

論文 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

宮本 一成*¹・魚本 健人*²

要旨：現状のトンネル覆工コンクリート内部の検査手法として挙げられる電磁波レーダ法の測定範囲拡大等の効率性向上を目的とし、測定装置をコンクリート表面から最大で 1m 程度離れた非接触状態においてコンクリートの内部性状探査を行った。結果として、測定装置とコンクリート表面の間隔が 0mm の場合に比べ、間隔が大きくなるほど検知能力は低下したが、既存の電磁波レーダ装置では 500mm 程度、指向性が高いとされるホーンアンテナでは 800～1000mm で、埋設深さが 100～200mm の内部空隙や H 形鋼、ジャンカを減算処理することにより検知することが可能であった。

キーワード：覆工コンクリート、非破壊検査、電磁波レーダ、非接触、ホーンアンテナ

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いる。現状の検査手法としては、電磁波レーダによりライニング厚さ、コンクリートの内部性状（空隙やジャンカ）、背面空洞¹⁾を測定する非破壊検査²⁾が挙げられる。しかし、この測定方法は測定装置をコンクリート表面にはば接触させた状態で測定するものであり、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測定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。このため、より実用性に富んだライニングコンクリートの測定方法が求められているのが実情である。

そこで本研究では、列車等に電磁波レーダ装置を搭載して走行と同時に測定可能なシステムを想定し、測定装置のアンテナ部をコンクリート表面から最大で 1m 程度離れた非接触状態におけるコンクリート内部性状の探査を行い、その際のアンテナ部とコンクリート表面との間隔が検知能力に及ぼす影響を検討した。また、既

存の測定装置に比べて指向性が高いとされるホーンアンテナを使用して、既存の測定装置との比較を行い、その適用性の検討も行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究で使用した供試体は、W/C 64.6%、強度 18N/mm²、スランプ 18cm、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。

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

供試体の寸法は、2m×9m、厚さが最大 0.7m 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 1.5m 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間 A～F に区分した。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

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 東京大学教授 東京大学生産技術研究所 工博 (正会員)

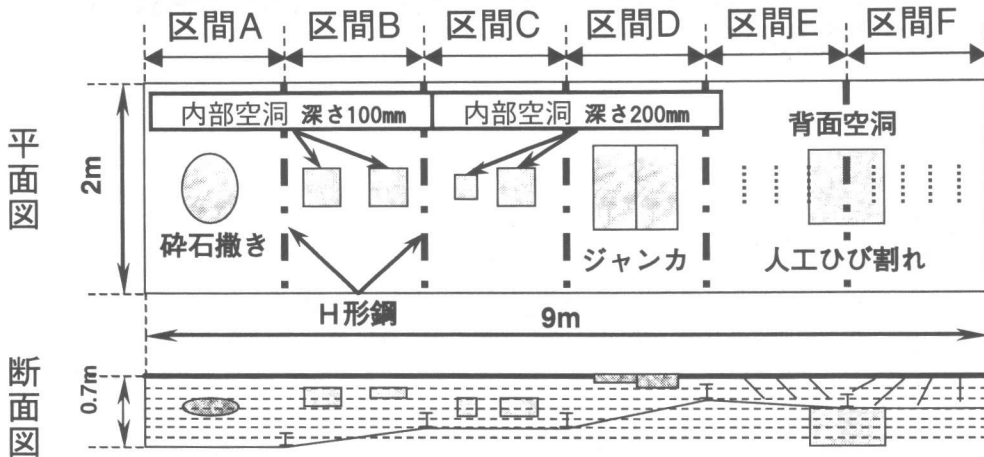


図-1 供試体の平面図、断面図および埋設物配置状況

* 断面図の点線は100mm間隔

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× t200 d=200
B	内部空隙 (100)	400×400× (t100, 200) d=100
C	内部空隙 (200)	400×400 (200×200×t200 d=200)
D	ジャンカ	500×1000× (t50, 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) ひび割れ角度: 30, 45, 60, 90度 (幅0.3mm)
E~F	背面空隙	800×800× t400 d=300
それぞれの区間の境界に配置	H形鋼	150×150× L2000 d=50, 150, 350, 550

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砕石撒きを配置した。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100mmで配置し、区間Cには埋設深さ200mmで面積の異なる模擬空隙を配置した。区間Dには、あらかじめ作製しておいた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にはひび割れ幅が異なるひび割れ、ひび割れ角度が異なるひび割れをエンビ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。

2.2 測定装置

本研究では、写真-1、写真-2に示す既存の汎用型電磁波レーダシステムとホーンアンテナを用いた。既存の電磁波レーダシステムの中心周波数は約800MHz程度であり、アンテナに改造が施されているため、電波の受信時間の経過(深さに対応)と共に増幅率を挙げていくSTCの調整を3段階に変化させることが可能となっている。本研究では、通常時に使用されるレベルを含めて、図-2に示すような3段階の計測レベル(以後、計測レベルI, II, IIIと示す。)で測定を行った。

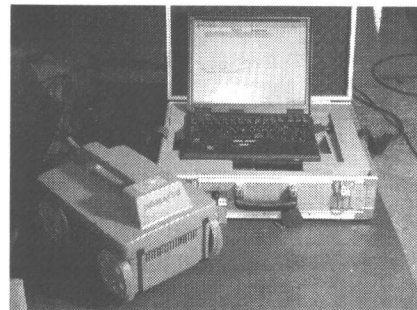


写真-1 既存の電磁波レーダシステム

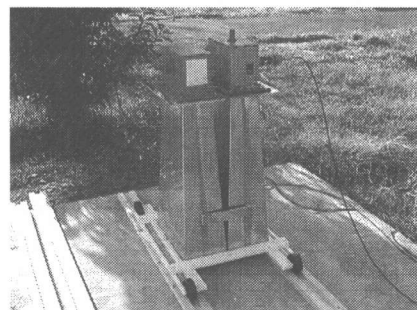


写真-2 ホーンアンテナ

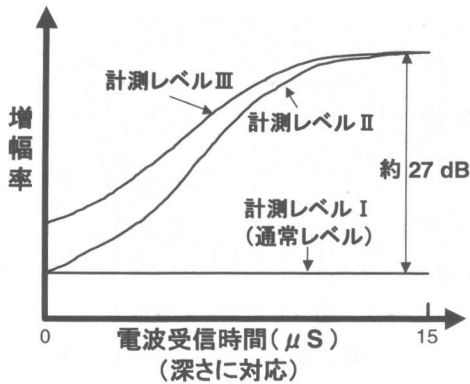


図-2 使用した計測レベル (STC 機能)

一方、ホーンアンテナの中心周波数は 850MHz であり、測定終了後に STC 調整等することが可能なシステムとなっている。

2.3 実験方法

本研究では、発泡スチロールの比誘電率が空気の比誘電率に非常に近いことから、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た。そこで、発泡スチロール板を供試体上に積み上げ、その上で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部との間隔を保持し、計測を行った。また、積み上げた発泡スチロール板の高さにアンテナ部を走行させるための台車の高さを加えたものを計測高さとした。計測高さは、既存レーダシステムでは 0, 100, 300, 500mm の 4 水準、ホーンアンテナでは 100, 400, 600, 800, 1000mm の 5 水準とした。測定状況を写真-3 に示す。なお、アンテナは埋設物が配置された供試体中央部を、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。

3. 結果および考察

3.1 既存のレーダ装置による測定

(1) 計測レベルが検知能力に及ぼす影響

図-3、図-4、図-5 は、計測高さ 0mm において、計測レベルをそれぞれ I, II, III と変化させたときの区間 B における内部空隙を測定した原画像である。図に示すように、それぞれの計測レベルにおいて空隙部分を検知するこ

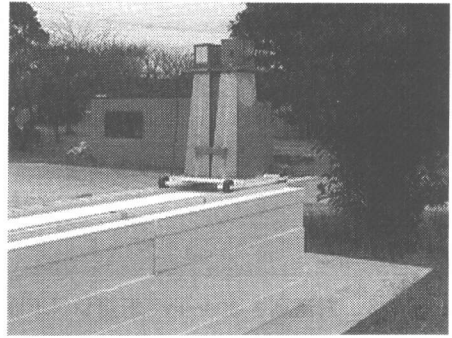
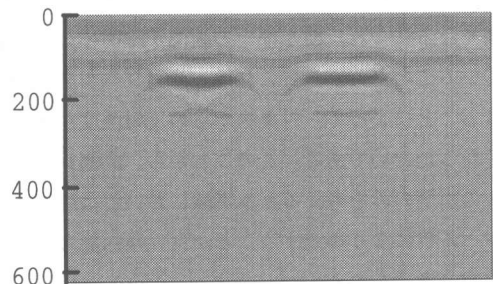
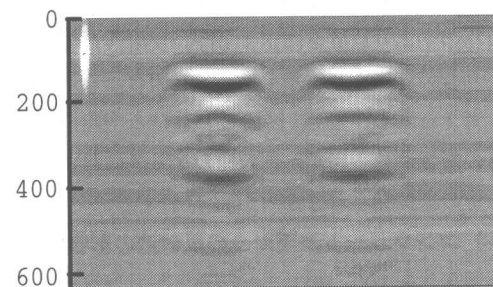


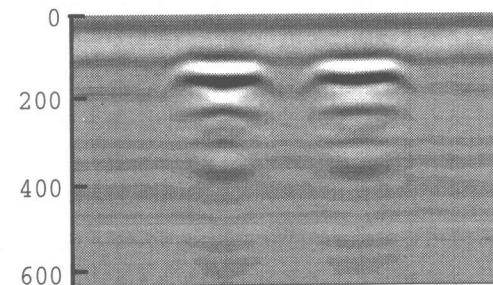
写真-3 測定状況



(mm) 図-3 レベルⅠ 計測高さ 0 mm
内部空隙 (埋設深さ 100mm)



(mm) 図-4 レベルⅡ 計測高さ 0 mm
内部空隙 (埋設深さ 100mm)



(mm) 図-5 レベルⅢ 計測高さ 0 mm
内部空隙 (埋設深さ 100mm)

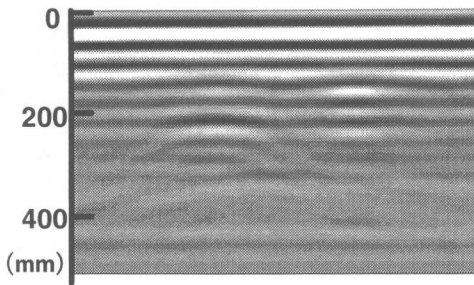


図-6 計測高さ 300mm 計測レベルⅢ
内部空隙 (埋設深さ 100mm)

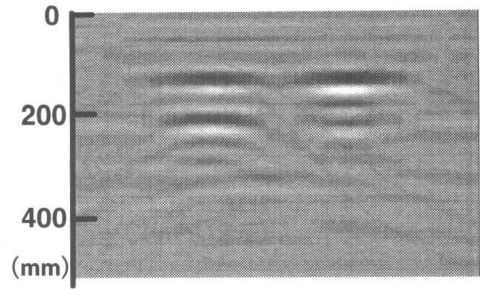


図-7 図-6の減算処理後の
内部空隙 (埋設深さ 100mm) 部分

とは可能であったが、計測レベルがⅠ、Ⅱ、Ⅲと高くなるにつれ、検知部分の画像が鮮明になっていることが分かる。これは、計測レベルを上げることによって、対象物からの反射強度が高くなったためである。このことから、計測レベルの影響のみを考えると本実験においては計測レベルⅢにより測定することが良い検知能力を示すと考えられる。

しかし、計測レベルを上げていくと同時に、画像上部に定常的に帯状に検知されているコンクリート表面からの反射波も鮮明になっており、対象物のかぶり位置を同定する際、反射波形の重なり合い等により誤差を生じる原因になることも考えられる。また、区間 B における空隙の厚さの影響は見られず、この他のケースにおいてもその差は見られなかった。

(2) コンクリート表面からの反射波の影響

計測高さを 100, 300, 500mm とし、コンクリート表面とアンテナとの間隔が開いていく場合、図-6 に示すように、計測レベルを上げる場合よりも顕著にコンクリート表面からの反射波が強くなる傾向にあり、これと対象物からの反射波が重なるために、埋設物を検知することが難しくなった。そのため、測定方向、深さ方向から成るそれぞれの測定データから一定値を減ずることにより、コンクリート表面からの反射波のような、定常的に検出されるデータを除去し、欠陥部のように部分的に検出されるデータを抽出することができる減算処理を行った。図-7 は、図-6 に減算処理を施したものであ

り、多少の表面波が残っているものの、画像における埋設物の位置の判断は容易になっている。

しかし、減算処理により対象物からの反射波の一部も同時に除去してしまい、埋設深さの推定に誤差が生じる可能性があることやアンテナとコンクリート表面との間隔が変化する場合では、減算処理を使用できないことから、今後、表面からの反射波の除去方法の検討が必要であると考えられる。

(3) 計測高さが検知能力に与える影響

表-3 は、計測高さ 0, 100, 300, 500mm で測定を行った結果を示したものである。表中の数値は、それぞれの測定から推定した埋設深さであり、○・△・×の記号は、どの段階で対象物の存在を確認できるかを示したものである。なお、区間 C の埋設深さ 200mm で面積が大小の内部空隙においては、計測高さ 100mm 以上で面積の小さい空隙を検知することが困難であったため、面積の大きい空隙の推定値を示している。また、区間 B の空隙もこれにあわせて同じ寸法、厚さの内部空隙の推定値を示している。

表-3 に示すとおり、計測高さが 0mm の場合、計測レベルに関係なく原画像から比較的良好に検知が可能である。しかし、埋設深さ 350mm 以上の H 形鋼や区間 E, F の人工ひび割れ、背面空洞に関しては検知することが不可能であり、どの計測高さにおいても同様であった。この原因として、H 形鋼は、埋設深さが 350mm 以上と深い位置に配置していたことから、電磁波の減衰が起因していると考えられる。

表-3 既存レーダシステムによる計測高さ別の測定結果一覧表

区間	計測高さ 計測レベル		0mm			100mm			300mm			500mm		
	埋設物	埋設深さ	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
A	碎石撒き	200	×	195 ○	188 ○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
B	内部空隙	100	101 ○	118 ○	109 ○	101 △	112 ○	95 ○	129 △	134 △	169 △	×	229 △	211 △
C	内部空隙	200	×	237 △	237 ○	×	185 △	185 △	×	×	×	×	×	×
D	ジャンカ	表面近傍	21 ○	19 ○	11 ○	35 △	24 △	21 △	72 △	80 △	92 △	142 △	145 △	150 △
E~F	背面空隙	300	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
E~F	人工ひび割れ	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	H形鋼 浅	150	203 ○	185 ○	224 ○	174 △	172 ○	166 ○	×	193 △	234 △	180 △	174 △	258 △
	H形鋼 深	350	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○：原画像から検知可能 △：減算処理画像から検知可能 ×：検知不可能

これは、使用した供試体のコンクリート打設日から本装置での測定日までの日が浅く、コンクリート中の含水量が多かったことが大きく影響していると考えられる。また、人工ひび割れに関しては、エンビシートを利用したため、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。背面空洞は、H形鋼直下に配置されていることから、電磁波がH形鋼で全反射し、検知が不可能であったと考えられる。

計測高さが100mm以上では、碎石撒きの検知が完全に不可能になり、埋設深さ200mmの内部空隙の検知もほぼ不可能になっているが、埋設深さ100mmの内部空隙、埋設深さ150mmのH形鋼、ジャンカにおいては、コンクリート表面からの反射波が顕著なために減算処理を必要とするが、検知が可能であった。埋設深さの推定については、計測高さが100mmまで、もしくは計測レベルがII、IIIである場合比較的精度の良い埋設深さの推定が可能であり、特に埋設深さ100mmの内部空隙の精度が良好であった。一方、計測高さが300mm以上では推定精度は悪く、コンクリート表面からの反射波が大きく影響していることが考えられる。

全体的な測定結果として、最大で計測高さ500mmにより、測定画像から埋設物の存在を検知することが可能であった。しかし、測定波形観察により埋設物から反射してきた波形の立ち上がり位置を検知することは、減算処理後に残存したコンクリート表面からの反射波に阻害され、非常に難しい状態であった。このため、対象物の存在のみを検知することが目的である

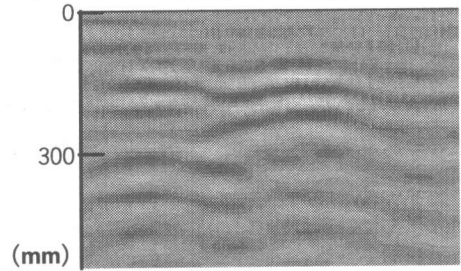


図-8 計測高さ1000mm
内部空隙埋設深さ100mm

場合には、計測高さが500mmであっても検知が可能であるが、測定波形から対象物のかぶり位置の推定など明確な位置を判断するには計測高さは100mm程度までが限界と考えられる。

3.2 ホーンアンテナによる測定

既存の電磁波レーダシステムと同様の実験方法により、計測高さ100, 400, 600, 800, 1000mmで測定を行った。図-8, 図-9は、それぞれ計測高さが1000mm, 400mmのときの測定画像であり、表-4は測定結果を示したものである。

ホーンアンテナによる測定においても、既存の測定システムと同様にコンクリート表面からの強い反射波が生じたため、全ての測定結果において減算処理を行ったが、表-4に示すように背面空洞、人工ひび割れ、埋設深さ350mm以上のH形鋼を除いて、計測高さ800mmまではほぼ全ての埋設物の検知が可能であった。特に内部空隙においては、埋設深さに関わらず計測高さ1000mmまで検知が可能であり、既存測定システムの2倍の計測高さにも関わらず、良好な検知能力を示している。また、既存の測定シ

表一 4 ホーンアンテナによる計測高さ別測定結果一覧表

区間	埋設物	埋設深さ	計測高さ(mm)				
			100	400	600	800	1000
A	碎石撒き	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	×	×	×	×	×

○：原画像から検知可能 △：減算処理画像から検知可能 ×：検知不可能

ステムでは非接触状態において検知が困難であった区間 A の碎石撒きも検知している。これらは、既存の測定システムに比べて局所的に電磁波を放射し、多くのエネルギーをコンクリート内に送り込んでいるためであり、ホーンアンテナの指向性が高いことを示している。この他に、背面空洞など検出不可能であった埋設物に関しては、既存の測定システムと同様な原因が挙げられる。

埋設深さの推定に関しては、計測高さによる影響はほとんど見られず、既存の測定システムの測定精度と比べると、精度は良好であった。これは、既存の測定システムに比べて送信する電磁波の指向性が高いことから、埋設物からの反射波の減衰は少なく、波形の振幅は大きくなっており、波形観察による埋設深さの推定誤差が減少したためと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 既存のレーダ測定システムにおいて、計測レベルを変化させて測定を行った結果、計測レベルが高いほど測定画像が鮮明になるが、同時にコンクリート表面からの反射波も大きくなることがわかった。
- (2) 既存のレーダ測定システムは、コンクリート表面とアンテナの間隔が 500mm 程度離れても、コンクリート内の埋設深さ 100~200mm の空隙や H 形鋼を測定画像から検知することが可能であった。
- (3) コンクリート表面からの反射波は、対象物

からの反射波と重なることがあり、波形観察において誤差を生じさせる原因になることが考えられる。

- (4) 既存レーダ測定システムの埋設深さの推定精度は、計測高さ 100mm までは良好であった。一方、ホーンアンテナによる測定では、計測高さによる推定精度の変化はほとんど見られなかった。
- (5) ホーンアンテナを用いた場合、コンクリート表面とアンテナの間隔が 800~1000mm であっても、埋設深さ 100~200mm の空隙や H 形鋼、碎石撒きを検知する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、研究費の一部は運輸設備整備事業団の運輸分野における基礎研究推進制度（平成 11 年度補正予算）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)竹中工務店の米澤氏、大野氏、岡田氏、(株)竹中土木の安藤氏、および(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。

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