

# 報告 種々の条件で埋設された合成樹脂製可とう電線管の電磁波レーダ法による探査性能に関する検討

瀧 論<sup>\*1</sup>・太田 達見<sup>\*2</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート部材に埋設された合成樹脂可とう電線管 (CD 管) を電磁波レーダ法で探査する場合の難易度と精度を実験によって検討した。実験では、種々の条件で CD 管を埋設した 4 体の試験体を、実務経験が豊富な 3 人の技術者が計測した。計測は、鉄筋と CD 管が埋設されていること以外、技術者に何も知らせない形式で実施した。探査の難易度について、埋設深さが 175mm より深い場合や埋設管が大きく湾曲している場合などでは CD 管の検知が困難になるなどの知見を得た。探査の精度について、測定誤差は概ね 5~10mm の範囲におさまリ、計測技術者によって測定誤差の分布が異なるなどの特性を得た。

**キーワード:** 非破壊検査, 電磁波レーダ法, 合成樹脂製可とう電線管, 技量

## 1. はじめに

近年、複数種の電磁波レーダ法の装置が市販され、コンクリート中の空洞や埋設物の調査が容易となっている。同法は他の非破壊検査法と同様、探査性能 (信頼性や精度など) に適用の限界がある。その性能の向上には、装置や画像処理ソフトの改良に加え、探査対象の特性の把握も重要である。

電磁波レーダ法に探査性能の検討について、例えば東川ら<sup>1)</sup>、山口・森濱ら<sup>2)</sup>、濱崎<sup>3)</sup>などの研究がある。それらは鉄筋を探査対象としている。一方、多くの建築物の鉄筋コンクリート (RC) 部材には、鉄筋の他に合成樹脂可とう電線管 (JIS C 8411 に準拠; 以下、CD 管) が埋設されている。CD 管は鉄筋と比較して、一般に部材内部の深い位置に複雑な状態で埋設されており、その探査は難しい。そのため、CD 管の探査に関する知見は、リニューアルなどの実工事で有用な参考情報となる。しかし、これまでに CD 管探査に関する検討結果の報告は少ない。

電磁波レーダ法による探査性能向上のために、計測技術者の技量も重要な要因となる。これに関して近年、技術者の資格有無や使用機器熟練度の違いをパラメータとした検討結果が報告されている<sup>4)</sup>。技量は多様で定量化が難しく、評価の方法などのさらなる検討が望まれる。

以上を背景に、CD 管を対象とする探査性能を実験し、その難易度と精度を検討した。精度については、技量の観点からも考察した。本報ではそれらの結果を報告する。

## 2. 探査の原理と実験の概要

### 2.1 探査手順と原理

電磁波レーダ法では、探査装置で対象物を計測し、そ

の結果から得られる画像を処理する。その画像の判読によって、埋設物の有無やその位置、深さが推定される。

計測では、比誘電率が異なる物質境界での電磁波の反射を利用する。具体的に、計測装置のアンテナからパルス波を発信し、その反射波を受信するまでの伝搬時間  $t$  と反射率  $\gamma$  を計測する。計測された  $t$  を基に、埋設物の深さ  $d$  が算定される。 $d$ 、 $\gamma$  はそれぞれ次式で算定される。

$$d = vt/2 \quad (1)$$

$$\gamma = (\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}) \quad (2)$$

ここに、 $v$ : コンクリート中の電磁波速度、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ : 物質 1、2 の比誘電率である。真空中の電磁波速度を  $c$ 、コンクリートの比誘電率を  $\epsilon_r$  とすると、 $v$  は次式で与えられる。

$$v = c/\sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

以上の計測結果を基に画像が処理される。画像では埋設物や空洞は眉型に表示され、多くの場合その下方にリングング (虚像) が生じる。これが埋設物の判断を困難とし、探査結果に差が現れる要因の一つとなっている。

### 2.2 試験体とパラメータ

実験には、図-1 に示す RC 床版を模した 4 体の試験体を製作した。試験体には、呼び強度 27N/mm<sup>2</sup>、スランプ 18.0cm の普通コンクリートを打ち込んだ。各試験体とも上端と下端の X、Y 方向に D13@200mm を配筋した。上端筋のかぶり厚さを 40mm とした。CD 管は試験体 4 の管 C のみと呼び 16 (外径 21mm, 内径 16mm) とし、他は呼び 22 (外径 27.5mm, 内径 22mm) とした。図中の基準線は、後述の考察での装置の走査線である。

試験体中の CD 管の諸条件に関して、P1~P6 のパラメ

\*1 清水建設 (株) 技術研究所 構造・生産技術センター 情報化生産グループ 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 清水建設 (株) 技術研究所 構造・生産技術センター 情報化生産グループ グループ長 工博 (正会員)



ータを設定した。それらは、P1: CD管の設計埋設深さ、P2: 埋設した管の方向、P3: 管の径、P4: 管の湾曲の有無、P5: 鉄筋の干渉、P6: 管相互のあきとした。なお、本実験のように、床版の探查はその上面で装置を走査する。P5に関して、本実験のCD管の検知は、その直上近くに平行して埋設されている鉄筋の影響が大きい。本実験の場合、CD管とこれに平行な上端筋のX-Y平面へ投影したあきを $l_h$ とする。 $0\text{mm} \leq l_h < 20\text{mm}$ のとき鉄筋の干渉が強い(「強」)、 $20\text{mm} \leq l_h < 40\text{mm}$ で中程度(「中」)、 $40\text{mm} \leq l_h$ で弱い(「弱」)、とした。

以上のパラメータをつぎのように試験体1~4に設定した(表-1の着色部参照)。

試験体1: P1に着目し、深さ75~200mmの範囲に管A~Fを25mm刻みで埋設した。

試験体2: P5とP6に着目した。P5に関し、 $l_h=0\text{mm}$ である管D、Eで鉄筋干渉は「強」、 $l_h=30\text{mm}$ である管C、Fで「中」、 $40\text{mm} \leq l_h$ である他のCD管で「弱」となる。P6に関し、30mmのあきを有する2本のCD管が埋

表-1 試験体とパラメータの関係

試験体	CD管	パラメータ						
		P1: 埋設深さ (mm)	P2: 埋設管の方向 (度)	P3: 管の呼び径	P4: 管の湾曲	P5: 管と鉄筋の干渉	P6: 管相互のあき (mm)	
1	A	75	0	22	—	弱	—	
	B	100						
	C	125						
	D	150						
	E	175						
	F	200						
2	A	150	0	22	—	弱	30	
	B					中		
	C					強		
	D					中		
	E	125				弱	30	
	F					中		
	G					強		
	H					弱		
3	A	125	45	22	—	弱	—	
	B	150	-45		大			
	C	125	45		—			
	D	150	-45		—			
4	A	125	0	22	—	強	—	
	B							16
	C							16
	D	150		22	小	弱		
	E				—			
	F				小			強

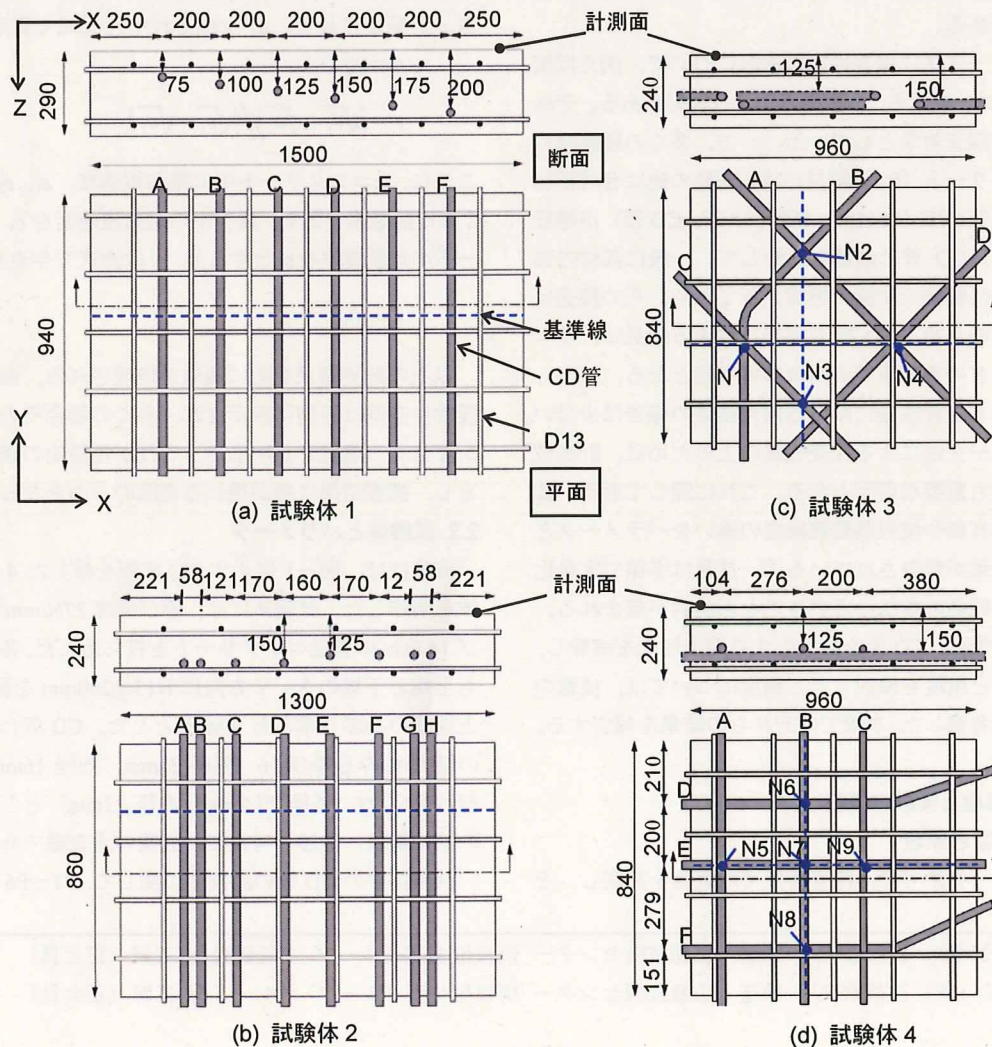


図-1 試験体



設されたケース(管 A-B 間, 管 G-H 間)を設定した。

試験体 3 : P2 と P4 に着目した。P2 については, 管 A ~D を鉄筋と  $\pm 45^\circ$  方向に埋設した。P4 について, 管 B の中央あたりに  $45^\circ$  の湾曲部を設けた。

試験体 4 : P3 ~P5 に着目した。P3 について, 管 C のみ呼び 16 とした。P4 について, 管 D, F を緩やかに湾曲させた。P5 について, 管 A, F を  $l_h=0\text{mm}$  とした。

なお, 表-1 の P4, P6 欄の—は, それぞれ湾曲部がないケース, 近くに他の埋設 CD 管がないケースである。

試験体 1~4 と同一材料で, 図-2 に示すような一辺が 150mm の立方体のブロック試験体を 4 個作製した。同試験体の中央に D13 の鉄筋を挿入し, 同試験体の各面からのかぶり厚さを計測できるようにした。

### 2.3 計測者と装置

実験では, 電磁波レーダ法による探査の経験年数が 6, 7, 27 年の技術者 a, b, c が計測した。装置は, 各技術者が現場での検査業務に使用しているものを用いた。技術者 a, b は装置 A を, 技術者 c は装置 B を使用した。技術者 a は, 参考のために, 装置 B による計測も行った。

装置 A, B の主な仕様について, アンテナ周波数は装置 A が 1.6GHz, 装置 B が 2.3GHz であった。探査深度は両装置とも 5~300mm であった。

### 2.4 計測条件

計測は, 屋内において材齢が 271~284 日の間で実施した。試験体は, 製作から実験まで室温が  $20^\circ\text{C}$  一定の屋内に保管した。試験体には, 埋設物の位置や深さが目視で推測できないようにした。技術者には実験条件や試験体形状, 寸法などに関する情報を知らせずに実験した。

計測の結果として, 各技術者に 1) 上端筋と CD 管の平面の概略位置, 2) 装置を基準線(図-1)に沿って走査した場合に検知される埋設物の位置と深さを, 実験直後に報告することを課した。また, 結果確認のため, 基準面の輝度モード画像の提出を求めた。技術者 a には参考として, 一部試験体で装置 B による画像の提出を課した。

上述の 2) に関して, 試験体 1~4 で CD 管が検知されるべき箇所数は, 順に 6 (管 A~F), 8 (管 A~H), 4 (N1~N4), 5 (N5~N9) となる。また, 計測手順は各技術者に一任した。計測時間は, 特に制限を設けなかった。

実験時に比誘電率の推定を意図して, 試験体 1~4 それぞれの近くにブロック試験体を置いた。技術者にはその意図は伝えず, 任意に利用してもよいこととした。

## 3. 実験結果

### 3.1 比誘電率の設定と探査計測時間

実験での, 各技術者間の計測の手順や方法は, ほぼ同様であった。ただし, 比誘電率の設定方法は技術者によって異なった。計測手順は, まず試験体表面を X, Y 方向

表-2 比誘電率の計測と設定

技術者	ブロック試験体計測				設定方法
	1	2	3	4	
a	8.8	8.8	—	—	試験体 1, 2 の値を同 3, 4 に適用
b	7.9	8.3	8.1	8.1	試験体 1~4 とも計測値を適用
c	—	—	—	—	試験体 1~4 とも 8.0 と設定

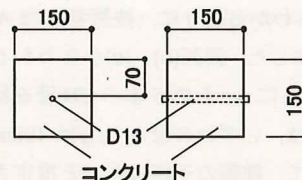


図-2 ブロック試験体



(a) 全景

(b) 近景

写真-1 計測実験の状況

ともに約 200mm 間隔で探査し, そこで得られる輝度モード画像を判読した。ついで埋設物があると思われる箇所でも詳細に探査した。そして, 埋設物が検知された箇所でも, 振幅モード画像を利用し材質(金属/非金属)の判定と埋設深さの計測をした。計測状況を写真-1 に示す。

比誘電率  $\epsilon_r$  の推定について, 技術者 a は, 試験体 1, 2 の計測前に各試験体脇にあったブロック試験体を利用した。技術者 b は, 全てのブロック試験体を利用した。技術者 c は, ブロック試験体を全く利用しなかった。実験後のヒアリングで, 技術者 a は試験体 1, 2 のブロック試験体による  $\epsilon_r=8.8$  を, 試験体 3, 4 にも適用したとのことであった。技術者 c は, ブロック試験体からの推定値は信頼性が低いと判断し, 標準的な値  $\epsilon_r=8.0$  を採用したとのことであった。以上,  $\epsilon_r$  のブロック試験体による計測値と, 試験体 1~4 の設定値は, 表-2 のように整理される。技術者 a は, 技術者 b, c に対して,  $\epsilon_r$  を 10% 程大きく推定していた。

実験に要した時間は, 技術者 a~c の順に 2 時間 18 分, 3 時間 14 分, 3 時間 13 分であった。技術者 b, c と比べ, 技術者 a は 1 時間ほど早く実験を終了した。

### 3.2 探査画像の例

#### (1) 試験体 1

各技術者による画像例として, 試験体 1 の基準面の輝度モード画像を図-3 に示す。同図(a)~(c)は, 技術者 a



～cの結果に対応する。図中、縦軸が試験体の深さに、横軸がX方向の水平位置に対応する。また、図中検知されたCD管をの矢印で、試験体の底部を破線で示す。

図-3(a)～(c)とも、深さ50mmあたりの水平方向に7箇所の眉型の像が認められる。これらは鉄筋に対応する像である。それらのうち(a), (c)では、その下方にも複層に重なるリングング（虚像）が観察される。

図-3(a)からわかるように、技術者 a は A～C の 3 本の CD 管を検知した。同図(b), (c)からわかるように、技術者 b, c はともに A～E の 5 本の CD 管を検知した。

試験体 1 では、いずれの管とも  $h_0$  は 100mm 程度であり、P5 に関して、鉄筋の干渉は弱いと推定される。その場合でも、鉄筋のリングングによって、CD 管の存在の推定が難しくなっている状況が図-3 から理解できる。

### (2)試験体 2

同じく試験体 2 の輝度モード画像を図-4 に示す。同図(a)に示すように、技術者 a は管 F, G, H を検知した。ただし、互いに近接した管 G と H は、1 本として認識した。また、技術者 b は同図(b)に示すように管 A～H の 8 本全てを、技術者 c は同図(c)に示すように管 F, G, H の 3 本を検知した。

### 3.3 探査の難易度

3.2 で例示したような探査結果を整理すると表-3 となる。表中、検知した場合を○、しなかった場合を×とした。ただし、試験体 2 の近接した管 A と B および管 G と H については、2 本を別々に識別した場合を◎、1 本と推定した場合を○、検知しなかった場合を×とした。また、試験体 4 の管 D～F で、X 方向に平行な部分のみを検知した場合は△と表示した。

### 3.4 埋設深さの推定精度

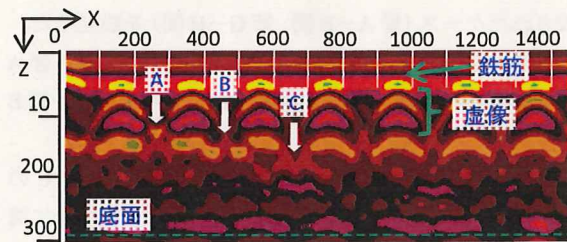
計測の後日、各試験体中の CD 管の実際の埋設深さを  $\phi 50\text{mm}$  のコア抜きによって計測した。コア抜き箇所は、試験体 1, 2 では基準線（図-1）と各管の交差位置、試験体 3, 4 では図-1 での N1～N9 とした。

コア抜きで得られた実測深さを  $h_0$ 、計測で得られた推定深さを  $h_1$  とした場合の試験体別の測定誤差 ( $=h_1-h_0$ ) を図-5 に示す。測定誤差が得られた箇所数は、延べ 48 点であった（試験体 1～4 の順に 12, 13, 12, 11 点）。多くの箇所では誤差の絶対値は 10mm 以下である。ただし、図-5 から 4 箇所で 10mm を超える測定誤差が生じたことがわかる。

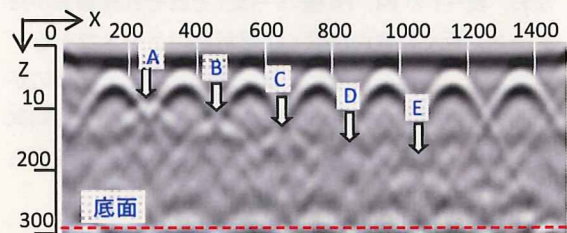
## 4. 考察

### 4.1 探査の難易度

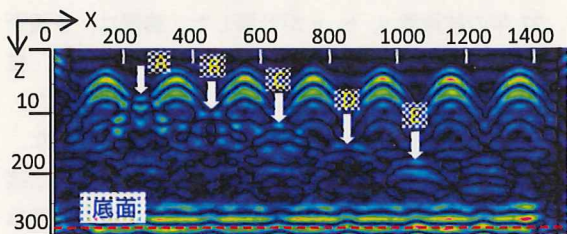
埋設深さに関するパラメータ 1 (P1) に関して、試験体 1 では 2 人の技術者が 175mm までを、他の 1 人は深さ 125mm の管 C までを検知した。このことから、経験



(a) 技術者 a (装置 A)

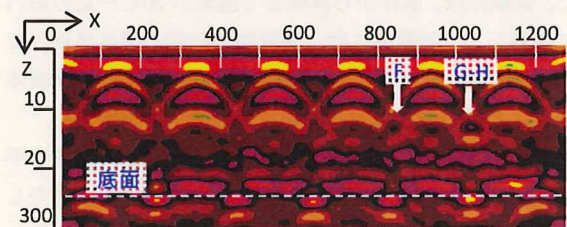


(b) 技術者 b (装置 A)

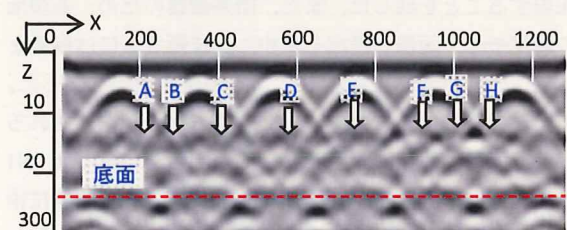


(c) 技術者 c (装置 B)

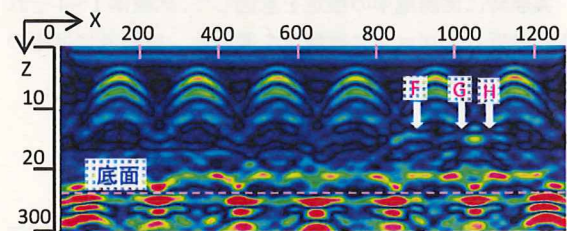
図-3 試験体 1 の探査結果画像



(a) 技術者 a (装置 A)



(b) 技術者 b (装置 A)



(c) 技術者 c (装置 B)

図-4 試験体 2 の探査結果画像



に富む技術者であれば125mm程度の埋設深さのCD管ならば容易に検出できると考えられる。一方、175mmより深いものは検知が難しいものと考えられる。

試験体2~4において、技術者a, cが検知した埋設管(表-3の○または◎)は、全て125mmであった。逆に、深さ150mmの管はほとんど検知できなかった。参考として、技術者aが装置Bによって計測し、処理した画像を図-6に示す。この場合の管の有無は、実験後の処理画像からのみによって判定された。その結果、埋設深さ150mmの管Dは検知できず、それより深く埋設されていた管Eは検知できた。このことから、本実験では埋設深さ150mmの管は検知が難しかったものと考えられる。以下での試験体2~4の考察では、特筆しないかぎり、埋設深さが125mmの管を主な考察対象とする。

埋設方向に関するP2について、試験体3で鉄筋と±45°方向に埋設されたCD管A, Cは、3人とも検知した。このことから、埋設管の方向については、いずれの方向であっても容易に検知できるものと考えられる。

埋設管の径に関するP3について、試験体4で呼び16の管Cを2人が検知した。このことから、呼び16の管は、標準的な条件下である程度、検知可能と思われる。

埋設管の湾曲に関するP4では、試験体3, 4とも深さ125mmの管を対象としていないため、P4では深さ150mmの管を対象とする。試験体3での大きな曲率を有する管Bは3人とも検知することができなかった。また、試験体4で小さい曲率の管D, Fは1人のみが完全に検知した。湾曲が大きな埋設管は検知が難しく、小さな管は状況によっては検知しにくい場合があると考えられる。

鉄筋(上端筋)の干渉に関するP5について、影響が強いとした試験体2の管E( $I_b=0\text{mm}$ )は1人のみ、同じく試験体4の管Aは2人が検知した。また、鉄筋の干渉が中程度とした試験体2の管F( $I_b=30\text{mm}$ )は3人とも検知した。このことから、鉄筋の干渉が強い場合の検知はやや困難で、中程度の場合は概ね検知可能といえる。

CD管の近接に関するP6について、管相互のあきを30mmとした試験体2の管GとHを、2人が2本として、他の1人は1本として検知した。このことから、CD管の径と同じ程度の間隔を有する2本の埋設管の検知は、ある程度可能なものと考えられる。

以上に対し、3人の技術者のうち検知できた人員が0, 1, 2, 3人である場合、それぞれ難、やや難、可能、容易と統一する。これを利用すると、本実験による埋設CD管検知の難易度を表-4のように表わすことができる。

#### 4.2 探査の精度

式(1), (3)からわかるように、電磁波レーダ法による埋設物の深さ $d$ は、 $\epsilon_r$ の平方根に反比例する。表-2に示したように、各技術者が設定した $\epsilon_r$ は7.9~8.8であった。

表-3 探査結果

試験体	CD管	パラメータ						探査結果			
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	技術者			
								a	b	c	
1	A	75	0	22	—	弱	—	○	○	○	
	B	100						○	○	○	
	C	125						○	○	○	
	D	150						x	○	○	
	E	175						x	○	○	
	F	200						x	x	x	
2	A	150	0	22	—	弱	30	x	◎	x	
	B							中	x	○	x
	C							強	x	○	x
	D							中	x	○	x
	E	125	0	22	—	弱	30	○	○	○	
	F							○	◎	◎	
	G							○	○	○	
	H							○	○	○	
3	A	125	45	22	—	弱	—	○	○	○	
	B	150	-45					大	x	x	x
	C	125	45					—	○	○	○
	D	150	-45					—	x	○	x
4	A	125	0	22	—	強	—	x	○	○	
	B							—	○	○	○
	C							16	○	○	x
	D	150	0	22	—	弱	—	○	○	x	
	E							小	△	○	x
	F							小	△	○	x

使用装置 技術者a, b : 装置A(アンテナ周波数1.6GHz)  
技術者c : 装置B(同2.3GHz)

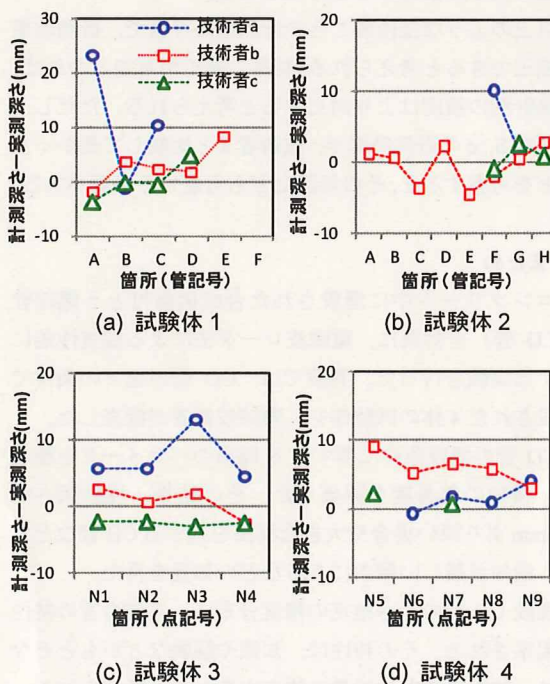


図-5 CD管の埋設深さの計測値と実測値の差

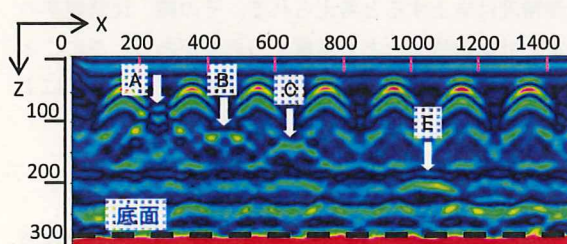


図-6 技術者aの装置Bの画像(試験体1)



仮に $\epsilon_r=8.0$ を基準とすると、 $\epsilon_r=8.8$ では、基準の場合と比較して $d$ を4.9%浅く見積ったことになる。

図-5に示した埋設深さの計測誤差に関して、階級幅を2mmとした場合の度数分布を図-7に示す。図中、N:個所数、m:平均、s:標準偏差である。図中、(a)~(c)はそれぞれ技術者a~cの、(d)は延べ48箇所全体の計測誤差の分布に対応する。図には、参考のために、各ケースに応じた平均と標準偏差の正規分布から得られる度数分布を曲線で重ね描いた。同図(d)から、測定誤差の多くは-5~10mmに分布していることがわかる。

図-7(d)の全体分布では、計測による度数分布は最頻値(2mm)よりも小さい範囲に偏っており、正規分布による度数分布と異なっていることがわかる。図-7(a)~(c)は、各技術者の計測による度数分布は図-7(d)と比較して、正規分布による度数の形状に概ね一致している。また、図-7(a)~(c)から、技術者間の度数は固有の分布をしており、技術者b、cの測定誤差分布の平均およびばらつきは、技術者aと比較して小さいことがわかる。この要因は、同一の条件下での実験結果であることから、技量に大きく依存すると考えられる。

以上のような技術者ごとの計測値の評価で、計測結果が補正できると考えられる。結果の補正が可能となれば、現場計測の精度はより向上すると考えられる。ただし、技術者b、cの計測時間が、技術者aと比較して長かったことを考慮すると、その要因なども考慮する必要がある。

## 5. まとめ

コンクリート中に埋設された合成樹脂可とう電線管(CD管)を対象に、電磁波レーダ法による探査性能に関する実験を行った。実験では、CD管が種々の条件で埋設された4体の試験体を、熟練技術者が探査した。

CD管の埋設条件に関する6種類のパラメータを整理し、検知の難易度を評価した。その結果、埋設深さが175mmより深い場合や大きな湾曲を有するCD管などでは、検知が難しい傾向にあるなどの知見を得た。

埋設CD管の深さ推定の精度分布に、各技術者の特性が観察された。その特性は、知識や経験などがもたらした、技術者ごとの技量に依存するものと考えられる。その技量を評価し、計測結果の補正などが可能となれば、計測精度は向上すると考えられる。その際、比誘電率の設定や計測の時間なども考慮する必要がある。このことは、技量の評価の難しさを意味し、電磁波レーダ法による探査精度向上のための今後の課題となる。

## 謝辞

実験では、東陽コンサルタント(株)の宮島真課長の協力を得た。ここに記し、謝意を表す。

表-4 CD管検知の難易度評価

記号	パラメータ	試験体	CD管	難易度
P1	深さ h(mm)	$h \leq 125$	A~F	容易
		$125 < h \leq 175$		可能
		$175 < h$		難
P2	方向	上端筋の45°	A, C	容易
P3	管の径	呼び16	C	可能
P4	湾曲	大	B	難
		小	D, F	やや難
P5	CD管と鉄筋の干渉	$l_h = 0\text{mm}$	E	やや難
		$l_h = 30\text{mm}$	F	容易
P6	相互のCD管あき	30mm	G-H間	可能

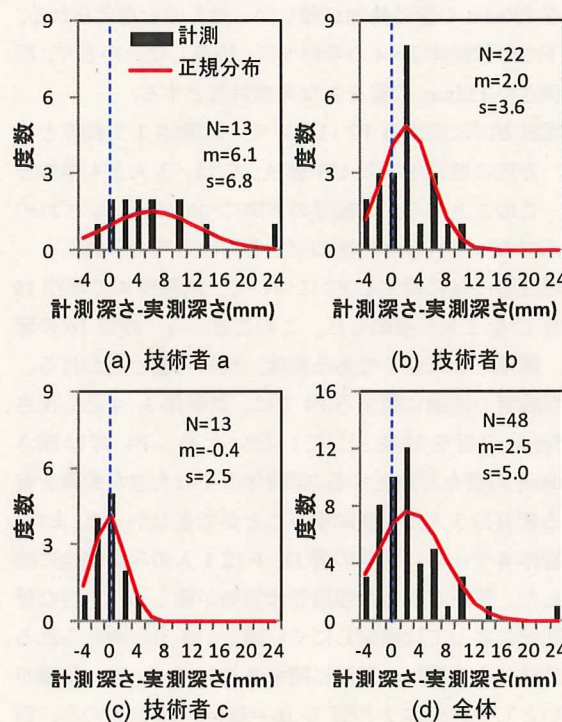


図-7 測定誤差の頻度分布

## 参考文献

- 東川孝治, 曾我部正道, 井上裕司, 谷村幸裕: 鉄筋検査機の鉄道構造物への適用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1497-1502, 2002.
- 山口順一郎, 森濱和正, 前川聡, 飯田洋志: 電磁波レーダ測定におけるコンクリートの比誘電率とかぶり測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1875-1880, 2004.
- 濱崎仁: 実構造物におけるかぶり厚さの測定誤差およびその補正方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.799-804, 2008.
- 土木学会: コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339委員会)(第3期)報告書ならびにシンポジウム講演梗概集, コンクリート技術シリーズ100, 2012年11月