

電磁誘導法による鉄筋のかぶり厚さ測定装置の 基本性能に関する実験的検討

辻谷 薫*¹・陣内 浩*¹・吉田 泰*¹・加藤 圭*²・飯島 真人*²・佐藤 貢一*³・並木 哲*¹

Keywords : cover depth, electromagnetic induction method, electromagnetic wave radar method, measurement error, rebar

かぶり厚さ, 電磁誘導法, 電磁波レーダ法, 測定誤差, 鉄筋

1. はじめに

2009年に改定された日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5「鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS5と称する)¹⁾では、鉄筋に対するコンクリートのかぶり厚さ(以下、鉄筋のかぶり厚さと称す)の品質管理方法に関し、従来よりも詳細に規定され、鉄筋のかぶり厚さ不足が懸念された時に、非破壊検査によってかぶり厚さを測定することが明文化された。同書の改定趣旨によれば、この背景には耐震強度偽装問題などを発端として、品質保証体系の明確化に対する要望が高まったことなどがある。

一方、詳細な規定を定めるに至る重要なポイントとして、非破壊検査技術の向上によって、鉄筋のかぶり厚さを高い精度で測定することが可能となってきたことも挙げられる。状況に応じて鉄筋のかぶり厚さを非破壊検査する旨は1986年版のJASS5より明文化されているが、当時の雑誌記事²⁾などからは、測定装置の測定精度が実務で使えるレベルに達しておらず、実際の現場での普及には至らなかったことが読み取れる。新たに定められたJASS5 T-608:2009「電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置の測定方法」では、装置本体の性能を表-1に示すような高い精度で規定しており、旧式の測定装置ではこの規定を満足することが難しい。しかしながら、この精度を満足する測定装置がどの程度存在するのか、またどのような精度で測定することが可能なのかなどについては、情報が少ないのが現状である。

そこで筆者らは、2009年時点でレンタル会社などから借りることのできる最新の鉄筋のかぶり厚さ測定装置を複数準備し、それらの測定精度などを実験的に検証した。本報告では、これらの結果について報告する。

表-1 装置本体の性能 (JASS5 T-608:2009)
Table 1 Performance of devices (JASS5 T-608:2009)

項目	性能
測定方式	電磁誘導法
面内位置の測定誤差	±10mm または探査距離の±1.0%以下
走査方向の分解能 (判別可能な2つの鉄筋の空の最小値)	75mm以下(深さ方向50mmまで) かぶり厚さ×1.5倍以下(深さ方向80mmまで)
かぶり厚さの測定範囲	最小10mm以下, 最大80mm以上
かぶり厚さの測定誤差	±2mm以下(深さ方向50mmまで) ±3mm以下またはかぶり厚さの±5%以下(深さ方向80mmまで)
かぶり厚さの分解能	1mm以下

表-2 使用した測定装置の分解能と面内位置の測定誤差
Table 2 Resolution of devices and measurement error of in-plane position

記号	測定原理	かぶり厚さの分解能*(mm)	面内位置の測定誤差 (mm)			
			D10厚50mm	D10厚80mm	D25厚50mm	D25厚80mm
E1	電磁誘導	1	0	0	1	1
E2		1	0	0	0	0
E3		1	7	8	6	8
E4		1	0	1	0	0
E4o		1	0	2	1	2
R1	電磁波レーダ	1	—	—	—	—

*カタログ値による

*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室
*2 建築本部技術部建築技術部
*3 技術センター建築技術開発部ニューフロンティア技術開発室

2. 使用した測定装置

実験に使用した測定装置の分解能と面内位置の測定誤差を表-2に示す。測定装置は、最新の電磁誘導方式の測定装置4台と、測定装置E4と同じ製造会社の一つ古い型の測定装置(E4o)1台とした。測定装置の形態は、測定装置E3のみが本体と探査センサが一体となった形式で、残りは個別の本体と探査センサがコードで接続された形式である。また、5章に示すコンクリートを用いた実験のみ、比較用として本体と探査センサが一体となった電磁波レーダ方式の測定装置も使用した。表-1に示した JASS5 T-608 : 2009 の規定のうち、かぶり厚さの分解能については各装置の基本性能といえる。そこで、表-2には各装置のカタログ値を示した。面内位置の測定誤差については、写真-1のように鉄筋位置にマーキングした厚さ10mmの亚克力板を積み重ね、亚克力板のマーキング位置と測定結果の差を確認した。なお、かぶり厚さ部分がコンクリートに近い比誘電率の場合しか測定できない電磁波レーダ方式の測定装置については、この確認実験からは除外している。表-2からわかるように、表-1に示した分解能および面内位置の測定誤差の規定については、現在の最新装置で対応可能であった。測定装置E3のみ、面内位置の測定誤差が大きい、今回の実験ではこれが測定装置のシステム自体に起因する性能なのかを特定するには至らなかった。



写真-1 面内位置の測定誤差の検証状況
Photo1 Verification situation of measurement error of in-plane position



写真-2 かぶり厚さの測定誤差の検証状況
Photo2 Verification situation of measurement error of cover depth

3. かぶり厚さの測定誤差とかぶり厚さの測定範囲の検証

3.1 目的

ここでは、測定装置の基本性能のうち、かぶり厚さの測定誤差を実験的に確認した。実験では、厚さ10mmの亚克力板を1枚、2枚、3枚と重ねていき、鉄筋の深さの測定精度を検証した。

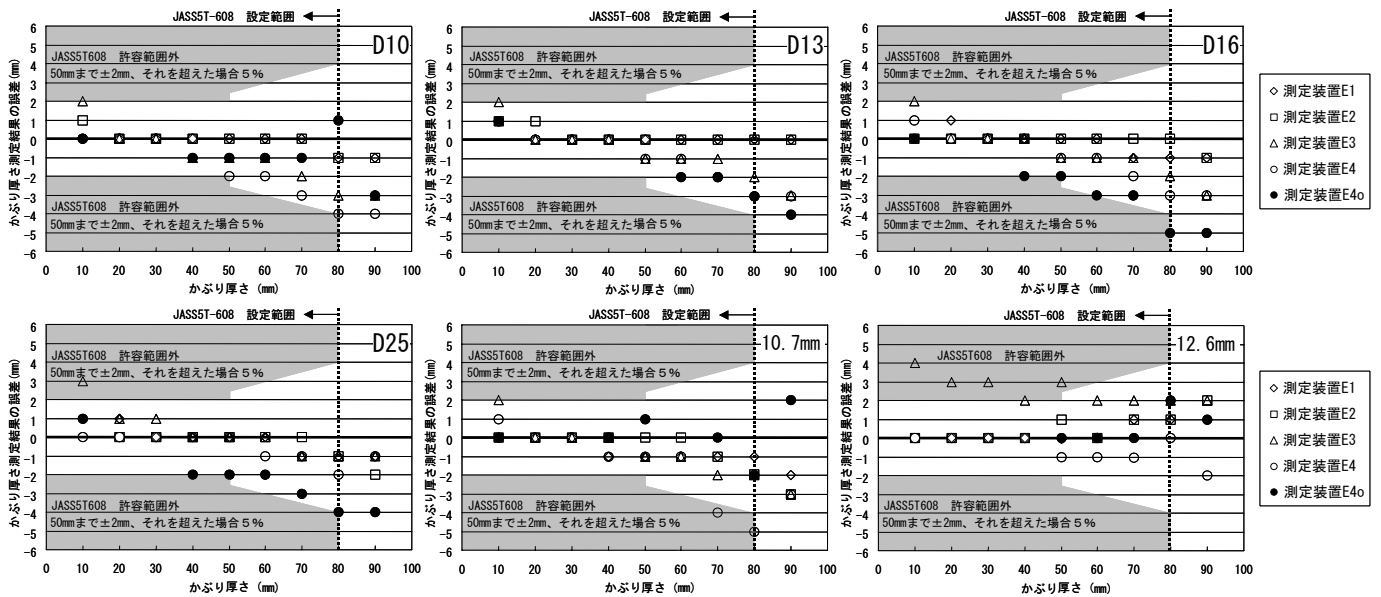
3.2 実験計画

かぶり厚さの測定誤差の検証では、写真-2に示すように、測定対象の鉄筋の上に厚さ10mmの亚克力板を積み上げ、各高さでの測定誤差を確認した。測定対象とした鉄筋は、JIS G 3112「コンクリート用異形棒鋼」の呼び名 D10, D13, D16, D25 に適合する異形棒鋼4種および JIS G 3137「細径異形 PC 棒鋼」の呼び名 10.7mm, 12.6mm に適合する異形 PC 棒鋼2種とした。細径異形 PC 棒鋼はやや特殊なものであるが、超高層 RC 造建築の柱などでは使用される例が多く、建築工事

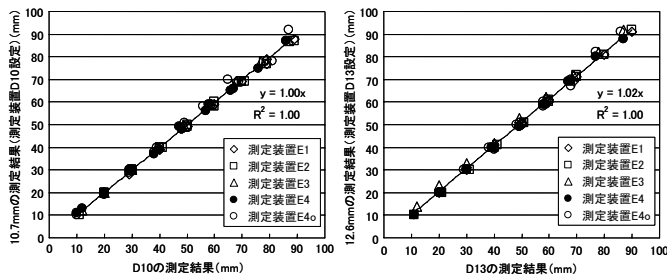
では無視できないことから実験対象に加えた。各装置とも測定前に測定対象の鉄筋径を設定する必要があるが、細径異形 PC 棒鋼の測定にあたっては、いずれの装置も呼び名 10.7mm および 12.6mm に該当する鉄筋径が選択できない。そこで、ここでは呼び名 10.7mm を D10 に、12.6mm を D13 に設定して測定した結果を示している。異形棒鋼については、呼び名どおりに入力値を設定して測定を行った。なお、JASS5 T-608 : 2009 に規定されるかぶり厚さの測定範囲については、この実験を行うことで、結果として確認できると考えた。

3.3 実験結果

各装置のかぶり厚さ測定結果の誤差を図-1に示す。測定は同条件で3回行い、3回の測定値の平均を測定結果としている。3回の測定値のばらつきはみられなかった。図中には、JASS5 T-608 : 2009 の規定値も示した。ここでの規定値の設定は、かぶり厚さ50mmまでの目標値を±2mm、かぶり厚さ50mmを超えた場合の目標値をかぶり厚さの±5%以下としている。



図一 かぶり厚さ測定結果の誤差
Fig.1 Error of measurement result of cover depth



図二 異形 PC 棒鋼と異形棒鋼の測定結果の違い
Fig.2 difference in the measurement result of steel bars for prestressed concrete and ribbed bars

図一より、JASS5 T-608 : 2009 に規定されるかぶり厚さの測定範囲という視点でみれば、いずれの装置でも最小 10mm, 最大 80mm 以上を確保できると判断した。

かぶり厚さの測定誤差の検証では、JIS G 3112 に適合する異形棒鋼については、かぶり厚さが 10mm 程度の場合に誤差が大きくなるケースがあるものの、おおまかには最新の測定装置で測定されたかぶり厚さの測定誤差は JASS5 T-608 : 2009 の規定を満足すると考えられた。また、図中に●で示した旧式の測定装置 E4o では、最新の測定装置での測定結果に比べて鉄筋径が太い場合やかぶり厚さが大きい場合に誤差が大きくなる傾向がみられた。この結果のみで最新式と旧式の精度の違いを議論するのは無理があるが、測定装置の改良で測定精度が向上していると考えられ、最新式の装置を調査に使用したほうがかぶり厚さの測定精度は向上する。また、全般的に、かぶり厚さが大きいほど、測定誤差はよりマイナスとなる傾向がみられた。

JIS G 3137「細径異形 PC 棒鋼」に適合する異形 PC 棒

鋼については、測定装置 E3 や E4 のように測定誤差が大きくなる装置もあるものの、事前の確認実験などで測定装置 E1 のように精度良く対応できる装置を選定すれば、実務上は測定可能と考えられた。異形 PC 棒鋼の測定にあたり、装置の設定を径の近い異形棒鋼とすることの妥当性を大まかに確認するため、10.7mm と D10 および 12.6mm と D13 の測定値を比較したものを図二に示す。これより、全体像で考えれば、異形 PC 棒鋼 10.7mm および 12.6mm を、便宜上 D10 および D13 として測定しても大きな誤差は生じないと思われる。もちろん、実際に使用する測定装置での確認は必須と思われるが、該当する径の設定値がないことを理由に測定自体を諦める必要はないと考える。

4. 走査方向の分解能（判別可能な 2 つの鉄筋の空の最小値）の検証

4.1 目的

ここでは、測定装置の基本性能のうち、走査方向の分解能について実験的に確認した。測定方法が電磁誘導法によるため、原理的に近傍の金属の影響を受けることが想定されるため、測定誤差を検証した。

4.2 実験計画

走査方向の分解能の検証では、写真一 3 に示すように、同径の 2 本の鉄筋を平行に配置し、片方の鉄筋のかぶり厚さを測定した時に、もう一方の鉄筋が測定値にどの程度影響するのかを確認した。測定対象とした鉄筋は呼び名 D10 および D25 の異形棒鋼の 2 種とした。

実験における 2 つの鉄筋の間隔は、120mm, 105mm, 90mm, 75mm, 50mm, および 30mm の 6 ケースとした。実験時における 2 つの鉄筋の間隔は、各ケースの幅で加工したアクリル板を鉄筋の間に設置することで調整した。測定時には、測定対象の鉄筋の上に厚さ 10mm のアクリル板を積み上げ、各高さでの測定誤差を確認した。

4.3 実験結果

走査方向の分解能の検証結果を図-3に示す。図-3の縦軸の値は、前章3.で測定した各鉄筋1本での測定値との差である。つまり、図-3で示す縦軸の値は、他の鉄筋が近くにあることの影響によって生じる測定誤差を示している。JASS5 T-608 : 2009 に示される規定



写真3 走査方向の分解能の検証状況

Photo3 Verification situation of resolution scanning direction

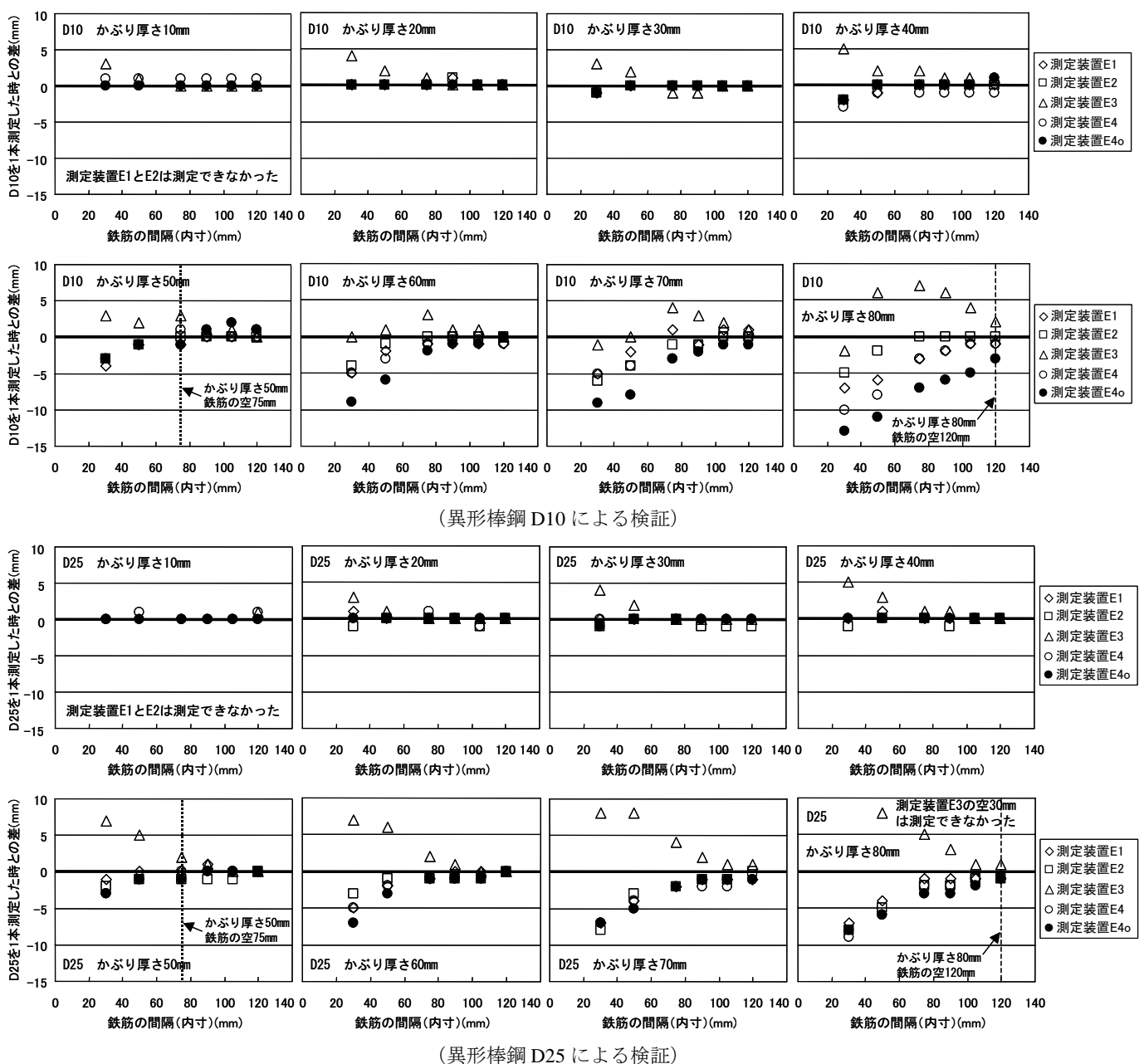


図-3 走査方向の分解能の検証結果

Fig.3 Verification result of resolution of scanning direction

は、深さ方向 50mm までは鉄筋の間隔として 75mm 以上において、深さ方向 50mm を超えて 80mm までは鉄筋の間隔としてかぶり厚さの 1.5 倍以上において、他の鉄筋による影響をあまり受けないことを意味している。したがって、点線で示した鉄筋間隔 75mm の測定値の差が鉄筋のかぶり厚さ 50mm において 0mm 程度になっていること、また破線で示した鉄筋間隔 120mm の測定値の差が鉄筋のかぶり厚さ 80mm において 0mm 程度になっていることが望ましい。図-3の結果より、実験誤差なども考慮すれば、概ね新型の測定装置は JASS5 T-608 : 2009 に適合すると考えられる。なお、全体像としては、測定装置 E1, E2, E4, E4o は、鉄筋のかぶり厚さが大きくなるほど、また鉄筋の間隔が狭くなるほど、1 本を測定した場合に比べて測定値が小さくなる傾向にある。それに対し、測定装置 E3 は明らかに異なる傾向を示しており、このような各測定装置の特性は、測定前に確認しておいたほうが良いことを示唆している。

5. 鉄筋の被覆がコンクリートである場合の検証

5.1 目的

ここでは、最新の電磁誘導法による測定装置が、コンクリートの調合や材齢などの影響を受けないことを実験的に確認した。実験では、比較用として最新の電磁波レーダ方式の測定装置を用いた測定も行った。なお、電磁波レーダ方式の測定装置で入力しなければならない被覆材（コンクリート）の比誘電率は、測定装置の初期入力値である 8.0 とした。

5.2 実験計画

コンクリートの使用材料と調合の概要を表-3および表-4に示す。コンクリートの水結合材比は 65%、40%、20%の3種類とし、使用材料は実際の工事で使用されているものを選定した。参考までに確認した測定用試験体と同じ養生条件で保管した $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体の圧縮強度は、水結合材比 65%、40%、20%に対して、材齢 4 週でそれぞれ 20.9, 47.7, 117N/mm²であった。

かぶり厚さの測定に用いた試験体の形状を図-4に示す。測定対象の鉄筋径は D10 および D25 の2種類とし、いずれも鉄筋間隔は 120mm とした。試験体としては、調合ごとに、かぶり厚さ 20mm, 50mm, 80mm の位置に鉄筋を埋め込んだものを、鉄筋径ごとに 1 体ずつ製作した。試験体は温度 20℃湿度 80%の恒温恒湿室

表-3 コンクリートの使用材料

結合材 B	普通ポルトランドセメント	密度 : 3.16g/cm ³
	高強度用結合材*	密度 : 2.99g/cm ³
粗骨材 G	安山岩系砕石	表乾密度 : 2.62g/cm ³ 吸水率 2.78%
細骨材 S	安山岩系砕砂	表乾密度 : 2.62g/cm ³ 吸水率 2.69%
練混ぜ水 W	上水道水	密度 : 1.00g/cm ³
混和剤 Ad	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤	密度 : 1.06g/cm ³
	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	密度 : 1.06g/cm ³

*普通ポルトランドセメント : スグセッコウ系混和材 : シリカフューム = 7 : 2 : 1

表-4 コンクリートの調合概要

調合	結合材種類	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				材齢 4 週 圧縮強度* (N/mm ²)
			B	W	G	S	
A1	普通ポルトランドセメント	65	277	180	865	928	20.9
A2		40	450	180	865	826	47.7
A3	高強度用結合材	20	750	150	865	673	117

*温度 20℃湿度 60%養生

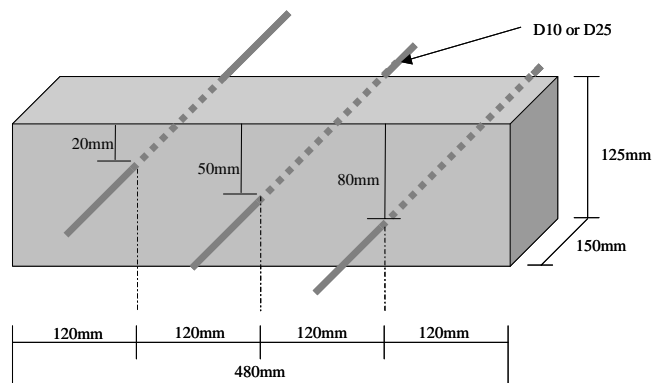


図-4 かぶり厚さ測定用試験体の形状

Fig.4 Form of the examination object for measurement of cover depth

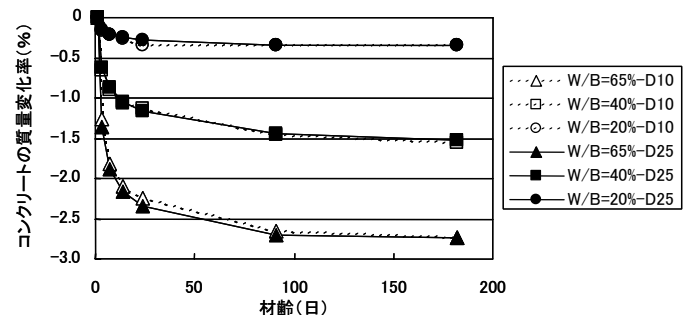


図-5 コンクリートの質量変化

Fig.5 Mass change of concrete

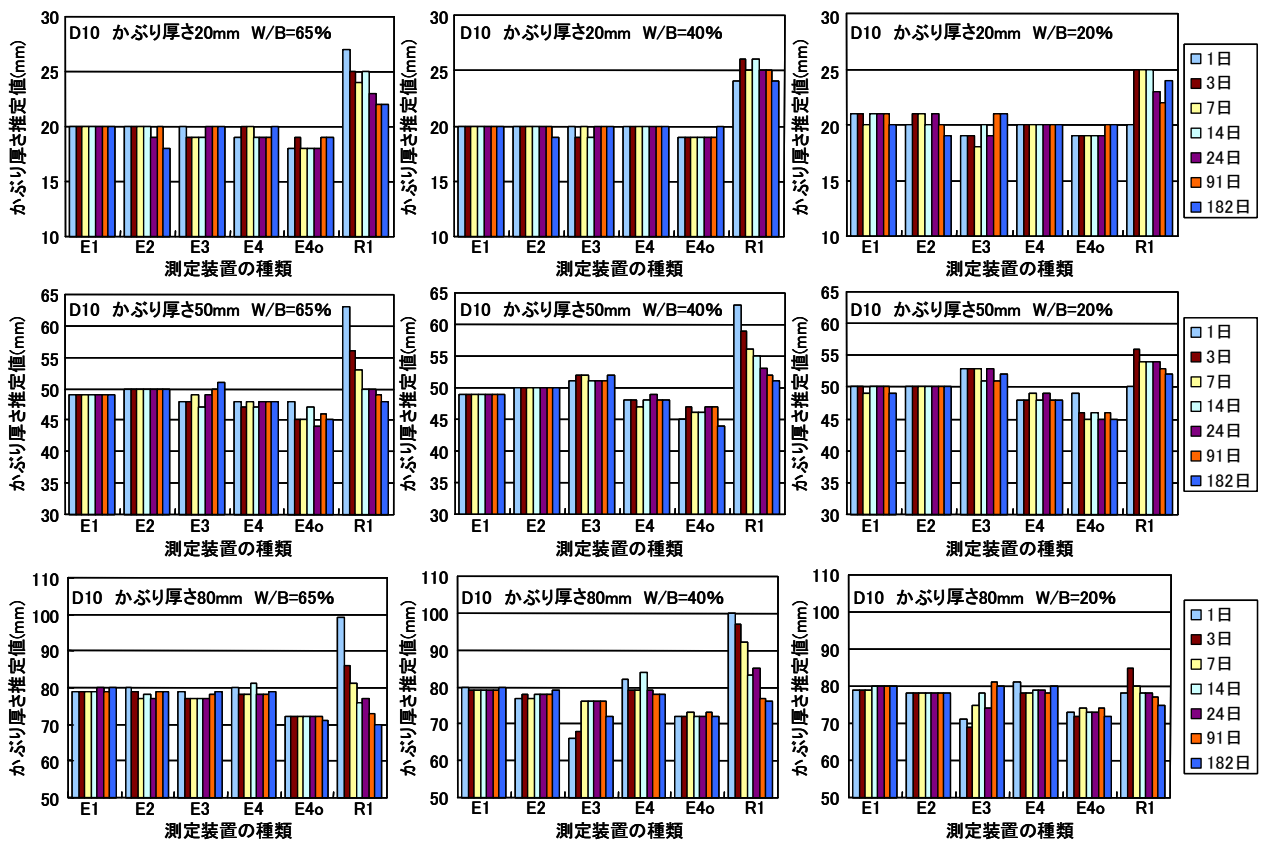


図-6 コンクリートによるかぶり厚さ検証結果 (D10)
Fig.6 Verification result of cover depth for concrete (D10)

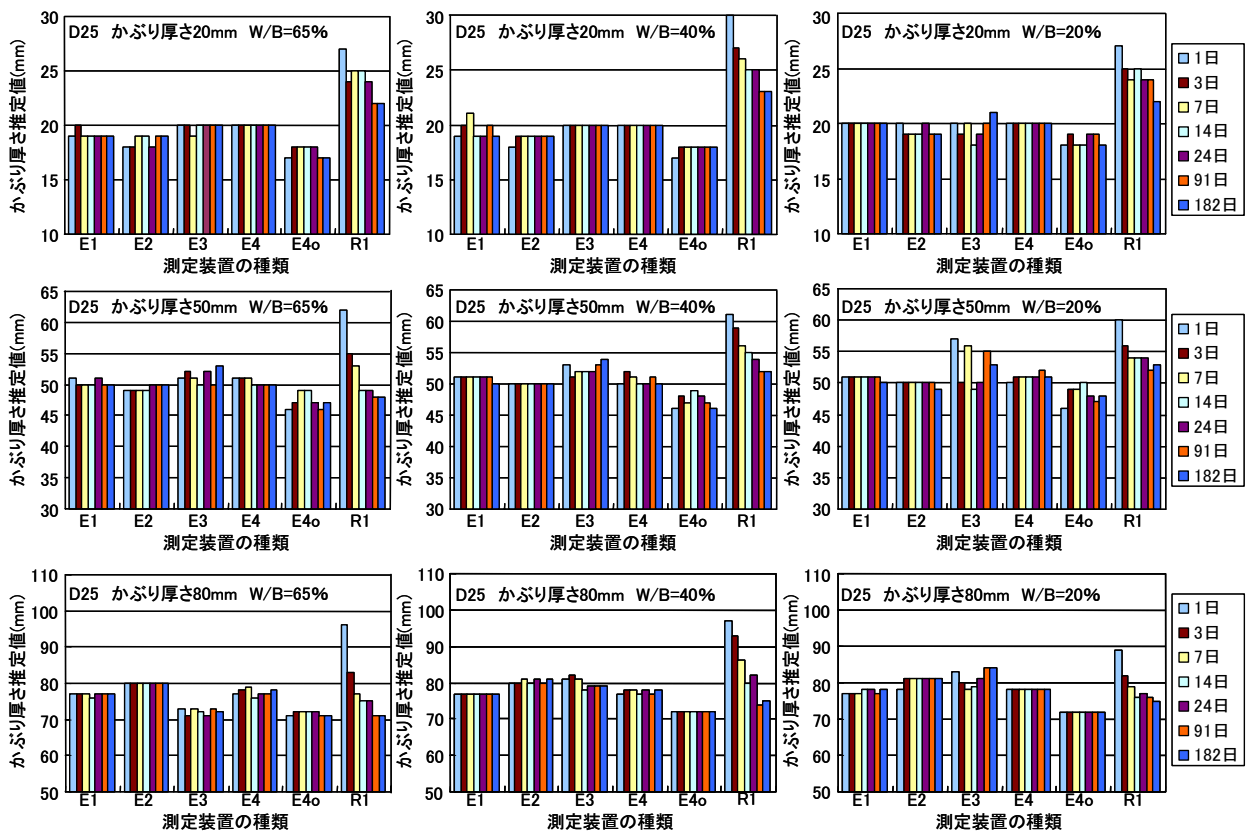


図-7 コンクリートによるかぶり厚さ検証結果 (D25)
Fig.7 Verification result of cover depth for concrete (D25)

で製作し、材齢1日で脱型した後に温度20℃湿度60%の恒温恒湿室に保管した。保管時間の経過による各試験体のコンクリート部分の質量変化を測定した結果は図-5に示すものであり、水結合材比の違いによって、実験中の質量変化の異なる試験体を製作できたことが確認できた。かぶり厚さの測定は、材齢1日の脱型後に温度20℃湿度80%の恒温恒湿室で行い、その後は温度20℃湿度60%の恒温恒湿室で行った。測定材齢は、材齢1日、3日、7日、2週、4週、13週、26週である

5.3 実験結果

コンクリート試験体による実験結果を図-6および図-7に示す。図-6および図-7に示した値は、実測値を3.で測定した各鉄筋1本での測定誤差で補正している。また、同時に実験を進めていた4.での結果から、鉄筋間隔は120mmでは、かぶり厚さ50mmおよび80mmの測定時に隣の鉄筋の影響があることがわかった。そこで、図-3に示した測定値の誤差分は実測値に補正を行った。

図-6および図-7の結果より、いくつかの補正を行っても測定結果の誤差を完全に無くすことは難しかったものの、電磁波レーダ法に比べれば、今回使用した最新の電磁誘導法による測定装置は、コンクリートの調合や材齢などの影響を受けないことが確認できた。

6. まとめ

JASS5 T-608 : 2009「電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置の測定方法」の規定に対し、2009年時点でレンタル会社などから借りることのできる最新の鉄筋のかぶり厚さ測定装置の測定精度が適合するのかを検証した。結果を以下に示す。

- 1) かぶり厚さの分解能については、JASS5 T-608 : 2009の規定である1mm以下を満足する装置は複数存在することが確認できた。この点については、カタログで基本性能を確認すれば良く、実務では問題は生じないとする。

- 2) 面内位置の測定誤差については、ある装置では少し大きな数値となったものの、JASS5 T-608 : 2009の規定(±10mm または探査距離の±1.0%以下)を満足する装置は複数存在することが確認できた。
- 3) かぶり厚さの測定範囲については、JASS5 T-608 : 2009の規定である10mm以下、80mm以上を満足する装置は複数存在することが確認できた。
- 4) かぶり厚さの測定誤差については、かぶり厚さ50mmまでの目標値を±2mm、かぶり厚さ50mmを超えた場合の目標値をかぶり厚さの±5%以下とすれば、新型の装置で規定を満足するものは複数存在することが確認できた。この項目については極めて重要と考えられるため、使用する装置の特性はJASS5 T-608 : 2009に示される試験によって把握する必要がある。
- 5) 走査方向の分解能については、鉄筋間隔75mmの測定値の差が鉄筋のかぶり厚さ50mmにおいて数mm程度となり、鉄筋間隔120mmの測定値の差が鉄筋のかぶり厚さ80mmにおいて数mm程度となる新型の装置が複数存在することが確認できた。この項目についても、使用する装置の特性を把握する必要があると考えられる。
- 6) 最新の電磁誘導法による測定装置が、コンクリートの調合や材齢などの影響を受けないことを実験的に確認した結果、今回の調合の範囲では影響が無いことが確認できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5「鉄筋コンクリート工事」, 2009. 2
- 2) 笠井, 田村, 魚本他 : <座談会>非破壊検査の評価と適用, コンクリート工学, Vol. 27, No. 3, pp. 14~28, 1989. 3
- 3) 日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 付18. JASS5 M-701 : 2005 高強度コンクリート用セメントの品質基準 附属書3, p. 719, 2009. 2