

V-16 トンネルの覆工厚調査における地中レーダー探査の解析精度の検討

カナン地質(株)	正	○篠原 潤
(株)芙蓉調査設計事務所	正	須賀 幸一
(株)芙蓉調査設計事務所	正	山田 公雄
愛媛大学工学部	正	矢田部 龍一

はじめに

物理探査は非破壊で多くのデータを迅速に得られる等利点が多い反面、電磁波や弾性波、電気等を使い調査対象物の物性値の変化を捉えて解析する間接的な調査であるため、おのずと解析精度には限界がある。その認識を誤ると、探査そのものの信憑性をも疑われてしまう。

今回トンネル変状調査により愛媛県内の 10 箇所のトンネルにおいて、地中レーダーによる覆工コンクリート厚及び覆工背面の空洞調査を実施した。調査は電磁波を使用した間接的な物理探査であるが、覆工コンクリートのコア抜きによる直接的な調査も併せて実施している。両者の調査結果を比較して、地中レーダーのトンネル調査における評価と解析精度についての検討を行った。

調査トンネル概要

トンネル変状調査では、打音、地中レーダー、コア抜き等の結果から、変状ランクを決定する。調査した 10 トンネルはすべて在来工法によって施工され、施工開始年代は 1959～1983 年である。NATM工法以前の在来工法で施工されたトンネルは、施工方式上、覆工と地山の間に空隙が残ることが多く、巻き厚不足のトンネルが多い。図-1 によると、変状ランクは施工年代に比例していることが分かる。ここでの変状ランクは以下の通り。3A(直ちに対策が必要)、2A(早急に対策が必要)、A(重点的に監視し、計画的な対策が必要)、B(監視が必要)である。

今回、検討を行ったのは、変状ランク 3A の a トンネル(支保工、モルタル注入なし)、A の b トンネル(支保工、モルタル注入あり)、B の c トンネル(支保工、モルタル注入あり)の代表的な 3 トンネルである。

地中レーダー探査概要

地中レーダー探査は電磁波をアンテナから地中に放射し、地中の物性変化をきたしている境界で反射され再び地表に出現した波を受信して地中の状況を把握しようとするものである。

トンネル調査における地中レーダー探査の模式図を図-1 に示す。調査に使用した地中レーダーは日本無線(株)製(JEJ-51E)で、アンテナ部の周波数は 400MHz である。

現在、地中レーダー探査に利用されているアンテナの周波数は、10MHz～2000MHz 程度である。今回使用した 400MHz のアンテナはトンネルの覆工厚及び覆工厚背面の空洞調査

には一般的に使用される周波数であり、覆工厚、覆工厚背面の空洞の規模、支保工の有無や地山の状況など多くの情報が得られるのが特徴である。現地での測定は、高所作業車を 2～4km/hr で走らせることにより、レーダーアンテナを走査させて、連続画像として集録させた。測線はトンネル縦断方向 3 測線である。また結果確認及び地山の観察を行うためにコアードリルによるコア抜きも実施している。

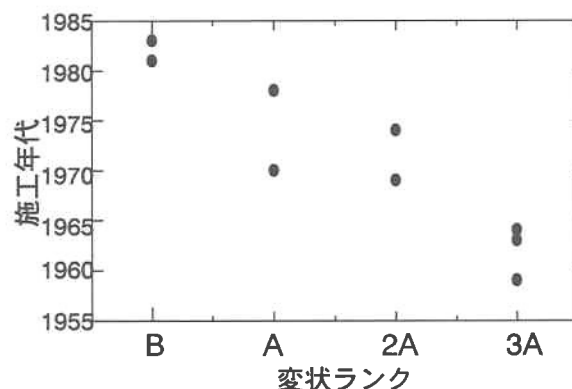


図-1 変状ランクと施工年代の関係図

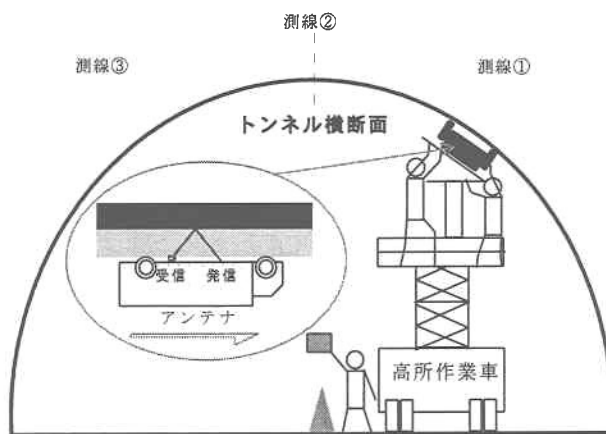


図-2 地中レーダー探査模式図

次に解析の手順を図-3 に示しておく。測定により得られた反射映像は、縦軸が電磁波の往復反射時間、横軸が距離を示している。覆工厚を求めるには図-3 式によって縦軸を深度に変換する必要がある。ここで、

D_n (n 層の深度) $\epsilon \gamma_n$ (n 層の比誘電率)
 T_n (n 層で生じた往復反射時間)

つまり覆工厚を求めるには、コンクリート底面の往復反射時間(T)とコンクリートの誘電率 ($\epsilon \gamma$) が分かればよいということである。

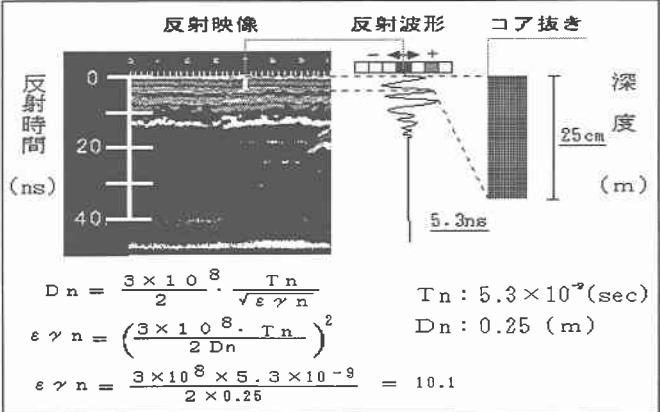


図-3 地中レーダー探査解析模式図

解析精度に影響する要素

- ここでトンネル覆工厚調査において地中レーダー探査の解析精度に影響すると考えられる要素を示す。
- ① 比誘電率：コンクリートの誘電率は乾燥、湿潤状態などの条件により 5～20 と大きく異なる。
 - ② 指向性：直下のデータ（コア抜き地点）だけでなく、周辺のデータ（±25° 以内）の影響を受ける。
 - ③ 周波数：アンテナの周波数は、高周波数になるほど分解能力高くなる反面、探査深度は浅くなる。
 - ④ 見掛けの反射：反射は物質の境界面で起こる反射の他に、表面反射、多重反射等の影響を受ける。

調査データの検証

前述の解析精度に影響する要素により、コア抜きによる覆工厚と図-3 の地中レーダーから求めた覆工厚には、誤差が生じる。その誤差がどの程度の範囲であるかを検証した。以下に a、b、c トンネルの地中レーダーから求めた覆工厚とコア抜きの覆工厚との比較図(図-4)を及び比較一覧表(表-1)を示す。

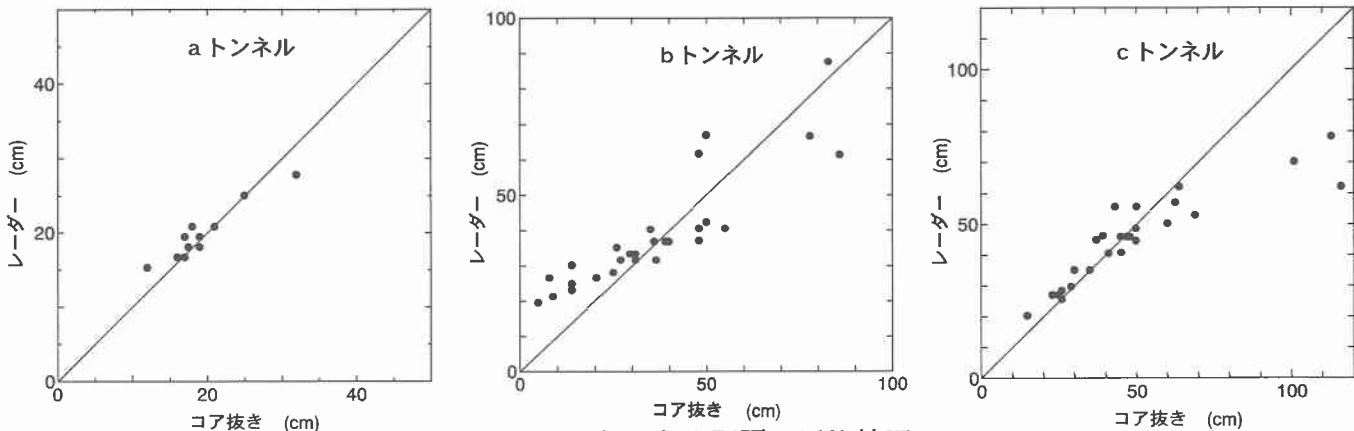


図-4 トンネル別覆工厚比較図

a トンネルのように覆工の厚さがあまり変化せず、覆工背面の状況が同じようなトンネルについては、レーダーから求めた厚さとコア抜きの厚さの誤差は 7.0%と少なく、良く一致している。c トンネルでは 14%と a トンネルより誤差が大きくなる。これは覆工の厚さの変化が大きいが原因と考えられが、比較的良く一致していると言える。しかし b トンネルは誤差平均 46.2%と大きい。覆工厚、覆工背面の状況に変化が大きいに加え、覆工材自体の違いが大きいのではないかと考えられる。図-4 より、覆工厚の浅い地点では安全側に補正する必要があることが分かる。また相関係数を見てみると 0.88～0.83 と良い相関がとれており、データの信頼性はあると考えられる。

あとがき

今回地中レーダーによるトンネル覆工厚調査のデータを用い、解析誤差やデータの信頼性についての検証を行ったが、有意義な情報が得られた。今後の調査の参考としたい。

	a トンネル	b トンネル	c トンネル
コア抜き	覆工厚 (cm)	12～32	5～86
	覆工厚平均	19	38.8
レーダー	覆工厚 (cm)	15～28	19～88
	覆工厚平均	19.3	36.5
データ数	13	27	27
誘電率	10.1	6.4	10.7
誤差 (%)	0.1～27.2	1.7～285.2	0.2～46.5
誤差平均 (%)	7.1	46.2	14
相関係数	0.86	0.83	0.88

表-1 覆工厚比較一覧表