

伝播速度自動解析型電磁波レーダ鉄筋かぶり検知器の現場適応性の検証

西日本高速道路(株)四国支社 高松技術事務所 富田雄一

1、はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性確保には、コンクリートの強度と密実性のもとより適切な鉄筋のかぶり深さの確保が非常に重要となる。このため平成 16 年 4 月以降、西日本高速道路(株) (以下、NE X C O 西日本) は鉄筋かぶり深さについて非破壊によるかぶり深さの測定を導入している。しかし市販されているかぶり検知装置では測定精度について限界があり、精度の向上が必要である。

著者は、高品質かつ経済的な構造物の建設を目的として、平成 14 年度から高精度でかぶり深さを推定できる非破壊検査機器の開発に取り組んでおり、本検証は、開発した伝播速度自動解析型電磁波レーダ鉄筋かぶり検知器 (以下、新型かぶり検知器) の試作機による、実構造物を対象とした測定精度と適応性の検証結果について述べるものである。

2、既存の鉄筋かぶり測定技術の問題点

現場で容易にかぶりの測定が可能な手法としては、電磁誘導法と電磁波レーダ法が代表的であり、NE X C O 西日本でもこれらの手法が採用されている。

表-1 に既存技術の測定原理と問題点¹⁾を、図-1 に既存の測定機器の測定精度検証結果²⁾を示す。図-1 では、表-1 に示す問題点のとおり、電磁誘導法は、深いかぶりでは実際よりもかぶりが薄く測定され、電磁波レーダ法はばらつきが大きいことが分かる。

このように測定状況や、測定者の技量による測定精度の低下など、万人にとって取り扱いが容易で、かつ高性能な測定機器となっていないのがかぶり測定技術の現状である。

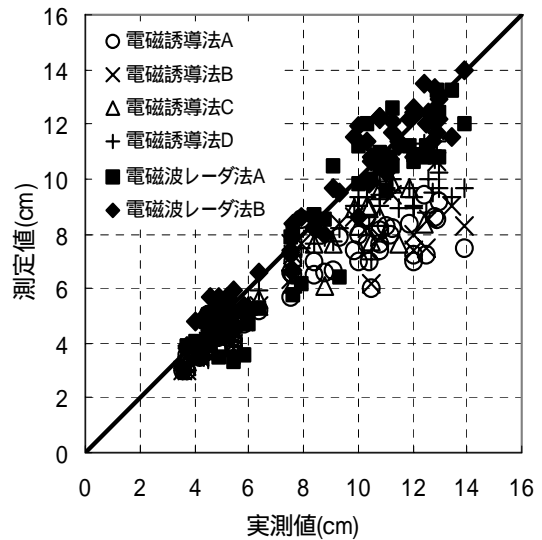


図-1 既存技術の測定結果

表-1 既存技術の測定原理と問題点

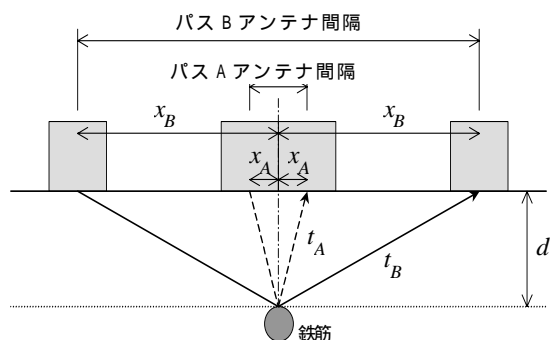
既存技術と測定原理	問題点
電磁誘導法 原理: 鋼材の反応による磁場の変化からかぶりを推定する。	<ul style="list-style-type: none"> ・コイルの作る磁束は、放射状に広がるため、配筋が密な場合やかぶりが深い場合は、周囲の鉄筋の影響によりかぶりが薄く測定される。 ・測定精度を確保するためには、鉄筋径が既知である必要がある。
電磁波レーダ法 原理: 電磁波の反射時間に推定伝播速度を乗じてかぶりを推定する。	<ul style="list-style-type: none"> ・電磁波の伝播速度は、コンクリート中の水分量の影響により変化するため、正確な伝播速度の推定は困難で測定精度が不安定。 ・測定結果が画像による位置情報のため、解析技術者の技量により測定精度が左右される。

3、新型かぶり検知器の概要

新型かぶり検知器は、誰でも容易に正確なかぶり測定が可能な機器の開発をコンセプトとし、これを可能とするため、基本技術として三井造船(株)が開発したマルチパス電磁波レーダ法を採用している。

測定原理は、電磁波レーダ法と同様に電磁波の伝播時間を測定し、鉄筋かぶりを推定する手法であるが、図-2のように、2組の送受信アンテナを備えていることが最大の特徴である。この2組の伝播経路の異なる電磁波の反射時間を用いて解析を行うことで、従来、困難とされてきたコンクリート中の電磁波の正確な伝播速度の推定を可能としている。また、5GHzと非常に高い周波数のアンテナを用いることにより、高い分解能を備えている。

表-2 は室内検討の結果であるが、新型かぶり検知器は、高精度かつ安定した測定精度を得ることに成功している。



d : 鉄筋の真のかぶり深さ (cm)
 t_{AB} : 送信アンテナから発信された電波が鉄筋に反射して受信アンテナに達した時間 (秒)
 x_{AB} : 鉄筋投射点とアンテナとの距離 (cm)
 次の方程式が $d_A = d_B$ を満足する V を収束計算にて求める

$$d_A = \sqrt{(V \times t_A \div 2)^2 - x_A^2} \quad (\text{バス A かぶり深さ})$$

$$d_B = \sqrt{(V \times t_B \div 2)^2 - x_B^2} \quad (\text{バス B かぶり深さ})$$

図-2 新型かぶり検知器の測定原理

表-2 室内検討での測定精度 (単位:cm)

かぶり	最大値	最小値	平均値	標準偏差
4.0	0.49	-0.45	-0.08	0.3457
8.0	0.77	-0.03	0.34	0.3719
12.0	-0.39	-0.94	-0.57	0.1937

4、構造物による適応性の検証

室内検討では十分な性能を確認できたが、実構造物では、コンクリート表面の不陸などの不確定要素が存在するため、実構造物による適応性の検証を行った。検証には、尾道自動車道の尾道ジャンクション工事で撤去した跨高速道路橋山方橋(表-3、図-3)の壁高欄、アーチ材、鉛直材および下部工を使用した。

測定精度の確認方法は、測定値の再現性も確認するため、新型かぶり検知器により1測定箇所につき3回測定を行い、測定した対象鉄筋までコアドリルで削孔し、ノギスで実測のかぶりを確認する方法とした。

測定対象鉄筋は181本、新型かぶり測定機による測定総データ数はその3倍の543測定である。なお、新型かぶり検知器の測定データの抽出については、測定者の技量に依存することが無いように配慮し、誰でも同じ結果が抽出できる、解析補助ソフトウェアを使用した。

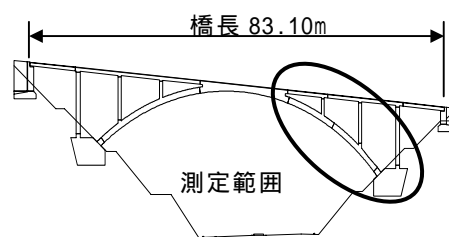


図-3 山方橋側面図

表-3 山方橋設計条件

道路規格	第3種5級
荷重	TL-14
形式	RC固定アーチ橋
橋長	83.10m
有効幅員	4.00m
支間	アーチ支間 56.10m
供用	平成5年10月

5、実構造物の比誘電率の分布

電磁波のコンクリート中の伝播速度 v は、次の式(1a)で表される。

$$V = C / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1a)$$

ここに、 C : 真空中での電磁波の速度(cm/sec)

ϵ_r : コンクリートの比誘電率

電磁波レーダ法の場合、測定精度に最も影響するのは、この比誘電率 ϵ_r の推定精度である。比誘電率は、コンクリート中の水分量に依存するため、一般的に乾燥状態のコンクリートで $4 \sim 12^2)$ 、湿潤状態で $8 \sim 20^2)$ と大きな幅があるとされており、既存技術では正確な推定が困難であった。

図-4は、実構造物でのコンクリートの比誘電率の分布を示したものであるが、かぶりの深い箇所では、比誘電率のばらつきが少なく、浅いかぶりではばらつきが大きくなる傾向が見られる。これは浅いかぶりほど外部環境の影響を受けやすいため、比誘電率がばらつくものと考えられる。また、比誘電率の最大値と最小値の幅は、6程度と大きく、比誘電率の最適化を行わず一般的なコンクリートの比誘電率8を用いてかぶりを算出すると、かぶりが6cmの場合、比誘電率の違いによる誤差だけでも $\pm 1.3\text{cm}$ 程度の誤差が発生することが分かった。

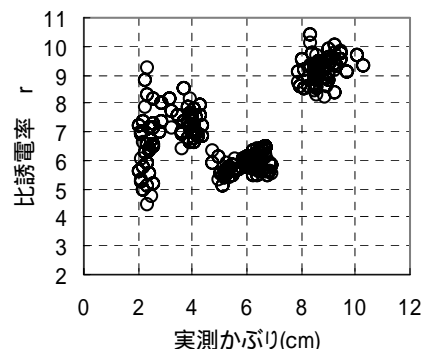


図-4 実構造物の比誘電率分布

6、新型かぶり検知器の測定精度

図-5は、新型かぶり検知器の測定値と実測かぶりとを比較したものであるが、ばらつきが少なく、傾きもほぼ一致しているのが分かる。また、図-6に示すとおり、誤差はほぼ正規分布する結果となり、測定の平均値は 0.21cm (3%)と若干実測値よりも高めになるが、個別95%信頼区間でのかぶりの測定精度は $\pm 0.98\text{cm}$ ($\pm 20.1\%$)以下となった。

これは、西日本高速道路株の定める非破壊検査での判定基準、誤差20%以下を個別でほぼ満足し、基準どおりサンプルデータ数10個とした場合の平均値の95%信頼区間は $\pm 0.32\text{cm}$ ($\pm 6.7\%$)となり、非常に高精度で判定することが出来ることが分かった。

新型かぶり検知器は開発途上の試作機ではあるが、実構造物に対しても、十分な性能を発揮できることが分かった。

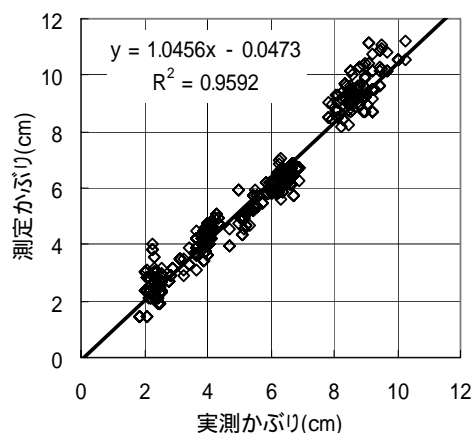


図-5 測定値と実測値のかぶりの比較

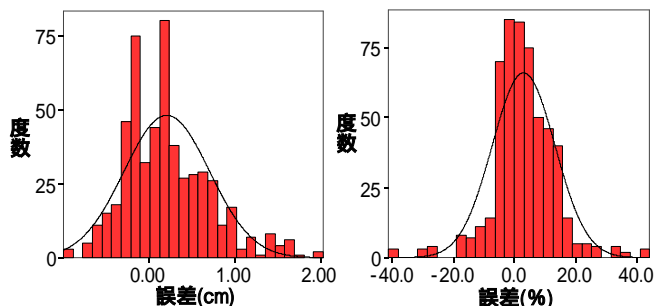


図-6 測定誤差の分布状況

7、既存技術と新型かぶり検知器の比較

既存技術の測定精度に関する既往の研究¹⁾と比較するため、この研究の測定範囲である、かぶり3~11cmまでのデータを用いて、測定精度の比較を行った。

なお、試作機の測定データは、3回繰り返し測定のうち1回目の測定データのみを使用して、出来るだけ比較条件を同一とした。

表-4 および図-7¹⁾は、既存の電磁波レーダ法による測定機器と、鉄筋かぶり検知器の試作機の測定誤差を示したものであるが、試作機が最もばらつきが少なく、既存技術と比較して安定した高い測定精度を有することが分かる。

表-4 かぶり3~11cmでの測定誤差の比較(単位:cm)

測定機種	度数	平均値	標準偏差	95%信頼区間	
				個別	10個平均
試作機	146	0.21	0.48	0.94	0.31
レーダ法A	44	-0.40	0.96	1.88	0.63
レーダ法B	48	0.25	0.71	1.40	0.47

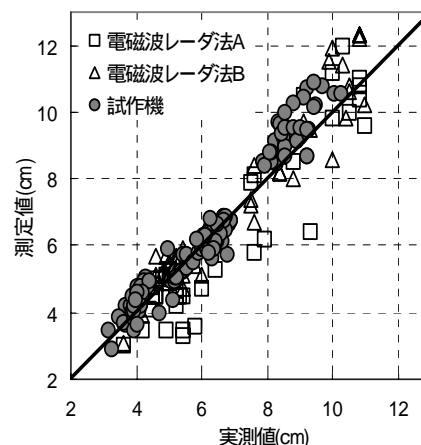


図-7 測定誤差の分布比

8、今後の課題

現在の新型かぶり検知器は試作機であり様々な検討を行うため、アンテナ間隔が調整できる機構を盛込む等、アンテナや本体を故意に大きく製作している。

図-5のかぶり2cm辺りで誤差が大きくなっているが、これは、アンテナが大きいため、コンクリートの不陸に追従できず、アンテナ素子とコンクリート面とのクリアランスが不安定になることが原因と推定されている。薄いかぶりでは、図-2のパスBアンテナのなす三角形が扁平となるため、クリアランスが不安定になると、比誘電率の解析精度が低下することが試算上では検証済みである。今後の実用機では、アンテナ形状の見直しが必要と考えられる。

9、まとめ

コンクリートの比誘電率のばらつきが大きいため、既存技術では正確な比誘電率の推定は困難である。しかし比誘電率を自動解析する新型かぶり検知器は、試作機段階とはいえ実構造物に対しても十分対応できる性能を有していることが確認できた。また、解析補助ソフトウェアを用いて、鉄筋位置やかぶりの自動抽出を行うことにより、測定者の技量に依存しない、高精度かつ高効率な解析が可能であることが分かった。今後は、アンテナとコンクリート表面とのクリアランスの安定性を高める機器の形状変更や、小型化などの改良を加え、誰でも簡単に高精度の測定が可能な実用機の開発に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 井ヶ瀬良則, 小野聖久: 橋梁 非破壊検査によるコンクリートの品質管理の取り組み, ハイウェイ技術, No23, p92, 2002
- 2) 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] p117~126, 2002