

シリーズ/知っておきたい・建設マネジメントAtoZ

# 社会インフラを取り巻く 社会構造の変化とコンクリート構造物の 長寿命化と維持管理

〔その18 超音波トモグラフィ・非破壊試験装置を用いた  
コンクリート構造物の調査事例〕

坂本 浩之<sup>\*1</sup> 三上 創史<sup>\*2</sup> 牛島 栄<sup>\*3</sup>

\*1 (株)地球システム科学 開発事業部 部長 技術士(総合技術監理部門,  
建設部門)

\*2 同 上 課長

\*3 青木あすなろ建設(株) 技術研究所 所長 工博 技術士(総合技術監理部  
門)

THINKING ABOUT THE MAINTENANCE MANAGEMENT AND  
MAKING OF A SOCIAL INFRASTRUCTURE LONG-LIVED IN THE  
CHANGE IN A SOCIAL STRUCTURE –PART18 INVESTIGATION  
CASE WITH CONCRETE STRUCTURE WHICH USES  
“SUPERSONIC WAVE TOMOGRAPHY AND NONDESTRUCTIVE  
TESTING DEVICE” (by Hiroyuki SAKAMOTO, et al.)

## 1. はじめに

近年、我が国においては高度経済成長期に建設された土木・建築構造物等の社会インフラの老朽化対策が急務となっており、時代のニーズに対応した維持管理・更新に係る効率的・効果的な技術が求められている。維持管理・更新は、一般的には①調査・点検、②診断・評価、③劣化予測、④補修・補強、⑤更新の流れで行なわれる。コンクリート構造物の調査・点検では目視点検が基本となっているが、予防保全の観点から変状が発生する前に兆候を明らかにするために、また調査結果を可視化、定量化することで劣化の進展が比較しやすい等の理由から非破壊試験の必要性はますます高まってきている。一方、コンクリートの非破壊試験には様々な方法があり、得られる測定結果の精度や評価、適用性に関する技術的な課題も多くあり、新たな非破壊試験方法も開発されている。

本稿では、この一例として「超音波トモグラフィ・非破壊試験装置」（以下、試験装置と略）を用いて行った「RC床版供試体の鉄筋、埋設管（波付硬質ポリエチレン電線管、厚鋼電線管）、厚さ探査」、および「トンネル覆工コンクリートの鉄筋、厚さ探査」の調査事例から、この試験装置の適用性と今後の課題を紹介する。

## 2. 技術概要

### 2-1. 技術の特徴

この試験装置は、超音波トモグラフィ A1040MIRA と呼ばれる機種である。主にコンクリート内部の配筋や部材厚さ、配管や空洞欠陥等を検知することができる。装置には超音波の横波を発受振できるアレイセンサを48個備えており、これをコンクリート表面に押し当て、測定ボタンを押すと自動計測が行われ、数秒で測定・解析を行い、現場で即時に解析結果を試験装置に2次元トモグラフィ画像とし表示することができる。また、複数の2次元トモグラフィデータから専用の解析ソフトを用いて3次元トモグラフィ画像を生成することが

できることから、コンクリート内部の状態を可視化してわかりやすく推定することができるのが大きな特徴である。

コンクリートの調査・点検のための非破壊試験法の比較を表1に示す。使用する波動の種類によって弾性波と電磁波による方法に大別される。使用周波数帯域によって、超音波、衝撃弾性波、打音、電磁波レーダ、電磁誘導に分類され、この試験装置は、超音波に分類される。それぞれの試験法は、検査・点検項目に対する目的や適用性に違いがある。

例えば、配筋状態とかぶり厚さに関して、従来の衝撃弾性波、打音による方法は適用できない。また、電磁波による方法は、鉄筋の上筋の配筋状態とかぶり（厚さ）（200mm程度まで）の適用は可能であるが、下筋等がある多段配筋では上筋によって電磁波が遮られる場合は適用できない。これらの課題に対して、超音波トモグラフィは、48個のアレイセンサを用いた測定・解析技術によって、電磁波では適用が難しかったかぶり（厚さ）が200mmを超える下筋のある多段配筋においても、適用が可能であり、適用可能深さは、配筋状態にも影響を受けるが電磁波に比べると2.0mと非常に大きい。

表1 コンクリート非破壊試験法の比較

分類	検査・点検項目	非破壊試験					
		弾性波				電磁波	
		超音波		衝撃弾性波	打音	電磁波レーダ	電磁誘導
		超音波トモグラフィ	超音波				
使用周波数帯域	横波 25kHz - 85kHz	2MHz、 5MHz	80Hz - 35kHz	20Hz - 20kHz	1600MHz - 2600MHz	20kHz - 40kHz	
適用可能深さ	2.0m	1m	2.5m	0.3m	0.2m	0.1m	
概観	施工不良(ジャンカ、コールドジョイント、内部空洞、配管)	○	○	○	○	○	○
検査	配筋状態	○ 多段配筋可				○	○
	かぶり厚さ	○ 多段配筋可				○ 上筋可	○ 上筋可
	コンクリート品質	強度	○	○	○		
		緻密性	○※	○	○		
部材厚さ・内部欠陥	○	○	○	○	○		
点検	ひび割れ・はくり	○	○	○	○		

※ 超音波速度(横波)の速度による表層の緻密性評価が可能。

出典 大成出版社「非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル」により作成



写真1 48個のアレイ型センサー



図1 48個のアレイセンサーによる探査原理

## 2-2 探査原理

本システムは、超音波横波を用いた反射法による探査原理である。システム本体の下面を写真1に示す。下面には、48個(4行×12列)のアレイセンサーが配置されており、探査方法は、試験装置をコンクリート表面に押し当て、測定ボタンを押して行う。図1に試験装置の探査原理を示す。

先ずCH1から超音波横波が発振され、反射波がCH2~12で受振される。次にCH2から発振し、CH3~12で受振される。順次、発受振を繰り返して66通り(11+10+...+2+1)、1056経路(66×4×4)の反射波信号を受振する。

アレイセンサーから発振された超音波横波は、音響インピーダンスが異なる面、例えば鉄筋、配管、空洞、ジャンカ、はく離、ひび割れ、躯体端面で反射する。

1056経路の超音波の発受振を瞬時にやり、検知した反射波の時間と設定された横波伝搬速度から試験装置の解析ソフトによって、2次元トモグラフィ画像として、試験装置の画面に表示される。RC床版上面から行った事例を写真2に示す。試験装置の中央の画面に解析結果が2次元トモグラフィ画像として表示される。



写真2 2次元トモグラフィ画像例

表 2 本システムの仕様

外形寸法・重量	380×130×140mm 4.2 kg
センサー数	48CH:4行×12列
センサー面寸法	330×75mm
センサー間距離	長辺 30mm 短辺 25mm
最小探査深度	50mm
最大探査深度	2000mm
電源方式	内部充電電池
動作温度環境	-10℃～+50℃

製品名 A1040 MIRA、製造会社 Acoustic Control Systems, Ltd.

表 3 本システムの設定諸元

色感度	0～48dB
アナログ感度	0～60dB
発信回数	0.5～5.0
発信間隔	0～50ms
使用周波数設定	25kHz～85kHz ステップ 5kHz
自動伝搬速度設定	0n・0ff
遅延時間	0～50 μ S
表示画質	平均・低・高
A-スキャン種別選択	Off・塗り潰し有・無

RC 床版上面から行った事例を写真 2 に示す。試験装置の中央の画面に解析結果が 2 次トモグラフィ画像として表示される。

### 2-3. システム機器仕様

本システムの仕様を表 2 に示す。試験装置は、コンパクトかつ軽量であり作業が容易である。最大探査深さは無筋コンクリートの場合を示しており、鉄筋コンクリートの場合は、鉄筋の配筋の状態（かぶりや間隔、段数）に依存して探査深度は 2000 mm よりも小さくなる。表 3 に本システムの設定諸元を示す。

探査目的に応じて、使用周波数の設定は、25～85kHz の範囲で 5kHz 間隔で任意に設定する。また、



写真 3 RC 床版（ポリエチレン電線管 φ65 mm）供試体

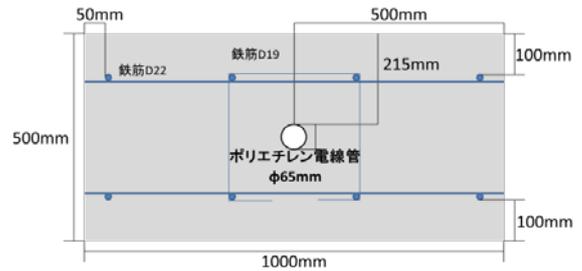


図 2 RC 床版・断面図（ポリエチレン電線管 φ65 mm）

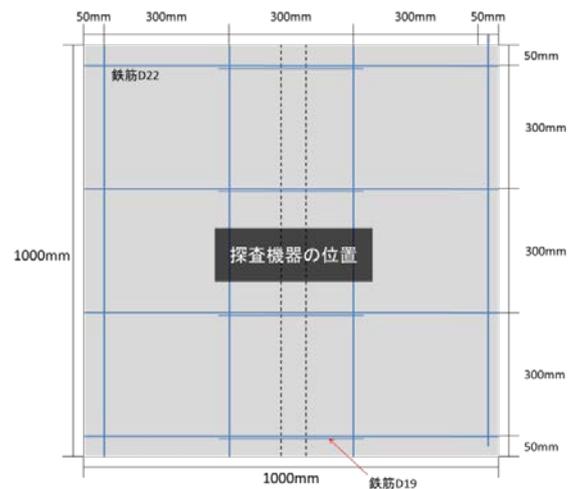


図 3 RC 床版・平面図（ポリエチレン電線管 φ65 mm）

横波伝播速度の設定は、コンクリート厚さが既知の場合は、解析結果から逆算して設定する。一方、厚さが未知の場合は、自動伝搬速度設定によって自動的に横波伝搬速度を設定することができる。

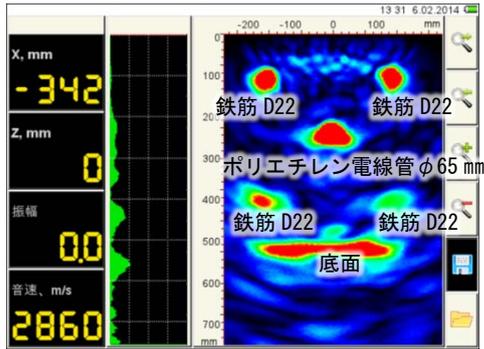


図4 RC床版(ポリエチレン電線管φ65 mm)・解析画像



写真4 RC床版・厚鋼電線管φ113.4 mm供試体

### 3. 調査事例

#### 3-1. RC床版の電線管、鉄筋、厚さ探査

##### (1) 波付硬質ポリエチレン電線管φ65 mm供試体

探査位置は、RC床版のセンターで、電線管に直交する向きとして、伝搬速度の設定は、自動設定で行った。探査面は、機器本体の長手向きの鉛直断面になる。RC床版の供試体を写真3に、断面を図2、平面を図3に示す。尚、すべての供試体のコンクリート呼び強度は $24\text{N/m}^2$ である。

解析結果を図4に示す。使用周波数は50kHz、伝搬速度は2830m/secである。RC床版の上・下鉄筋、波付硬質ポリエチレン電線管、床版底面の反射が明瞭に検知できた。電線管に平行する上・下の主筋は、かぶり100mm、鉄筋間隔300mm、ポリエチレン電線管かぶり215mmであり、解析画像と概ね整合している。直径は、上筋では下筋に比べて濃い色の示す範囲が実際の鉄筋径より若干大き

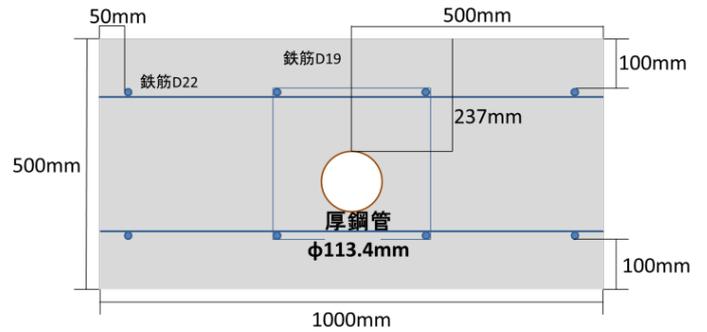


図5 RC床版・断面図(厚鋼電線管φ113.4 mm)

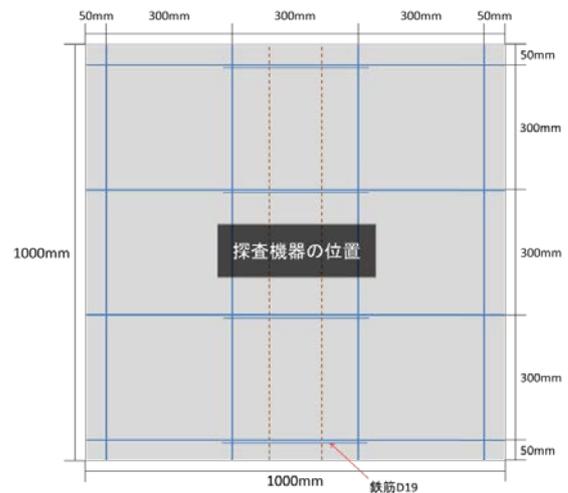


図6 RC床版・平面図(厚鋼電線管φ113.4 mm)

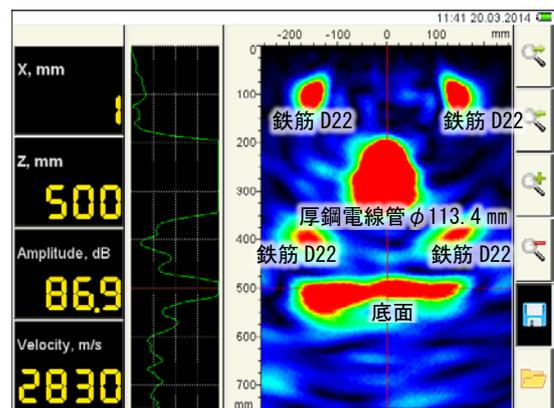


図7 RC床版(厚鋼電線管φ113.4 mm)・解析画像

く表示された。ポリエチレン電線管φ65 mmは、縦方向には良く整合したが、横方向には若干大きく楕円形に表示された。波付管であることによる反射の乱れの影響と推察できる。床版厚さは500mmで良く整合した。



写真5 RC床版・厚鋼電線管φ33.3mm供試体

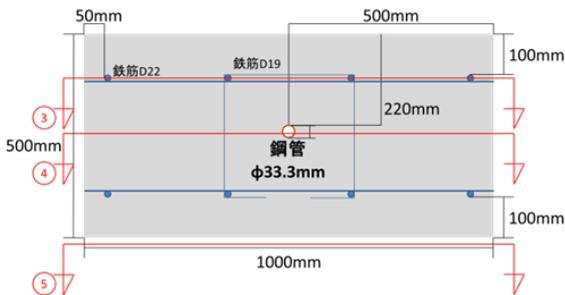


図8 RC床版・パターンA断面図  
(厚鋼電線管φ33.3mm)

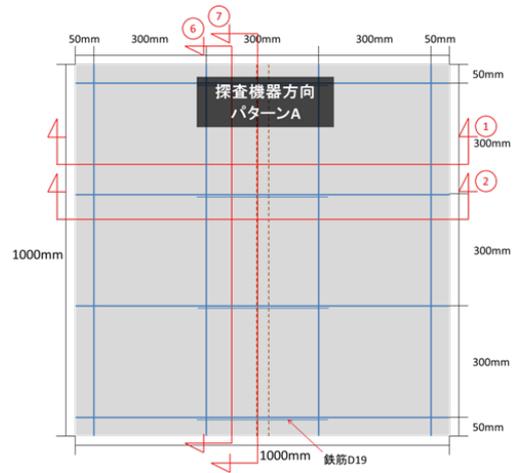


図9 RC床版・パターンAの平面図  
(厚鋼電線管φ33.3mm)

3次元解析画像を生成するために、RC床版上面に縦、横に5cm×5cmの間隔でマス目を罫書き、各マス目の交点に試験装置の左側上のセンサを基準として縦方向、横方向に5cm間隔で順次測定を行った。使用周波数は50kHz、伝播速度は2510m/secである。RC床版写真を写真5に、パターンAの断面図、平面図をそれぞれ図8、9に示す。3次元解析画像位置を図10に示す。保存したデータをパソコンに読み込み、解析ソフトを用いて、5cm間隔の各B-scanデータから、それぞれC-scan、D-scanの解析画像を作成した。

パターンAにおける3次元解析画像を図11に示す。この画像から、任意位置の前述した各scan解析画像を作成することができる。図12に供試体センターでの各scanの2次元解析画像を示す。図13に各断面番号別に各scanの解析画像を示す。

パターンAでは、RC床版の上・下鉄筋、厚鋼電線管、床版底面の反射が明瞭に検知できた。電線管に平行する上・下の主筋は、かぶり100mm、鉄筋間隔300mm、厚鋼電線管かぶり220mmであり、解析画像と整合している。鉄筋の径は、上筋では下筋に比べて濃い色の示す範囲が実際の鉄筋径より若干大きく表示された。厚鋼電線管φ33.3mmは、ほぼ正円形となり整合した。床版厚さは500mmで実際と良く整合した。

## (2) RC床版・厚鋼電線管φ113.4mm供試体

探査位置は、RC床版のセンターで、電線管に直交する向きとし、伝搬速度の設定は自動設定で行った。探査面は機器本体の長手向きの鉛直断面になる。RC床版写真を写真4、断面を図5、平面を図6に示す。

解析結果を図7に示す。使用周波数は35kHz、伝搬速度は2830m/secである。RC床版の上・下鉄筋、厚鋼電線管、床版底面の反射が明瞭に検知できた。電線管に平行する上・下の主筋は、かぶり100mm、鉄筋間隔300mm、厚鋼電線管かぶり237mmであり、解析画像と概ね整合している。直径は、上筋では下筋に比べて濃い色の示す範囲が実際の鉄筋径より若干大きく表示された。厚鋼電線管φ113.4mmは、正円形ではないが概ね整合した。床版厚さは500mmで良く整合した。

## (3) RC床版・厚鋼電線管φ33.3mm供試体

探査位置は、電線管に直交する向きをパターンA、平行する向きをパターンBとして2方向で行った。

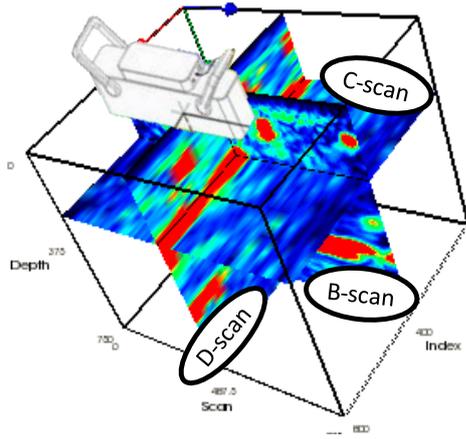


図 10 3次元解析画像位置

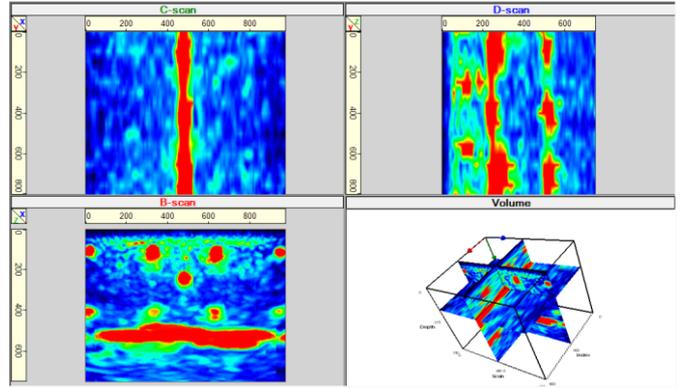


図 12 RC床版・パターンAの2次元解析画像

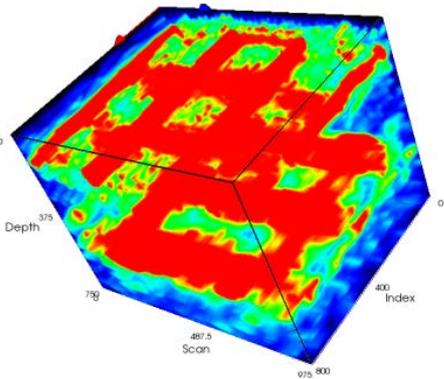


図 11 RC床版・パターンAの3次元解析画像

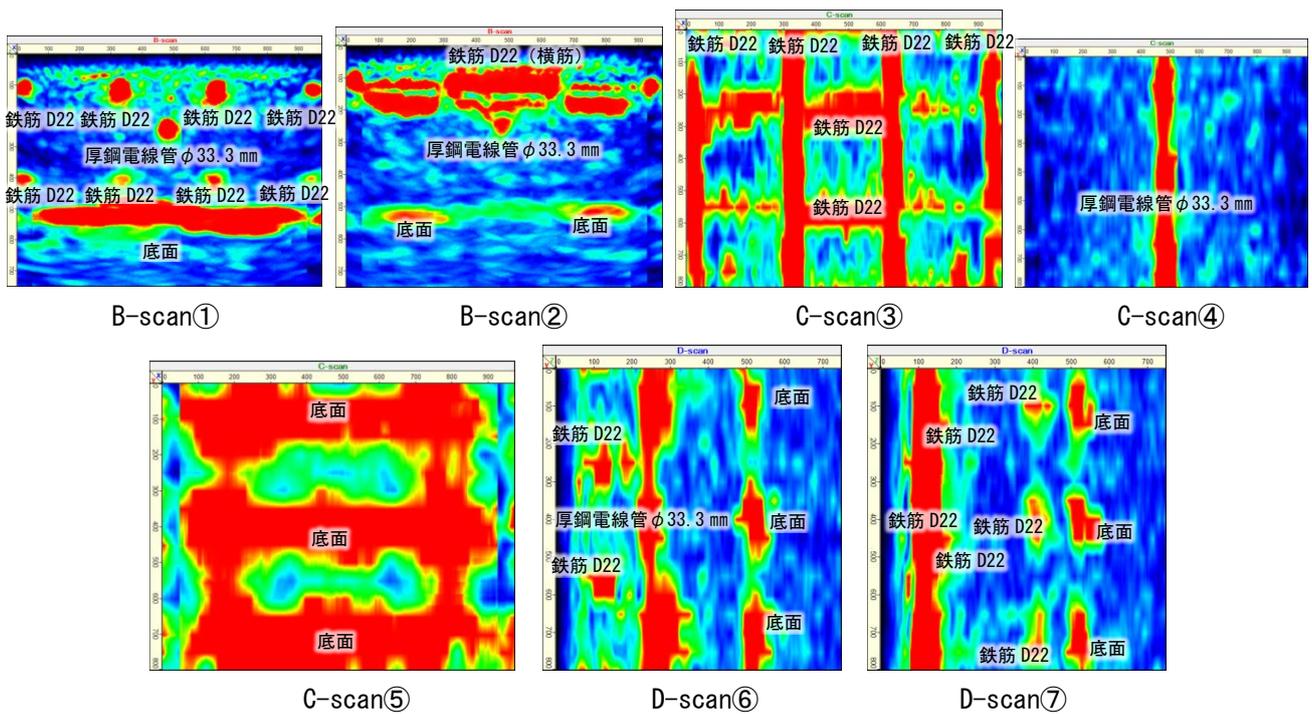


図 13 パターンAの各スキャンによる解析画像

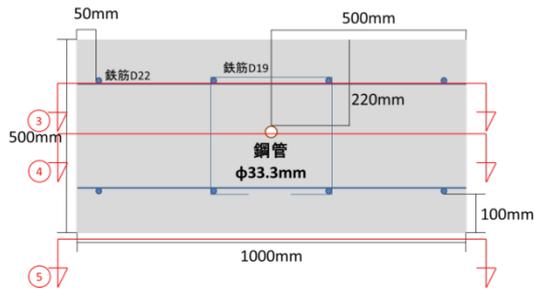


図-14 RC床版・パターンBの断面図  
(厚鋼電線管φ33.3mm)

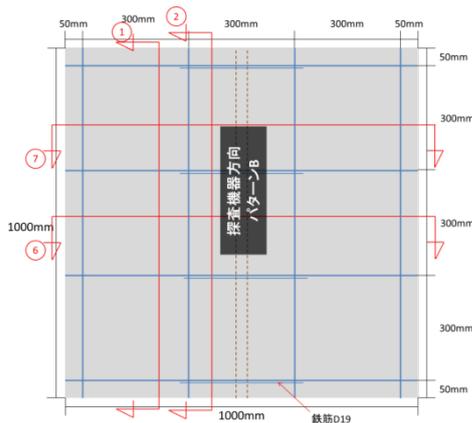


図-15 RC床版・パターンBの平面図  
(厚鋼電線管φ33.3mm)

パターンBの断面図、平面図をそれぞれ図14、15に示す。3次元解析画像位置を図16に示す。パターンAと同様の処理を行いB-scanデータから、それぞれ、C-scan、D-scanの解析画像を作成した。

3次元解析画像から、パターンAと同様の処理を行い各scan解析画像を作成した。図17に供試体センターでの各scanの2次元解析画像を示す。図18に各断面番号別に各scanの解析画像を示す。

パターンBでは、パターンAと同様にRC床版の上・下鉄筋、厚鋼電線管、床版底面の反射が明瞭に検知できたが、3次元トモグラフィから得られた解析画像では主筋と厚鋼電線管は試験装置が埋設管に直交するパターンAにおける解析画像の方がより明瞭であった。

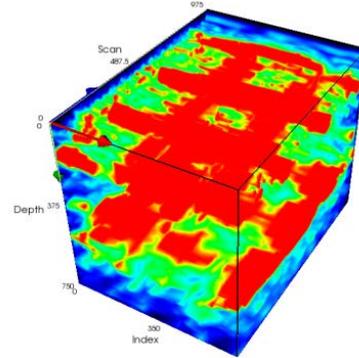


図-16 RC床版・パターンBの3次元解析画像

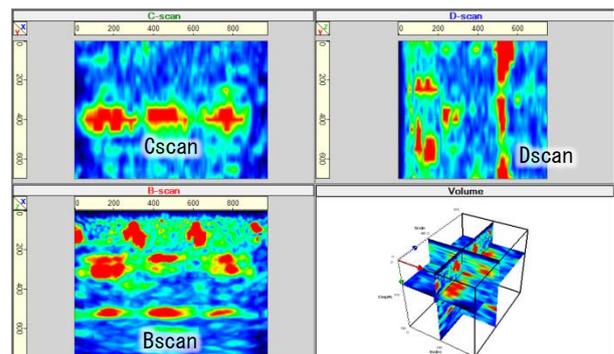


図-17 RC床版・パターンBの2次元解析画像

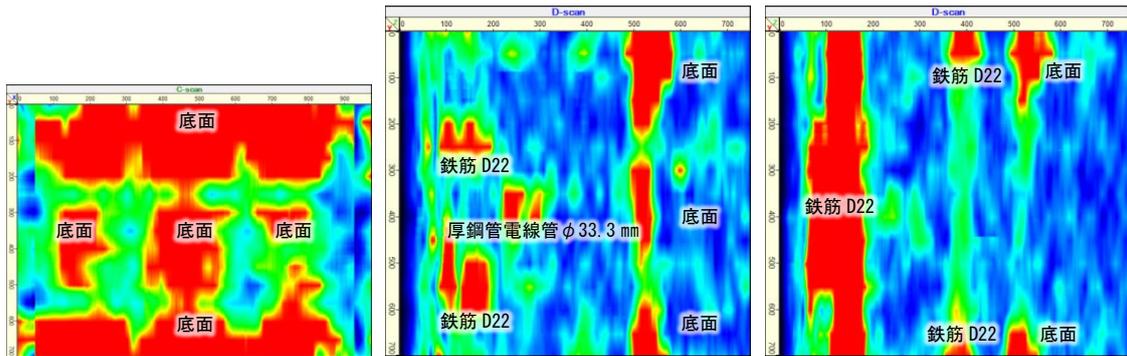
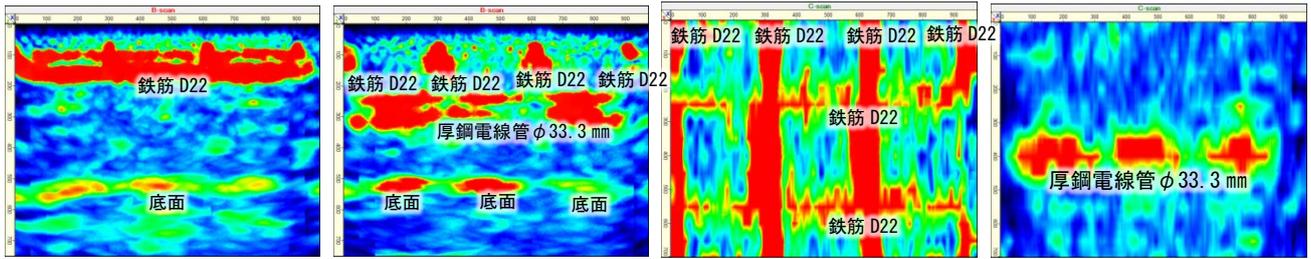


図-35 RC床版・B解析画像(D-scan⑦)



写真6 側壁部・覆工コンクリート探査の探査

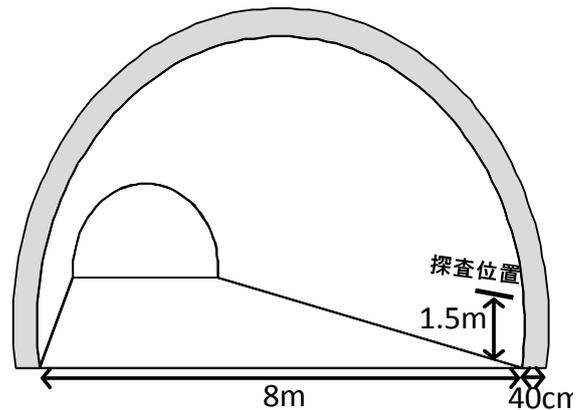


図19 側壁部・探査位置

### 3-2. トンネル覆工コンクリートの鉄筋、かぶり(厚さ)探査

#### (1) 側壁部での探査

探査位置は、トンネル側壁部の高さ 1.5m の個所、伝搬速度の設定は、自動設定で行った。試験装置は、トンネル縦断方向とした。探査面は、試験装置の長手向きの鉛直面になる。対象トンネル覆工の様子を写真 6 に、探査位置を図 19 に示す。

解析結果を図 20 に示す。使用周波数は 50kHz、伝搬速度は 2510m/sec である。トンネル横断面方向に内面より鉄筋 D16、かぶり 150 mm、鉄筋間隔 250 mm に配置された鉄筋と覆工コンクリート背面厚さ 400 mm からの反射波が明瞭に検知できた。また、背面反射の 2 往復反射波が 800 mm 深度に検知された。背面が気中にある場合、波動のエネルギー減衰が少なく、また多重反射の経路上に鉄筋による反射・遮断が少ないことによって多重反射が

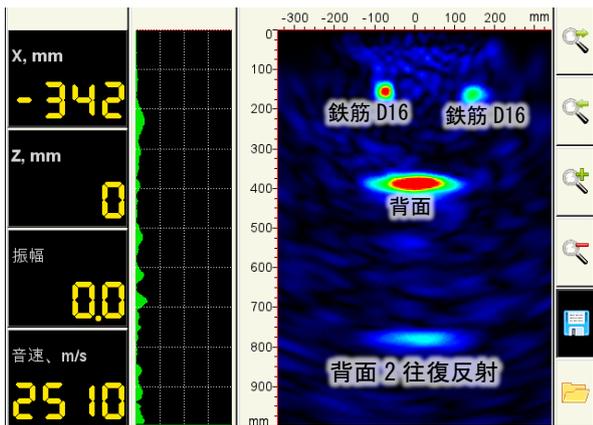


図 20 側壁部・解析画像

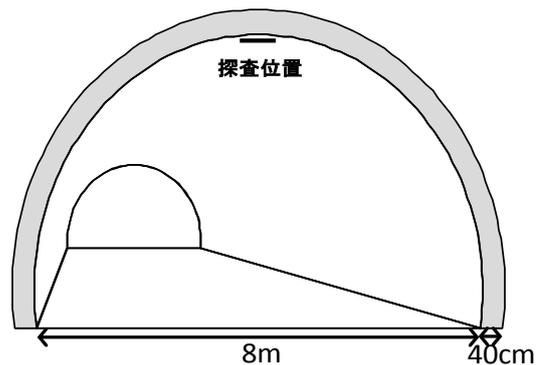


図 21 探査位置図



写真 7 トンネル覆工コンクリート全景

生じたと考えることができる。仮に背面が地山と密接している場合、グラウト注入がある場合は、波動エネルギーが透過することで減衰し多重反射が生じにくいことから、多重反射の有無に着目することで背面空洞の状態を把握できる可能性があることが示唆された。

## (2) 頂部での探査

探査は、トンネル頂部で、横波伝搬速度の設定は、自動演算モードで行った。探査機器本体はトンネル横断方向とした。探査面は、機器本体の長手向きの鉛直面になる。対象トンネル覆工コンクリートのようすを写真 7 に、探査位置を図 21 に示す。解析結果を図 22 に示す。使用周波数は 50kHz、

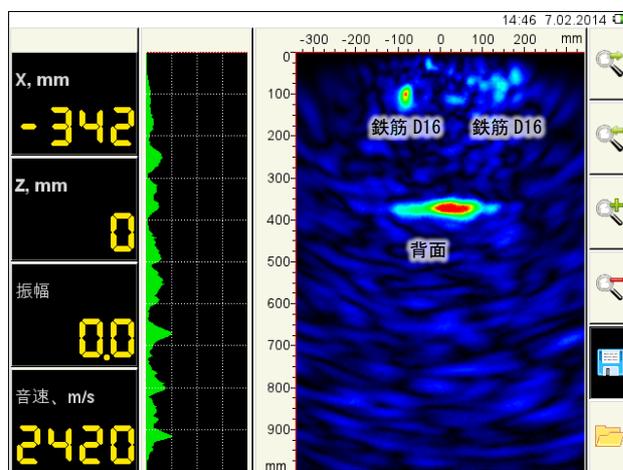


図 22 頂部・解析結果（使用周波数 50kHz）

横波伝搬速度は 2420m/sec である。トンネル縦断面方向に内面より鉄筋径 D16、かぶり 100 mm、鉄筋間隔径 250 mm に配置された鉄筋と覆工コンクリート背面・厚さ 380 mm からの反射波が検知できた。頂部の鉄筋のかぶりは、側壁部 150 mm に比べて 50 mm 小さくなった。打設時の鉄筋の沈み込みによるものと推察される。右側の鉄筋は、スペーサーや組み立て鉄筋、横断方向の主鉄筋の影響による反射と推察される。頂部のコンクリート部材厚さは、自動設定で得られた伝搬速度が 2420m/sec であり、側壁部 2510m/sec と比べると約 4% 遅くなっている影響で、厚さが 20 mm 小さく解析されたと推察される。

## 4. 考察とまとめ

### (1) RC床版供試体の埋設管、鉄筋、かぶり（厚さ）探査

RC床版（1×1×0.5m、ダブル配筋 D22@300）の内部にある埋設管の材質、直径、かぶりの異なる3種類の供試体で本試験装置を用いて床版上面から探査を行った。

探査の結果、埋設管である波付硬質ポリエチレン電線管 65 mm、厚鋼電線管 113.4mm及び33.3mm、鉄筋 D22・ピッチ 300 mmダブル配筋、かぶり 100 mm、床版厚 500mm に対して概ね適切にトモグラフィ画像として表示できた。使用周波数は、35kHzの方が50kHzに比べて下筋の検知には有利であった。配管直径は、鋼管の方がポリエチレン管に比べ良く整合した。ポリエチレン管は波付管であるので反射面が一樣でないこと、配管周辺のコンクリート充填具合が鋼管と比較して一樣でないなどの要因が考えられる。床版底面の位置精度は、超音波横波の発振周波数は50kHzの方が35kHzに比べて良い傾向が見られた。

3次元トモグラフィ解析を行うことで、任意位置での断面図を作成でき、コンクリート構造物の内部の情報をより多く得ることができ有益であった。

### (2) トンネル覆工コンクリートの鉄筋、かぶり（厚さ）探査

実大トンネル覆工コンクリート供試体（直径 8m、壁厚 40 cm）の鉄筋、かぶり（厚さ）の探査を側壁部及び頂部で行った。

探査の結果、側壁部、頂部にて、鉄筋 D16、壁厚 400 mm に対してトモグラフィ画像を適切に表示することができた。頂部の鉄筋は、側壁部に比べてやや不明瞭になったが、スペーサーや組み立て鉄筋、横断方向の主鉄筋の影響による反射と推察される。

## 5. おわりに

社会インフラの維持管理・更新のための調査・点検技術として、コンクリート構造物を対象とする超音波トモグラフィ非破壊試験装置を用いた探査事例により、本試験装置の適用性について一定の有効性を検証することができたと考える。

今後の課題として、①ひび割れやジャンカ、コールドジョントの検知、②鉄筋コンクリートの配筋、かぶり深さや鉄筋コンクリート厚さの測定精度、③自動設定で得られる横波伝搬速度を用いたコンクリートの強度推定、④トンネルで知見された多重反射の現象を利用した背面の空洞検知、への適用検討が挙げられる。今後はさらに本試験装置を用いて、供試体や実構造物による適用性の検証や実探査を継続し、調査・点検における有効な非破壊試験技術の一つとして広範囲に応用できるよう検討したい。

### 【参考文献】

- 1) 牛島 栄 社会インフラの危機(つくるから守るへ-維持管理の新たなる潮流), 日刊建設通信新聞社(2014年7月)
- 2) 小林一輔, 牛島 栄 コンクリート構造物の維持管理(これからの長寿命化に備えて), 森北出版 (2006年12月)
- 3) 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル, 大成出版社

以上