論文 鉄筋検査機の鉄道構造物への適用に関する研究

東川 孝治*1 曽我部正道*2 井上 裕司*3 谷村 幸裕*4

要旨: 高密度配筋を特徴とする鉄道ラーメン高架橋への鉄筋検査機の適用性について検討した.電磁誘導法では軸方向鉄筋や帯鉄筋の組数の影響が大きいことを室内試験により明らかにして,修正式を作成,これを実構造物に用いて現地試験により検証した.レーダ法では,含水率に結果が左右されること,高架橋位置により含水率が異なっていることなどを現地測定試験により明らかにした.

キーワード:非破壊検査,鉄筋のかぶり,電磁誘導法,レーダ法

1. はじめに

既設構造物における鉄筋のかぶりは,中性化 や塩分浸透による構造物の経時的な性能劣化予 測,余寿命予測などにおいて重要な因子となる ¹⁾²⁾.単純な物理量で,かつ比較的測定の容易な 鉄筋のかぶりの精度を可能な限り高めておくこ とは予測精度の向上に欠かせない条件となる. また,鉄筋のかぶりの非破壊検査は,新設構造 物の施工時・完成時の検査においても,近年, 重要な役割を果たしている.

具体的な鉄筋のかぶりの非破壊検査手法とし ては,電磁誘導法及びレーダ法が最も一般的で ある³⁾⁴⁾⁵⁾.これらの手法を用いた鉄筋検査機は, 既に各所で多用されているが,実際の構造物に 適用した場合の精度確認や適用性に関する検証 事例は少ないようである.

そこで本研究では,電磁誘導法及びレーダ法 について,特に鉄道ラーメン高架橋への適用性 という観点から検討を行うこととした.

2. 電磁誘導法(磁気式)に関する検討

2.1 測定原理と課題

電磁誘導法は,磁気式と渦流式に大別するこ とができる⁴⁾.磁気式では,コイルを巻いた探 触子に低い周波数の交流磁界を発生させ,鉄筋 (強磁性体)の存在により生じる磁束の変化を, 電磁誘導現象により生じるコイル起電力の変化 として捉え,鉄筋のかぶりや径を推定する.

一方,渦流式は,探触子のコイルに流す交流 電流の周波数をより高くし,導体である鉄筋に 渦電流を発生させるところが前者と異なる.渦 電流も磁界を作り磁束を変化させる.この磁束 の変化は,鉄筋の導電率,透磁率,かぶり,直 径によって生じるため,探触子のコイルにおい てこの大きさを捉え鉄筋のかぶりや径を推定す ることができる.

市販の装置では磁気式では通常 1kHz 以下の 低い周波数が,渦流式では32kHz 程度が用いら れているようである.

電磁誘導法による測定法は最も簡便であるが, かぶりの大きい範囲に対する感度が十分ではない.探触子の作る磁界の影響範囲内に探知対象 以外の鉄筋が存在した場合にその影響により誤 差が大きくなるなどの問題がある.

表 - 1 に鉄道高架橋として最も一般的な構造 形式であるビームスラブ式ラーメン高架橋の配 筋例を示す.この構造形式は,他の構造形式に 比べ,構造物に配置される鉄筋量が多く,また 兵庫県南部地震以降,更に鉄筋量が増加する傾 向にある.寒冷地の高架橋の場合,かぶりは表

^{*1(}財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造研究室 研究員(正会員)

^{*2(}財)鉄道総合技術研究所 構造力学研究室 副主任研究員(正会員)

^{*3(}株)BMC 工修 (正会員)

^{*4(}財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造研究室 主任研究員 工修(正会員)

- 1の値から 10mm 増され設計・施工される.

図 - 1 に電磁誘導法による鉄道高架橋測定の 概念図を示す.例えば電磁誘導法でこの種の高 架橋の柱帯鉄筋を測定する場合,帯鉄筋の狭い 間隔での配置や複数組配置,直交する軸方向鉄 筋などが測定精度に影響を及ぼすと考えられる.

2.2 室内試験による精度検証

(1) 試験方法

まず室内試験において精度確認試験を行った. 具体的には,実構造物の配筋状態に近い鉄筋組 を行い,この上に木版を置き,かぶりをパラメ ータとして誤差の測定を実施した.

実構造物では鉄筋コンクリートに囲まれてい るが,コンクリート自体は導電率が低く,透磁 率も問題になるほどの大きさではないため,室 内試験ではコンクリートの影響は無視してよい と考えた⁴⁾.

(2) 鉄筋間隔及び鉄筋組数の影響

図 - 2 に鉄筋間隔及び鉄筋組数の影響を示す. 耐震設計上の要求から,帯鉄筋やスターラップ が75~150mm間隔で1~2組程度配置される. 使用される帯鉄筋はD16,D19などである.

D16 を標準として鉄筋間隔及び鉄筋のかぶり をパラメータとし.測定可能深さは電磁誘導法 では 70mm が限界であった.鉄筋が1組の場合, 磁気式及び渦流式ともに,鉄筋間隔 100mm 程 度までであれば単一の鉄筋を配置した場合と同 一の結果であった.

一方,鉄筋が2組になると隣接する鉄筋の影響が現れる.かぶりが増加するに従い誤差は大きくなる.かぶり40mmにおける誤差は両方式ともに4mm程度であるが,かぶり60mmにおける誤差は,磁気式で8mmに対して渦流式では5mm程度であった.

また近年 耐震部材には溶接閉合型帯鉄筋が用 いられるが溶接の影響は少なかった.2 組の鉄 筋の閉合部は溶接部の重なりで部分的に3組と なるが,誤差は2組の結果と同程度であった.

(3) 直交鉄筋の影響

表 - 1 ラーメン高架橋の配筋の例

		か	測定鉄筋			直交鉄筋	
部位		ぶ	鉄	組	間	鉄	目四
		IJ	筋	数	隔	筋	间则
中間	上面	30	D16	1.0	250	D13	250
スラブ	下面	30	D16	1.0	125	D13	125
梁出	上面	30	D16	1.0	250	D13	250
スラブ	下面	30	D13	1.0	250	D13	250
縦梁下面		30	D16	2.0	150	D32	93
縦梁側面		30	D16	1.0	150	D19	200
横梁下面		30	D16	2.0	125	D32	93
横梁側面		30	D16	1.0	125	D16	200
柱中間		40	D16	1.5	100	D32	93
柱端部		40	D16	2.0	100	D32	93

・かぶり,間隔の単位は mm

・かぶり太字:補正の必要あり



図 - 1 ラーメン高架橋の柱の 電磁誘導法による測定の概念図



図 - 2 鉄筋間隔及び鉄筋組数の影響

柱及び梁下面などは,測定鉄筋と直交する軸 方向鉄筋が D29,D32 と径が大きい.試験では, 直交する軸方向鉄筋を所定間隔でまず配置し, その上に帯鉄筋を模して測定鉄筋を並べ,更に 木版を設定かぶり分重ねて測定した.

図 - 3 に直交鉄筋の影響を示す. D16 鉄筋に

D32 の主鉄筋が交差する場合を想定し,その影響度を検討した.図から1組の場合も2組の場合も,直交鉄筋の影響を大きく受けること,かぶりが増加するに従いその影響が顕著となることが分かる.

また,直交鉄筋がある場合も,磁気式よりも 渦流式の方が誤差は小さい.柱標準かぶり 40mmにおける誤差は,磁気式で5mm(1組) と8mm(2組),渦流式で1mm(1組)と4.5mm (2組)であった.渦流式の方が誤差は小さい.

(4) 測定値の補正

電磁誘導法では,鉄筋の組数や直交する軸方 向鉄筋により,かぶりの測定に誤差を生じるた め,測定値の補正が必要になる.補正が必要な 部位のかぶりを表-1中に太線で示した.

測定値は,全体として実際よりも浅く判定されるため,安全側であると言えるが,一方,竣 工検査などにおいて,本来適切であるかぶりが 「かぶり不足」として判定されると問題である.

実構造物における多様かつ複雑な配筋に対し て,個々に理論式を導くことは非常に煩雑なた め,以下のような簡略式を提案した.

$$y=ax^2+x$$
 (1)

ここに,y は推定されるかぶり真値(mm),a は配筋状態より求まる定数(1/mm),x は電磁誘 導法による測定かぶり(mm)である.特に現場で の使用を考慮して,できるだけ簡便な式とした.

図 - 4 に示すように,定数 a を最小 2 乗法に より求めると,磁気式により測定する場合,2 組帯鉄筋,スターラップに対しては 6.18×10⁻³, 1 組帯鉄筋,スターラップに対しては 3.80×10⁻³ ³がそれぞれ求まる.

梁出スラブ先端・下面は, 剥落などの公衆安 全面からも重要な部位となるが, 上側から曲げ 下げられる鉄筋と測定鉄筋が束ねられるため誤 差が生じ,補正が必要である.係数は2.27×10⁻³ となった.

渦流式による場合の係数は,2 組帯鉄筋,ス



図-4 補正値の算定

ターラップに対しては 2.85 × 10⁻³,1 組帯鉄筋, スターラップに対しては 1.11 × 10⁻³ となった. 渦流式であればスラブ先端での補正は必要ない. 鉄筋の径,直交する鉄筋の径により,これらの値は異なるが,通常の構造形式においては1 ランク程度の径の差異では誤差は殆どなく,上 記定数をそのまま用いてもよいと考えられる.

2.3 現地試験による精度検証

式(1)の精度および鉄筋検査機の性能確認の ため,設計の異なる2つの実鉄道ラーメン高架 橋において検証試験を行った.具体的には誤差 が大きくなる傾向にある磁気式の電磁誘導法を 用いて80箇所でかぶりを測定し,その後鉄筋を はつり出しノギスにより真かぶりを測定した.

図 - 5 に実構造物における磁気式検査機の検 証結果を示す.(a)の高架橋は,提案した補正式 に近い条件の配筋であり,相関係数も 0.963 と 非常に良い.(b)の高架橋は主鉄筋が D25 で,間 隔もやや広いため,補正式による補正値は実測 値に対してやや過大となる.ここでは補正式を そのまま適用したが,相関係数は 0.930 であっ た.

2.4 鉄道高架橋への適用性

電磁誘導法は,特にかぶりが厚い場合に周囲 の鉄筋の影響を受け測定が困難となる傾向にあ った.測定限界かぶりは前述のように約70mm であった.鉄道構造物の中でも例えば橋脚構造 などでは,かぶりが100~150mmとなるものも 多いが,こうした場合には全く測定が行えなか った.

また,同様の理由により直交する深部の軸方 向鉄筋のかぶりや位置検知は困難であった.し たがって,コア抜きのための位置出しなどでに 対して信頼性は低い.

ただし,帯鉄筋やスターラップなどの構造物 の維持管理に実質的に必要とされる鉄筋かぶり については,後述するレーダ法よりも精度が高 くまた測定時間も短いため,極めて実用的な手 法であると判断できる.

3. レーダ法(電磁波法)の検討

3.1 測定原理と課題



図 - 5 実構造物における磁気式の検証結果

レーダ法(電磁波法)は,送信アンテナをコ ンクリート表面につけ,内部に向けて電磁波を 放射し,その電磁波が内部の鉄筋に反射されて 受信アンテナで観測されるまでの時間と電磁波 速度から,鉄筋までの距離を求める手法である. この手法の問題としては、電磁波の伝搬速度が コンクリートの材質(含水率)などに影響を受 けることが挙げられる⁶⁾.レーダ法による測定 かぶりは式(2)で算定される.

$$d = \frac{C}{2\sqrt{\varepsilon_r}}t\tag{2}$$

ここに, *d*(m)は測定かぶり, *C* は真空中にお ける電磁波速度 3×10⁸(m/s), *t* は電磁波の往復 時間(m), ,はコンクリートの比誘電率(一般 に 6~11)である.本手法で誤差が入り込む余 地は,機械的なものを除けばこの比誘電率のみ で,取り得る範囲が6~11ということは,式の 性質上これにより測定しようとするかぶりの最 大1.5倍程度の誤差が生じるということになる.

3.2 現地試験結果

測定機器の性能確認のため,電磁誘導法と同 様に実鉄道ラーメン高架橋を対象とし 32 箇所 で検証試験を行った.図-6に測定結果を示す.

はつりなどによる比誘電率のキャリブレーションが実施できない場合には, 「を中庸な 8.0 程度と仮定し測定を行うこととなるが,この場 合の誤差は -16 ~ -1 mm であった(図中). 一方,最初のはつり箇所で「=6.2 を得て,これ により測定を行った場合,誤差は -7 ~ +9 mm であった(図中).

比誘電率の推定方法にもよるが,今回の測定 結果では全般的に電磁誘導法よりも大きな誤差 となった.

3.3 鉄道高架橋コンクリートの比誘電率

比誘電率は,特定のコンクリート部材に共通 の値ではなく,あくまで個々の測定位置に依存 していると思われる.図-7は測定上の誤差が 全て比誘電率によるものと考え,真かぶり,測 定かぶりから比誘電率を逆算したものである. 比誘電率 6.2 とした測定から逆算した場合,同 ーのコンクリートであっても,は5から10ま でと広く分散している.これに伴う図中程度の 誤差は避けられないと考えられる.

一方,比誘電率 6.2 の測定からの逆算結果を 比誘電率 8.0,10.7 の測定からの逆算結果を比 較すると,ここでも個々の値には開きがある. 別の機械的誤差,測定時の操作方法による誤差 などが介在していると思われる.

コンクリートの比誘電率と含水率とには相関 があることが知られている.また含水率は深さ



図 - 6 実構造物におけるレーダ法の検証結果



図-7 比誘電率の逆算結果



図 - 8 ラーメン高架橋の含水率分布の例

方向に対して,特に表面から鉄筋までのかぶり の範囲で大きく変化していることが知られてい る⁶⁷⁷.これに加え実際の構造物では,部位毎の 差なども大きいと考えられる.

図 - 8 にラーメン高架橋表面含水率の分布状 況を示す.測定は市販のモルタル水分計を用い て行った結果である.この水分計は測定精度は あまり良くないが,面ごとの定性的な傾向を把 握するうえで用いた.図から一般的な傾向を見 い出すことは困難であるが,高架橋柱の含水率 が,高さ,面に大きく影響を受けること,天候 に大きく左右されることなど,定性的な傾向は 読みとれる.

3.4 鉄道橋への適用性に関する検討

以上の検討結果からレーダ法による測定を実施する場合には,精度を高めるために,ドリル による微破壊検査⁵⁾などを併用し比誘電率を知 る必要があると考える.この場合,鉄道高架橋 では同一構造物であっても雨かかりなどによっ て含水率が異なるため,複数箇所で検証してお くことが望ましい.

レーダ法は,別途行った比較的かぶりが厚い 橋脚構造での試験では,かぶり 150mm までの 構造物に対して測定することができた.また, 100mm 程度までであれば位置検知も正確に行 うことができる.

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す.

- 電磁誘導法は,かぶり70mmまで一般的 なラーメン高架橋に対しては高い精度 でかぶり測定を行い得る.
- (2) 電磁誘導法のうち渦流式は磁気式に比 べ精度が高く,測定誤差は半分以下とな っている.
- (3) 電磁誘導法は,柱や梁下面などにおける, 複数組の帯筋,スターラップ,太径かつ
 密な直交鉄筋の影響を受ける.これらの
 影響は実験式で補正し得る.

(4) レーダ法は、コンクリートの比誘電率の 影響を大きく受ける.比誘電率は高架橋 個々の位置でバラつくため、複数箇所で ドリルを用いた微破壊検査などにより 検証する必要がある.

本研究の結果が,今後の鉄道構造物における 耐久性設計及び維持管理の一助となれば幸いで ある.

謝辞

磁気式及び渦流式の電磁誘導法測定に際して, 富士物産株式会社に多大なるご協力を頂いた. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管 理編], pp.97-112, 2001.1
- 2) 長谷川雅志ほか: RC ラーメン高架橋の中性 化深さに関する調査,土木学会年次学術講演 会講演概要集,pp584-585,2001.10
- 3)和美広喜,小田喜信,林憲秋:コンクリート の非破壊検査方法(原理と手法)-鉄筋位置, 径,かぶり-,コンクリート工学,Vol.27, No.3, pp.43-47,1989.3
- 4)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 ,非破壊検査協会,非破壊 検査, Vol.47, No.10, pp.712-716, 1998.10
- 5)吉松明彦:鉄筋位置測定のための非破壊試験 - 電磁波法 - ,非破壊検査協会,非破壊検査, Vol.47, No.10, pp.712-716, 1998.10
- 6) 森濱和正,笠井芳夫,湯浅昇:コンクリート 内部の含水状態と比誘電率の関係,非破壊検 査協会,平成11年春季大会講演概要集, pp.91-94,1999.5
- 7) 森濱和正ほか: 非破壊試験によるコンクリート品質,部材厚さ,かぶり厚さの検査方法に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1,2001