

論文 非破壊検査によるかぶり、鉄筋位置の測定精度の評価

榊原 泰造^{*1}・竹田 宣典^{*2}・十河 茂幸^{*3}

要旨：各種の非破壊検査機器類の性能検証を、実構造物レベルで行った場合についての適用性を評価した。鉄筋かぶり、径、配筋間隔をパラメータとした鉄筋コンクリート構造物を電磁波レーダ法、電磁誘導法を用いて鉄筋探査を行い、かぶりと鉄筋位置について定量的に比較を行い、測定精度に及ぼす種々の影響を検討した。その結果、配筋間隔の粗密がかぶりの測定値の精度に影響を及ぼし、また配筋位置の面的な座標に関する推定の精度にも少なからず影響を及ぼしていることが分かった。

キーワード：かぶり、鉄筋径、配筋間隔、電磁波レーダ法、電磁誘導法、実構造物モデル

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の健全度診断においては、各種非破壊検査に頼るところが大きくなりつつある。昨今の鉄筋コンクリート構造物では、スリム化が図られる一方で、構造鉄筋の複雑化、過密化も増してきている。コンクリート内部鉄筋の複雑化・過密化は、所定のかぶり寸法確保不足など、コンクリート構造物の耐久性に及ぼす施工上の影響も懸念され、さらに実際の構造物の調査時には、内部鉄筋の過密化により非破壊検査手法の適用を制限するものとも成り得る。

そこで著者らは、現在供試体実験レベルで

多々行われている各種非破壊検査機器類の性能検証を、実構造物レベルで行った場合の適用性の評価を目的とし、写真-1のような様々な配筋状態、埋設物、劣化状況の位置を正確に把握している実物大のコンクリート構造物を作製し、各種非破壊検査機器の評価実験を行った。

本論文は、その中で構造鉄筋に着目し、電磁波レーダ法および電磁誘導法により計測を行った結果について、かぶり・径・配筋間隔をパラメータとした検証を行い、実配筋との差を定量的に比較することによって、測定精度に及ぼす種々の影響と検査方法の適用性を検討した結果を述べるものである。



写真 - 1 製作した実構造物モデル

*1 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室グループ長 博士(工学)(正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所副所長 工博 (正会員)

表 - 1 かぶりの測定項目一覧

かぶり (mm)		配筋間隔 (mm)	
		75	150
鉄筋径	D13	28 ~ 78	28 ~ 144
		3種類	7種類
	D19	22 ~ 150	22 ~ 150
		4種類	10種類

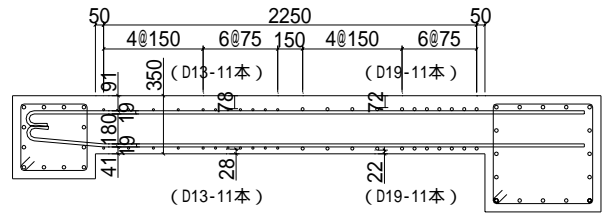


図 - 1 実構造物モデルの水平断面の一例

2. 実験概要

2.1 実構造物モデルの概要

表 - 1 に測定項目一覧を、図 - 1 に実験で使用した実構造物モデルの水平断面図の一例を示す。構造物モデルは柱・壁・スラブで構成され、鉄筋はすべて異形棒鋼を使用し、かぶり、径、配筋間隔をパラメータとした。横筋の配筋間隔はすべて 150mm であり、実験での測定対象は縦筋および横筋の両方とした。なお、かぶりは表面かぶり、配筋間隔は鉄筋の芯での値である。

次にコンクリートの使用材料を表 - 2 に、目標としたフレッシュコンクリートの性状と示方配合、および強度試験結果を表 - 3 に示す。コンクリートの打込みに起因する硬化コンクリートの品質の変動を極力抑制するため、またパイププレートを使用することによる振動が鉄筋の組立て精度に及ぼす影響を考慮して、高流動コンクリートとした。さらにコンクリート躯体全表面において、内部配筋位置と相関のない、200mm 等間隔で鉛直水平方向に格子墨を施し、測定の際の基準線（測定線）とした。墨の各交点では打ちあがったコンクリートの出来形寸法計測を

表 - 2 コンクリートの使用材料

材料	記号	銘柄	表乾密度 (g/cm ³)
セメント	C	低熱ポルトランドセメント (L)	3.22
混和材	LF	石灰石微粉末	2.70
細骨材	S1	熊谷産陸砂 (75%)	2.61
	S2	佐原産陸砂 (25%)	2.59
粗骨材	G	栃木県安蘇郡葛生産石灰砕石 (2005)	2.70
混和剤	AD1	高性能AE減水剤	-

表 - 3 コンクリートの示方配合と性質

粗骨材 最大寸法 (mm)	目標値		水結合材 比 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材率 s / a (%)	単位量 (kg/m ³)						圧縮強度 (N/mm ²)		
	スラブ加- (cm)	空気量 (%)				水 W	セメント C	石粉 LF	細骨材		粗骨材 G	高性能 AE減水剤 AD1	28日	6ヶ月
									S1	S2				
20	65	4.5	30.9	48.6	48.5	170	350	200	759		837	6.60	50.0	65.8
									569	190				

行い、全交点における部材厚さを求めて各種非破壊検査による測定値の補正を行った。

2.2 測定方法

測定は電磁波レーダ法および電磁誘導法にて行った。表 - 4 に示すように、測定対象がかぶりの場合、電磁波レーダ法により同一メーカーの測定機器を使用した異なる 2 測定業者および、電磁誘導法を使用した 1 測定業者の計 3 測定業者による結果の比較検討を行った。使用した測定機器が同じ場合でも、測定者が異なることによる結果の差異を考慮したものである。測定対象が配筋位置の場合は、電磁波レーダ法による 1 測定業者の結果の検討を行った。電磁波レーダ法および電磁誘導法とも、測定当日に対象構造物の鉄筋のかぶり寸法が既知である部位において、事前にコンクリートの比誘電率、透磁率等の校正を行ったうえで以後の測定を行った。スキニングによる測定では、主に各壁の縦 1800mm × 横 2000mm の範囲の測定線上を中心に行い、定めた測定開始位置から終了位置まで機器を途中停止させることなく測定した。本実験構造物において、電磁波レーダ法によって取得された波形データの一例を図 - 2 に示す。

表 - 4 測定対象と測定手段

測定対象	測定手法	測定機器	測定業者
かぶり	電磁波レーダ法	N社製	A社, B社
	電磁誘導法	H社製	C社
配筋位置	電磁波レーダ法	N社製	A社

3. 実験結果および考察

3.1 かぶりの測定精度

(1) かぶり深さの影響

図 - 3 に、表 - 4 で示した測定対象をかぶりとした場合について、かぶりの測定精度に及ぼす深さの影響を径別に比較したものを示す。なお、実験遂行上、A～C社の各測点における測定データ数は必ずしも一致しておらず、また電磁誘導法においては、本実験の範囲では、かぶり144mmにおける測定は不能であった。測定機器の能力、鉄筋径、配筋間隔などが影響を及ぼしていると考えられる。電磁誘導法による精度よいかぶりの計測は、かぶり100mm程度以下と報告する例もある¹⁾。かぶりの測定結果については、測定可能であった範囲を図中に示す。

電磁波レーダによる結果については、本実験の範囲では全体的に精度よく測定できている。かぶりの大きさと精度についての明確な相関は

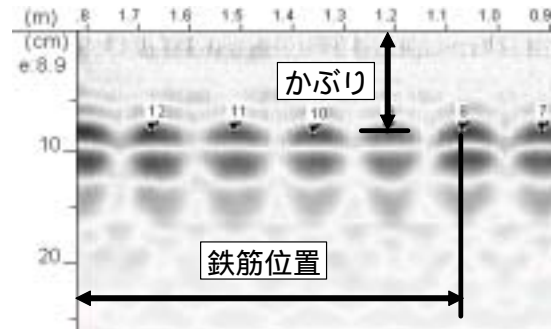


図 - 2 電磁波レーダ法によって得られた波形データの一部

認められないものの、かぶりの大きさに対する真値との誤差は、かぶりの小さい範囲で最大でも10%であり、真値との偏差をかぶりで除した値で定義される誤差率は、かぶりが大きくなるにつれて小さくなる傾向が認められた。また例外はあるが、かぶりが小さい場合には、測定値が真値よりも小さく、かぶりが大きくなるにつれて、測定値が真値よりも大きくなる傾向が認められた。ただし本実験の範囲で得られた結果

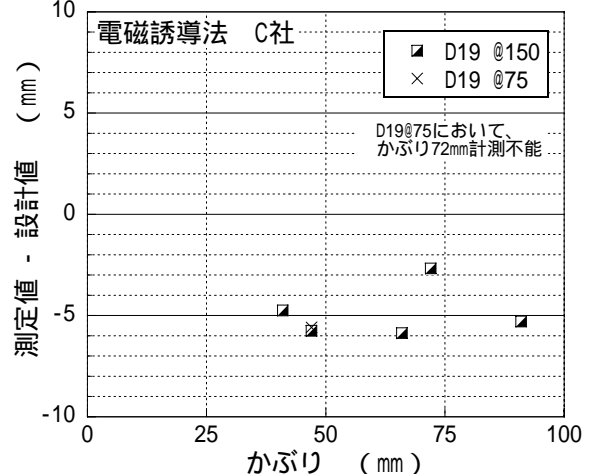
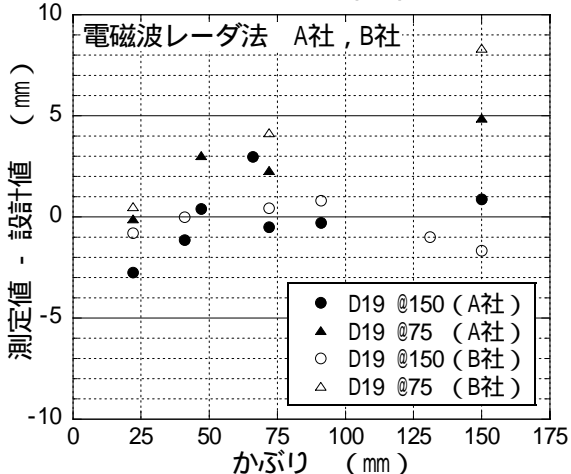
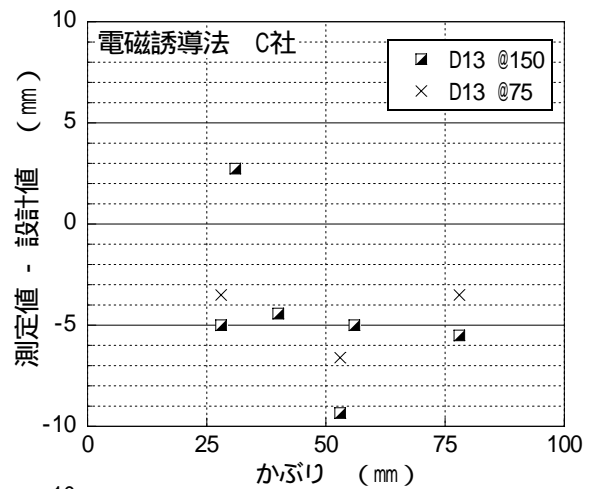
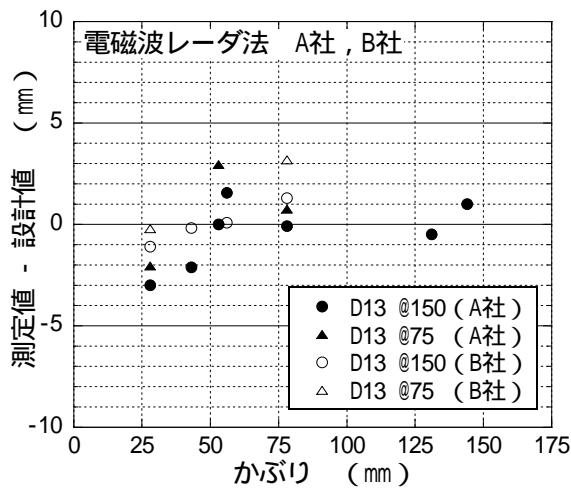


図 - 3 かぶりの測定精度に及ぼす深さの影響

では、かぶりの真値と比較した場合に、かぶりの測定値の大小が測定の精度に及ぼす影響は少ないと考えられる。

次に、電磁誘導法による結果については、例外はあるものの、鉄筋径、かぶりの大きさに関わらず、測定された値の大半が真値より5mm程度小さくなった。また、75mm間隔で配筋された径19mm、かぶり72mmの鉄筋については、明確なデータを得ることができず、測定が不能であった。これは、配筋間隔が鉄筋の芯間距離であり、隣り合う鉄筋の最短距離が理論上53mm程度となること、つまり、かぶりの大きさは72mm程度であるが、かぶりの大きさより小さい配筋間隔が測定の可否に影響を及ぼすと考えられる。

(2) 配筋間隔の影響

図-4に配筋間隔が異なる同径鉄筋のかぶり測定値を比較したものを、表-5に各測定値の統計解析結果を示す。なお図中の平均かぶりとは、同一条件で配筋された複数の鉄筋を、測定線を変えて測定した複数の値を平均したものである。前述したとおり、実験遂行上、A～C社の各測点における測定データ数は必ずしも一致しておらず、また上述したとおり、75mm間隔で配筋された径19mm、かぶり72mmの鉄筋については、電磁誘導法によるかぶりに関する明確な測定結果を得ることができなかった。

電磁波レーダ法によるかぶりの測定では、150mm間隔で配筋された場合より、75mm間隔で配筋された測定値のほうが、すべての場合において大きな値を示した。またかぶりの大きさが同条件の場合の配筋間隔の影響として、75mm間隔で配筋された場合のかぶりの測定値が、150mm間隔で配筋された場合よりもすべて小さくなった。このことは、測定対象とする鉄筋が、使用機器の適用範囲内に配筋されていても、粗配筋に比べて密配筋の場合にはやや大きな値を示す可能性があることを示している。また標準偏差および分散についても同様に、150mm間隔で配筋された場合より、75mm間隔で配筋されたほうが、同等以上に大きな値を示した。このこ

表-5 かぶり測定値の統計解析結果
電磁波レーダ法(N社製測定機器による)

(寸法単位: mm)

A社	かぶり	配筋間隔	データ数	平均値	標準偏差
D13	28	150	30	25.0	2.1
		75	70	26.0	1.8
	53	150	29	53.0	2.7
		75	60	56.0	3.6
	78	150	27	77.9	1.6
		75	54	78.8	1.6
D19	22	150	40	19.3	1.6
		75	50	21.9	1.6
	47	150	40	47.4	1.1
		75	50	50.0	3.1
	72	150	45	71.5	1.8
		75	41	74.3	1.8
	150	150	15	150.9	1.8
		75	9	154.9	0.6

B社	かぶり	配筋間隔	データ数	平均値	標準偏差
D13	28	150	15	26.9	2.0
		75	25	27.8	2.3
	78	150	11	79.3	1.8
		75	20	81.2	3.1
D19	22	150	20	21.2	1.6
		75	20	22.5	1.8
	72	150	19	72.4	1.5
		75	24	76.2	2.7
	150	150	9	148.3	2.7
		75	15	158.3	5.3

電磁波誘導法(H社製測定機器による)

(寸法単位: mm)

C社	かぶり	配筋間隔	データ数	平均値	標準偏差
D13	28	150	4	23.0	0.8
		75	6	24.5	0.5
	53	150	3	43.7	0.6
		75	15	46.4	2.4
	78	150	2	72.5	2.1
		75	2	74.5	3.5
D19	22	150	7	18.3	0.5
		75	8	19.1	0.6
	47	150	12	41.3	1.2
		75	12	41.4	2.9
	72	150	8	69.5	1.9
		75	測定不能	-	-

とは、密配筋の測定の場合には、測定される値のばらつきが大きくなると予想されるため、測定対象物は、母数を多くして検証する必要があることを示唆するものである。

電磁誘導法によるかぶりの測定では、電磁波レーダ法と同様、150mm間隔で配筋された場合より、75mm間隔で配筋された測定値のほうが、かぶりの測定値、標準偏差、分散とも大きくなる傾向が見られ、かぶりが大きくなるにつれて顕著である。ただし電磁誘導法による測定では、かぶりの大きさ、配筋間隔に関わらず、真値に比較して小さい値を測定する傾向が見られる。

3.2 配筋位置の測定精度

図-2に示すような、電磁波レーダ法によって測定された測定線上内部に位置する鉄筋の反

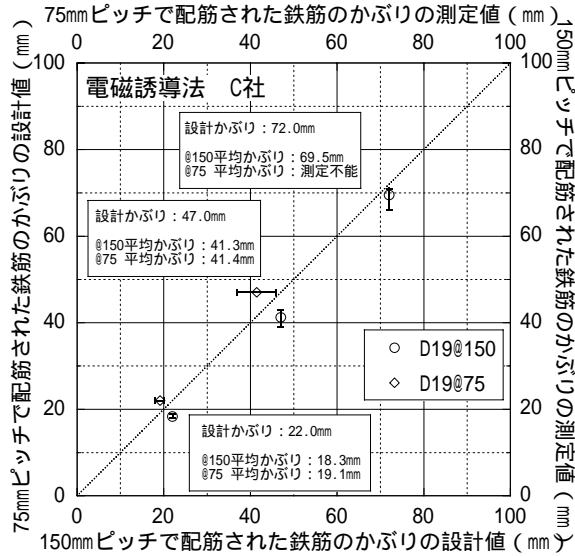
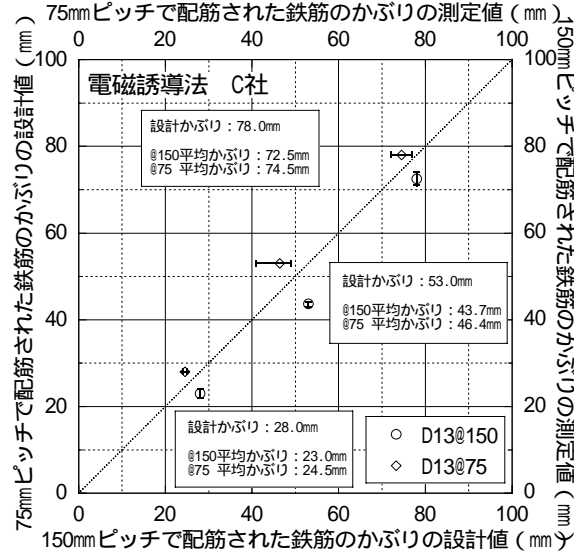
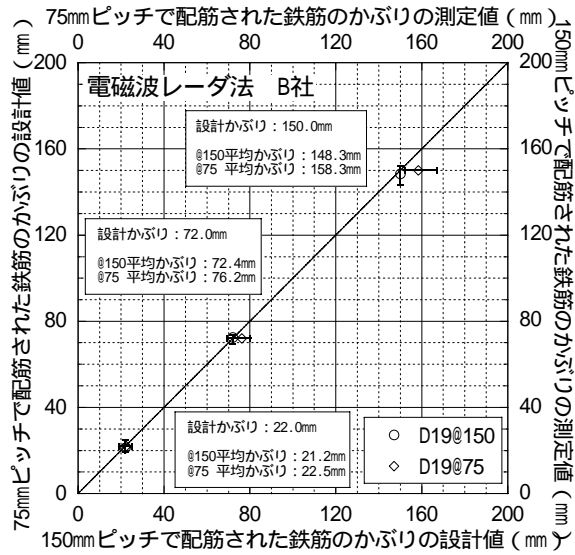
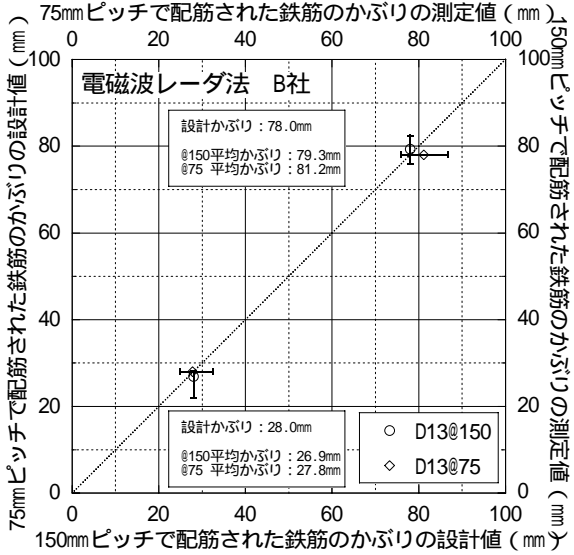
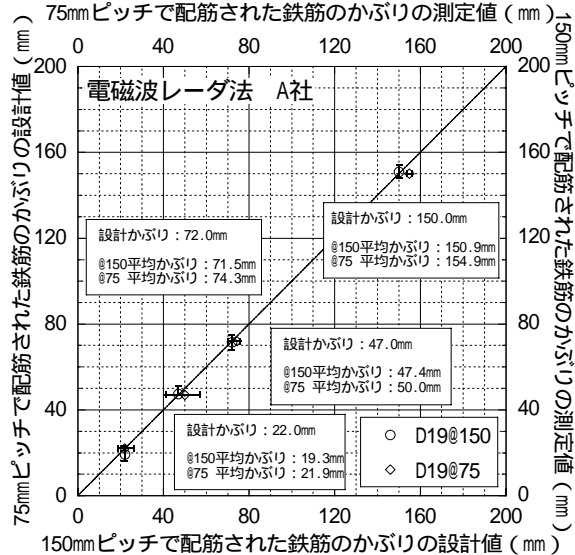
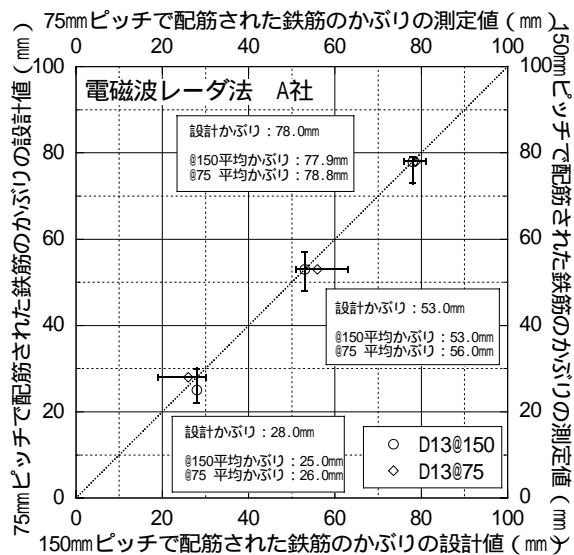


図 - 4 配筋間隔が異なる同径鉄筋のかぶり測定値の比較

射波形データをピーク処理し、コンクリート内部の配筋位置の推定を行った結果と実配筋位置との比較を図 - 5 に示す。かぶりの大きさは縦

筋・横筋とも 50mm 未満であり、縦筋がコンクリートの表層に近い位置に存在する。図中の矢印は測定方向を示すものであり、測定機器は鉛

直水平方向とも 200mm 間隔で、鉛直方向に 11 測定線、水平方向に 10 測定線の測定を行った。実線が測定により推定された配筋位置であり、鎖線が実配筋位置を示す。推定された鉄筋位置について、縦筋は水平方向の測定線本数である 10 節点からなる折れ線であり、同様に横筋は鉛直方向の測定線本数である 11 節点からなる折れ線である。推定された鉄筋の各節点における実配筋との座標位置の測定誤差の絶対値について統計解析を行った結果を表 - 6 に示す。

配筋位置の平面座標系における距離の測定は、測定機器に取り付けられている距離計によって行われており、蛇行測定など、測定作業者の技量による人為的誤差も含まれる可能性がある。かぶりが 20mm ~ 30mm 程度の小さい場合、D19 鉄筋が 150mm 間隔で配筋された鉄筋の座標位置の測定精度が、誤差平均 5mm 程度、標準偏差最小値 4.1% で最も良い。また配筋間隔が密になった場合、鉄筋径に関わらず測定精度が悪くなり、測定値のばらつきも大きくなる傾向がある。縦筋に比較してコンクリート内部側に存在する横筋に関しては、表層側の鉄筋の径、配筋間隔の影響があるものの、測定値の精度が悪くなり、ばらつきが大きくなった。

4. まとめ

本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) かぶりの測定精度に及ぼす深さの影響については、電磁波レーダ法、電磁誘導法ともに明確な相関は認められなかった。電磁波レーダ法では、かぶりが小さい場合では測定値が真値より小さく、かぶりが大きくなるにつれて測定値が真値より大きくなる傾向が認められた。電磁誘導法では、かぶり厚さに関わらず、5mm 程度小さく測定された。
- (2) 配筋間隔の違いがかぶりの測定値に及ぼす影響については、電磁波レーダ法、電磁誘導法とも、配筋間隔が密なほうが、粗な場合よりもかぶりが大きく測定され、標準

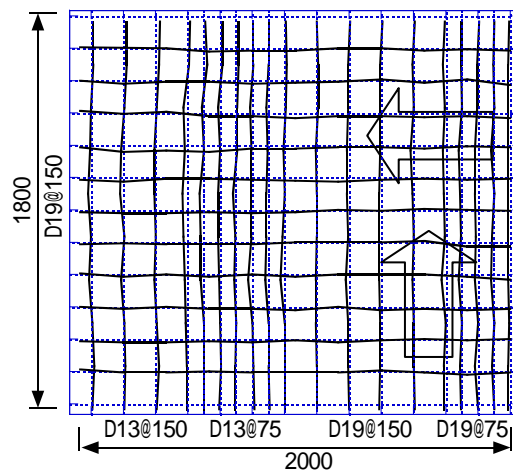


図 - 5 電磁波レーダ法により推定した配筋位置と実配筋のずれ

表 - 6 座標位置の測定誤差の統計解析結果

		縦筋				横筋
		D13@150	D13@75	D19@150	D19@75	D19@150
各鉄筋の座標位置の測定誤差 (mm)	最小値	1.7	0.8	1.0	1.0	1.4
	最大値	16.7	17.5	13.0	15.0	19.5
	平均値	8.3	7.8	5.1	7.9	9.3
	標準偏差	5.4	5.7	4.1	5.2	6.2

偏差、分散も大きくなる傾向が認められた。またかぶりが大きくなるにつれてこの傾向は顕著である。

- (3) 電磁誘導法では、径、配筋間隔、かぶりの大きさの組み合わせによって、正確な測定が不能になる場合がある。実構造物での測定の不能は鉄筋が存在しないことを意味する可能性もあり、適用には注意を要する。
- (4) 電磁波レーダ法による配筋位置の推定では、密な配筋間隔では粗な配筋間隔に比較して測定精度が悪くなり、測定値のばらつきも大きくなる傾向がある。コンクリート内部側に存在する鉄筋に関しては、測定精度が悪くなり、ばらつきが大きくなった。

謝辞：本実験を遂行するにあたり、三協株式会社殿、非破壊検査株式会社殿に御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所材料施工部コンクリート研究室ほか：コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書，独立行政法人土木研究所，pp.1-37，2003.3