

論文 かぶり, 鉄筋位置の非破壊試験における測定誤差に関する検討

竹田 宣典^{*1}・榊原 泰造^{*2}・十河 茂幸^{*3}

要旨: コンクリート構造物中の鉄筋の非破壊検査において, 電磁波レーダ法および電磁誘導法を用いた場合, 測定機器の種類やかぶり, 鉄筋径, 鉄筋間隔などの配筋状態が, かぶりや鉄筋位置の測定値に及ぼす影響について調査した。かぶりの検査については, 3種類の測定器を用いた場合の測定値の誤差の分布を調査し, 統計的な考察を行った。鉄筋位置の検査については, 鉄筋間隔が測定値に及ぼす影響について検討を行った。その結果, 測定機器の種類によって, かぶりの測定値の誤差やばらつきが異なり, 鉄筋間隔が狭くなると, 鉄筋の推定位置の誤差が大きくなることがわかった。

キーワード: 非破壊試験, かぶり, 鉄筋位置, 電磁波レーダ法, 電磁誘導法

1. はじめに

コンクリート構造物の健全性評価や建設時の品質検査において, 非破壊試験が用いられることが多くなってきている。コンクリート構造物中の鉄筋探査を非破壊的に行う場合には, 電磁波レーダ法および電磁誘導法が用いられることが多い。これらの目的で, 非破壊検査機器を用いる場合, その適用可能範囲・適用対象物が製造メーカーにより定められてはいるが, 測定範囲の限界や測定値の精度やばらつきに関しては, 十分に把握されているとは云えない。

そこで本報告では, 配筋条件が異なる実構造物レベルの鉄筋コンクリート部材において, 電磁波レーダ法および電磁誘導法を原理とする非破壊試験機を用いて, 同一鉄筋のかぶりを多数回測定し, 非破壊検査機器の測定誤差の分布を調査し, 統計的な考察を行った。さらに電磁波レーダ法および電磁誘導法を用いて, かぶり, 配筋間隔が異なる壁部材中の鉄筋位置の測定精度について評価を行った。

配筋条件が異なる鉄筋コンクリート製構造物モデルを写真-1に示す。非破壊検査による測定対象は, 壁部材内部の格子状配筋における鉛直方向に配筋した異形鉄筋であり, 水平方向の配筋に対してコンクリート表層側に配筋した。配筋の条件を表-1に示す。測定対象とした鉛直方向の鉄筋の径は13mmと19mmとし, 鉄筋間隔は75mmと150mmとした。かぶりは, 耐久性上問題となる浅いかぶりを想定し20~85mmの範囲に設定した。なお, 水平方向の鉄筋は, 鉄筋径19mmの異形鉄筋を150mm間隔で配置した。

写真-1 実験に使用した実構造物モデル



2. 実験概要

2.1 実験に使用した構造物モデルと測定項目

*1 (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)
 *2 (株) 大林組 技術研究所土木材料研究室主任 工修 (正会員)
 *3 (株) 大林組 技術研究所副所長 工博 (正会員)

表-1 かぶりの測定対象となる鉄筋の配筋条件

鉄筋種別	D13						D19						
	@150			@75			@150			@75			
配筋間隔 (mm)													
かぶりの設計値 (mm)	28	53	78	28	53	78	22	47	72	22	47	72	
測定箇所でのかぶり実測値 (mm)	26	51	82	27	52	81	22	47	73	22	48	72	

表-2 コンクリートの配合および品質試験結果

水粉体比 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m ³)						スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)		
		W	C	LF	S	G	AD				28日	91日	365日
30.9	48.5	170	350	200	759	837	6.60	630×620	3.8	10.0	50.0	61.3	70.5

【C】:低熱セメント, 【LF】:石灰石微粉, 【AD】:高性能AE減水剤 密度(単位:g/cm³) 【C】:3.22, 【LF】:2.70, 【S】:2.60, 【G】:2.70

表-3 測定に使用した非破壊検査機器の概要

測定機器	測定原理	適用範囲 (公称探査精度)
A	電磁波レーダ法	かぶり: 5~20mm (鉄筋径6mm以上), 配筋間隔: 80mm以上 (φ10鉄筋が深さ60mmにある場合)
B	電磁誘導法	渦流試験法
C	電磁誘導法	パルス誘導法

コンクリートの配合および品質試験結果を表-2に示す。ブリーディングや材料分離などの施工に起因するコンクリートの品質変動やバイブレータによる締固め時の振動が鉄筋の組立て精度へ及ぼす影響を考慮して、高流動コンクリートを使用し、締固めを行わず打込みを行った。圧縮強度は標準養生した供試体の試験結果である。

2.2 測定方法

測定に使用した非破壊検査機器の概要を表-3に示す。電磁波レーダ法を原理とする1機種および電磁誘導法を原理とする2機種を用いた。電磁誘導法による検査機器は、渦流試験法を原理とする機種と渦電流にパルスを加えることで電場に指向性を持たせたパルス誘導法を原理とする機種である。かぶりの測定は、測定当日までの期間、躯体コンクリートが十分空中乾燥状態にあった構造物モデルに対して実施し、測定当日に対象構造物の鉄筋のかぶり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および透磁率の校正を行った。電磁波レーダ法による測定では、電磁波の伝搬速度がコンクリートの含水状態に影響を受けるが、モデル試験体の含水状態に大きな差がないと考えられるために、含水率の測定は省略した。

かぶりの測定精度に関する統計的な考察を行

うために、測定対象となる鉄筋の同一箇所を30~100回程度測定し、各検査機器による測定値の平均値と実測値の差異や測定値のばらつきに関して検討を行った。また、非破壊試験による測定終了後、測定箇所のコンクリートをはつり取り、鉄筋を露出させ、かぶりの実測を行った。

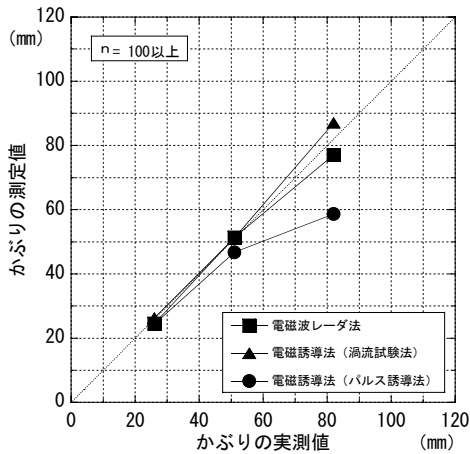
3. 実験結果および考察

3.1 かぶりの測定

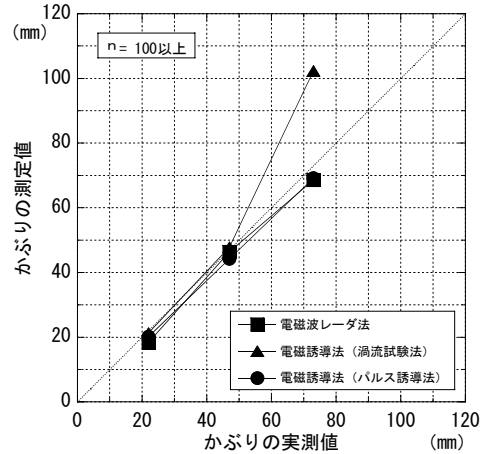
(1) 測定機種がかぶり測定に及ぼす影響

電磁波レーダ法および電磁誘導法を用いて測定した場合のかぶりの測定値の平均値を図-1に示し、変動係数を図-2に示す。

電磁波レーダ法では、かぶりが50mm以下では、測定値の平均値と実測値の差(以下、偏差と呼ぶ)は、-3~1mmの範囲にあるが、かぶりが80mm程度では、偏差は-8~2mmの範囲にあった。測定値のばらつき(変動係数)は、鉄筋径、鉄筋間隔に係わらず、かぶりが小さいほうが大きくなる傾向があり、また、鉄筋径が大きい方が、鉄筋間隔が狭い方が、測定値のばらつきは、若干大きくなる傾向があった。渦流試験法では、かぶりが50mm以下では、平均値の偏差は±1mm程度の範囲にあるが、かぶりが80mm程度となると、鉄筋径13mmの場合5mm程度と

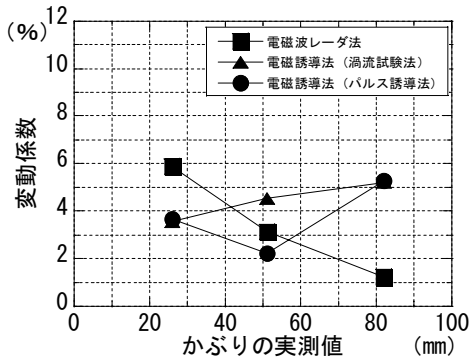


(a) 鉄筋径 D13 の場合

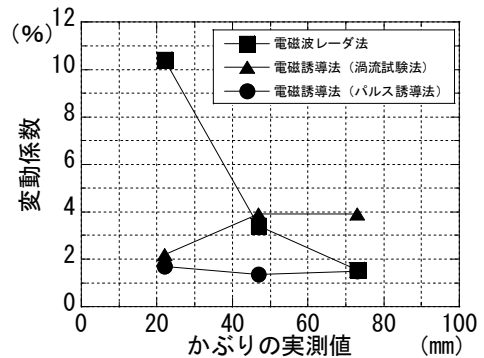


(b) 鉄筋径 D19 の場合

図-1 測定機器が異なる場合のかぶりの測定値と実測値の関係 (鉄筋間隔 150mm)



(a) 鉄筋径 D13 の場合



(b) 鉄筋径 D19 の場合

図-2 測定機器が異なる場合のかぶりの変動係数 (鉄筋間隔 150mm)

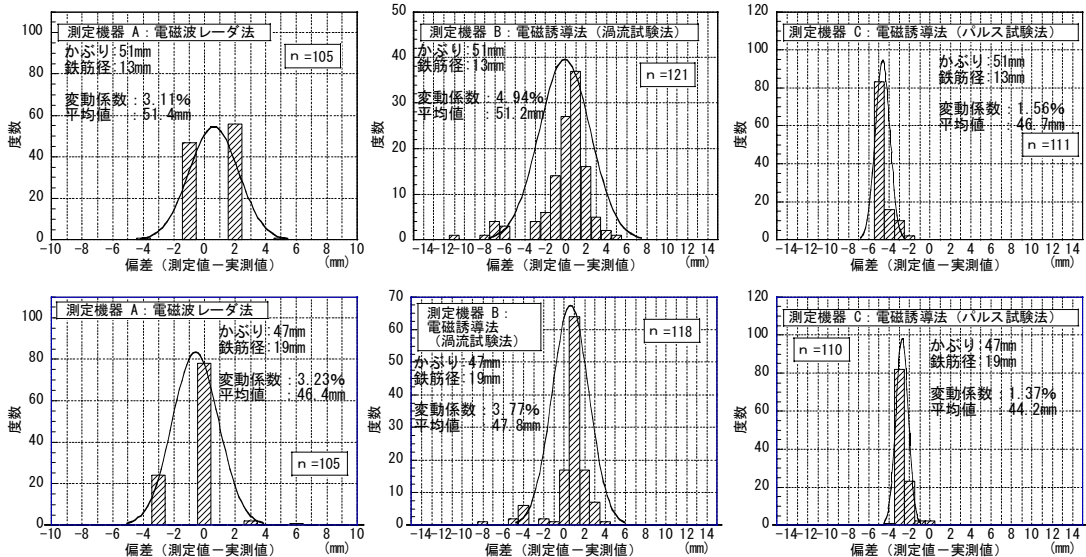
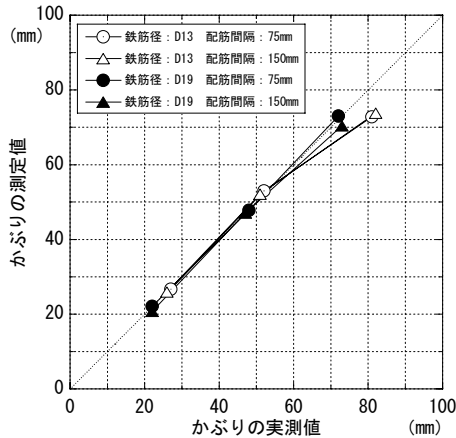


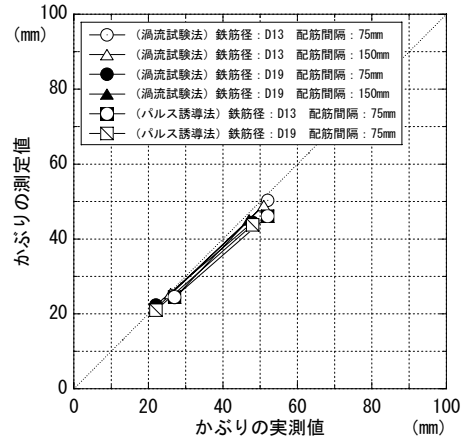
図-3 かぶりの測定偏差の分布の例 (鉄筋間隔 150mm)

なり、鉄筋径 19mm の場合 30mm 程度となった。ばらつきは、かぶりの増大に伴い大きくなる傾向があった。パルス誘導法では、かぶり 50mm 以下では、測定値の平均値は実測値に対して 1

~4mm 程度小さく示され、かぶりの増大に伴い、偏差は大きくなった。ばらつきは 3 機種のうち最も小さいが、鉄筋径 13mm で、かぶり 80mm 程度の場合、ばらつきが大きくなった。

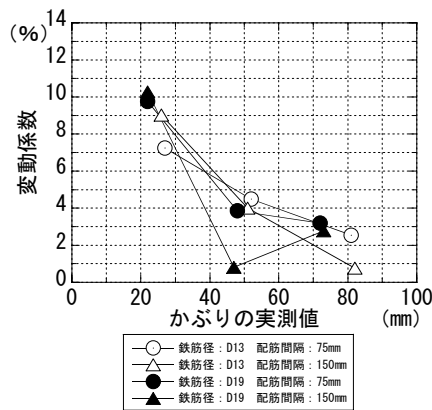


(a) 電磁波レーダ法による測定結果

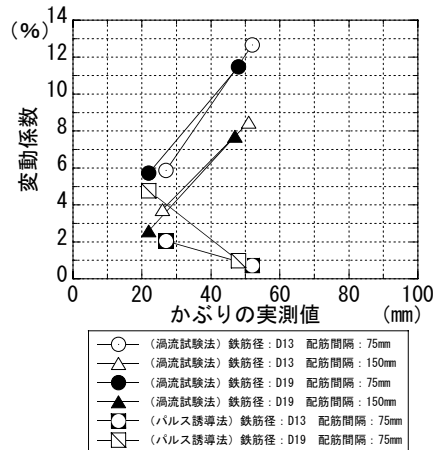


(b) 電磁誘導法による測定結果

図-4 鉄筋間隔が異なる場合のかぶりの測定値と実測値の関係



(a) 電磁波レーダ法による測定結果



(b) 電磁誘導法による測定結果

図-5 鉄筋間隔が異なる場合のかぶりの変動係数

同一の鉄筋に対する測定値の偏差分布の例を図-3に示す。電磁波レーダ法では分解能の限界に起因した測定値の不連続性が存在するが、電磁誘導法では測定値は連続的な値を示し、偏差は正規型の分布を示した。かぶりが50mm程度で鉄筋間隔が150mmの場合、1回の測定値の偏差は、電磁波レーダ法では-4~+6mm、過流試験法では-8~+4mm、パルス誘導法では-5~0mmの範囲にあり、変動係数は、電磁波レーダ法では約3%、過流試験法では4~5%、パルス誘導法では約1.5%であった。このように、測定機種によって、測定値の偏差やばらつきの傾向が異なることが確認された。また、いずれの測定機器においても、1回の測定のみでは、正確な値が得られない可能性があるために、複数の測定

値の平均値を用いることが必要と考えられる。

(2) 配筋間隔がかぶり測定に及ぼす影響

鉄筋間隔が異なる場合のかぶりの測定値の平均値を図-4に示し、変動係数を図-5に示す。かぶりが50mm以下における鉄筋間隔の影響について以下に示す。電磁波レーダ法では、鉄筋間隔が測定値の平均値の偏差に及ぼす影響は小さいが、変動係数は間隔150mmの方が75mmに比較して若干小さくなった。過流試験法では、鉄筋間隔150mmの方が75mmの場合に比較して、平均値の偏差は2~3mm小さくなり、変動係数は3~5%小さくなった。パルス誘導法では、鉄筋間隔に係わらず、測定値は実測値より小さくなる傾向が認められたが、鉄筋間隔150mmの方が75mmの場合に比較して、平均値

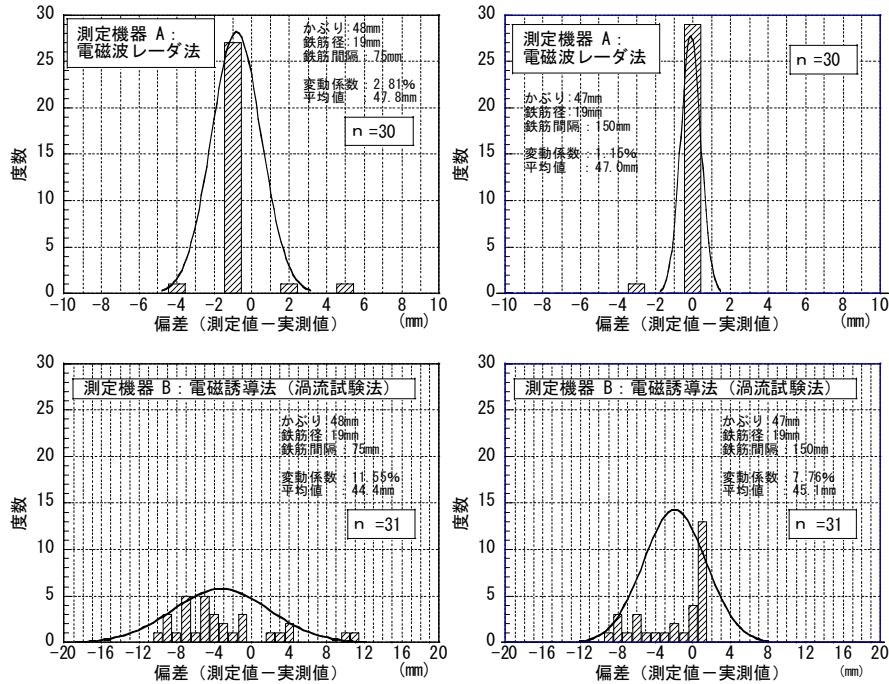


図-6 鉄筋間隔が異なる場合のかぶりの測定誤差の分布の例

の偏差は0.5～2mm小さいが、変動係数はほぼ同じであった。

鉄筋間隔が150mmおよび75mmの場合の同一鉄筋に対する測定値の偏差分布の例を図-6に示す。電磁波レーダ法では、鉄筋径19mm、かぶり50mm程度において、かぶりの測定値の変動係数は、鉄筋間隔が150mmの場合1.2%であるが、鉄筋間隔が75mmの場合2.8%となった。同一条件における変動係数は、過流試験法では、鉄筋間隔が150mmの場合7.7%、鉄筋間隔が75mmの場合11.6%となり、パルス誘導法では、鉄筋間隔が75mm、150mmのいずれの場合にも約1.0%となった。いずれの機種においても、鉄筋間隔が狭くなると、かぶりの測定値の平均値は大きく変化しないが、ばらつきが大きくなる傾向がある。この理由として、鉄筋間隔が狭い場合、隣接する鉄筋の影響を受け易くなることが影響していると考えられる。

3.2 鉄筋位置の測定

電磁波レーダ法によって測定された壁部材内部に位置する鉄筋の反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との比較を図-7に示す。格子

状に配筋された鉄筋は、それぞれ異なるかぶりを有しており、かぶり深さの違いによって、非破壊検査によるコンクリート内部の配筋状況の再現の精度を検証した。実線が測定により推定された配筋位置であり、測定機器をコンクリート表面の測線上を走査させて推定した折れ線である。鎖線が実配筋位置を示す。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い、蛇行走査など、測定作業者の人為的誤差も含まれている。なお、図中(b)の左下部および(c)の中央上部における不規則な折線位置には、コンクリート内部にあらかじめ設けられた人工欠陥の位置を示すものである。

かぶりが20～80mmの場合、鉄筋間隔が150mm程度であれば、比較的精度良く鉄筋の位置を推定することが可能であった。鉄筋間隔が75mmで、かぶりが75mmになると、鉄筋位置の推定精度が悪くなった。また、かぶりが150mmの場合、鉄筋間隔が150mmであれば、本実験では、鉄筋位置の推定が可能であったが、鉄筋間隔が75mmの場合は、鉄筋位置の推定は不可能であった。

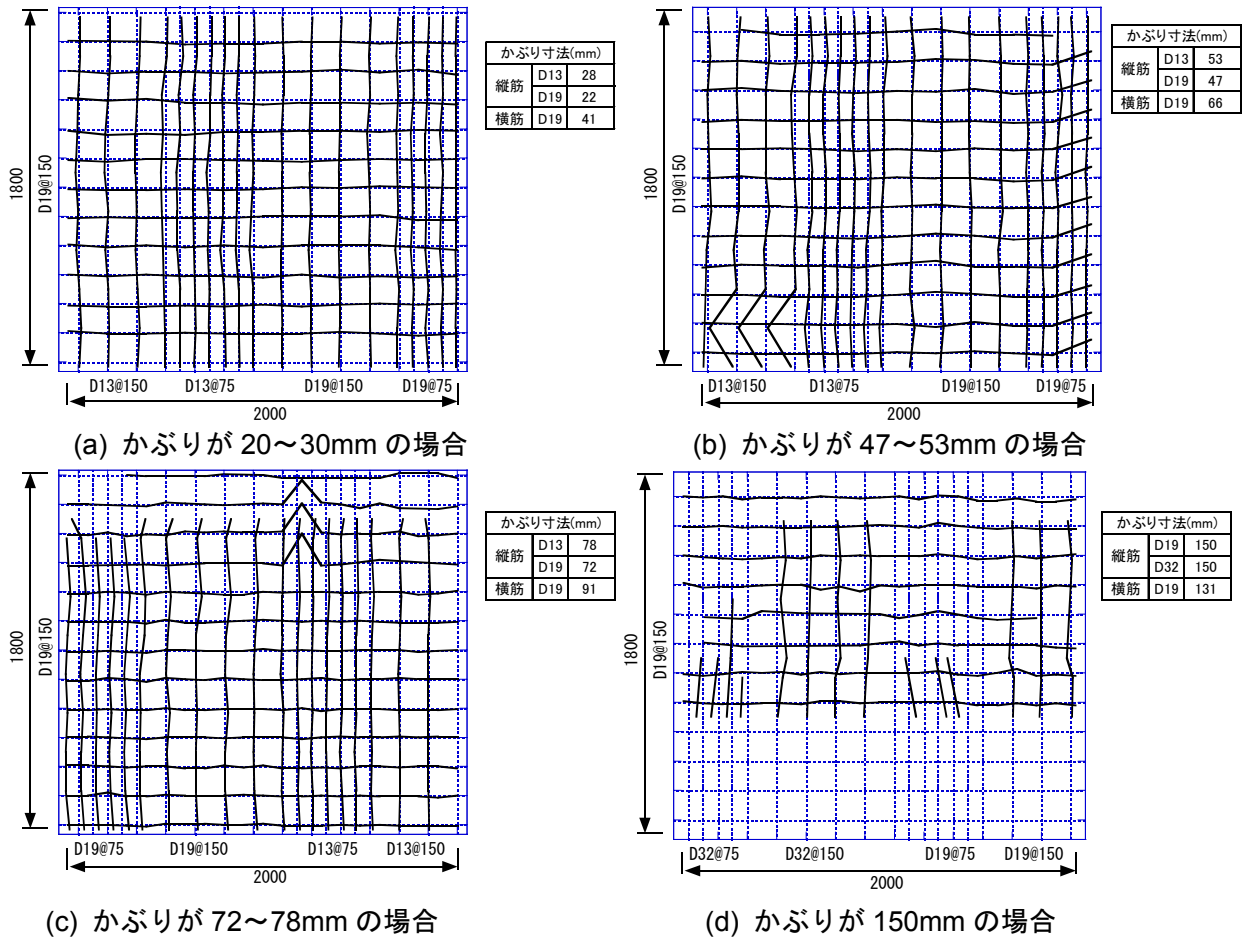


図-7 電磁波レーダ法により推定した鉄筋位置の測定結果

4. まとめ

実構造物モデルにおいて、鉄筋間隔 75~150mm、鉄筋径 13~19mm の条件で、鉄筋のかぶりと位置に関する各種の非破壊試験の精度について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) かぶりの非破壊試験において、かぶりの測定値の平均値と実測値の偏差は、かぶりが 50mm 以下においては、電磁波レーダ法では-3~1mm、過流試験法では±1mm、パルス誘導法では-4~-1mm の範囲にあるが、かぶりが 80mm 程度以上になると、電磁誘導法では、平均値の偏差が 20mm 以上になる場合があるなど、測定機種によって測定値と実測値の偏差の傾向が異なることが認められた。
- (2) 同一の鉄筋のかぶりを多数回測定した場合、測定値の変動係数は、鉄筋間隔 150mm、かぶり 50mm 程度においては、電磁波レーダ法では約 3%、過流試験法では 4~5%、パルス誘導法では

約 1.5% となり、測定機種によって測定値のばらつきが大きくなる傾向が認められた。

- (3) 電磁波レーダ法、電磁誘導法いずれにおいても、鉄筋間隔によって、測定値の平均値は大きく変化しないが、鉄筋間隔が狭くなると測定値のばらつきが大きくなる傾向が確認された。鉄筋間隔が狭い場合は、隣接する鉄筋の影響を受け易くなることが影響していると考えられる。
- (4) 電磁波レーダ法による鉄筋位置の推定では、かぶりが 20~80mm、配筋間隔が 150mm 程度であれば、比較的精度良く鉄筋の位置を推定することができた。かぶりが 150mm の場合、鉄筋間隔が 150mm 程度あれば、推定可能であったが、75mm の場合は推定できなかった。

以上のように、測定機種によって、かぶりや鉄筋位置の測定値と真値の差異やばらつきは異なるために、機種の特長や測定条件を十分把握して、測定結果を評価することが重要である。