

# 報告 実構造物における電磁波レーダによる比誘電率およびかぶりの推定

松塚 忠政<sup>\*1</sup>・森濱 和正<sup>\*2</sup>・小松原 健<sup>\*3</sup>

**要旨:** 電磁波レーダを用いてコンクリート構造物のかぶりを推定するためには、コンクリートの比誘電率を正確に設定する必要がある。筆者等は構造物中の鉄筋を利用してコンクリート内部の比誘電率の分布状態を非破壊的に推定し、鉄筋かぶりを精度良く推定できる手法を提案した。この度、実構造物において実測する機会を得たのでその結果を報告する。その結果、提案した手法による最大誤差は15%程度であり、これ以上の精度向上を図るには装置の改善が必要なことがわかった。

**キーワード:** 電磁波レーダ, 比誘電率, かぶり

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は所定のかぶりが確保されなければ、コンクリートの剥落事故の発生を招くなど、耐久性に問題がある事が指摘されている<sup>1)</sup>。

著者等は電磁波レーダを用いてコンクリート構造物内の鉄筋のかぶりを、構造物に傷つけることなく、簡便に精度良く測定する手法を提案した<sup>2), 3)</sup>。

一方、国土交通省において2005年度に施工される橋梁上下部工のうち85箇所工事において、非破壊試験によるかぶり測定を試行<sup>4)</sup>している。その判定基準はこれまでの実験結果等から誤差を20%見込んでいる。耐久性評価の観点から、精度の向上が必要である。

電磁波レーダによるかぶりの測定には比誘電率分布に伴う誤差が報告されており<sup>5)</sup>、その改善を目的に、実構造物を測定する機会を得たので、その結果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用装置

今回の測定に使用した電磁波レーダ装置を写真-1に示す。この電磁波レーダ装置の諸元

は表-1に示したとおりである。



写真-1 電磁波レーダ装置

表-1 装置の仕様

項目	仕様
測定可能厚さ	5~200mm
深度方向分解能	2~3mm
周波数	400~950MHz
寸法	160×210×150mm
重量	約1kg

### 2.2 かぶりの推定方法

筆者等が提案しているかぶりの推定方法は以下のとおりである<sup>2), 3)</sup>(以下提案法という)。

電磁波レーダによる鉄筋かぶりの測定は、コンクリートの内部を伝搬する電磁波の反射時間からかぶりを測定する。電磁波の反射時間と距離の関係は式(1)で示される。かぶりの測定にあたり、使用する電磁波レーダ装置には予め比

\*1 (独) 土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 工修 (正会員)  
 \*2 (独) 土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 (正会員)  
 \*3 (独) 土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 (正会員)

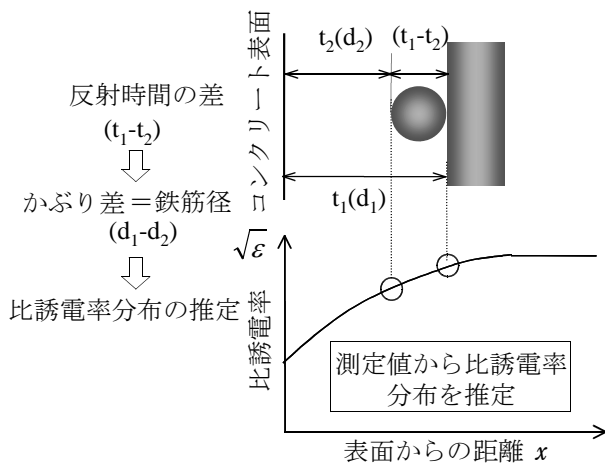


図-1 比誘電率の分布の推定

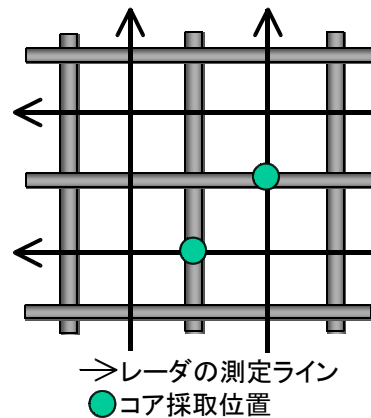


図-2 測定ラインとコア採取位置例

$$\frac{Ct}{2} = \int_0^d \sqrt{\epsilon} dx \quad (1)$$

ここで

- $t$ : 計測される反射時間
- $d$ : 鉄筋までの距離
- $C$ : 真空中の電磁波速度
- $\epsilon$ : 物質の比誘電率

$$\sqrt{\epsilon} = \frac{x}{\frac{1}{a} + \frac{x}{c-b}} + b \quad (2)$$

誘電率を設定して測定する必要がある。しかし、比誘電率はコンクリート中の水分分布等により変化するため、正確に設定する事が困難である。これまでの研究からコンクリート内部の比誘電率分布を式(2)で仮定する<sup>6)</sup>。互いに緊結された縦筋および横筋のかぶりを測定し、その測定結果の差が鉄筋径と等しい事を利用して、測定結果を回帰することにより、変数 $a$ 、 $b$ および $c$ を算出し、コンクリート内部の比誘電率分布を推定した。かぶりの測定においては比誘電率を3種類(6.2, 8.0, 10.7)変化させて行った。得られた比誘電率の分布と測定された反射時間との関係から、式(1)を解くことにより鉄筋のかぶりを算出する。

### 2.3 かぶりの実測方法

本実験では、非破壊試験で推定した鉄筋かぶりを検証する為、 $\Phi 25\text{mm}$ の小径コアを測定し

た縦筋及び横筋上で採取し、採取コア長もしくは、コア孔深さにより鉄筋かぶりを実測した。

### 3. 構造物概要

測定はA～Dの4種類の構造物について測定を行った。

構造物Aは自動車専用道路の橋脚であり、2基(A1, A2)測定した。測定箇所はフーチングである。構造物概要を図-3に示す。

構造物Bは自動車専用道路の橋梁上部工である。形式はポストテンション方式6径間連続PC中空床版橋である。構造物概要を図-4に示す。

構造物Cは道路の取り付けランプの橋脚である。構造物概要を図-5に示す。

構造物Dは国道の立体交差部分の橋梁の橋台である。構造物概要を図-6に示す。測定箇所はフーチングであるが南面は土留壁が設置されており、測定が不可能であった。これら構造物の概要、測定位置、配筋状況および打設されたコンクリートの配合を表-2～4に示す。

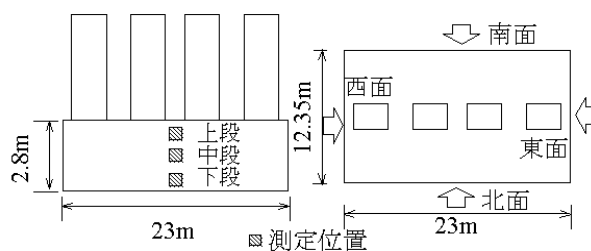


図-3 構造物A概要図

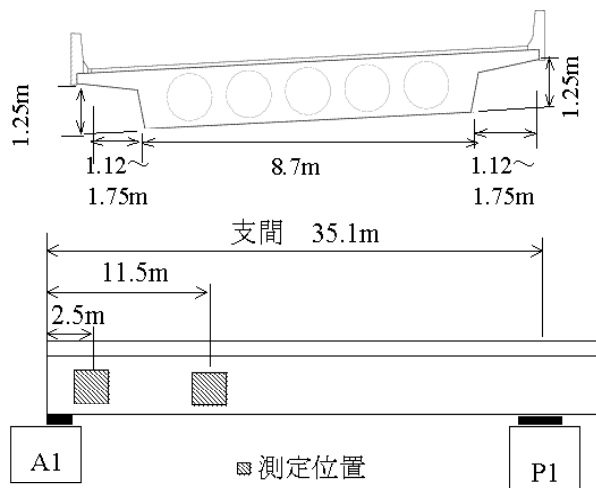


図-4 構造物B概要図

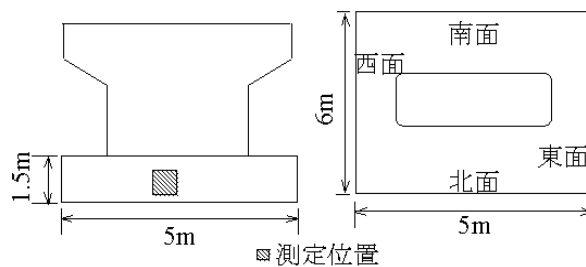


図-5 構造物C概要図

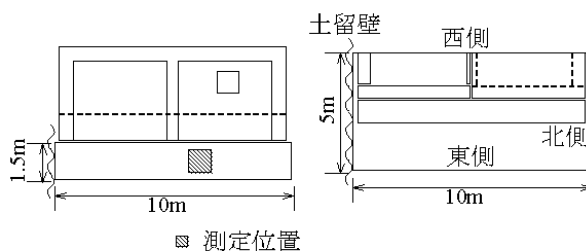


図-6 構造物D概要図

表-2 測定位置概要

構造物	工種	測定箇所	測定箇所詳細
A	A1	橋脚フーチング	フーチング4面。1面のみ上下2箇所の計5箇所
	A2		1面の上中下の3箇所
B	橋梁上部工	橋桁側面	支間中央付近と支点付近の2箇所
C	橋梁下部工	橋脚フーチング	フーチング4面を測定
D	橋梁下部工	橋脚フーチング	フーチング4面のうち、土留めの無い3面を測定

表-3 現場概要

構造物	養生方法	測定材齢	前側鉄筋(mm)			後側鉄筋(mm)		
			鉄筋径	設計かぶり	間隔	鉄筋径	設計かぶり	間隔
A	水中養生	28日	D16	115-118	300	D32~38	131-134	125
		23日	D16	115	300	D32~38	131	125
B	シート養生	9日	D16	36.5	125	D13	52.5	250
C	シート養生	14日	D19	118.5-120	200	D22~25	137.5-139	250
D	シート養生	9日	D19	118.5-123	200	D16~25	137.5-142	250

表-4 コンクリート配合

構造物	セメント種類	呼び強度	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
								水	セメント	細骨材	粗骨材
A	高炉B種	27	20	8	51.5	4.5	42.9	153	297	794	1065
B	早強	36	20	8	41.6	4.5	39.2	172	414	664	1038
C	高炉B種	27	20	8	55.0	4.5	44.3	156	284	814	1062
D	高炉B種	27	20	8	52.5	4.5	44.4	158	301	810	1048

#### 4. 結果

本実験において、各構造物の設計図書に示された設計かぶり、2.2に示す提案法により推定したかぶりの解析結果およびコアにより実測したかぶりの実測値をそれぞれ表-5に示す。

構造物Aの実験結果を見ると、かぶりの実測

値と解析値との誤差は大きくてもA1の北面で約14%程度であるが、その他の位置での測定結果は10%以内であった。

構造物Bは、誤差は大きくても後側の鉄筋(横筋)で約14%程度であるが、前側の鉄筋(縦筋)については、6~7%の誤差に収まっており、か

表-5 実構造物実験結果(mm)

測定箇所				測定比誘電率			設計かぶり	解析結果	実測値	実測との差		
				6.2	8.0	10.7				(mm)	(%)	
A1	フーチング	北面	上段	前側鉄筋	156.0	136.5	117.0	118.0	142.3	125.0	17.3	13.8
				後側鉄筋	176.5	154.5	133.0	134.0	156.4	150.0	6.4	4.3
				かぶり差	20.5	18.0	16.0			25.0		
		前側鉄筋	157.0	137.0	118.0	118.0	119.9	132.0	12.1	9.2		
		後側鉄筋	181.5	159.0	137.0	134.0	133.9	155.0	21.1	13.6		
		かぶり差	24.5	22.0	19.0			23.0				
	東面	中段	前側鉄筋	142.0	124.0	106.0	115.0	136.2	124.0	12.2	9.8	
	後側鉄筋		161.0	141.0	121.0	131.0	151.2	145.0	6.2	4.3		
	かぶり差		19.0	17.0	15.0			21.0				
	南面	中段	前側鉄筋	170.0	149.0	128.0	118.0	139.3	144.0	4.7	3.3	
	後側鉄筋		193.0	169.0	145.0	134.0	155.3	167.0	11.7	7.0		
	かぶり差		23.0	20.0	17.0			23.0				
西面	中段	前側鉄筋	163.5	143.0	123.0	115.0	125.0	115.0	10.0	8.7		
後側鉄筋		188.0	164.5	142.0	131.0	139.8	131.0	8.8	6.7			
かぶり差		24.5	21.5	19.0			16.0					
A2	北面	上段	前側鉄筋	168.5	148.0	127.0	118.0	142.1	137.0	5.1	3.7	
			後側鉄筋	191.0	167.0	144.0	134.0	156.9	155.0	1.9	1.2	
			かぶり差	22.5	19.0	17.0			18.0			
		前側鉄筋	172.5	151.0	130.0	118.0	150.4	145.0	5.4	3.7		
		後側鉄筋	192.0	168.0	144.5	134.0	170.2	165.0	5.2	3.2		
		かぶり差	19.5	17.0	14.5			20.0				
前側鉄筋	170.0	149.0	128.0	118.0	150.3	148.0	2.3	1.6				
後側鉄筋	191.0	167.0	144.0	134.0	166.0	165.0	1.0	0.6				
かぶり差	21.0	18.0	16.0			17.0						
B	桁	支間中央	側面	前側鉄筋	62.5	53.5	45.0	36.5	53.3	50.2	3.1	6.2
				後側鉄筋	82.0	70.5	61.0	52.5	76.1	66.6	9.5	14.3
				かぶり差	19.5	17.0	16.0			16.4		
		前側鉄筋	67.0	57.0	47.0	36.5	52.0	48.5	3.5	7.2		
		後側鉄筋	83.5	71.5	60.0	52.5	76.1	67.9	8.2	12.1		
		かぶり差	16.5	14.5	13.0			19.4				
C	フーチング	北面	中段	前側鉄筋	168.5	148.0	127.0	120.0	139.0	137.3	1.7	1.2
				後側鉄筋	196.0	172.0	147.0	139.0	157.4	157.2	0.2	0.1
				かぶり差	27.5	24.0	20.0			19.9		
		前側鉄筋	153.0	134.0	115.0	118.5	135.5	124.8	10.7	8.6		
		後側鉄筋	177.5	155.5	134.0	137.5	157.4	147.3	10.1	6.9		
		かぶり差	24.5	21.5	19.0			22.5				
		前側鉄筋	165.0	144.0	124.0	120.0	134.6	134.6	0.0	0.0		
		後側鉄筋	192.0	168.0	144.5	139.0	152.9	154.0	1.1	0.7		
		かぶり差	27.0	24.0	20.5			19.4				
		前側鉄筋	158.5	138.5	119.0	118.5	136.5	127.3	9.2	7.2		
		後側鉄筋	180.5	158.0	136.0	137.5	155.0	148.1	6.9	4.7		
		かぶり差	22.0	19.5	17.0			20.8				
D	フーチング	北面	中段	前側鉄筋	202.0	177.0	152.0	123.0	162.1	151.7	10.4	6.9
				後側鉄筋	229.0	201.0	173.0	142.0	174.8	174.5	0.3	0.2
				かぶり差	27.0	24.0	21.0			22.8		
		前側鉄筋	157.0	137.5	118.0	123.0	143.2	125.8	17.4	13.8		
		後側鉄筋	181.5	159.0	137.0	142.0	159.1	144.6	14.5	10.0		
		かぶり差	24.5	21.5	19.0			18.8				
		前側鉄筋	159.5	139.5	120.0	118.5	143.2	131.9	11.3	8.6		
		後側鉄筋	188.0	165.0	142.0	137.5	159.1	151.0	8.1	5.4		
		かぶり差	28.5	25.5	22.0			19.1				

ぶりの小さい上部工に於いても概ねよく推定できている結果となった。かぶりの実測値と解析値との差については10mm弱であった。

構造物Cの測定結果を見ると、かぶりの実測値と解析値との誤差の大きい西面、東面でも9%程度であり、北面、南面に於いては1%程度で

あった。

構造物Dの測定結果を見ると、かぶりの実測値と解析値との誤差の比較的大きい西面でも14%程度であり、北面、東面では9%以下の誤差であった。

構造物Aの横筋および縦筋のレーダの画像を

写真-2~3に、構造物Cの横筋および縦筋のレーダの画像を写真-4~5に示す。構造物Aについては、前側鉄筋(横筋)の判読はやや見にくいものの可能であったが、後側鉄筋(縦筋)の判読はかぶりよりも配筋間隔が狭いため、隣り合う鉄筋が干渉し本来の鉄筋位置では無い位置に強い反応が現れるなど、判読に苦慮した。構造物Cはかぶりよりも配筋間隔が大きいいため、判別し易い事が分かる。

## 5. 考察

### 5.1 測定精度

図-7~8はかぶりの実測値と今回の解析値との差を実測値との比率(誤差%)の分布で示したものである。全ての解析結果が誤差15%以内の精度でかぶりの推定が可能であった。また約82%の解析結果が誤差10%の範囲に収まった。これまで実施してきた大型供試体や実構造物でも殆どが誤差10%以内の結果であり<sup>2), 7)</sup>, 正規分布を仮定すると、誤差が $2\sigma$  ( $\sigma$ :標準偏差)以内に入る誤差は約15%であった。

### 5.2 誤差要因

構造物Cについては、実測かぶりの差が前側鉄筋(横筋)の径19mmとほぼ等しく、測定箇所鉄筋が緊結されていると考えられるにも関わらず、非常に良く推定できた箇所(北面, 南面)と誤差9%程度の箇所が存在した。図-9に今回の解析で得られた構造物Cの比誘電率分布を示す。北, 南面の比誘電率分布はほぼ一致し、他の2箇所と比較して大きい範囲で分布していた。

今回測定に使用した装置の最小の読みは2~3mm間隔であり、特にかぶりの値が小さい場合には、この最小読みの値の差が比誘電率分布の解析結果に大きな影響を与えられられる。そこで図-10に構造物C南面の前側鉄筋(横筋)と後側鉄筋(縦筋)のレーダの読みに人為的に $\pm 3\text{mm}$ の誤差を付加した場合の比誘電率分布を示し、かぶりの解析値の誤差も()内に示した。前側鉄筋のかぶりを3mm大きく読むことにより比誘電率分布が変化し、かぶりの解析値

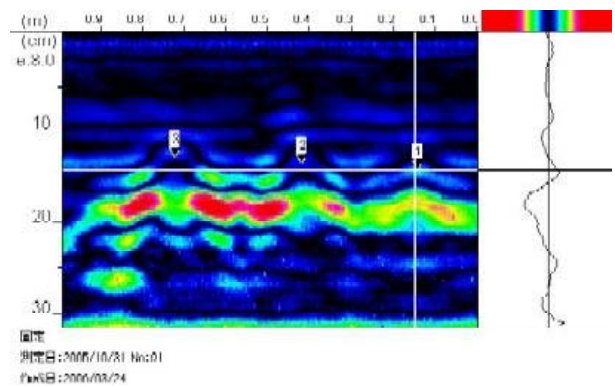


写真-2 構造物A1北面上段の横筋

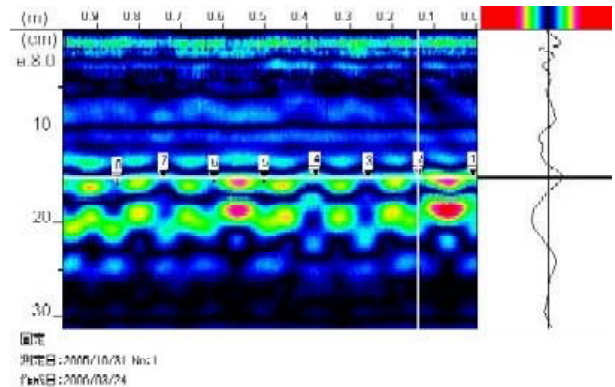


写真-3 構造物A1の北面上段の縦筋

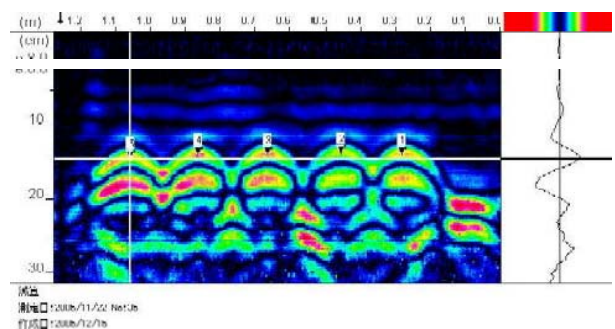


写真-4 構造物C 南面 横筋

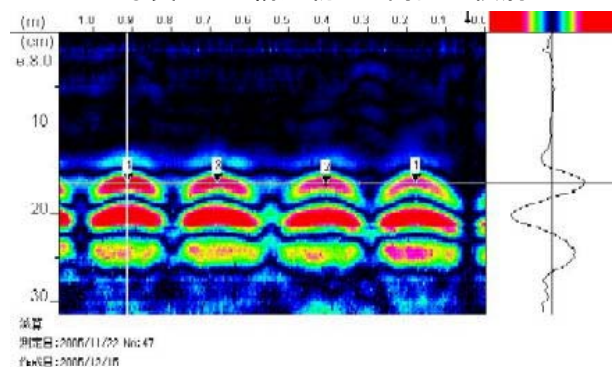


写真-5 構造物C 南面 縦筋

は+14%の誤差を生じる事が判る。このことから、現在の装置の性能の範囲内において、提案法による測定の精度は高いものの、装置の最小の読み程度の誤差により、かぶり推定誤差は15%程度生じることが明らかになった。よって

かぶりの解析結果の誤差については、本提案法に起因するものではなく、さらに精度向上を図るには装置の改善が必要である。

## 6. まとめ

実構造物において電磁波レーダを用い、提案法により鉄筋かぶりを算出した。その結果実測値との誤差は約15%以内に収まることがわかった。またより一層の精度の向上には、更なる装置の改善が不可欠である。

## 参考文献

- 1) 土木コンクリート構造物耐久性検討委員会：土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言について，2000.3
- 2) 中村英佑ほか：鉄筋径を利用した非破壊試験による比誘電率分布とかぶりの推定，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.1801-1806，2005.6
- 3) 森濱和正ほか：RC構造物の検査への非破壊試験の適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.1825-1830，2005.6
- 4) 国土交通省大臣官房技術調査課：非破壊試験を用いたコンクリート構造物の品質管理手法の試行について，2005.5
- 5) 富士岳ほか：非破壊試験によるコンクリート品質，厚さ，鉄筋かぶり・径の計測に関する研究 第2報 電磁波レーダー法および衝撃弾性波法，非破壊検査，Vol.52，No.12，pp.691-696，2003.12
- 6) 前川聡ほか：電磁波による鉄筋のかぶり厚さ測定，非破壊検査，Vol.55，No.1，pp.16-22，2006.1
- 7) 山口順一郎ほか：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究 電磁波レーダ法その4 電磁波レーダ法での非破壊による比誘電率推定とかぶり厚さの推定精度，日本非破壊検査協会平成17年度春季大会講演概要集，pp.77-80，2005.5

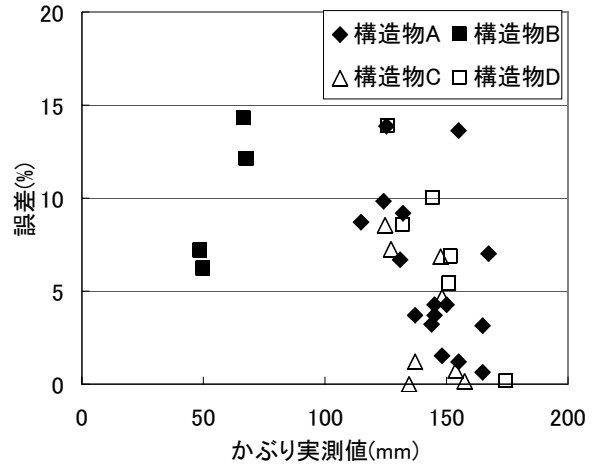


図-7 解析結果と実測値との差

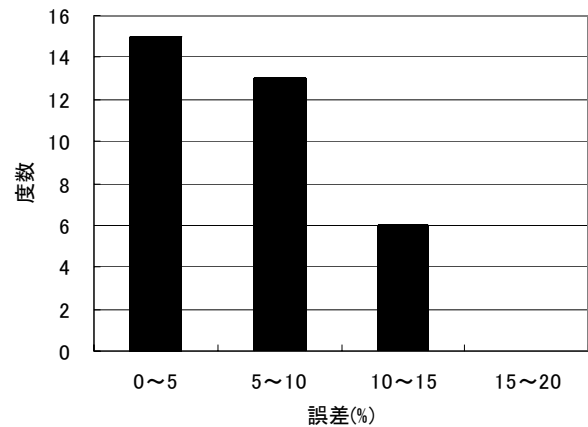


図-8 誤差別頻度分布

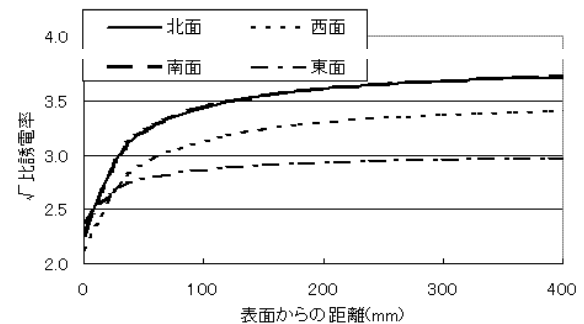


図-9 構造物Cの比誘電率分布

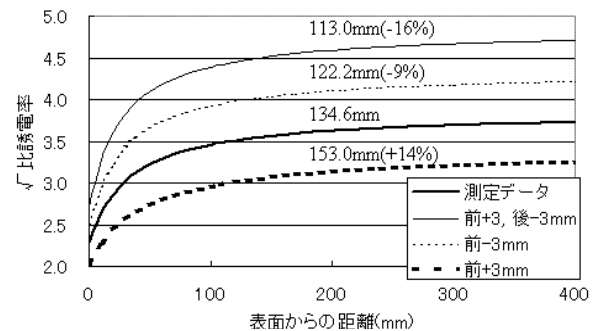


図-10 構造物Cの読みの違いによる影響