

低周波超音波非破壊試験による覆工背面空洞の検知に関する検討

鍋島 康之¹・松本 俊範²

¹正会員 明石工業高等専門学校教授 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)
E-mail:nabesima@akashi.ac.jp

²正会員 (株)ニュージェック 港湾・海岸グループ (〒1 531-0074 大阪市北区本庄東二丁目3番20号)
E-mail:matsumototn@newjec.co.jp

近年、老朽化したトンネルでは覆工コンクリートの背面と地山との間に空洞が生じている場合がある。この背面空洞は地山の弛みや覆工コンクリートの耐力低下などの原因にもなるため、空洞検査手法の確立が必要となる。しかしながら、従来の打音検査では検知しづらく、効果的な検査方法が望まれている。そこでコンクリートと石板との境界面に空隙を埋設し、背面空洞を模擬した供試体を作製した。その供試体に低周波超音波非破壊検査を行い、電磁波レーダーを用いた場合の結果と比較し、検知精度を評価した。

Key Words : lining concrete, low-frequency, void, visualization, ultrasonic non-destructive inspection

1. はじめに

近年、1960年代から1970年代に整備されたトンネルなどの社会資本において機能低下や劣化が進み、更新時期を迎えている。これはメンテナンスフリーとして考えられていたコンクリートが20年、30年以上経過して劣化が進み、ひび割れの発生、鉄筋の腐食、コンクリート表面の剥離などが発生するようになったからである。トンネル覆工コンクリートの劣化による事故は平成11年の福岡トンネルでのコンクリート塊の落下事故¹⁾など社会的に問題になる事故も多い。このため近年では社会資本の維持管理や点検業務が非常に重要視され、国土交通省では、平成14年度に「道路トンネル定期点検要領(案)」を策定し、2~5年間隔で確実に定期点検および維持補修工事を実施している²⁾。しかし、道路トンネル点検について維持管理予算の確保が困難な状況であることや老朽化したトンネルが多いことなどから効率的・効果的な点検が望まれている。

覆工コンクリートの内部点検については打音検査が主流であるが、この検査法は検査の結果に個人差が生じる、定量的な結果が残らない等の問題がある。さらにコンクリート表面の経年変化における剥離など劣化は判定できるもののその深さまでは判定が困難であり、剥離や内部亀裂がある程度深くなると有無判定もできなくなる³⁾。したがって検査において個人差が発生しにくく、定量的

な結果が残る超音波や電磁波などを用いた非破壊検査が有力視されている。本研究では、低周波超音波非破壊検査法がコンクリートと地山との間の空隙をどの程度の精度で検知可能かを検証し、検知精度を向上させる方法を考察することを目的としている。

2. 低周波超音波非破壊試験

本研究では、低周波超音波トモグラフィー探傷システム((株)日本マテックMIRA A1040)を使用した。この試験装置底面には12チャンネル×4列の計48チャンネルのセンサー(プローブ)が図-1のように搭載されている。まず、1chから超音波を送信し、残りの11chで受信する。次に2chから超音波を送信して3~12chで受信する。これを順に送受信チャンネルを切り換えて図-2のような66通りの信号を受信することで供試体断面図を作成するシステムになっている。

また、各チャンネルに4個のDPC(Dry Point Contact)センサーが配置されており、1056通りの路程信号を受信して演算させることで信号の位置精度の向上、ノイズの消去を行い、断面図をトモグラフィーとして描いている。このため、本研究使用した超音波非破壊試験装置は供試体内部の状況を立体的に捉えることが可能であり、既往の研究⁴⁾でコンクリート内部の亀裂の位置や形状を精度

よく検知することが可能である。

通常、コンクリートは均一部分材ではなく、骨材など超音波の阻害要因により減衰が大きいいため、深い位置の測定できないとされている。このため、本装置では45kHzの低い周波数を用いて超音波の波長を長くすることで減衰による影響を小さくし、深い位置の亀裂を測定可能にしている。一般に周波数が高ければ波長は短くなり、コンクリート内部の小さな傷を検知することができるが、減衰による影響が大きくなり、深い位置の測定が困難になる。

送信された超音波（パルス波）は次に示す音響インピーダンス Z と音圧反射率 r により反射される⁹⁾。

$$Z = \rho \times C \quad (1)$$

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

ここに、 ρ ：媒質の密度、 C ：媒質中を通る音速、 Z_1 ：入射側物質の音響インピーダンス、 Z_2 ：通過側物質の音響インピーダンスである。

超音波の波動モードは横波を使用している。横波は縦波と異なり、密度変化を伴わないで形状変化が伝わる波動である。横波は発泡スチロールなどの独立気泡集団材質であっても、一体化しておれば、気泡の影響をあまり受けず安定して伝播し、縦波のように散乱は生じない⁹⁾。

本装置のプロープはDPCセンサーを使用しており、グリセリンなどの接触媒質を必要としない。また、プロープはスプリングタイプであり、8mmまでの凹凸に対応可能である。



図-1 試験装置底面に設置されたプロープ

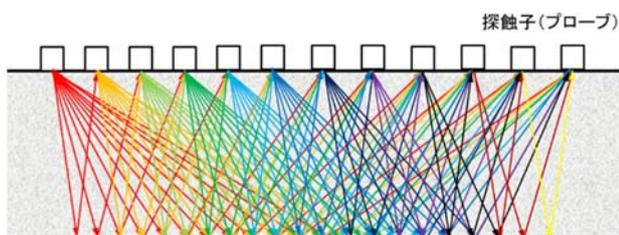


図-2 超音波の送受信レイアウト

3. トンネル覆工コンクリート背面の空洞に対する検証

(1) 試験供試体

本実験では空洞を模擬するために、図-3のような流紋岩の石板（545×230×28mm）の上にエアクッション（50×50mm）を貼り付け、その上部に高さ200mmのコンクリートを打設した供試体（空洞あり）と、石板の上部に直接コンクリートを打設した供試体（空洞なし）を製作した。外見上は図-4に示すように、空洞の有無による差はみられず、外見上判断することは不可能である。本研究に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。水セメント比を60%、目標スランプを15cm、目標空気量を4.5%とした。これらの値は一般的なトンネル覆工コンクリートに使用される値である⁷⁾。

(2) 低周波超音波非破壊試験結果

図-5、6は超音波非破壊試験により得られたトモグラフィ画像である。赤色の横線はコンクリートと石板の境界面である深度200mmを示している。図-5より、空隙

表-1 コンクリート供試体の配合

| 粗骨材の最大寸法(mm) | スランプ(cm) | 水セメント比(%) | 空気量(%) | 細骨材率(%) |
|--------------|----------|-----------|--------|---------|
| 20 | 15 | 60 | 4.5 | 47 |

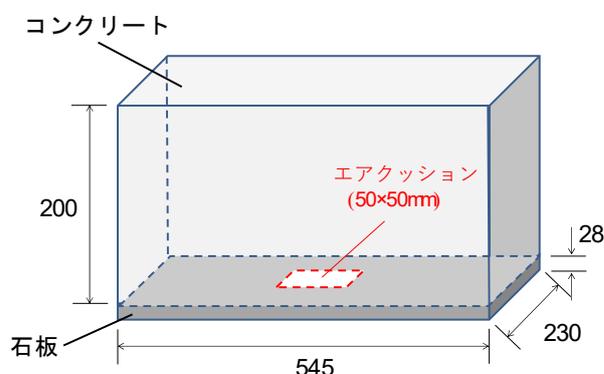


図-3 背面空洞を模擬した供試体概要図



図-4 試験供試体の外観

がない供試体では反射強度が強い黄色の範囲が深度230mm付近で現れており、石板底面を検知していることがわかる。コンクリートと石板の境界面においては、コンクリートから石板に超音波が透過する際、一部の超音波は反射するが、コンクリートと石板の密度差が大きくないため、大部分の超音波が透過してしまうことからこの様なトモグラフィーになったと考えられる。また、トモグラフィーでは石板の上端部が平滑に現れており、境界面の性状を正確に検知している。

一方、図-6に示している空隙がある供試体では、境界面である深度200mm付近で強度の高い赤色が現れており、背面空洞を検知できていることがわかる。さらに、トモグラフィー中央に段差があり、緑色の範囲がある程度平滑に現れていることより、境界面も検知できていることがわかる。しかし、埋設している空洞の幅が50mmであるのに対し、トモグラフィー画像では赤色の幅が80mm程度現れており、空洞の幅を正確に検知できていない。これは今回使用した周波数によるものと考えられ、周波数を適切に調整することで検知精度が向上すると考えられる。また、空洞をエアクッションを用いて再現しているため、亀裂などと異なり境界面が変動する影響も考えられる。

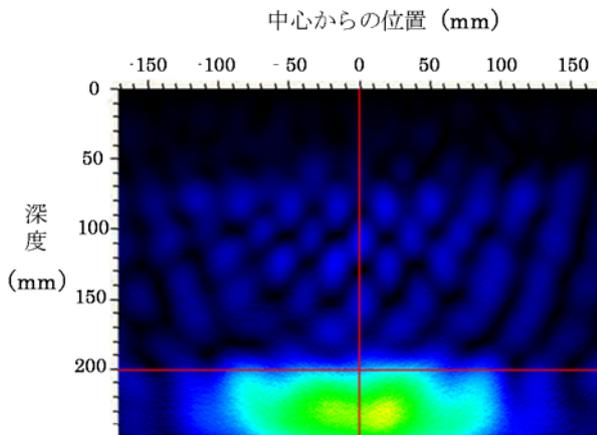


図-5 超音波トモグラフィー画像（空洞なし）

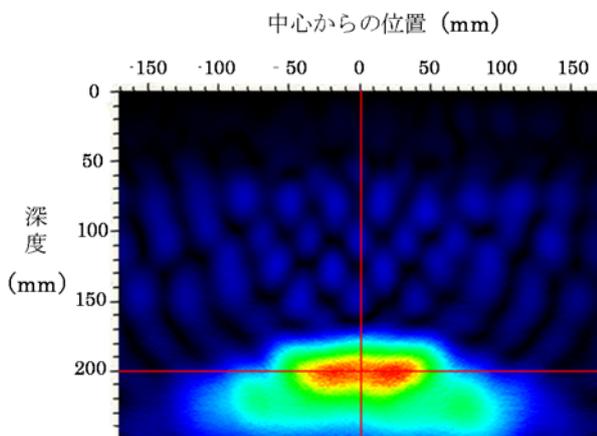


図-6 超音波トモグラフィー画像（空洞あり）

(3) 電磁波レーダー非破壊試験結果

(2)節では超音波非破壊試験の結果を示したが、比較のために電磁波レーダーを用いた場合について検証した。電磁波レーダーとして、本研究ではPROFIS PS 1000（株）日本ヒルティ）を使用した。この装置ではコンクリート面上を走行して、直線的に探査を行うことができる。この装置の底面からマイクロ波帯の電磁波を入射し、反射された電磁波を受信する。この行程を移動しながら行うことで内部の状況を検知することができる。一般に、深い位置の測定を行う場合、周波数を低くして減衰を小さくしなければならないが、電磁波の周波数を小さくしてしまうと直進性が失われてしまい、コンクリート表面を走査させながら測定が行うことができなくなる。そのため、本研究では周波数が2.6GHzのマイクロ波を使用した。

図-7、8は電磁波レーダー非破壊試験によって得られた結果である。図中には赤色の横線が2本示してあり、上側の横線がコンクリートと石板の境界面、下側の横線が供試体底面を示している。図-7、8より、どちらの供試体も境界面を正確には検知できなかった。境界面を検知できていないのは、コンクリートと石板の誘電率にあまり差がなかったことが考えられる。

一般的に比誘電率は空気が1、コンクリートが6~8、流紋岩がほぼ6~9であり、この誘電率の差によって電磁波は反射するため誘電率が同程度の場合、電磁波は反射しにくくなり、検知は困難になる⁸⁾。これより、電磁波レーダー非破壊試験でコンクリート背面地盤を測定する際の精度は、背面地盤の地質に影響することがわかった。

また、異なる部材の境界に空洞があったとしても電磁波は空洞で反射するので検知できるはずである。しかしながら、本試験では空洞を検知できなかった。背面空洞を検知できていないことに関して考えられる要因をいくつか挙げてみると、まず電磁波の減衰が考えられる。本試験の空洞の深度は200mmであり、減衰によって電磁波のエネルギーが弱くなってしまったことが考えられる。ただし、図-7、8ともに供試体底面付近で強い反射が検知できていることから、明らかに異なる境界は検知できていると考えられる。この点を考慮すれば、図-8の空洞背面の反射強度は図-7よりも反射強度が弱く、空洞が存在することによる影響が伺える。

4. まとめ

本研究では、超音波非破壊試験が覆工コンクリートの背面にある空洞をどの程度正確に検知可能かを、電磁波レーダーと比較することで検証した。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

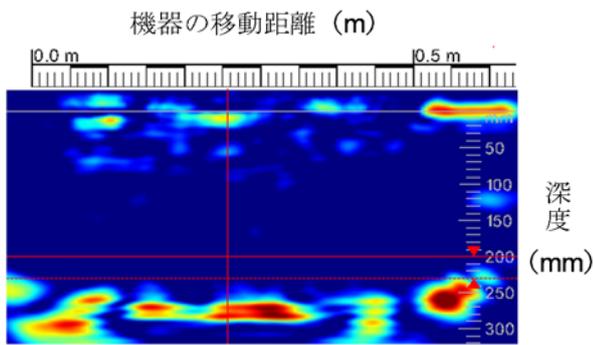


図-7 電磁波レーダー試験結果 (空洞なし)

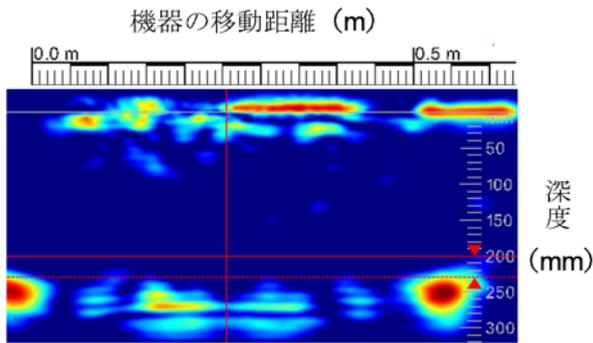


図-8 電磁波レーダー試験結果 (空洞あり)

- 1) 超音波非破壊試験ではコンクリートと石板の間に存在する空洞の位置を正確に判定できた。ただし、空洞の範囲については、今回の試験方法・条件では正確に判定できなかった。
- 2) 超音波非破壊試験では、コンクリートと石板の境界面の性状を正確に検知することができた。
- 3) 電磁波レーダー試験では、空洞の有無ならびに境界面の位置を正確に判定することができなかった。この原因として、今回設定した電磁波の減衰などの影

響が考えられる。

謝辞：非破壊試験の実施にあたっては、日本マテック（株）神田文義氏および日本ヒルティ（株）正野英二氏にご協力頂きました。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 辻正哲 著：コンクリート構造物の劣化と非破壊試験への期待，日本非破壊検査協会機関誌「非破壊検査」第51巻，pp.125-128，2002.
- 2) 建設コンサルタント協会近畿支部公共土木施設の維持管理に関する研究委員会：道路トンネル維持管理の現状と課題，<https://www.kk.jcca.or.jp/upload/oteire/02/file04.pdf> (2012.7取得) .
- 3) 松井精一，山田裕一，長田文博：低周波弾性波を用いたトンネル覆工コンクリート内部の劣化診断手法，土木学会論文集 No.746，pp.13-24，2003.
- 4) 鍋島康之，松本俊範：各種非破壊検査による覆工コンクリート内部亀裂の検知比較，関西道路研究会会報，Vol.41，pp.6-11，2017.
- 5) 日本非破壊検査協会：非破壊検査便覧，pp.8-15，p.57，pp.427-567，1972.
- 6) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の非破壊試験法，pp.1-29，1994.
- 7) 土木学会：新体系土木工学 70 トンネル I 山岳トンネル，技報堂出版，pp.177-196，1980.
- 8) 戸井田克，升本一彦，宮嶋保幸，日比谷啓介：岩石資料の比誘電率・導電率の含水状態との関係について，土木学会第51回年次学術講演会，pp.706-707，1996.

(2018.8.10 受付)

DETECTION OF INTERNAL VOID BETWEEN TUNNEL LINIG CONCRETE AND ROCK BY USING ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE INSPECTION METHOD

Yasuyuki NABESHIMA and Toshinori MATSUMOTO

In this study, the internal void between the lining concrete and rock was examined by using ultrasonic non-destructive inspection method. A composite model sample of concrete and rock was used to examine the accuracy. As the result, the ultrasonic non-destructive inspection method had high accuracy to determine the position and depth of internal void in the concrete test specimen, which was compared to that of the electromagnetic wave non-destructive inspection method.