

レンガ覆工トンネルにおける地中レーダー調査について SURVEY ON BRICK-LINED TUNNEL BY GROUND PENETRATING RADAR

久合田 幸男*・村松 誠一*・稲垣 正晴**・新 弘治***

Sachio KUGOTA, Seiichi MURAMATSU, Masaharu INAGAKI, Koji SHIN

Ground penetrating radar has been effectively used for tunnel survey. Tunnel lining is mostly made of concrete. Huge data from the surveys have shown that the dielectric constants of lining concrete almost vary 9 to 12. However, a dielectric constant at a location for calibration has been calculated to be incredibly small. That disagreed with our statistical common sense. After investigating repeatedly, no error has been found. It can be imagined that water content of brick must be changed more easily than concrete. Though experimental analysis is needed for proof, the actual feature of brick must be kept in mind when analysis of tunnel survey by GPR is carried out.

Keywords: ground penetrating radar, tunnel survey, dielectric constant

1. まえがき

地中レーダーは電磁波反射法を適用するための探査装置である。非破壊でかつ連続的に計測が可能であるという特長を生かして、ここ 10 数年来トンネル覆工背面調査に広く利用されてきたのは周知のことである。

通常、トンネルの覆工材料にはコンクリートが用いられているが、昭和初期以前に建設されたトンネルの中には覆工材料にレンガを用いたものもある。地中レーダー記録のデータ解析には覆工材料の比誘電率に関する吟味が不可欠である。過去の大量のデータを統計的に調べてみると、覆工コンクリートの比誘電率は 9 ～ 12 と比較的安定している。ところが本調査の結果、覆工材料にレンガを用いたトンネルにおいて地中レーダー記録から予想されるレンガ覆工厚とボーリングによる実測値との関係に経験的には非常に考えにくい現象が発生した。すなわち、ほとんど乾燥状態と思われる程の著しく小さい比誘電率をもたなければ説明できないような箇所が存在することがわかった。再計測も含めた考察の結果、やはり実際に起こっている現象であることが示された。これはレンガ覆工の場合には比誘電率のこれまでの統計的な標準値を無条件には利用することができなということである。本報告では、この点に関する調査・解析の経緯を述べることにより、今回見い出されたレンガ覆工に関する知見が、今後のトンネル調査データ解析を行う際に貴重な参考データとなることを示す。

* 株式会社 日本建設技術社
*** 株式会社 ウォールナット

** 正会員 株式会社 ウォールナット

2. データ校正と覆工コンクリートの比誘電率

地中レーダーを用いてトンネル覆工厚の測定を行うにはデータの校正が必要である。これは電磁波速度が媒体の比誘電率に依存して変化するためである。校正用の基準比誘電率を求めるには、参照点における実際の覆工厚を知らなければならない。非破壊法による測定結果から計算によって比誘電率を求める方法もあるが、ボーリングによる方が確実であり、内部の直接観測ができることからより充実した調査結果を導くのに役立つ原始的ではあるが実用的な方法である。以下に示す式を用いて、参照点における比誘電率を計算する。

$$\tau = \frac{CL}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし τ : 実際の厚さ (cm)
 L : 記録紙上の長さ (cm)
 ϵ_r : 物質の比誘電率
 C : 計測器によって決まる定数

基準比誘電率を求めるには、確実性を増すために複数箇所のデータを必要とし、当然ある程度のバラツキがある。バラツキの原因には二つ考えられる。²⁾ 一つは比誘電率自身のバラツキ、もう一つは地中レーダー測線上の点とボーリング点とのずれである。トンネル覆工背面には凹凸があるため少しの位置ずれでも大きな違いになることがある。当然のことながら、この場合には計算された比誘電率の値は実際の値と相当異なっているはずであり、この値を基準値の決定に際し考慮に入れると正しい校正の障害となる。これを避けるために、現実により得る比誘電率の範囲をあらかじめ知っておく必要がある。実験研究の結果¹⁾、コンクリートや砂あるいはロームのような地中レーダー調査対象となる媒体の比誘電率の違いは含水率が支配的な要素であり、それを構成する地質あるいは土質の違いにはほとんど依存しないことが分かった。したがって、乾燥状態ではどのような材質であってもほぼ同一の値を持つ。また、トンネルの実サンプルを使った試験によれば、覆工コンクリートの含水率は大部分は 10 % 前後 (7 % ~ 13 %) に分布することが分かった。含水率と比誘電率の関係は式 (2) で表される。

$$\begin{aligned} \sqrt{\epsilon} &= \eta_a \sqrt{\epsilon_a} + \eta_w \sqrt{\epsilon_w} + \eta_s \sqrt{\epsilon_s} \\ \eta_a &= \phi - \eta_w \\ \eta_w &= \frac{(1-\phi) \rho_s \gamma}{1-\gamma} \\ \eta_s &= 1-\phi \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

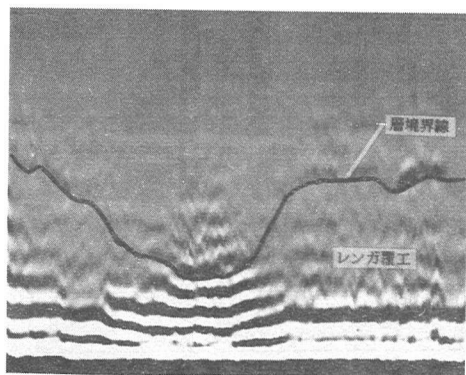
ただし ϵ : 比誘電率
 η : 体積分量比
 ρ : レンガを構成する土
粒の比重
 γ : 含水率

(添字 a: 空気 s: レンガ w: 水)

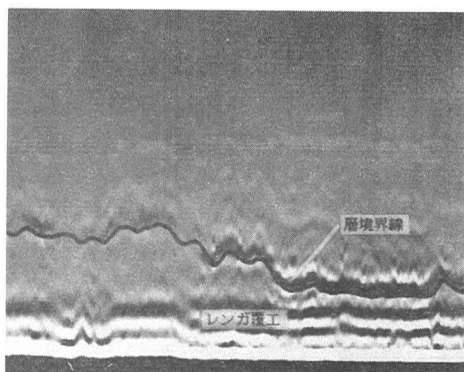
式 (2) を用い、間隙率 30 %、空気を含まないコンクリートおよび骨材の物質自身の比誘電率を 6 として上記含水率に相当する比誘電率を計算すると 9 ~ 17 という結果を得る。一方、過去の調査結果に基づいた多くのデータを使って統計的に比誘電率の分布を調べてみると、おおむね 9 ~ 12 の範囲にはいることが分かった。これは、計算値とほぼ一致する。したがって、現実的にあり得る覆工コンクリートの比誘電率の範囲が目安値として明確になった。

3. 地中レーダー調査結果

地中レーダーによる覆工背面調査はこれまで多くのトンネルで実施してきたが、今回の道路トンネル調査の記録の中で奇妙な信号が取得された。図 - 1 にその記録を示す。図中右側に扇形状の多層構造を示す信号



図－１ 地中レーダー記録
(扇形多層構造)



図－２ 地中レーダー記録
(層厚変化)

的な反射信号が観測されるが、本調査のような形状の信号が局所的に見られる記録はこれまで取得されたことはない。

また、通常の層状反射信号が見られる区間でも解析を進めていくと理解しがたい現象が現れた。先述のように、最終的に縦断面を作成するには層厚の較正を行わなければならない。このため、本調査ではボアホールカメラによる断面の撮影を行った。図－２にボアホールカメラ撮影を実施した箇所を含む地中レーダー記録を示す。図中左側から右側に向かって層境界を示す反射信号の帯が見られる。層厚は左右で著しく異なりほとんど２倍程の違いがある。そこで、それぞれの代表点においてボアホールカメラ記録を取得した。ところが、結果は予想に反し全く同一の巻厚を示した。この状態を正しいものとして比誘電率を計算すると、表－１に示すとおりとなる。覆工の薄い部分と、厚い部分の比誘電率は４.４に対して１３.７であり、覆工コンクリートの標準的な値の範囲を甚だしく逸脱している。レンガ覆工の場合はブロックという規格化された単一要素の積み重ねであり、普通不規則な凹凸変化はない。したがって、ボアホールカメラ調査実施位置とのずれによるバラツキとは考えられない。地中レーダー計測実施測線付近でレンガの段組が突然変化していることも考えられたので、注意深く再度詳細に調査を行った。その結果は否定的であり、前回と全く同一の疑問が残った。

表－１ 較正用比誘電率

地 点	L (cm)	τ (cm)	ϵ_r
No. 1 (薄い部分)	3.5	45	4.4
No. 2 (厚い部分)	6.2	45	13.7

４．レンガ覆工の比誘電率

レンガ覆工の比誘電率のうち、No. 2の方は標準的な値となっている。一方、No. 1は非常に含水率の小さなほとんど乾燥状態にあることを示している。図－３に含水率と比誘電率の関係を表すグラフを示す。レンガの間隙率を測定したところ、２０～３０％という結果を得た。そこで、図中には間隙率２０％と３０％の二つの場合について含水率と比誘電率の関係を、式（２）を用いて計算しプロットした。ただし、レンガを構成する土粒子の比誘電率を６とした。いずれの場合も含水率が１０％前後ではNo. 1のような小さな比誘電率は得られない。やはりレンガは乾燥状態にあるとしか考えられない。

地中レーダー調査に並行して目視調査が行われた。図－１の地中レーダー記録中の異常箇所を含む目視調査結果を図－４に示す。この付近はクラックが多く、割れ目から漏水している箇所が相当数観測された。漏

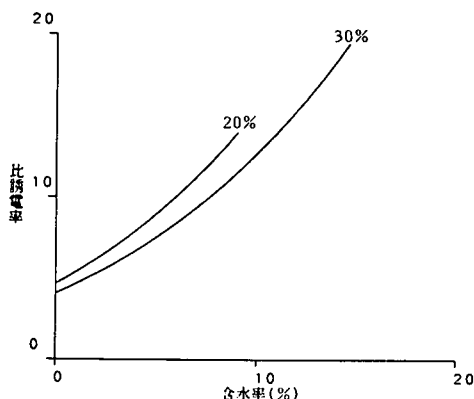


図-3 含水率と比誘電率の関係

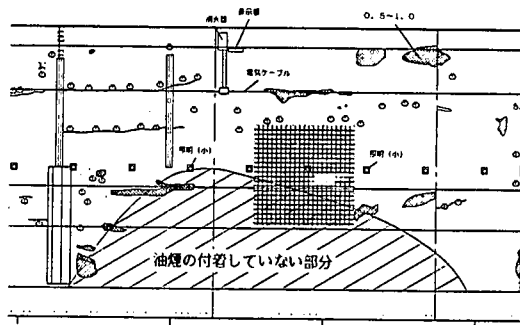


図-4 目視調査結果

水箇所の周辺は広く湿潤しており、覆工表面に油煙が付着している。付着した油煙の分布状況は目視結果および写真より把握することができた。地中レーダー記録と油煙の付着状況には関連性がみられ、図-1中の異常信号の部分が図-4中の油煙の付着がない部分に一致していた。また、他の地中レーダー記録中でも明らかに覆工が薄いと思われる区間は、目視結果の油煙の付着していない部分におおむね一致していた。レンガはコンクリートと比べ透水性がよく、覆工材料にレンガを使用しているトンネルでは湿潤部分と乾燥部分が狭い範囲で共存できているのではないかとと思われる。このようなレンガの含水性能が同一トンネル内での含水量の違いを生み、電磁波の速度を司っている比誘電率の違いを生んだものとする。図-1中の明瞭な扇形構造は、比誘電率が徐々に変化していくようすをそのまま反映したものであることをよく表している。

5. 結論

地中レーダーを用いたトンネル覆工背面調査におけるデータ解析を行うには、覆工を構成する材料の比誘電率に関する知見が不可欠である。トンネル覆工の比誘電率は含水率が比較的一定していることからある標準的な範囲にはいる。この事実は校正用の比誘電率が妥当であるかを判断する際の貴重な材料となる。しかし、レンガ覆工においては含水率が極端に小さくほとんど乾燥状態にある場合も局所的に存在することが分かった。このような事実は、これまでの常識値を覆すものであり、地中レーダー記録の解析をより確実に遂行するためには、貴重な情報として心に留めておくべきである。

6. 参考文献

- 1) 岡田博明ほか：コンクリートの誘電的性質，物理探査学会第77回学術講習会講演論文集，pp204～205，1987.10.
- 2) 久保田英夫ほか：地中レーダーによる水路トンネル調査システムの実用化研究，トンネル工学研究発表会論文・報告集，pp211～216，1991.12.