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 諭^{*1}·太田 達見^{*2}

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の範囲におさまり、計測技術者によって測定誤差の分布が異なるとの特性を得た。 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¹⁾,山口・森濱ら²⁾,濱崎³⁾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4)。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 γ 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, γはそれぞれ次式で算定される。 d = vt/2

(1)

$$\gamma = \left(\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}\right) / \left(\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}\right)$$
(2)

ここに, v:コンクリート中の電磁波速度, ɛ₁, ɛ₂: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*ε*,とすると、*v*は次式で与えられる。

$$v = c / \sqrt{\varepsilon_r} \tag{3}$$

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 ンギング(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/mm²、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 のみを呼び 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、床版の探査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。 $0mm \leq l_h < 20mm$ のとき鉄筋の 干渉が強い(「強」)、 $20mm \leq l_h < 40mm$ で中程度(「中」)、 $40mm \leq l_h$ 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 =0mm である管 D, E で鉄筋干渉は「強」, l_h =30mm である管 C, F で「中」, 40mm $\leq l_h$ 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



試験 体	CD 管	バラメータ							
		P1:	P2:	P3:	P4:	P5:	P6:		
		埋設	埋設管	管の	管の	管と鉄筋	管相互		
		深さ	の方向	呼び径	湾曲	の干渉	のあき		
		(mm)	(度)				(mm)		
	Α	75	0	22	_	弱			
	B	100							
	C	125							
1	D	150							
	Е	175							
	F	200							
2	Α		0	22	_	55	30		
	В	150				33	00		
	С	100				中			
	D					強	_		
	Ŀ								
	F	125				\			
	 					弱	30		
3	Δ	125	45						
	B	150	-45		*	· 弱	_		
	C	125	45	22					
	D	150	-45		—				
4	Α		• 0	22	_	強			
	В	125							
	С			16		55			
	D			22	小	33			
	Е	150			_				
	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±45°方向に埋設した。P4について,管B の中央あたりに45°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*_b=0mm とした。

なお,表-1のP4,P6欄の一は,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℃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	ブロ	ック討	巅体	計測	記宁士法		
者	1	2	3	4	設定力法		
а	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		
с					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 所で詳細に探査した。そして、埋設物が検知された箇所 で、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 ε_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 ε_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 ε_r =8.0 を採用した とのことであった。以上, ε_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, ε_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時間ほど速く実験を終了した。

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 に重なるリンギング(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*l*_h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、鉄筋のリンギングによって、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 \bigcirc ,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 \bigcirc ,1本 と推定した場合を \bigcirc ,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 \triangle 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 ¢50mm 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







(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



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 (l_h =0mm)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 (l_h =30mm)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,*e*,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*e*,は7.9~8.8であった。

表-3 探査結果





図-6 技術者 a の装置 B の画像(試験体 1)

仮にε_r=8.0を基準とすると, ε_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ととな った,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,謝意を表する。

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	涩さ	h≦125		A∼F	容易
	h(mm)	125 <h≦175< td=""><td>Ι</td><td>可能</td></h≦175<>	Ι		可能
		175 <h< td=""><td></td><td>難</td></h<>			難
P2	方向	上端筋の45°	Ш	A, C	容易
P3	管の径	呼び16	IV	С	可能
P4	亦曲	大	Ш	В	難
	冷田	小	IV	D, F	やや難
P5	CD管と	$l_h = 0$ mm		Е	やや難
	鉄筋の干渉	$l_h = 30$ mm	Ш	F	容易
P6	相互のCD管	あき30mm	П	G-H間	可能



参考文献

- 東川孝治,曽我部正道,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.
- 4) 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