ボーリング結果との照合を行い、探査記録の解析方法についての知見を広げてきた。その結果、解析方法を体系化することができ、これらの判定方法を駆使し、総合的判断を下すことにより、従来判別できなかった崩積土や滞水層の探査が可能となった。

3・4 装置の汎用化とデータ処理の自動化

水路トンネル全般に適用するためには、装置をモジュール化し、個々の軽量化、コンパクト化を図るとともに、各水路トンネルの形状・大きさに対応するよう走行装置を改良する必要がある。

また、解析結果については正確に図化し、しかもデータの再分析を容易にする必要がある。このため、ディジタル化、作図、分析等の機能を有するデータ処理システムを新たに開発し、実用化した。

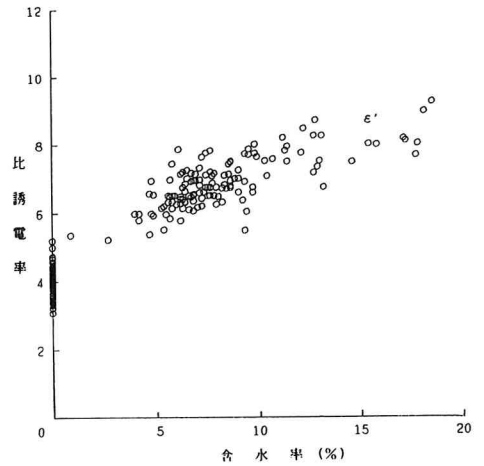
4. 現地適用結果の実例

地中レーダーによる水路トンネル調査システムについては、昭和62年以降、本格的に適用し、今まで調査箇所は、49発電所258kmに及んでいる。これらのうち典型的な探査結果の実例を挙げれば、以下のとおりである。

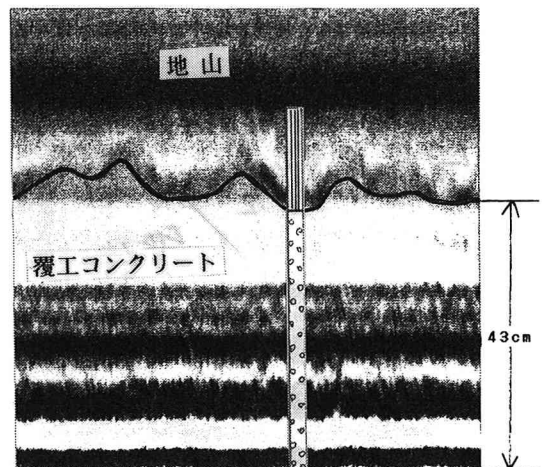
図－6は、覆工コンクリートが直接地山に接する例である。空洞に比べ反射信号は弱く、覆工が地山に接触していると判断できる。

図－7は、覆工背面に空洞の存在する例である。空洞始端信号が強くしかも極性は前例と逆のため容易に判定することができる。

図－8は、覆工内部に鉄筋がある場合の例である。表面付近の黒い帯状信号と、そこからくし状に上方に伸びた線が鉄筋の存在を示している。鉄筋があるため、覆工と地山境界の反射は非常に弱く判別しにくくなっている。



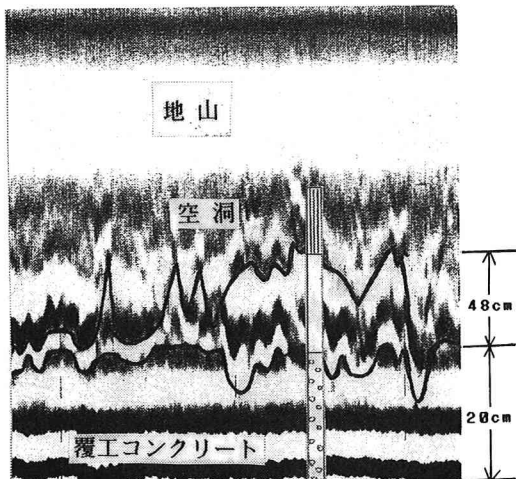
図－5 比誘電率と含水率の関係



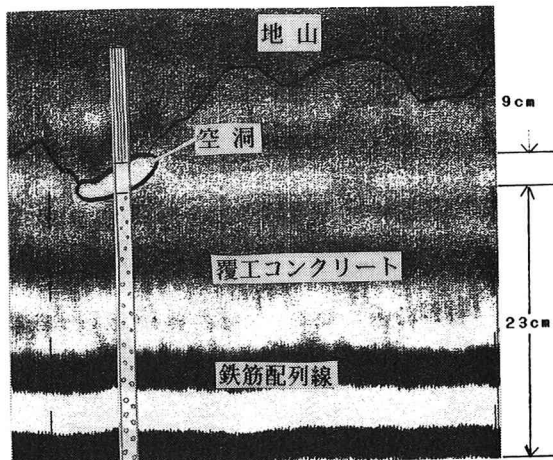
図－6 覆工／地山の解析例

図－9 は、覆工背面に崩積土が観測された例である。急勾配の信号列が上方まで連なり三角形のゾーンを形成しており、これが崩積土である。

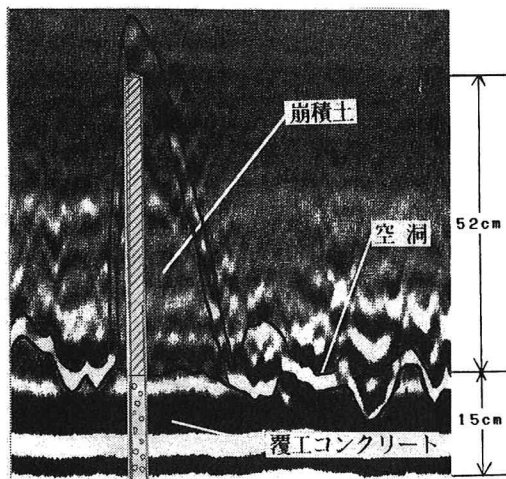
図－10は、覆工背面に滞水層のある例である。水の比誘電率は80程度と大きく、コンクリートや崩積土等に比べて厚さが極端に強調される。



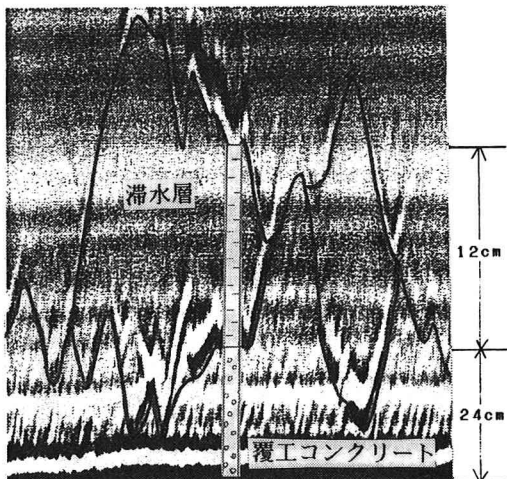
図－7 覆工／空洞／地山の解析例



図－8 鉄筋の解析例



図－9 崩積土の解析例



図－10 滞水層の解析例

5. 適用限界

これまでの地中レーダーによるトンネル調査システムの実用化研究および適用実績に基づき、同システムの適用限界として、探査深度と精度の2点について以下に示す。

5・1 探査深度

探査深度は、対象物の層構造や電気的性質、特に比抵抗によって異なる。典型的な層構造に大別し、調査実績よりそれぞれについて探査できた深度を整理すると、概ね表－2のとおりとなる。覆工を対象とした場合、深度探査は30～50cm程度であり、当社の水路トンネルの大部分に適用が可能と考えられる。

5・2 精 度

図-11は、覆工コンクリート厚さについて、地中レーダーとボーリング結果を比較したものであり、±5 cmの範囲に約90%の確率で収まっている。

図-12は、同様に空洞深さについて比較したものである。覆工コンクリートの場合に比べ、やや誤差が大きいが±10cmの範囲に約80%の確率で収まっている。なお、コンクリート厚さおよび空洞深さの誤差については、

・ 覆工コンクリート比誘電率の違い

・ レーダー位置とボーリング位置のズレが主な原因と考えられるが、前述のとおり比誘電率のパラツキによる誤差は小さいことから、レーダー位置とボーリング位置のズレが支配的と想定される。

6. あとがき

水路トンネル調査システムに関する実用化研究の結果、地中レーダー調査の有効性と現状機器の適用限界が明らかとなった。すなわち、同システムは覆工および覆工背面状況について、トンネル全線にわたって、迅速かつ連続的、定量的に情報が得られる点で従来のボーリング調査に比べ優れており、これにより、保守・管理のための基礎資料を一元的かつ体系的に収集、蓄積することが可能となった。今後は、統合的な保守・管理システムの構築に向けて、地中レーダーを積極的に活用するとともに、背面の地山性状判定への応用などの課題にも取り組んでいきたい。

7. 参考文献

- 1) 江川顕一郎ほか：地中レーダーの水路トンネル調査への適用に関する研究、電力土木 No.203, PP.13~22, 1986.7
- 2) 近藤始郎ほか：地中レーダーによる空洞・巻厚調査—水路トンネル調査への適用例、物理探査学会秋季講演論文集, PP.110~111, 1986.11
- 3) 岡田博明ほか：コンクリートの誘電的性質、物理探査学会秋季講演論文集, PP.204~205, 1987.11
- 4) 稲垣正晴：電磁波による路面下の空洞探査、センサー技術、Vol.9, No.4, 1989.4
- 5) 津田正寿ほか：地中レーダーによる崩積土の解析について、物理探査学会春季講演会論文集, PP.309~311, 1991.5
- 6) 久保田英夫ほか：地中レーダーによる滞水層の解析について、物理探査学会秋季講演会論文集, PP.401~404, 1991.10

表-2 層構成と探査深度

層 構 成	探 査 深 度
覆工/地山	30~40cm
覆工/空洞/地山	50~170cm
覆工/崩積土/空洞/地山	30~100cm
覆工/滞水層/空洞/地山	50~100cm

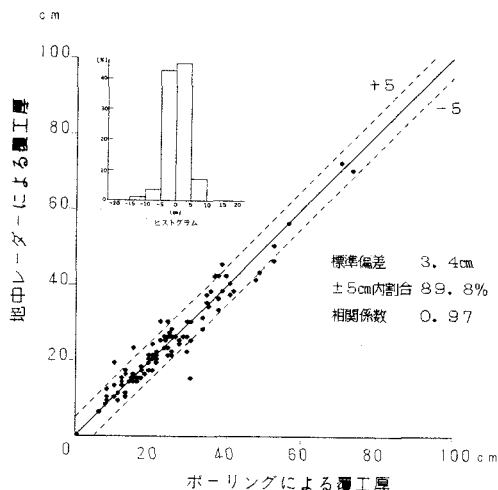


図-11 ボーリングとの照合結果（覆工厚）

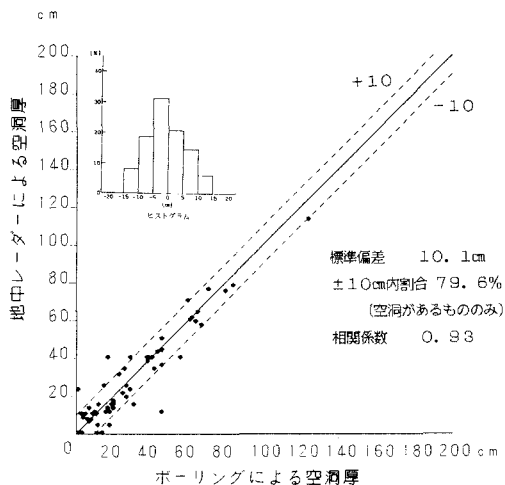


図-12 ボーリングとの照合結果（空洞厚）