

論文 RC造建築構造物のかぶり厚さを対象とした電磁誘導式鉄筋探査機の適用性に関する検討

百瀬 晴基^{*1}・大泉 健児^{*2}・閑田 徹志^{*3}・浅岡 茂^{*4}

要旨 : RC造建築構造物において電磁誘導法の原理を用いた鉄筋探査機の性能を確認することを目的に, 実大のRC造壁部材を作製し, 各種の電磁誘導式鉄筋探査機の測定精度を検証した。検証の結果, 測定誤差は-6~5mmの範囲であるが, その多くの場合は測定値は実測値に比べて浅い結果を示すことが確認された。また, 模擬試験体による実験を行った結果, 鉄筋間隔が100mm以上であれば±5mm以内の精度でかぶり厚さの測定を実施することができるが, 重ね継ぎ手となる場合の測定精度は-15~0mmとなることが明らかとなった。最後に測定結果の精度向上を図るため, かぶり厚さ, 鉄筋径, 鉄筋間隔の影響を考慮した補正式を提案した。

キーワード : 非破壊検査, かぶり厚さ, 電磁誘導

1. はじめに

2009年2月に改訂されたJASS 5ではコンクリート打設後のかぶり厚さの検査に関して記述されるなど¹⁾, RC造建築構造物において, かぶり厚さの確保がこれまで以上に重要視されてきている。代表的なかぶり厚さの非破壊検査機として電磁誘導法があり, その特徴として, コンクリートの物性の影響を受けないこと, 測定可能深さが浅いこと, 近接する鉄筋の影響を受けることなどが挙げられる²⁾。

電磁誘導式鉄筋探査機は, 探査プローブ内のコイルに交流電流を流し周辺に電磁場を励起する。この電磁場内に鉄筋などの金属物体が存在すると電磁場が影響を受け変化が生じ, この変化量をサーチコイルで検出することによりかぶり厚さを測定する。即ち, この電磁場内に目標とする鉄筋以外の金属物体が存在すると測定精度が低下することとなる。RC造建築構造物を対象に, 電磁誘導法によりかぶり厚さを測定する場合, 鉄筋量が多いケースでは近接する鉄筋の影響を受けやすく測定精度が低下することが懸念される。

本論では, RC造建築構造物における各種の電磁誘導式鉄筋探査機の測定精度を確認することを目的に, 実大のRC造壁部材を作製し, 電磁誘導式鉄筋探査機によるかぶり厚さの測定値とかぶり部をはつり実測したかぶり厚さの実測値を比較した。また, 今回検討した3種の電磁誘導式鉄筋探査機を対象に, アクリル板を用いた模擬試験体により, 鉄筋間隔や直交鉄筋などの配筋条件が測定誤差に与える影響程度と傾向を確認すると共に, 鉄筋間隔による測定誤差を改善する補正式を検討した。

2. 実大RC造壁部材による精度検証

2.1 実験概要

実大のRC造壁部材を作製し, 各種の電磁誘導式鉄筋探査機の測定精度を確認した。検討する電磁誘導式鉄筋探査機はメーカーが異なる表-1の3種類とした(以下, 電磁誘導A, 電磁誘導B, 電磁誘導Cと称する)。

実験に供した実大RC造壁部材を写真-1および図-1に示す。壁部は幅4400mm×高さ2800mm×厚さ200mmの形状であり, 幅1550mm×高さ1150mmの開口を設けた。柱部の断面形状は600mm×600mm, 梁部の断面形状は500mm×400mmとした。実構造物に近い部材とするため, 壁下部に下層からの差し筋を設け, 開口部の隅角部にはひび割れ補強筋として, D16の鉄筋を斜めに配した。

表-1 検討する電磁誘導式鉄筋探査機一覧

記号	測定原理	精度向上として 入力できる項目	かぶり厚さ測定精度 (技術資料記載値)
電磁誘導A	電磁誘導法	鉄筋径	かぶり厚さ80mm以下: ±1mm かぶり厚さ100mm以下: ±3mm かぶり厚さ110mm以下: ±4mm
電磁誘導B	電磁誘導法	鉄筋径	かぶり厚さ60mm以下: ±1mm かぶり厚さ80mm以下: ±2mm かぶり厚さ100mm以下: ±3mm
電磁誘導C	電磁誘導法	鉄筋径 鉄筋間隔	かぶり厚さ40mm以下: ±1mm かぶり厚さ60mm以下: ±2mm かぶり厚さ80mm以下: ±4mm かぶり厚さ100mm以下: ±5mm

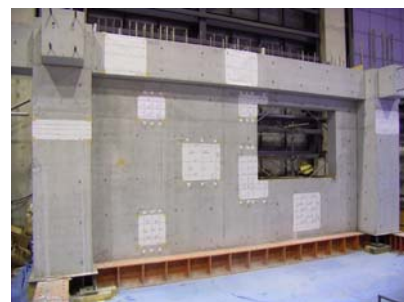


写真-1 実大RC造壁部材概観

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 研究員 博士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 研究員

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D (正会員)

*4 鹿島建設(株) 建築技術本部 建築技術 次長

コンクリートの使用材料を表-2 に、調合表を表-3 に示す。コンクリートは RC 造建築構造物で一般的に用いられる普通強度域のコンクリートとし、呼び強度を 24、スランブを 18cm、最大粗骨材径を 20mm とした。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比を 59.4%、細骨材率を 48.7%とした。

かぶり厚さの測定箇所の詳細を表-4 に示す。測定箇所は、壁部 6 箇所、梁部 2 箇所、柱部 2 箇所の計 10 箇所とした。測定数は表-4 に示す計 59 点とした。

3 種の電磁誘導式鉄筋探査機により、各測定点のかぶり厚さを測定した。かぶり厚さの測定は、電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置及び鉄筋径の測定方法(案)³⁾に準拠し、図-2 に示す手順で測定した。実物件のかぶり厚さの測定では、設計情報から鉄筋径が既知であることから、鉄筋径を入力してかぶり厚さを測定した。

かぶり厚さ実測値の測定方法を図-3 に示す。かぶり厚さの測定後、測定点のかぶり部をはつり、躯体表面にガイドを設け、ノギスにより実測値を測定した。

2.2 実験結果

かぶり厚さの実測値と測定値を図-4 に、全測定データのかぶり厚さの測定誤差を図-5 に示す。なお、本論では、かぶり部をはつり実測した値を実測値、電磁誘導式鉄筋探査機により測定した値を測定値とする。測定誤差は測定値から実測値を減じて求めており、マイナスを示す場合は測定値が実測値に比べて浅いことを意味し、プラスを示す場合は測定値が実測値に比べて深いことを意味する。また、図-5 中の平均値や変動係数は、上述の方法で算定した測定誤差から求めており、3 機種により得られた全てのデータを対象とした。

図-4 および図-5 から、電磁誘導式鉄筋探査機の種類によらず、測定値は実測値より浅い傾向を示しておりその測定誤差は 6~5mm の範囲に分布していることが確認できた。また、平均値は-1.7mm であり、標準偏差は、

1.8mm、変動係数は 107.2%であった。平均値が小さいことは、全体的に測定精度が高いことを意味するが、変動

表-2 使用材料

大項目	小項目	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³
細骨材①	八王子産砕砂	表乾密度:2.62g/cm ³
細骨材②	成田産砂	表乾密度:2.70g/cm ³
粗骨材①	八王子産砕石	表乾密度2.65g/cm ³
粗骨材②	秩父産砕石	表乾密度2.65g/cm ³
混和剤	AE減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物

細骨材①:細骨材②=質量比7:3、粗骨材①:粗骨材②=質量比6:4

表-3 調合表

W/C	s/a	単位量(上:kg/m ³ 、下:L/m ³)					
		水	セメント	細骨材①	細骨材②	粗骨材①	粗骨材②
59.4%	48.7%	181	305	601	257	556	370
		181	97	229	100	210	137

呼び強度:24、スランブ:18cm、空気量:4.5%

表-4 測定箇所詳細

NO	記号	測定数	部位詳細	配筋	備考
1	壁①	3	壁下部	手前 縦:D13@100mm 奥 横:D13@200mm	差し筋有り
2	壁②	6	壁下部	手前 縦:D13@200mm 奥 横:D13@200mm	差し筋有り
3	壁③	6	通常部	手前 縦:D13@100mm 奥 横:D13@100mm	-
4	壁④	6	通常部	手前 縦:D13@200mm 奥 横:D13@200mm	-
5	壁⑤	9	開口隅角部	手前 縦:D13@100mm 奥 横:D13@100mm	ひび割れ補強筋直上
6	壁⑥	9	開口隅角部	手前 縦:D13@100mm 奥 横:D13@200mm	-
7	梁①	3	通常部	手前 フープ:D13@200mm 奥 主筋:D22@200mm	-
8	梁②	2	通常部	手前 フープ:D13@200mm 奥 主筋:D22@200mm	-
9	柱①	9	通常部	手前 フープ:D13@50mm 奥 主筋:D22@150mm	-
10	柱②	6	通常部	手前 フープ:D13@50mm 奥 主筋:D35@150mm	-

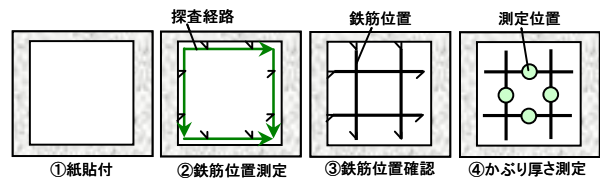


図-2 電磁誘導式鉄筋探査機によるかぶり厚さの測定方法

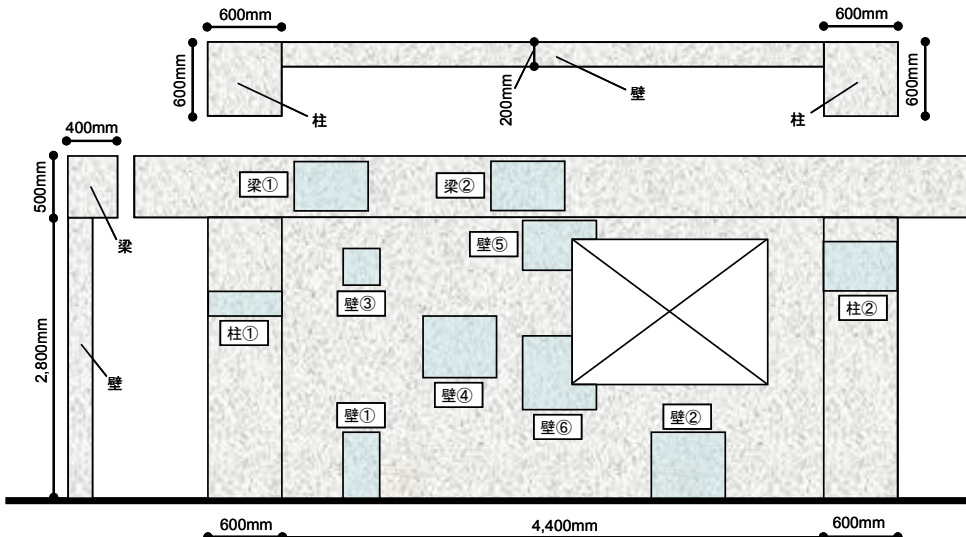


図-1 実大 RC 造壁部材詳細

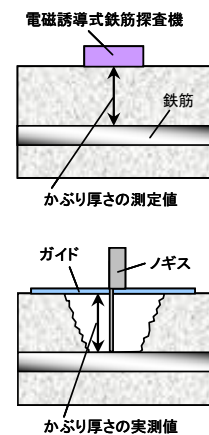


図-3 実測値の測定方法

係数が大きいことから、条件によっては測定精度が大きく悪くなると考えられる。

2.3 各部位の測定誤差

(1) 壁通常部

壁通常部におけるかぶり厚さの測定誤差を図-6に示す。壁通常部とは、手前に配されたD13@200mmの縦筋に直交してD13@200mmの横筋が配されており、鉄筋間隔が広く近接する鉄筋の影響を受けにくい部位である。ここで、手前側の鉄筋とは、電磁誘導式鉄筋探査機で測定する側の躯体表層に最も近い鉄筋を意味し、奥側の鉄筋とは手前側の鉄筋に直交に隣接した鉄筋を意味する。

図-6から、測定誤差は-2~2mmの範囲であり、鉄筋間隔が200mm程度の近接する鉄筋の影響が小さい箇所であれば、高い精度でかぶり厚さを測定できることが明らかとなった。

(2) 壁下部

壁下部におけるかぶり厚さの測定誤差を図-7に示す。壁下部とは、手前に配されたD13@100mmもしくはD13@200mmの縦筋に直交してD13@200mmの横筋が配されている。また、縦筋には下層からの差し筋が重ね継ぎ手で配されており、近接する鉄筋の影響が大きいと考えられる部位である。

図-7から、測定誤差は-5~0mmの範囲であり、測定値は実測値に比べて浅い結果を示している。これは測定範囲内に測定対象以外の鉄筋が存在したため、電磁場の

変化量が大きくなり、かぶり厚さが浅く出力されたと考えられる。壁下層部など重ね継ぎ手が存在する壁部のかぶり厚さを測定する場合には、実際のかぶり厚さに対して浅く測定される恐れがあることに注意を要する。

(3) 壁開口隅角部

壁開口隅角部におけるかぶり厚さの測定誤差を図-8に示す。壁開口隅角部とは、手前に配されたD13@100mmの縦筋に直交してD13@100mmの横筋が配されており、さらに奥側にひび割れ補強筋としてD16の鉄筋が斜めに配されている。

図-8から、測定誤差は電磁誘導Aでは-3~-1mm、電磁誘導Bでは-2~3mm、電磁誘導Cでは-6~-3mmの範囲であり、他の部位に比べて測定誤差が大きく、電磁誘導式鉄筋探査機毎にその傾向は異なる結果となった。壁

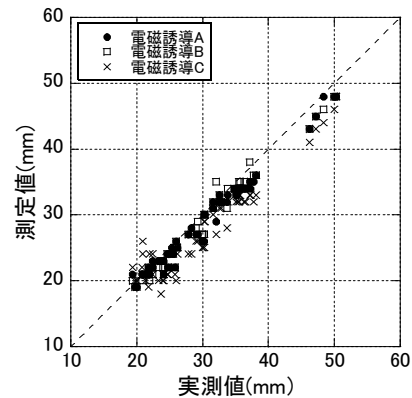


図-4 かぶり厚さの実測値と測定値

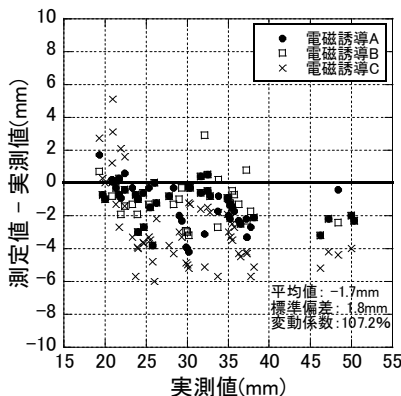


図-5 かぶり厚さの測定誤差 (全データ)

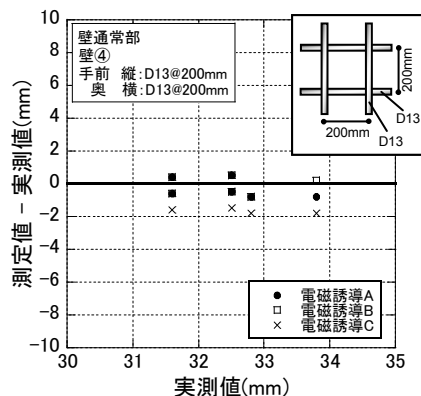


図-6 かぶり厚さの測定誤差 (壁通常部)

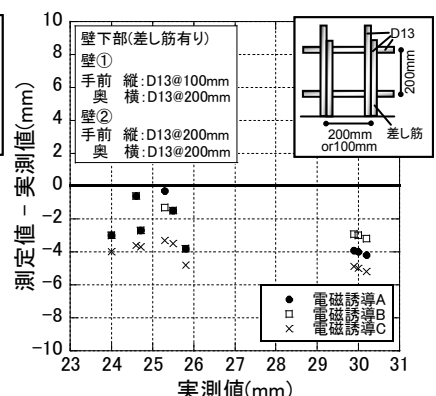


図-7 かぶり厚さの測定誤差 (壁下部)

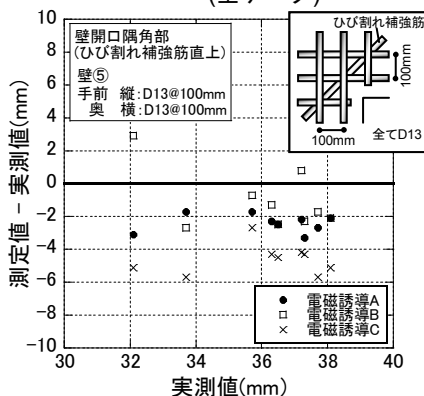


図-8 かぶり厚さの測定誤差 (壁開口隅角部)

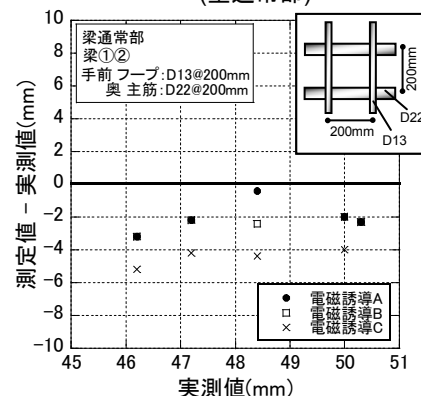


図-9 かぶり厚さの測定誤差 (梁通常部)

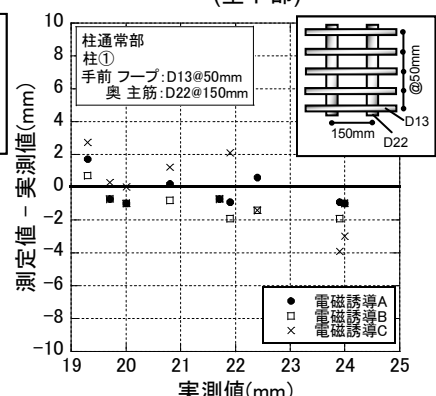


図-10 かぶり厚さの測定誤差 (柱通常部)

下部と同様に、壁開口隅角部の様に、通常の配筋に加えてひび割れ補強筋を設置する箇所のかぶり厚さを測定する場合には、実際のかぶり厚さに対して浅く測定される恐れがあることに注意を要すると考えられる。

(4) 梁通常部

梁通常部におけるかぶり厚さの測定誤差を図-9に示す。梁通常部とは、手前に配されたD13@200mmのフープ筋に直交してD22@200mmの主筋が配されている。

図-9から、梁通常部の測定誤差は-6~0mmの範囲であり、実測値に対して測定値は浅い結果となった。測定対象に直交して配された鉄筋の鉄筋間隔が200mmと比較的広い配置であったが、測定値は実測値に対して浅い結果となっている。これは、直交する鉄筋が太径の鉄筋であったため、電磁場を与える影響が大きくなったことが考えられる。このことから、鉄筋間隔が大きい場合であっても、鉄筋径が大きい場合やかぶり厚さが大きい場合には、測定精度が低下すると考えられる。

(5) 柱通常部

柱通常部におけるかぶり厚さの測定誤差を図-10に示す。柱通常部とは、手前に配されたD13@50mmのフープ筋に直交してD22@150mmの主筋が配されている。

図-10から、電磁誘導Cの測定誤差は-4~2mmの範囲であり、その他の電磁誘導式鉄筋探査機の測定誤差は-2~2mmの範囲であった。手前に配されたフープ筋は、鉄筋間隔が50mmであり近接の鉄筋の影響が大きいと考

えられたが、電磁誘導AおよびBは他の部位に比べて測定誤差は小さい結果となっている。この原因としては、かぶり厚さの実測値が20mm程度と小さいため、測定誤差も小さくなったことが考えられる。また、壁開口隅角部と同様に、同じ電磁誘導式鉄筋探査機であっても、近接の鉄筋の影響は異なる結果となった。

3. 模擬試験体による精度検証

3.1 実験概要

実大のRC造壁部材における3種の電磁誘導式鉄筋探査機の精度検証を実施した結果、同じ電磁誘導法であっても、近接の鉄筋の影響は異なる結果となった。今回検討した3種の電磁誘導式鉄筋探査機を対象に、アクリル板を用いた模擬試験体により、鉄筋間隔や直交鉄筋などの配筋条件が測定誤差に与える影響程度を確認した。

試験体詳細を図-11におよび図-12に示す。配筋条件として、図-11に示す壁配筋の影響、図-12に示す柱配筋の影響を確認した。かぶり厚さの水準は、RC造建築物で一般的なかぶり厚さの範囲とし、30mmおよび60mmについて実験を実施した。電磁誘導式鉄筋探査機でかぶり厚さを測定する場合、コンクリートの様に電磁場に影響を与えない材質であれば測定精度に影響を与えないことから、かぶり部を模擬する材料として非磁性のアクリル板を選定した。模擬試験体として、鉄筋を組んだ後にかぶりコンクリートを模擬した非磁性の

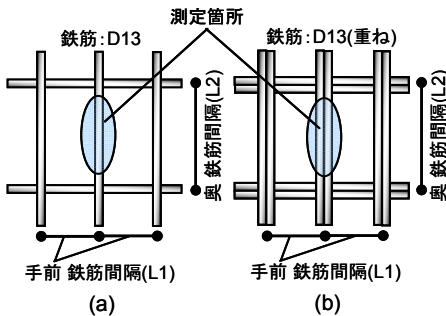


図-11 試験体条件詳細 (壁配筋の影響)

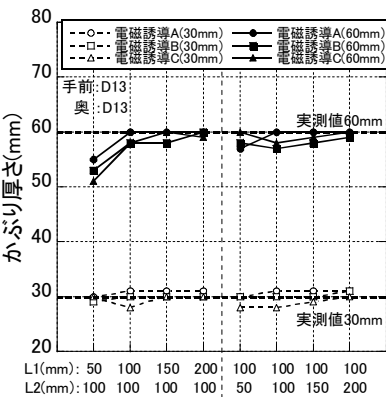


図-13.a 壁配筋の影響 (手前D13、奥D13)

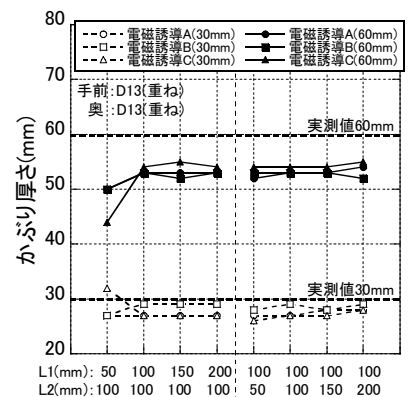


図-13.b 壁配筋の影響 (手前D13重ね、奥D13重ね)

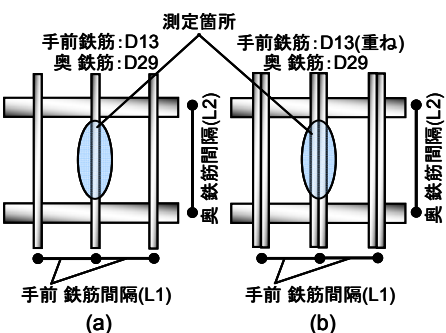


図-12 試験体条件詳細 (柱配筋の影響)

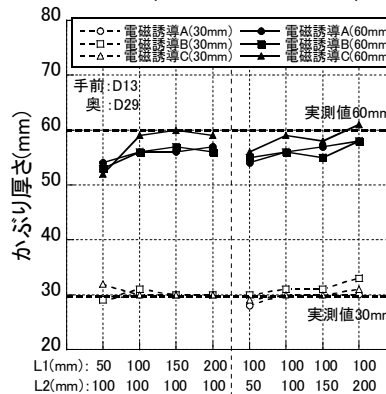


図-14.a 柱配筋の影響 (手前D13、奥D29)

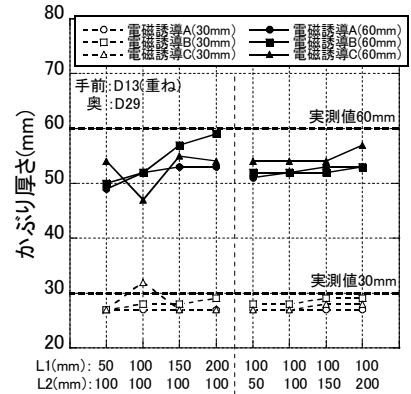


図-14.b 柱配筋の影響 (手前D13重ね、奥D29)

アクリル板を載せた試験体を作製し、アクリル板の上から電磁誘導式鉄筋探査機によりかぶり厚さを測定した。このアクリル板の厚さをかぶり厚さの実測値とした。なお、実大 RC 造壁部材による実験と同様に、鉄筋径を入力してかぶり厚さを測定した。

3.2 実験結果

(1) 壁配筋の影響

壁配筋の影響を図-13.a および図-13.b に示す。壁配筋の影響を確認するため、D13 を格子状組み、手前の鉄筋間隔と奥側の鉄筋間隔の影響を確認した。図中の X 軸は手前と奥側の鉄筋間隔を、Y 軸はかぶり厚さを示しており、実測値が 30mm および 60mm の場合のそれぞれの測定値をプロットしている。

図-13.a から、電磁誘導 A および B では鉄筋間隔が狭くなるほど実測値に比べて浅い結果を示した。また、手前だけでなく直交する奥側の鉄筋の影響も若干ではあるが認められた。電磁誘導 C では鉄筋間隔が狭くなるほど実測値に比べて浅い結果を示す傾向が認められたが、鉄筋間隔 50mm では深い結果を示すケースも確認された。図-13.b は、D13 の鉄筋を重ね継ぎ手とし格子状に組んだ配筋の結果である。図-13.b から、図-13.a と同じ傾向であり全体的に浅い結果となった。

図-13.a および図-13.b から、壁部のかぶり厚さを測定する場合、手前側の鉄筋間隔が 100mm 以上であれば $\pm 3\text{mm}$ 精度でかぶり厚さの測定を実施することができるが、鉄筋間隔が狭くかぶり厚さが 60mm 以上の深いケースや、重ね継ぎ手となるケースでは測定誤差が $-15\sim 0\text{mm}$ 程度になると考えられる。

(2) 柱配筋の影響

柱配筋の影響を図-14.a および図-14.b に示す。柱配筋の影響を確認するため、フープ筋 D13 と主筋 D29 を格子状に組み、手前と奥側の鉄筋間隔の影響を確認した。

図-14.a および図-14.b から、全体の傾向は、壁配筋と同じ傾向であることが確認できた。また、直交に配された奥側の鉄筋径が大きいこともあり、壁配筋に比べて奥側の鉄筋間隔の影響が大きい結果となった。

柱部のかぶり厚さを測定する場合、フープ筋の鉄筋間隔が 100mm 以上であれば $\pm 5\text{mm}$ 以内の精度でかぶり厚さの測定を実施することができるが、フープ筋が重ね継ぎ手となるケースでは測定誤差が $-15\sim 0\text{mm}$ 程度になると考えられる。この傾向は梁部でも同様であると推測され、特に鉄筋が密に配されている接合部のかぶり厚さの測定には注意が必要であると考えられる。

4. 電磁誘導法における精度向上手法の検討

4.1 実験概要

アクリル板を用いた模擬試験体による実験結果から、

表-5 実験要因と水準

実験要因	実験水準				
	1	2	3	4	5
かぶり厚さ	20mm	30mm	40mm	50mm	60mm
鉄筋種類	D10	D13	D16	D25	D32
鉄筋間隔	空き0mm	50mm	75mm	100mm	200mm

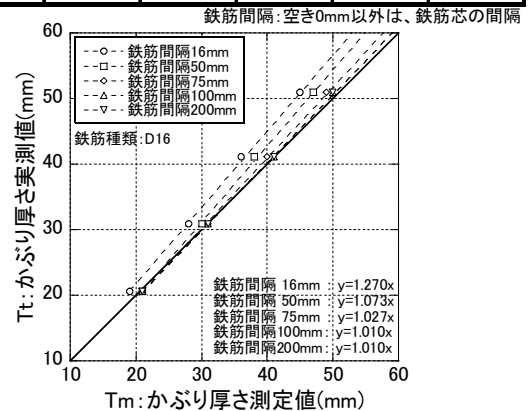


図-15 測定誤差に与える鉄筋間隔の影響

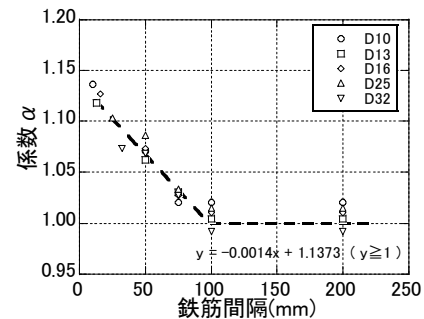


図-16 補正係数 α に与える鉄筋間隔の影響

近接する鉄筋の影響により、電磁誘導式鉄筋探査機の測定値は実測値に比べて浅い結果を示すことが確認された。本論では、電磁誘導 A に着目し、鉄筋間隔の影響を補正する手法について検討した。

アクリル板を用いた模擬試験体による実験から、近接する鉄筋の影響として、手前側の鉄筋だけでなく、直交する奥側の鉄筋の影響も大きいことが確認されているが、本論では補正手法の可能性を検討することとし、手前側の鉄筋に限定し検討を実施した。

実験要因と水準を表-5 に示す。実験要因は、かぶり厚さ、鉄筋径、鉄筋間隔とし、アクリル板を用いた模擬試験体により、かぶり厚さを測定した。

4.2 検討結果

測定誤差に与える鉄筋間隔の影響を図-15 に示す。図中の X 軸はかぶり厚さ測定値を示し、Y 軸はかぶり厚さの実測値を示す。図-15 は D16 の実験結果を示しており、鉄筋間隔が狭いほど測定値は浅い結果となっていることが分かる。鉄筋間隔や配筋状況を補正する式はいくつか提案されているが^{4),5)}、図-15 に示すように、測定誤差はかぶり厚さの測定値に比例していることから、本検討では補正式を式(1)によるものとした。即ち、図-15 における近似式の傾きが補正係数 α となる。

$$T = \alpha \cdot T_m \quad (1)$$

ここに、 T ：かぶり厚さの補正值(mm)

α ：鉄筋間隔および径を考慮する補正係数

T_m ：かぶり厚さの測定値(mm)

図-15と同様に、D10、D13、D25、D32についても補正係数 α を算定した。補正係数 α に与える鉄筋間隔の影響を図-16に示す。図-16から、補正係数 α は鉄筋径の影響が小さく、また鉄筋間隔100mm以上であれば変化しない結果となった。このことから、補正係数 α を表す式として、鉄筋間隔の関数となる式(2)が得られた。

$$\alpha = -0.0014 \cdot L + 1.1373 \quad (\alpha \geq 1.00) \quad (2)$$

ここに、 L ：鉄筋間隔(mm)

測定値の測定誤差を図-17.aに、補正值の測定誤差を図-17.bに示す。図-17.aから、測定値の測定誤差は-7~2mmの範囲であり、実測値に対して浅い結果であることが分かる。これに対して、式(1)および式(2)により補正したかぶり厚さの補正值による測定誤差は、図-17.bに示すように、 ± 2 mmの範囲であり精度良く実測値を再現できる結果となった。

今回検討した補正式は、かぶり厚さ、鉄筋径、鉄筋間隔の影響を考慮しているが、実構造物を対象にかぶり厚さの補正を行う場合には、直交鉄筋の鉄筋径および間隔を考慮した補正式に拡張する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 実大のRC造壁部材を作製し、3種の電磁誘導式鉄筋探査機の測定精度を検証した結果、測定値は実測値より浅い傾向を示しており、その測定誤差は-6~5mmの範囲に分布していることが確認できた。
- (2) 実大のRC造壁部材を対象とした測定誤差は、平均値は-1.7mmであり、変動係数は107.2%であった。平均値が小さいことは、全体的に測定精度が高いことを意味するが、変動係数が大きいことから、条件によっては測定精度が大きく悪くなると考えられる。
- (3) 実大のRC造壁部材による精度検証により、鉄筋間隔の広い壁通常部では高い精度でかぶり厚さの測定ができること、近接する鉄筋の影響を受けやすい壁下部、壁開口隅角部、重ね継ぎ手となる壁部、フープ筋間隔の狭い柱部などにおいて測定誤差が大きくなることなどが明らかとなった。
- (4) アクリル板を用いた模擬試験体による実験結果から、壁部のかぶり厚さを測定する場合、手前側の鉄筋間隔が100mm以上であれば ± 3 mm以内の精度でかぶり厚さの測定を実施することができるが、鉄筋間隔が狭いかぶり厚さが60mm以上の深いケースや、重ね継ぎ手となるケースでは測定誤差が-15~0mm程度になると考えられる。

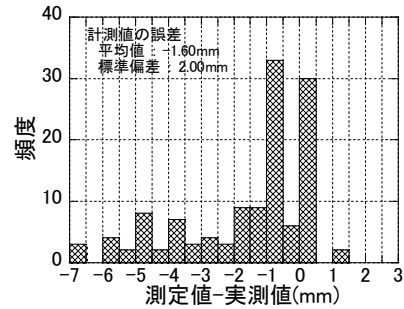


図-17.a 測定値の測定誤差

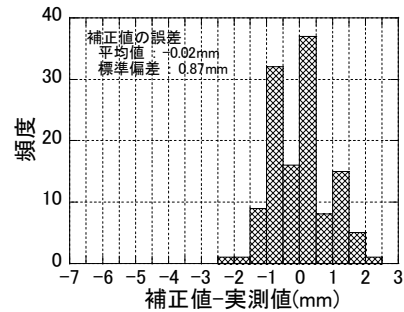


図-17.b 補正值の測定誤差

- (5) アクリル板を用いた模擬試験体による実験結果から、柱部のかぶり厚さを測定する場合、フープ筋の鉄筋間隔が100mm以上であれば ± 5 mm以内の精度でかぶり厚さの測定を実施することができるが、フープ筋が重ね継ぎ手となるケースでは測定誤差が-15~0mm程度になると考えられる。
- (6) かぶり厚さ、鉄筋径、鉄筋間隔の影響を考慮できる補正式を検討した結果、かぶり厚さの補正值による測定誤差は ± 2 mmの範囲であり、精度良く実測値を再現できる結果となった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、測定にご協力頂いた機器メーカー各社に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会；建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5, 2009.2
- 2) 小井戸純司：鉄筋位置測定のための非破壊試験-電磁誘導法-, 非破壊検査, Vol.47, No.10, PP.717-722, 1998.10
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法, PP.401-410, 2007.3
- 4) (独)土木研究所：電磁誘導法によるかぶり測定値の補正方法および補正かぶりの求め方(H19)
- 5) 東川孝治, 曾我部正道, 井上裕司, 谷村幸裕：鉄筋探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