

鉄筋探査機器の測定精度の評価

Evaluation of the Measurement Accuracy of Reinforcing Bar Probe Meters

三加 崇 TAKASHI SANGA
 藤田 学 MANABU FUJITA
 浅井 洋 HIROSHI ASAI
 玉置 一清 KAZUKIYO TAMAKI
 斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA

コンクリート構造物の耐久性を評価する手法の一つである鉄筋かぶりの測定には、電磁波法、電磁誘導法、超音波法など様々な原理を応用した機器が市販されているが、実際の現場環境下における測定精度は明らかではない。本報告は、電磁波法、電磁誘導法に関して、その補正方法および運用方法の妥当性を検証するものである。両者ともに、適切な補正を行うことにより、測定精度の向上を図ることが可能であることがわかった。

キーワード：かぶり、電磁波法、電磁誘導法、鉄筋探査

Various methods are proposed for the nondestructive testing of the covering depth for reinforced concrete using commercially available equipment. This paper describes the results of investigations into the measurement accuracy and the correction method for typical reinforcing bar probe meters, which utilize the electromagnetic wave method and the electromagnetic induction method. Measurement accuracy can be increased with proper compensation.

Key Words: Covering depth, Electomagnetic wave method, Electromagnetic induction method, Reinforcing bar prove

1. まえがき

従来、コンクリート構造物の耐久性を評価する際に重要となる品質検査は、プラントにおける材料検査、コンクリート打込み前における鉄筋組立検査、型枠検査など、主に施工中間段階における工程管理により行われてきた。近年、非破壊検査手法が注目され、発注機関によっては完成直後においてコンクリート構造物の品質検査の実施が義務化される傾向にある。

その一つである鉄筋かぶりにおける非破壊検査には、様々な方法が提案されているが、現場においてかぶり厚さの測定が簡易に行える方法として、電磁波法および電磁誘導法が挙げられる。これらは、特別な資格を必要とせず、鉄筋位置およびかぶりの測定結果が直ちに得られる手法である。

本報告は、現場環境下において簡易に測定できる電磁波法と電磁誘導法の2種類について、一般的に市販されている測定機器を選定し、その測定精度および補正方法について検証を行ったものである。

2. 鉄筋探査機器の特徴¹⁾

(1) 電磁波法

電磁波法は、インパルス状の電磁波（レーダー）をコンクリート内へ放射すると、コンクリートと電気的性質（比誘電率）の異なる物体、例えば鉄筋、空洞等の境界面で反射し、それを受信するまでの時間から反射物体までの距離を式(1)により測定する方法である（図-1）。

比誘電率は、コンクリートの含水率の影響を受けると考えられており（図-2）、一般的な状態で6～11の範囲となる。

$$D = V \cdot \frac{T}{2} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{T}{2} \quad (1)$$

D ：かぶり

T ：反射時間

V ：コンクリート中での電磁波の速度

C ：真空中での電磁波の速度（ $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）

ϵ_r ：コンクリートの比誘電率

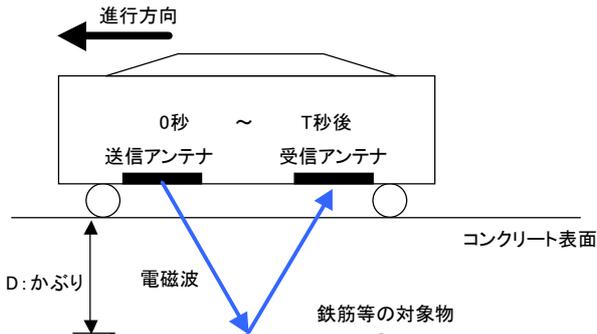


図-1 電磁波法による測定原理

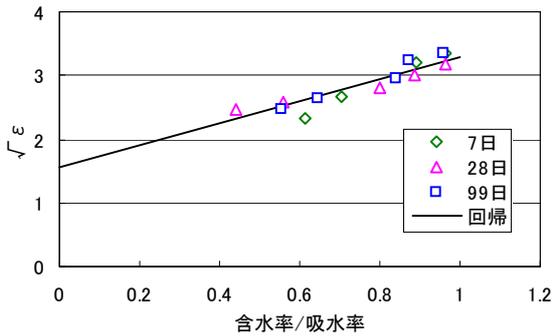


図-2 含水率と比誘電率の関係²⁾

(2) 電磁誘導法

電磁誘導法は、導線を円形に巻いたコイルに交流電流を流すことによって生じる磁界内に金属などの磁性体が存在すると、磁性体に電流が発生することにより新たに磁場が生成され、そのときの磁場の変化により新たなコイルに電流を発生させ、それを数値処理することによりかぶりを測定する方法である(図-3)。

先の電磁波法と原理的に全く異なるものであり、コンクリートなどの非磁性体の状態、例えば強度や材齢などの影響をほとんど受けず、金属などの磁性体のみ反応する。一方、鉄筋の直径や間隔などの配置状況によって、生成される磁場が異なるため、その補正が必要となるという特徴を有する。

表-1に、影響因子をまとめて示す。

表-1 測定方法による影響因子

	電磁波法	電磁誘導法
コンクリートの状態	比誘電率の設定 (含水率, 材齢, 強度)	—
配筋状態	—	鉄筋径 鉄筋間隔 直交鉄筋の状態

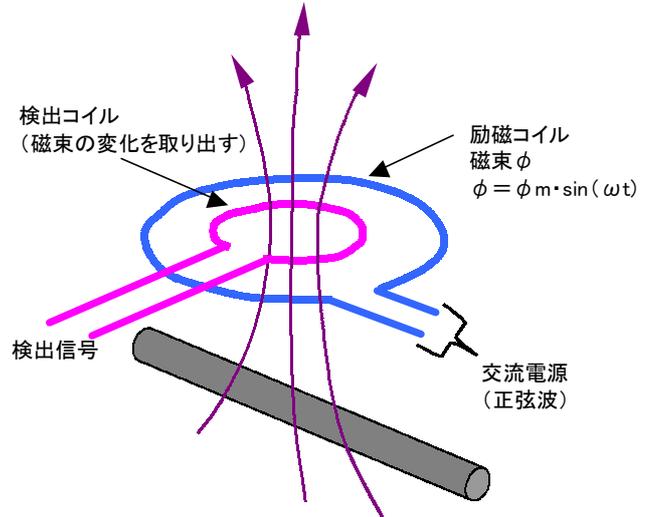


図-3 電磁誘導法による測定原理

3. 試験方法

(1) 使用機器

かぶり測定は、電磁波法を利用した測定機器 A および電磁誘導法を利用した測定機器 B を使用した。

(2) 試験体

表-2に、かぶり測定のために作製した試験体の一覧を示す。

測定機器の基本的な精度を検証する目的で、一方向の鉄筋配置のみとした基礎試験 step1 の試験体を図-4に示す。測定面を打設面とした case1 および型枠面とした case2 の2種類である。かぶりは、25mmから162mmと変化させて配置した。

実際の配筋状態による精度を検証する目的で、直交方向にも鉄筋を配置した実物模型試験 step2 の試験体を図-5に示す。コンクリート強度 (40N/mm², 21N/mm²) とかぶり (45mm, 116mm) が異なる3種類で、case3 が橋体、case4 が地覆および高欄、case5 が橋脚を想定した試験体である。

測定対象とした鉄筋は D16, D25, D35 の3種類である。

表-2 試験体一覧

試験体	鉄筋	方向	かぶり	コンクリート強度	備考	
step1	case1	D16, D25, D35	一方向	25mm~75mm	40 N/mm ²	打設面より測定
	case2	"	"	25mm~162mm	"	型枠面より測定
step2	case3	D16, D25	直交方向	45mm	40 N/mm ²	ウェブモデル
	case4	"	"	"	21 N/mm ²	地覆および高欄モデル
	case5	D25, D35	"	116mm	"	橋脚モデル

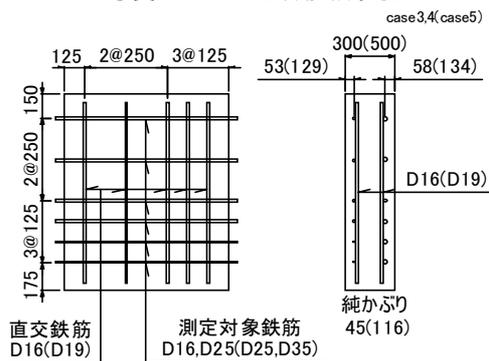
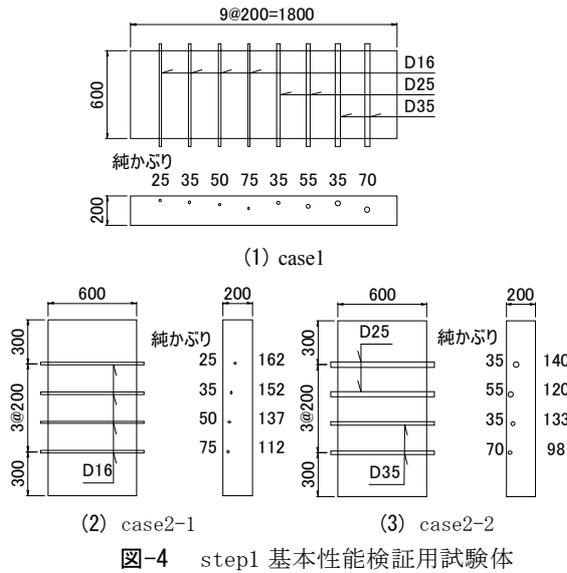
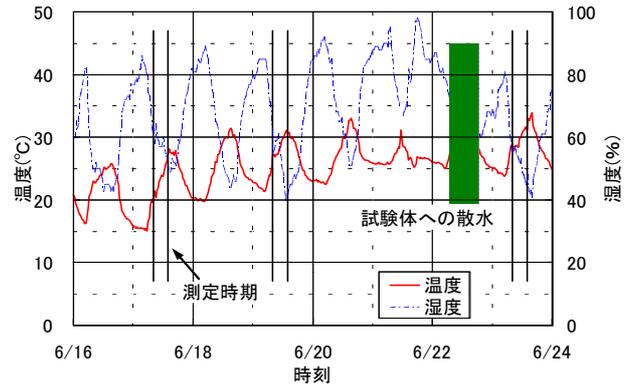
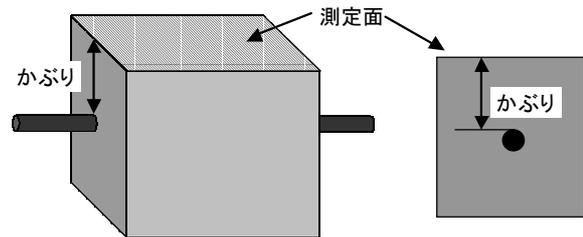


表-3 試験日および測定時期

40N/mm ² (H) 日付 材齢	21N/mm ² (N) 日付 材齢	状況	時刻	計測	気温	湿度	備考
6/14 0	6/9 0	打設					21N(N)は5日早く打設
6/16 2	6/16 7	脱枠					
6/17 3	6/17 8	脱枠翌日	8:00	○	19.6℃	63%	
			14:00	○	27.3℃	60%	
6/19 5	6/19 10	晴天日	8:00	○	27.1℃	55%	
			14:00	○	30.5℃	42%	
6/23 9	6/23 14	湿潤翌日	8:00	○	29.0℃	55%	
			14:00	○	31.2℃	48%	



測定対象の実構造物と同じ施工条件(型枠or均し&養生)



(3) 試験頻度および試験時状況

試験日および測定時期を表-3に示す。かぶり測定は、脱型を行った翌日、材齢5日(21N/mm²は10日)および試験体に半日散水し雨天の翌日の測定を模擬した計3回行った。

測定期間中における気温および湿度を図-6に示す。

4. 電磁波法

(1) 補正値の設定

電磁波法によるかぶり測定には、比誘電率の設定が必要となるが、この比誘電率はかぶりコンクリートの含水率の影響を受けるため、測定時ごと、さらに測定箇所ごとに、その設定は変化するものと考えなければならない。

比誘電率の測定方法としては、異なる測定位置の2つのデータから推定する双曲線法等が提案されているが、現状の測定機器の分解能ではあまり精度が期待できないことが指摘されている³⁾。現状では、かぶりが既知である測定データを代表させて、式(1)より逆算して比誘電率を推定する方法が多く採用されているようである。一般的に、完成構造物でかぶりが既知となる点は存在しないために、完成構造物と型枠や養生等の施工条件を同一としたダミー供試体を別途準備して、比誘電率を測定する方法が考えられる。

一般的に、実構造物を対象とした場合、ダミー供試体の測定面の養生は実構造と同様に行い、測定面以外の型

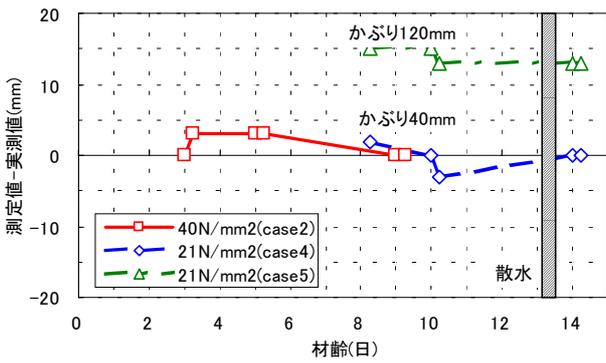


図-8 材齢と測定誤差の関係

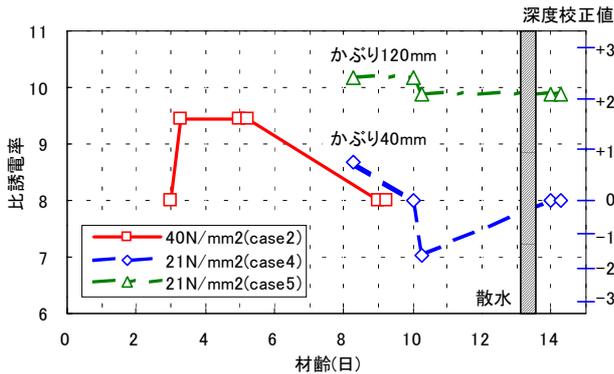


図-9 材齢と比誘電率の関係

枠は、乾燥が進行しないよう脱型しない。今回は試験体と同じ厚さのダミー供試体であるため、試験体同様に脱枠して養生を行っている。ダミー供試体のかぶりは、40mmと120mmの2種類とした。

図-8に、材齢とダミー供試体における測定値と実測値の差を、図-9に、この誤差の原因が式(1)に示す比誘電率の影響のみであると仮定して算出した比誘電率を示す。かぶりの大きいcase5の誤差が常に大きい、これはかぶり部分が厚いために内部の含水率が高く、それに伴い比誘電率が大きいためであると考えられる。case2とcase4の比較からは、コンクリート強度や材齢および散水の影響について、試験期間内では定性的な傾向は見出せなかった。今回使用した測定機器Aの読取り精度には2~3mm程度のばらつきがあり、また、機器Aでは、比誘電率に相当する深度校正值が表-4に示すように7段階で準備されており、厳密な設定はできず、これによる若干の誤差も生じる。そのために、比誘電率の変化の影響よりも、ばらつきの影響の方が大きかったものと推察される。

表-4 深度校正值と比誘電率の関係 (機器A)

深度校正值	-3	-2	-1	0	1	2	3
比誘電率	6.2	6.8	7.4	8.0	8.9	9.8	10.7

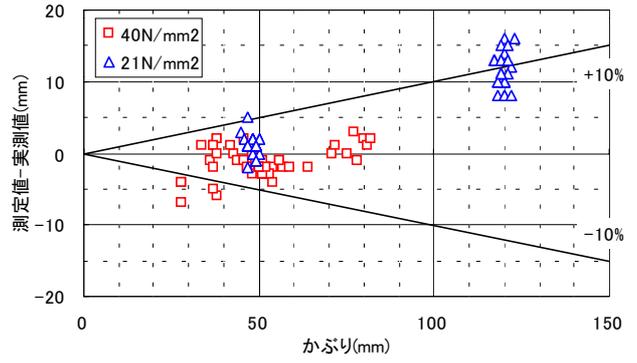


図-10 かぶりと誤差の関係 (補正前)

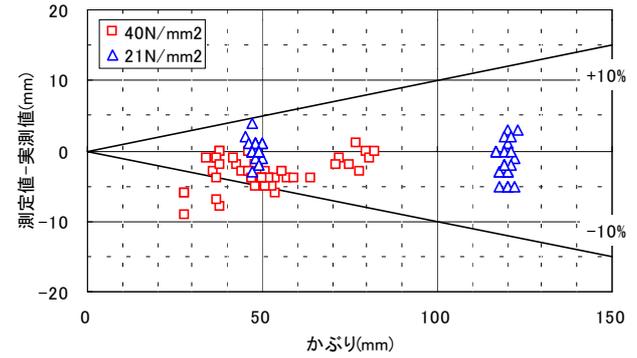


図-11 かぶりと誤差の関係 (補正後)

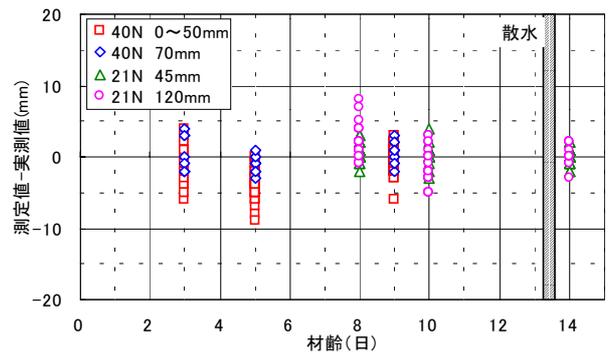


図-12 材齢と誤差の関係 (補正後)

(2) 基本性能

6/19の8:00の測定値に着目して、かぶり厚さと測定誤差の関係を考察する。図-10は比誘電率8.0(深度校正ゼロ)とした場合、図-11は各試験体および測定回ごとに比誘電率を測定して、補正を行った場合である。今回の測定範囲では、ダミー試験体を用いた深度校正により、±10%以内の良好な精度を有していることがわかった。特に、かぶり100mm以上では精度向上が大きく、深度校正の実施は必須と考えられる。今回は、かぶり25~75mmの試験体に対して、40mmのかぶりを有するダミー供試体を標準と設定した。40mmよりも小さなかぶりでは、実際には乾燥の進行によって比誘電率が予想以上に小さかったものと考えられ、今回の深度校正方法では逆に誤差が大きくなるという結果になった。ダミー供試体が多ければ多いほど精度が向上することはもちろんで

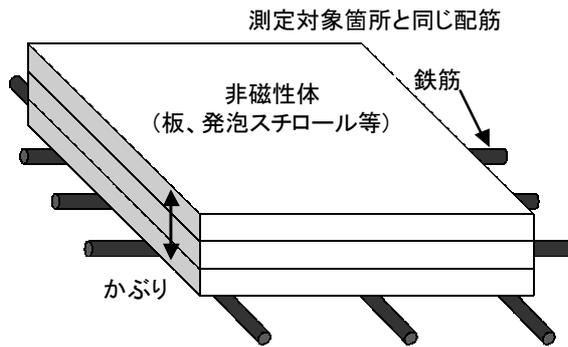


図-13 事前試験方法

あるが、その適切な設定が今後の重要な課題である。

図-12に、材齢と測定誤差の関係を示す。特に、乾燥収縮の進行や散水等に伴う定性的な傾向は認められず、材齢2週程度までならば、測定時期による影響は少ないものと考えられる。

5. 電磁誘導法

(1) 補正値の設定

電磁誘導法におけるかぶり測定は、測定箇所に対象の鉄筋1本のみであれば、極めて良好な精度を有するといわれている。しかし、実構造物では直交鉄筋や隣接鉄筋による磁場の影響を補正する必要があり、その精度は明らかではない。磁場の補正方法として、測定機器Bは鉄筋径、隣接鉄筋間隔については機器に入力することができ、機器内部で補正を行うものであるが、直交鉄筋の影響については考慮できない。そこで、電磁誘導法は非磁性体であるかぶり部分の材質の影響を受けないことを利用し、配筋後、コンクリート打設前に、測定箇所の種類に厚みを有する板または発泡スチロールを置いてかぶりの測定を行い、測定値の誤差を調べておく。コンクリート打設後の測定においても、それと同一の誤差が生じるものと考え、その値を補正値として用いる方法を採用した。

図-14に、発泡スチロールを用いた事前試験結果の一例を示す。鉄筋径は上下ともにD25、鉄筋間隔を125mm、250mmの2種類の組み合わせと、下筋だけD13で鉄筋間隔を125mmにした場合について行った。かぶり50mm程度までは、直交鉄筋の影響は生じていないが、それ以上のかぶりについては、鉄筋径や鉄筋間隔による影響を受けるため、事前試験による補正が必要となることがわかる。

(2) 基本性能

コンクリート試験体における測定結果で、6/19の8:00

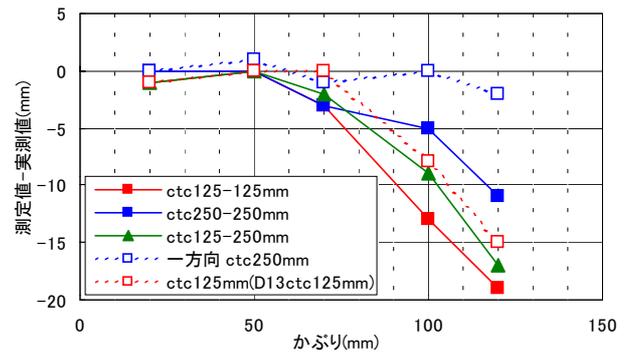


図-14 事前試験（直交鉄筋による影響）

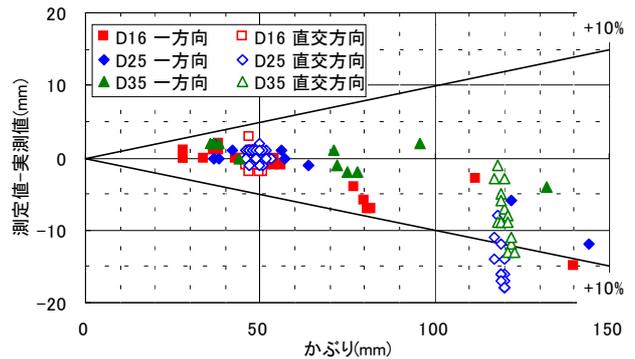


図-15 かぶりと誤差の関係（補正前）

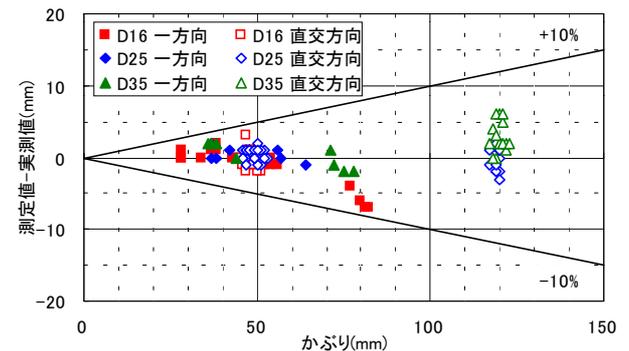


図-16 かぶりと誤差の関係（補正後）

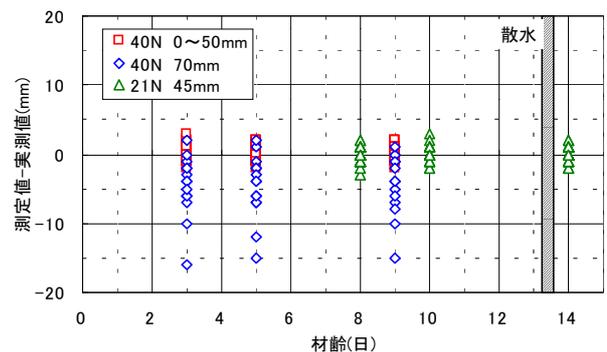


図-17 材齢と誤差の関係

に着目して、かぶり厚さと測定誤差の関係を示す。図-15は事前試験を実施しなかった場合、図-16は事前試験を実施して、直交鉄筋の影響を補正した場合である。鉄筋径および隣接鉄筋との間隔の影響については、すべて測定機器Bに入力して、補正を行っている。

今回の測定の範囲では、事前試験の結果、50mm以下のかぶりでは直交方向鉄筋の補正値はすべてゼロであった。かぶり50mm以上では、補正実施前の測定値は大きくばらついているが、各々の配筋状態に応じた事前試験による測定値と実測値の差を補正値として加えると、±10%程度の良好な精度を有していることがわかる。

図-17にコンクリート材齢と測定誤差の関係を示す。非磁性体の影響を受けないことから推察されるとおり、コンクリート材質の影響はなく、いずれの測定点とも、何度測定してもほぼ同一の測定値となった。

6. 重ね継手部の測定

ここまでは、1本の鉄筋を対象とした測定精度と結果を示してきたが、実構造物では鉄筋の重ね継手の位置で測定を行う場合がある。そこで、重ね継手部におけるかぶり測定精度の検討を行った。

(1) 試験体

鉄筋径はD16を使用し、図-18に示す鉄筋継手部を有する試験体を作製した。純かぶり38mm、72mmおよび100mmの3種類である。

(2) 測定精度

図-19に、電磁波法および電磁誘導法による継手部の測定結果をあわせて示す。

電磁波法(測定機器A)では、継手部分において1本の場合と変わらない精度で測定できている。一方、電磁誘導法(測定機器B)では、1本の鉄筋径であるD16と入力した場合、大きな誤差を生じていることがわかる。

図-20に、重ね継手部の上に発泡スチロールを置いた事前試験によって、鉄筋径の入力を変化させた場合の誤差を示す。鉄筋の断面積が同等となるように鉄筋径の入力値を1.4倍程度と設定した場合と比較して、今回の場合では鉄筋径を1.8倍の29mmと入力するのが最も良い精度が得られる結果となった。電磁誘導法の場合、測定箇所が重ね継手部であると把握できていれば、補正を行うことが可能であるが、そうでない場合は大きな誤差を生じることになるので注意が必要である。

7. まとめ

1) 電磁波法、電磁誘導法ともに、型枠脱枠翌日から材齢10日までの範囲で、測定値の変化はほとんど見られなかった。

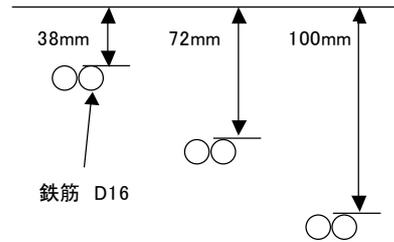


図-18 重ね継手部の試験体

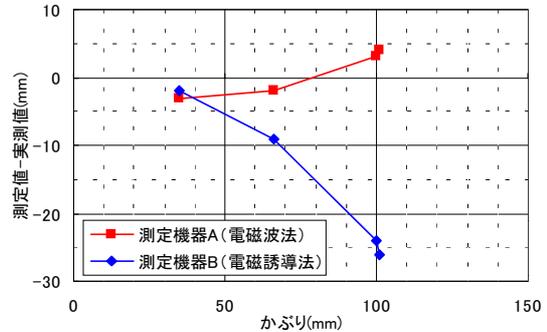


図-19 重ね継手部における測定精度

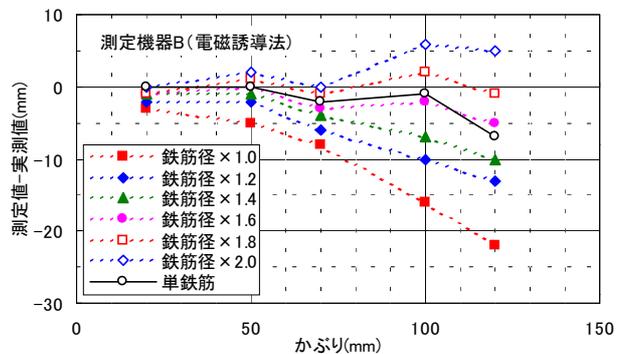


図-20 重ね継手部における鉄筋径入力による影響

- 2) 重ね継手部を有しない基本的な配筋状態において、電磁波法、電磁誘導法ともに、適切な補正を行うことにより、かぶり厚さに対して±10%程度以内の精度を有している。
- 3) 重ね継手部を有する構造物のかぶり測定を行う場合、電磁誘導法では継手部の存在を事前に把握しておく必要がある。電磁波法では特に精度への影響は認められない。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02〔基礎編〕，pp.121-126
- 2) 森濱，笠井，湯浅：コンクリート内部の含水状態と比誘電率の関係，日本非破壊検査協会平成11年春季大会講演概要集，pp.91-94，1999.5
- 3) 国土交通省土木研究所：非破壊試験によるコンクリート品質，厚さ，鉄筋かぶり・径の計測に関する共同研究報告書，2001.3