

ホーン型レーダによるコンクリート構造物の 欠陥探査方法に関する基礎研究

Basic Research on Defect Survey Method of Concrete Structure by Horn type Radar.

宮本一成*・魚本健人*

Kazunari MIYAMOTO and Taketo UOMOTO

1. はじめに

近年、山陽新幹線のトンネルライニングコンクリート剥落事故の発生等から、トンネル構造物のライニングの全断面検査が望まれており、現状の検査手法として、電磁波レーダによるライニング厚さ、コンクリートの内部欠陥（空隙やジャンカ）、背面空洞¹⁾を調査する非破壊検査方法²⁾が挙げられる。しかし、この検査方法は検査装置を対象とするコンクリート表面にはほぼ接触させた状態で検査するものであり、架線をはじめ、コンクリートの凹凸面などトンネル内の障害物を避けて調査する必要があることやトンネル全断面のように非常に広大な範囲を測定することを考えると、検査効率は悪く、実用性に欠ける面をもっている。

現実的な日常管理を考えると、軌道や架線の状況を検査するために用いられているような検査車両に検査機器を搭載し、トンネル内を走行しながら非接触でトンネル内のコンクリートの欠陥を検出することができれば、点検・調査を合理的・効率的に遂行することが可能であると考えられる。しかし、現状の測定装置では、電磁波を発信するアンテナが検査対象のコンクリート面から離れると電磁波が減衰し、内部欠陥の検出が困難となることが言われているため、研究開発なしに車両搭載式等を前提とした検査方法への活用は非常に難しい状況である。

そこで本研究では、電磁波を放射する際の指向性を向上させ、電磁波の減衰の影響を軽減することが可能と考えられるホーン型レーダアンテナを用いて、このアンテナを対象コンクリート面から最大で1m離し、コンクリート内部の探査を行った。また、同時にホーン型アンテナの基本特性等を種々検討し、最終的な検査結果については、有識者以外にも理解できるような簡易的な表示を試みた。

2. 供試体概要

本研究で使用した供試体は、W/C 64.6%，強度 18 N/mm²，スランプ 18 cm，空気量 4.5% の普通コンクリートである。示方配合を表1に示す。供試体の寸法は、2 m × 9 m，厚さが最大 0.7 m である。図1に供試体の平面図、断面図および供試体内部に欠陥部を模擬して配置した埋設物の状況を示す。なお、本研究ではコンクリート表面から埋設物までの距離を埋設深さと表現することとした。

供試体には 1.5 m 間隔で埋設深さを変化させて H 形鋼が配置され、これを境界として区分した。区間 A には、図に示すような楕円形の型に碎石を詰め、形状を保持するために、型を取り外しながらコンクリートの打設を行い、ジャンカを模擬した碎石撒きを配置した。また、区間 B では、厚さの異なる模擬空隙（スタイロフォーム）を埋設深さ 100 mm で配置し、区間 C には埋設深さ 200 mm で大きさの異なる模擬空隙を配置した。区間 D には、厚さの異なる空隙率 25% 程度の板状のポーラスコンクリートをあらかじめ作製しておき、打設時に配置することでジャンカを模擬した。区間 E、F にはひび割れ幅、およびひび割れ角度が異なる人工ひび割れをエンピシートにより作製した。また、区間 E、F の境界となる H 形鋼の直下に左右の寸法がほぼ均等となるように背面空隙を配置した。表2に埋設物の寸法等を示す。

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位体積重量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AE 減水剤
64.6	49.7	178	276	888	937	0.690

*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

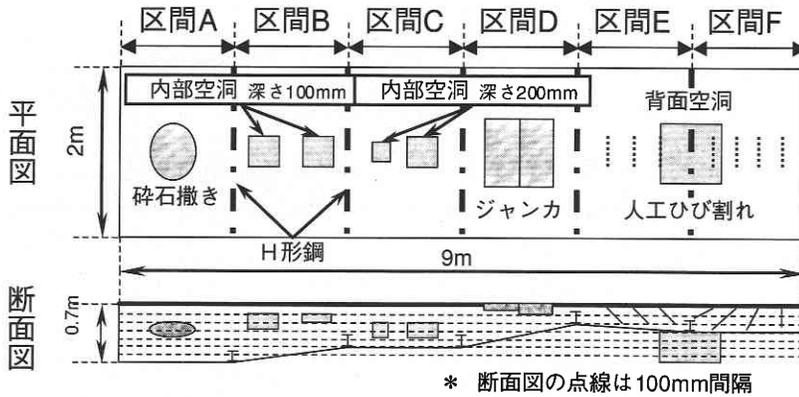


図1 供試体の平面図, 断面図および埋設物配置状況

表2 供試体内部の埋設物一覧

区間	名称	寸法および埋設深さ (mm)
A	砕石撒き	740×640×1200 d=200
B	内部空隙 (100)	400×400×(1100, 200) d=100
C	内部空隙 (200)	400×400 (200×200)×200 d=200
D	ジャンカ	500×1000×(150, 100) ポーラスコンクリート (空隙率25%)
E	人工ひび割れ	ひび割れ幅: 0.1, 0.3, 0.5mm 角度45度
F	人工ひび割れ	ひび割れ角度: 30, 45, 60, 90度 (幅0.3mm)
E~F	背面空隙	800×800×1400 d=300
それぞれの区間の境界に配置	H形鋼	150×150×L2000 d=Φ, 150, 350, 550

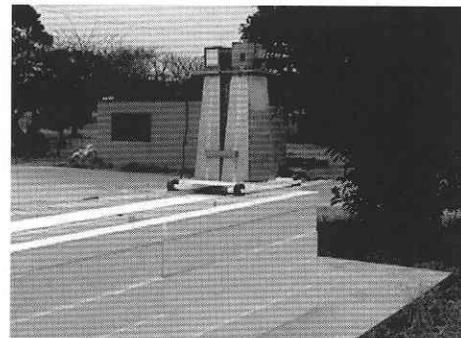


写真1 計測状況

3. 実験概要

本研究では、測定周波数が1 GHz 程度のホーン型アンテナを用いた。また、発泡スチロールの比誘電率が空気の比誘電率に近いことから、発泡スチロールを透過する電磁波が空気を透過していると仮定し、発泡スチロール板を供試体上に積み上げ、その発泡スチロール上で検査装置（アンテナ）を走行させることでコンクリート表面とアンテナとの間隔を保持し、コンクリート内部の欠陥部の探査を行った。実験での計測状況を写真1に示す。なお、本研究では積み上げた発泡スチロール板の高さにアンテナを走行させるための台車の高さを加えた高さを計測高さと呼ぶ。また、計測時の走行速度は人が歩く程度の速度とし、実験者など周囲の障害物の影響を避けるためにアンテナに縛り付けたロープを引っ張ることにより走行させた。まず、埋設物が配置されている供試体中央部を、計測高さ100, 400, 600, 800, 1000 mmの5水準により探査を行い、計測高さが埋設深さの推定精度に及ぼす影響を検討した。

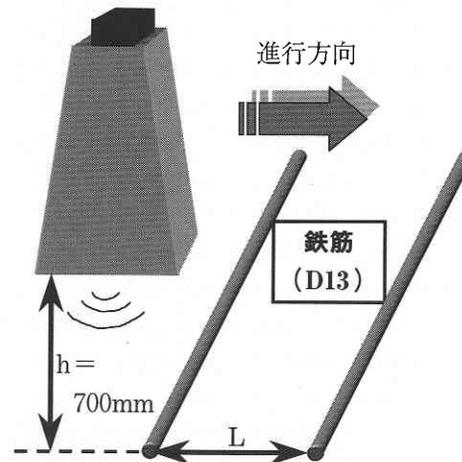


図2 水平分解能の実験方法

続いて、ホーン型レーダアンテナの基礎特性として、図2に示すように2本の鉄筋を水平に配置し、2本の鉄筋を1本と誤って計測してしまう鉄筋の間隔、すなわち水平方向（進行方向）に対してどの程度の分解能を有しているか検討した。また、トンネル全断面のような広大な範囲の計測

を行う場合、複数のアンテナを同時に使用し、計測を行うことが考えられる。そこで、ひとつのアンテナがどの程度の範囲を検出可能であるかを検討するために、図3に示す方法によりホーン型アンテナの検出可能範囲の検討を行った。最後に、複数の測線によって供試体計測を行うと共に、計測結果を容易に理解できるような表示方法についても検討した。

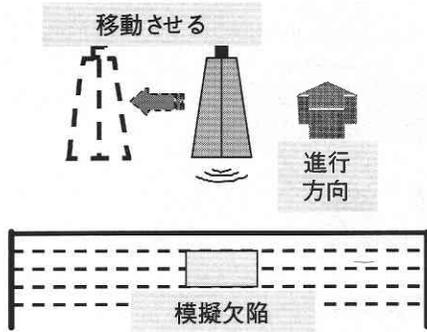


図3 測線間隔に関する実験方法

4. 結果および考察

4.1 各計測高さにおける埋設深さの推定

表3に計測高さを100～1000mmの5水準により供試体中央部を計測し、推定した埋設深さを示す。なお、計測高さ1000mmにおいては、区間B、Cの内部空隙部分のみを計測している。表より、区間B、Cの内部空隙は計測高さ1000mmでも計測が可能であり、推定精度は10%以内であった。しかし、埋設深さが300mm以上である背面空隙、H形鋼の計測は不可能であり、人工ひび割れにおいても同様であった。人工ひび割れに関しては、塩ビシートが埋め込んである状態であり、電磁波がひび割れ部で反射せず、透過してしまったためと考えられる。全体として、少なくとも計測高さが800mmにおいて、埋設深さ200mm程度の内部空隙、ジャンカ、H形鋼を計測することが可能であり、現在、一般的に使用されているダイポール型アンテナで同様に著者が行った結果^{3,4)}に比べて減衰が軽減されており、指向性の向上が大きく寄与していると考えられる。

4.2 ホーン型レーダアンテナの水平分解能

図2で示した方法により、2本の鉄筋の間隔Lを100, 200, 300, 400, 500mmとしたときの計測画像を図4に示す。図より、鉄筋間隔Lが300mm以上であれば、画像中央部の鉄筋検出部分(画像の濃淡のはっきりした部分)に2つの山を判断することが出来る。しかしながら、L=200mmでは2つの山が不明瞭となり、L=100mmでは完全に山が1つになっていることがわかる。このことから、本研究で使用したホーン型アンテナの水平分解能は、200～300mm程度であることがわかった。これは、計測を行う際、複数の欠陥部が存在し、隣り合う欠陥の間隔が300mm以下であった場合は、これらを同一の欠陥と判断する可能性があるということである。

4.3 ホーン型アンテナの検出可能範囲に関する検討

複数のアンテナを同時に使用して計測を行う場合、複数の測線も設定することが必要となる。その際、ひとつのアンテナより検出できる範囲を把握することが重要である。

表3 各計測高さによる埋設深さの推定値

区間	埋設物	埋設深さ	計測高さ(mm)				
			100	400	600	800	1000
A	砕石撒き	200	203	203	225	×	×
B	内部空隙	100	112	81	84	88	103
C	内部空隙	200	216	212	228	232	187
D	ジャンカ	表面近傍	19	3	0	3	×
E-F	背面空隙	300	×	×	×	×	×
E-F	人工ひび割れ		×	×	×	×	×
	H形鋼 浅	150	184	147	159	163	×
	H形鋼 深	350	×	×	×	×	×

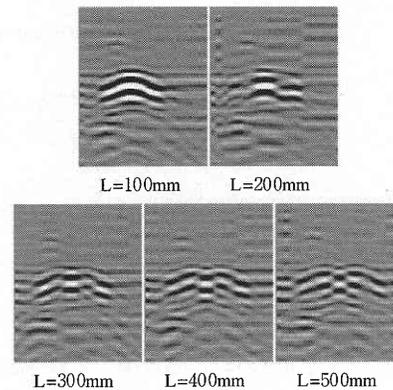


図4 ホーン型アンテナの水平分解能

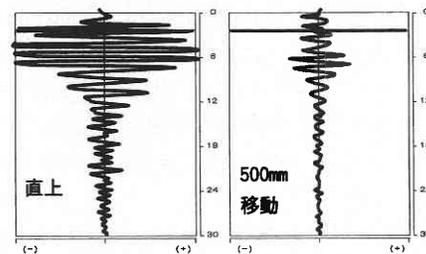


図5 欠陥部直上から測線が移動した場合の計測波形 (縦軸:伝播時間 横軸:振幅)

そこで、図3に示すように、区間B(埋設深さ100mmの内部空隙)において、アンテナの中心を内部空隙直上、進行方向に対して直角方向に500mm移動した位置で計測を行った。図5に計測波形を示す。なお、このときの計測高さは600mm程度である。図より、両者の計測波形の振幅値には大きな差があるが、アンテナを500mm移動させた場合においても、内部空隙を検出することは可能であった。これより、本研究で使用したホーン型アンテナの検出可能範囲は、上記の実験条件では、片側500mm、すなわち、少なくともアンテナの中心から1m程度であることが考えられる。

また、このときの推定深さは、内部空隙直上では116mmであり、500mm移動させた場合は125mmであった。これは、測線が欠陥部の直上でない場合、電磁波が発信されてから受信するまでの経路は、計測高さが一定であ

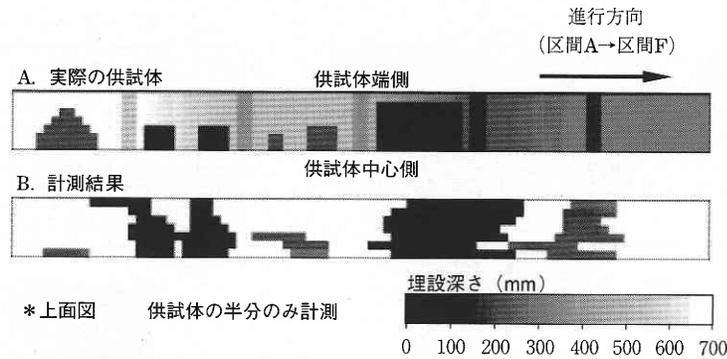


図6 簡易的表示によるコンクリート内部の埋設物推定図
(計測高さ800 mm, 測線ピッチ200 mmの場合)

れば、コンクリート面に対して斜めに入射することになり、欠陥部直上の場合に比べて経路が長くなるために誤差が生じた可能性がある。

4.4 簡易的な計測結果表示方法

本研究では、測線間隔の設定等に関して種々検討を行ったが、供試体計測では供試体寸法を考慮し、供試体中心から片測方向に測線間隔100 mmで計7本の測線を設定して計測を行った。このときの計測高さは、800 mmである。計測結果の処理方法は、計測範囲を100 mm四方のメッシュに区分し、それぞれのメッシュ内における最少の埋設深さ推定値を代表値とし、埋設深さ分布を示した。(図6 (B))なお、図6 (A)は、供試体の設計図より実際の供試体を表現したものである。

図より、計測結果と実際の供試体を比較すると、進行方向に対する欠陥部の位置は同様な傾向を示していることがわかる。一方、検出可能範囲が約1 m程度あることから、供試体端部での計測においても欠陥部が検出され、異なった結果を示していることも挙げられる。しかし、本研究で使用する供試体に比べて、寸法が大きい供試体や実際の構造物等であれば、測線間隔を大きくすることが可能となり、このような誤差は軽減することが可能であると考えられる。

5. ま と め

新たなトンネル検査手法の1つとして、車両搭載式の検査手法が合理性、効率性から望まれており、本研究では、ホーン型レーダアンテナを用いた非接触による電磁波レーダ法によるコンクリート内部の欠陥部探査について検討を行った。

- ① ホーン型レーダアンテナを用いた場合、検査装置と検査対象のコンクリート面との距離が1000 mm離れた場合でも、深さ100～200 mmの内部空隙を検出することが可能であり、このときの深さの推定精度は

10%以内であった。

- ② ホーン型レーダアンテナの水平分解能は、200～300 mmであった。
- ③ ホーン型レーダの検出可能範囲は、計測高さ600 mm、深さ100 mm程度の埋設物であれば、進行方向に対して直角方向に少なくともアンテナ中心から約1000 mmの幅で埋設物の検出が可能であった。
- ④ アンテナが欠陥部直上ではない場合、欠陥部の検出は可能であっても、深さの推定値に誤差が生じる可能性がある。
- ⑤ 一定間隔の複数の測線で計測することにより、実際の供試体と同様の傾向をもつ供試体内部の埋設物の推定を行うことが可能であった。

謝 辞

本研究は、東京大学生産技術研究所魚本研究室で行ったものであり、研究費の一部は、平成12、13年度科学研究費補助金基盤研究(A)(2)課題番号12305029(代表:魚本 健人)によるものである。研究にあたり、多大な御協力頂いた同研究室の皆様、(株)コマツエンジニアリングの吉村氏、金光氏、塩坪氏に感謝致します。

(2001年9月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 朴錫均:レーダ法によるコンクリート背面空隙の非破壊検査, 東京大学 学位論文, 1996.9.
- 2) 魚本健人:「非破壊検査」ではかるコンクリート構造物への応用, 土木学会誌 Vol. 85, 2001. 1, pp. 81-84.
- 3) 宮本一成・勝木太・魚本健人:レーダ法によるコンクリート構造物の内部調査, 日本非破壊検査協会, 鉄筋コンクリート構造物の計測と表面探傷シンポジウム, 2001.1.
- 4) 宮本一成・魚本健人:コンクリート構造物の電磁波レーダによるリモート検査方法に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, vol.23, No. 1, pp. 505-510, 2001.7.