

VI-327

弾性波伝達関数法（ETFuM）による鉄道トンネルの検査手法の開発

東日本旅客鉄道(株) 正会員 ○森島啓行
東京工業大学 肥後矢吉
大成建設(株) 角田知巳
(株)ナカボーテック 木内幸則

1. はじめに

トンネルの検査に重要な覆工厚さ、覆工背面の空洞、強度の検査方法は、破壊試験を主体として実施しているが、効率性、費用、及び少ないデータから全体を評価するため信頼性に問題があった。

そこで筆者らは、これら検査を効率的に行う非破壊試験法（以下「本検査法」という）を開発した。本報告は実トンネルにおける本検査法による測定試験、ボーリングによる検証試験及びシールドセグメントに対する適用性の評価試験の結果について述べた。

2. 弾性波伝達関数法の測定原理

弾性波伝達関数法（ETFuM）とは、低周波の疎密波を使用して、その透過波や反射波を捉え、入力信号との比を求めて検査対象物の形状、欠陥、密度等の情報を定量的に算出する方法である。

本検査法はこの原理を利用したものであり、トンネル覆工の巻厚と背面空洞における弾性波の伝達関数モデルは次のようにあらわすことができる。

$$H_{A_n} = G_{A_n} / F_n(\omega) = S_n \cdot \beta_n \cdot \beta_n \cdot M_n$$

H_{A_n} : 伝達関数、 G_{A_n} : 出力信号、 F_n : 入力信号、 S_n : 送波変換子の送波感度、 β_n : 変換子と伝播媒体間の結合に関する伝達関数、 M_n : 受波変換子の受波感度

ここで、出力信号の比をとり、周波数領域であらわすと次の式となる。

$$\frac{H_{A1}}{H_{A2}} = \frac{G_{A1} / F_1(\omega)}{G_{A2} / F_2(\omega)} = \frac{S_1 \cdot \beta_{11} \cdot h_{11} \cdot \alpha_1 \cdot h_{21} \cdot \beta_{21} \cdot M_1}{S_1 \cdot \beta_{12} \cdot h_{12} \cdot \alpha_2 \cdot h_{22} \cdot \beta_{22} \cdot M_2}$$

h_{11}, h_{12} : 対象材料の伝達関数、 α_1, α_2 : 測定対象に関する伝達関数

また、入力信号及び送信・受信変換子の特性が一定であれば、測定対象の伝達関数以外の要素はすべて消去でき、覆工厚さ、空洞の変化（ α_{n1}, α_{n2} ）は G_{A_n} （出力信号）の比として求められ、

$$\frac{H_{A1}}{H_{A2}} = \frac{G_{A1} / F_1(\omega)}{G_{A2} / F_2(\omega)} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

となる。

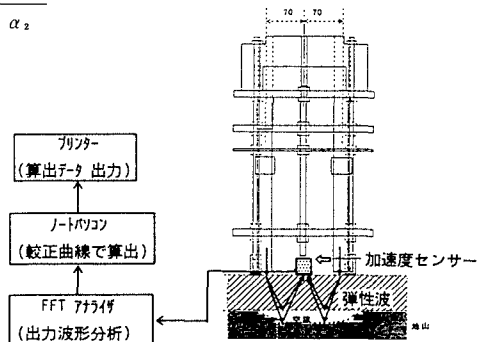
この α を求めて評価するのが本検査法の原理である。

3. 本試験法の機器概要

測定機器の構成を（図-1）に示す。入力装置は一定のバネ定数をもつバネ打撃式とし、出力信号のピックアップは圧電式の加速度センサーで5KHzまでフラットな特性のものを使用した。

4. 模擬覆工供試体による試験

コンクリート構造物への弾性波伝達関数法適用性の確認と測定検量線を求める目的で模擬供試体を製作して基礎試験を実施した。試験体の大きさは50×50×100 cm、強度条件は $\sigma_{ck} = 150, 210, 255, 400 \text{ Kg/cm}^2$ 、背面空洞の条件は0, 40, 100, 200mmとした。出力信号の代表的な波形は（図-2）に示すとおりである。強度はA及びBで示す上下波形のピークにおける時間の比、背面空洞深さはDで示す波高値にそ



（図-1）測定機器の構成

れぞれ良い相関が得られたので、この相関曲線を校正曲線とした。また覆工厚さは、A及びCで示す上下波形のピークにおける時間の差の1/2 に同時に測定した表面弾性波の伝播速度をかけた値とした。

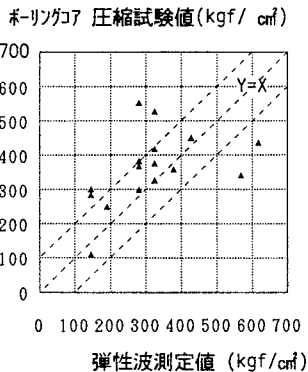
5 実トンネルにおける試験結果

昭和12年完成の鉄道トンネルにおいて、本検査法による測定試験を行った。また本検査法の測定データ検証の目的で覆工をボーリングし、覆工厚さ、背面空洞を測定す

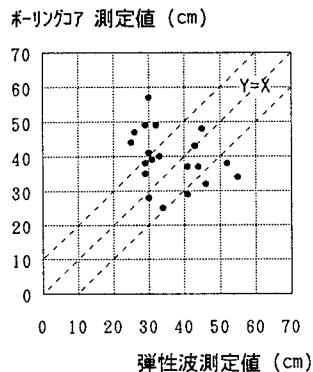
ると共に、採取コアを用いて強度試験を行い比較検証した。覆工ボーリングは $\phi 100\text{mm}$ で20箇所実施した。覆工厚さと背面空洞はスケールで測定し、強度はJISA1107による一軸圧縮試験により測定した。

本検査法による測定値と破壊試験による検証結果は次のとおりである。（図-3～図-5 参照）

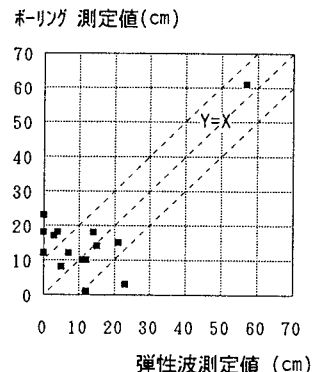
- (1) $\pm 10\%$ 以内と高い精度で測定できたデータが60個中11個あった反面、 $\pm 100\%$ を超える大きな違いを示すデータが5個あった。
- (2) 採取したボーリングコアを点検したところ、木材の混入、内部空隙、ジャンカなどが顕著に見受けられるものが20個中7個あった。
- (3) 一軸圧縮強度は、1本のボーリングコアにおいて最小 $158\text{Kgf}/\text{cm}^2$ 、最大 $408\text{Kgf}/\text{cm}^2$ といった値を示すなど、大きなばらつきが見られた



（図-3）強度データ



（図-4）覆工厚データ



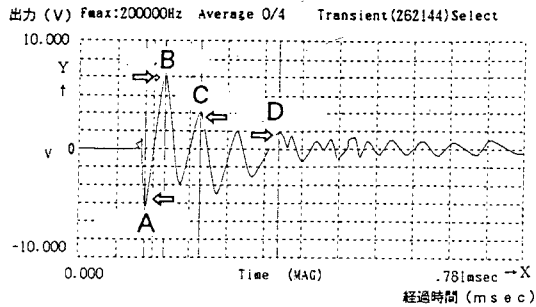
（図-5）空洞データ

6 シールドセグメントにおける試験結果

鉄筋コンクリート製のシールドセグメントに対する本検査法の適用性について評価試験を行った。試験体は実物の鉄道RCシールドセグメント（ $\sigma_{ck}=480\text{Kgf}/\text{cm}^2$ 、 $3000 \times 1000 \times 250\text{ mm}$ ）を使用した。試験結果の詳細は整理中であるが、セグメント厚さ測定値のと設計値の差は、25cmに対して $\pm 2\text{cm}$ 程度となっており、高精度であることが確認できた。

7 まとめ

- 1) 本試験で始めて、経年60年の実トンネルにおいて測定試験を実施したが、材質、形状とも異なる供試体で算出した校正曲線を使用したにもかかわらず、一定の範囲で測定可能なデータがあり、基本的に本検査法がコンクリート構造物に適応可能なことが明らかになった。
- 2) セグメント試験結果から判断すると、材質、形状がある程度均一な場合の測定精度は $\pm 10\%$ 程度の範囲となるものと期待できる。
- 3) 今後は、実トンネルにおける試験を重ね測定精度に大きな影響を与える要因の分析、精度を向上するための校正曲線や測定方法の改良を行う予定である。



（図-2）出力波形