

報告 各種鉄筋探査機の鉄道構造物への適用性に関する検討

宇野 匡和^{*1}・曾我部 正道^{*2}・長谷川 淳史^{*3}・仁平 達也^{*4}

要旨：本報告では、鉄道コンクリート構造物の鉄筋のかぶりの非破壊検査手法として一般的である、電磁誘導法による4機種の鉄筋探査機の鉄道構造物への適用性について検討した結果を報告する。電磁誘導法には磁気式、渦流式および併用式があり、室内試験で測定精度に配筋の影響があることを確認し、各機種の補正式を作成した。これらを実構造物で現地試験を行い精度の検証を行い、室内試験での補正式が実構造物の配筋においても適用でき、磁気式に比べ渦流式、併用式の各種鉄筋探査機の測定精度が高いことなどを確認した。

キーワード：非破壊検査、鉄筋のかぶり、電磁誘導法

1. はじめに

近年、既設構造物の維持管理において、構造物の性能劣化予測、余寿命予測などが行われている。これらの予測は、中性化や塩分浸透による構造物の経時的な性能劣化の把握により行われ、既設構造物の鉄筋のかぶりは、予測のための重要な因子となる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。

鉄道高架橋における、具体的な鉄筋のかぶりの非破壊検査手法としては、電磁誘導法が一般的である³⁾⁴⁾。

本報告では、東川らにより提案⁵⁾された、帯鉄筋のかぶり測定時の主鉄筋の影響や帯鉄筋の複数組配置、鉄筋間隔が狭い場合の隣接鉄筋の影響などの室内試験での確認方法、および補正式の算定の方法を用いて、特に鉄道ラーメン高架橋への適用という観点から4種類の電磁誘導法による鉄筋探査機の測定精度を検証・比較し補正式を提案するとともに、実構造物においてそ

の精度を検証した。

2. 電磁誘導法の測定原理と課題

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、磁気式は通常1kHz以下の低い周波数が用いられているものが多く、鉄筋の磁気特性により情報を得ている。一方、渦電流による場合は32kHz程度が良いとされている。

電磁誘導法による測定法は最も簡便であるが、かぶりが大きい範囲に対する感度は十分ではな

*1 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 副主任研究員 工修 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造力学 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 日本交通技術(株) 技術開発部 (正会員)

*4 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)

い。また、ラーメン高架橋のように配筋が密で、探触子の作る磁界の影響範囲内に探査対象以外の鉄筋が存在した場合、その影響により誤差が大きくなる問題が挙げられる。表-1に今回、室内試験、補正式算定および実構造物検証を行った鉄筋探査機を○印で示す。磁気式と渦流式を併用している b タイプは、測定原理を併用式と表記する。既に試験、検証済みの機種を●印で示している。前回試験済みのデータは、各検討段階で用いている。各種試験で用いた探触子は標準タイプである。

表-2 に既設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、兵庫県南部地震以降、更に鉄筋量が増加する傾向である。寒冷地の高架橋の場合、かぶりは表-2の値から 10mm 増され設計・施工されている。

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。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。

3. 室内試験による精度検証

3.1 試験方法

既に提案⁵⁾されている室内試験の方法で各種鉄筋探査機の測定精度の確認試験を行った。図-2に D16@100-1 組、直交鉄筋 D32 の場合の測定略図を示す。具体的には、実構造物の配筋状態に近い鉄筋を組み、この上に木版を置き、かぶりをパラメータとしてかぶり真値とかぶり測定値の差を測定した。この差をかぶり誤差としている。

本試験は、鉄筋のかぶりを木版に置き換えて試験を行っている。実構造物の鉄筋は、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判断した⁴⁾。本方法は、現

表-1 各種鉄筋探査機の概要

メーカー	A社		B社	C社
機種名	a1タイプ	a2タイプ	bタイプ	cタイプ
測定原理	磁気式	渦流式	併用式	渦流式
室内試験	●	●	○	○
実構造物検証	●	○	○	

(凡例) ●：既発表, ○：今回検証

表-2 ラーメン高架橋の配筋の例

	かぶり	測定鉄筋			直交鉄筋		
		鉄筋	組数	間隔	鉄筋	間隔	
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
- ・寒冷地は表中のかぶりは 10mm 増加する

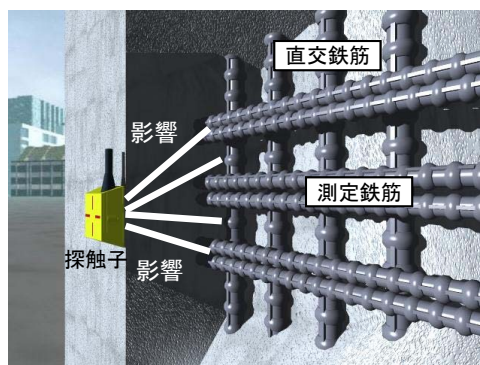


図-1 ラーメン高架橋の柱の電磁誘導法による測定の概念図

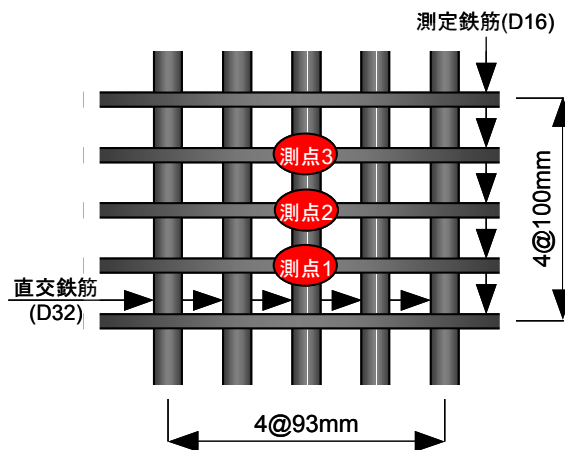


図-2 測定概略図 (D16@100-1 組、直交鉄筋 D32 の場合)

場において簡易な材料で検証を行えることから、検査員の技術向上や技量確認にも有効である。

3.2 鉄筋間隔及び鉄筋組数の影響

耐震設計上の要求から、実構造物では、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。確認試験では、標準を D16 とし、鉄筋間隔及び鉄筋のかぶりをパラメータとして試験を行った。

図-3 に今回室内試験した併用式 b タイプと渦流式 c タイプの鉄筋間隔及び鉄筋組数の影響を示す。鉄筋が 1 組の場合、併用式 b タイプと渦流式 c タイプともに、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様の結果であった。

鉄筋が 2 組になると隣接する鉄筋の影響が現れることがわかる。併用式 b タイプは、かぶりが増加するに従いかぶり誤差は大きくなる傾向にある。かぶり 30mm におけるかぶり誤差は 3mm 程度であるが、かぶり 60mm におけるかぶり誤差は、5mm 程度であった。渦流式 c タイプは、かぶりが 30mm より小さい値でかぶり誤差が大きく、30mm から 90mm の間では、かぶり誤差が 5mm 以内で推移している。また、併用式 b タイプでは、実際のかぶりより浅く測定されるのに対し渦流式 c タイプでは、深く測定される。このように 2 機種で異なった傾向を示している。

鉄筋の測定限界かぶりについては、併用式 b タイプと渦流式 c タイプともに 70mm~80mm 程度で測定不能の場合があった。

3.3 直交鉄筋の影響

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 と径が大きく測定精度に影響する。確認試験では、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-4 に併用式 b タイプと渦流式 c タイプの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

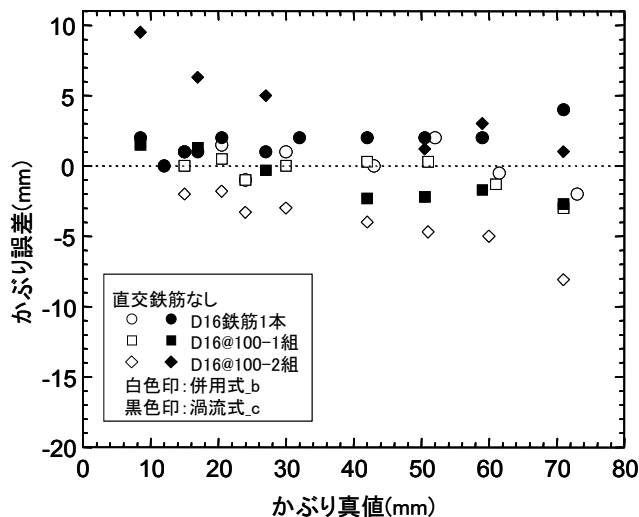


図-3 鉄筋間隔及び鉄筋組数の影響

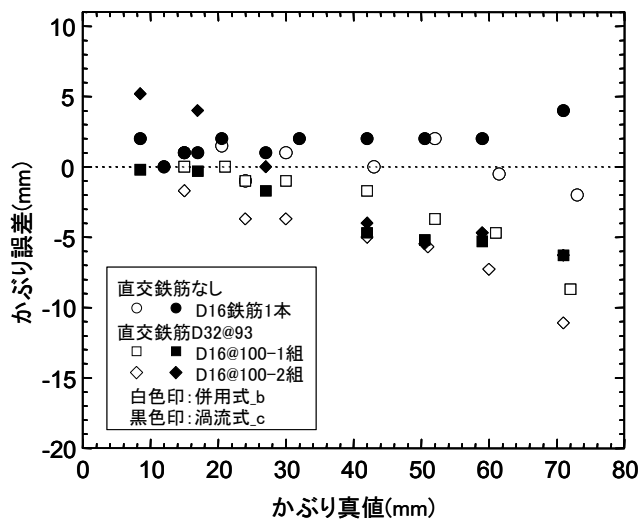


図-4 直交鉄筋の影響

た。但し渦流式 c タイプは、直交鉄筋に D29 を用いている。図から併用式 b タイプと渦流式 c タイプの両タイプともに、測定鉄筋 1 組の場合、2 組の場合も、直交鉄筋の影響を受けることが分かる。併用式 b タイプは、かぶりが増加するに従いその影響が顕著となるが、渦流式 c タイプは、1 組の場合も 2 組の場合も、5mm 程度のかぶり誤差で推移している。

3.4 鉄筋探査機 4 機種の比較

図-5, 図-6 に 4 機種のかぶり誤差の比較を示す。鉄道ラーメン高架橋における代表的な配筋である、鉄筋組数 1 組と鉄筋組数 2 組で直交鉄筋ありの場合について、磁気式、渦流式、併用式の 4 機種のかぶり誤差を示す。

鉄筋組数 1 組の場合での柱の標準的なかぶり

40mm～60mm 間のかぶり誤差を下記に示す。磁気式 a1 タイプでは、5mm～8mm である。渦流式 a1 タイプ、併用式 b タイプが、同様の傾向を示し、1mm～5mm のかぶり誤差である。渦流式 c タイプでは、概ね 5mm 程度のかぶり誤差である。渦流式、併用式は磁気式に比べ測定精度が高い。

鉄筋組数 2 組の場合での柱の標準的なかぶり 40mm～60mm 間のかぶり誤差を下記に示す。磁気式 a1 タイプでは、8mm～15mm である。渦流式 a2 タイプ、併用式 b タイプが、鉄筋組数 1 組の場合よりかぶり誤差が大きくなるものの、同様の傾向を示している。そのかぶり誤差は 5mm～8mm である。渦流式 c タイプでは、鉄筋組数 1 組の場合と同様で概ね 5mm 程度のかぶり誤差であり、他の 3 タイプより精度が高い結果が示されている。しかし、かぶり 20mm 以下では、危険側となるかぶり誤差が得られた。ただし、このかぶりは、検査等では、かぶり不足と判定されることとなるため運用上は問題が少ないと考える。かぶり自体の測定を目的とする場合には、危険側の評価となる点について留意しておく必要がある。

上記のように、測定原理の違いだけでなく、同方式の渦流式においても、探触子内のコイル数や径、コイルに流す電流の周波数などの違いから各種鉄筋探査の特性が異なることがわかる。

3.5 測定値の補正

室内試験で確認したとおり電磁誘導法では、鉄筋の組数や直交する軸方向鉄筋の影響により、鉄筋のかぶり測定には、かぶり誤差を生じる。

併用式 b タイプでは、測定値は、全体として実際の鉄筋のかぶりより浅く測定される。これは、維持管理上の構造物の性能劣化予測を行うのには、安全側であるが、竣工検査などでは、本来適切であるかぶりが「かぶり不足」として判定される可能性がある。

そこで、その測定値を実際のかぶりに合うように、提案されている簡略式で補正する⁵⁾。

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

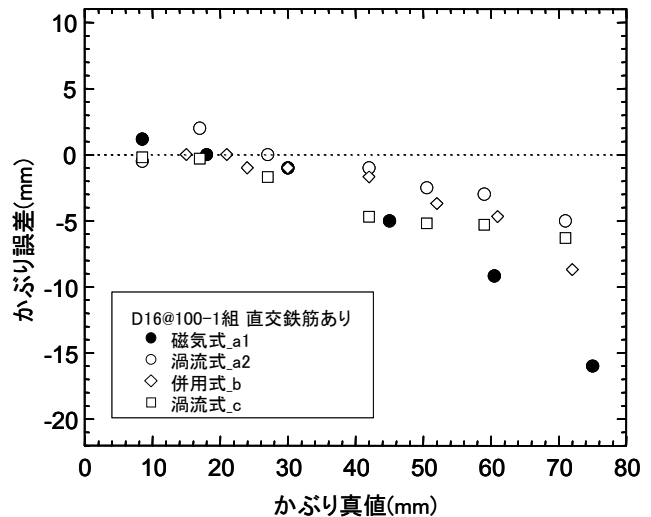


図-5 4機種のかぶり誤差の比較 (D16@100-1組,直交鉄筋あり)

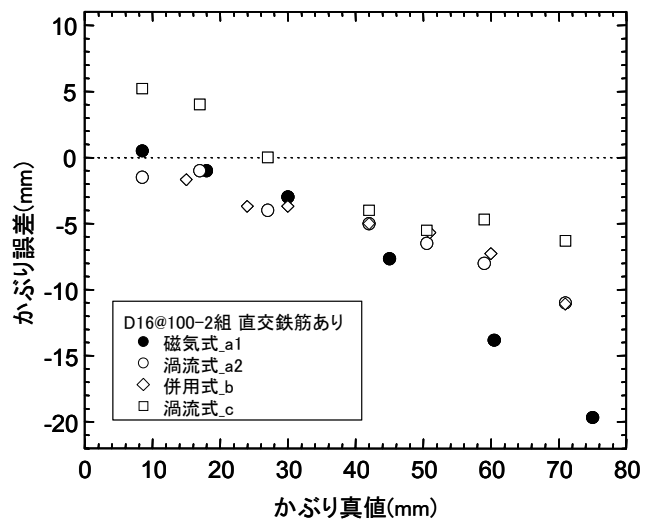


図-6 4機種のかぶり誤差の比較 (D16@100-2組,直交鉄筋あり)

y は推定されるかぶり真値(mm), a は配筋状態より求まる係数(1/mm), x は電磁誘導法による測定かぶり(mm)である。定数 a は、最小 2 乗法により求める。

磁気式 a1 タイプで測定する場合、2 組帯鉄筋、スターラップに対してと、1 組帯鉄筋、スターラップに対して補正式を算定している。また、張出スラブ先端・下面は、維持管理上、剥落などの公衆安全面からかぶりを把握しておくことは、重要であるので、これについても補正を行っている⁵⁾。

図-7 に、今回補正式を算定した併用式 b タイ

プの結果を示す。係数は、2組帯鉄筋、スターラップに対しては $a=3.34 \times 10^{-3}$ 、1組帯鉄筋、スターラップに対しては $a=1.75 \times 10^{-3}$ となる。張出スラブ先端・下面を磁気式 a1 タイプで測定する場合、かぶり誤差が無視できない大きさとなるため補正を行っているが、併用式 b タイプで測定した場合は、かぶり誤差が 1mm 程度と小さいため補正を行わない。

図-8 に、今回補正式を算定した渦流式 c タイプの結果を示す。かぶり真値 40mm~60mm の間は、1組、2組共にほぼ同じかぶり測定値を示している。係数は、2組帯鉄筋、スターラップに対しては $a=1.64 \times 10^{-3}$ 、1組帯鉄筋、スターラップに対しては $a=1.85 \times 10^{-3}$ となり、磁気式、併用式に比べ 1組用 2組用の係数に大きな違いは見られない。ただし、鉄筋組数が 2組の場合は、測定値が 30mm より小さい場合は、この補正式による補正はできない。

かぶりの測定を行う鉄筋の径、直交する鉄筋の径により、これらの値は異なるが、通常の構造形式では、1ランク程度の鉄筋径の差異では誤差は殆どなく、上記定数をそのまま用いる。ただし、同一の鉄筋探査機での場合である。各種鉄筋探査機で特性が異なり、測定結果の傾向が異なるため、機器ごとに補正式を算定し確認する必要がある。

4. 現地試験による精度検証

表-1 に示す渦流式 a2 タイプと併用式 b タイプにおける補正式の精度および各種鉄筋探査機の性能確認を実物の鉄道ラーメン高架橋の柱において検証試験を行った。検証方法は、この 2機種を用いて 96箇所のかぶりを測定し、その後、鉄筋をはつり出しノギスによりかぶりを測定した。測定対象の鉄筋は、D13 で 150mm~300mm 間隔で直交する軸方向鉄筋は、D25 である。

図-9、図-10 に実構造物における併用式と渦流式鉄筋探査機の検証結果を示す。この高架橋は上記に示すとおり、主鉄筋が D25 で、帯鉄筋 D13 で間隔もやや広いいため、補正式の算定に

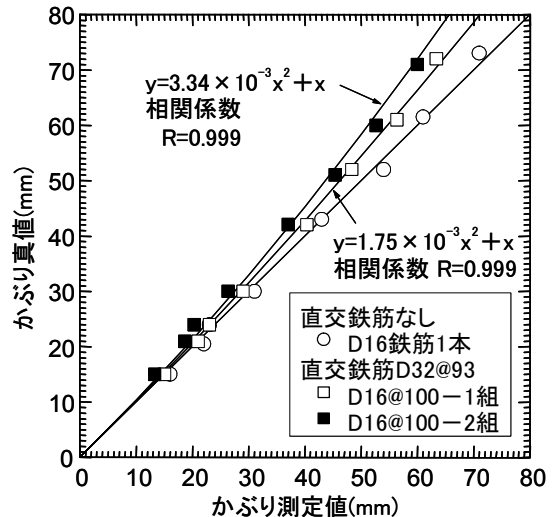


図-7 補正值の算定(併用式:bタイプ)

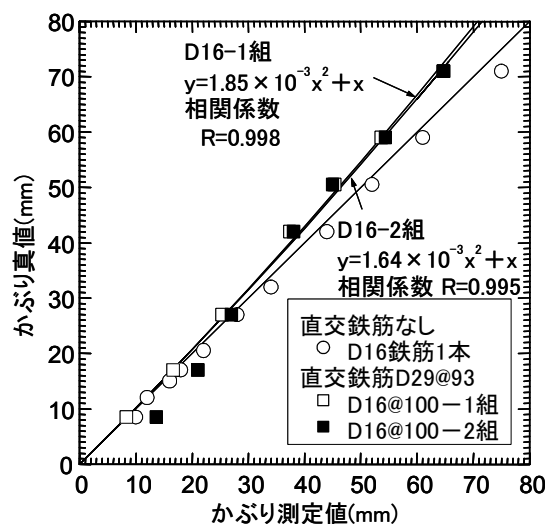


図-8 補正值の算定(渦流式:cタイプ)

用いた配筋状態とは異なるが、本検証にあたり、そのまま補正式を適用している。渦流式 a2 タイプの相関係数は 0.953 である。また、併用式 b タイプの相関係数は 0.919 であり共に強い相関を示す結果となった。この結果からも、一般的な配筋である高架橋においては、室内試験から算定した補正式をそのまま適用できる。

5. 鉄道高架橋への適用性

今回検証した鉄筋探査機は、維持管理に必要なとされる帯鉄筋やスターラップなどのかぶり測定については、精度が高く測定自体が容易であるため、極めて実用的な鉄筋探査の方法であると言える。ただし、今回の検証においても、全

ての鉄筋探査機において電磁誘導法は、鉄筋の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。実用的な測定限界かぶりはいずれの鉄筋探査機も 70mm～80mm 程度であった。つまり、鉄道構造物でも橋脚構造などのように、かぶりが 100～150mm となるものについては、かぶり測定が行えない。

また、今回検証した併用式 b タイプは、他の 3 機種種の鉄筋探査機に比べ、直交する深部の軸方向鉄筋の位置検知は誤差 10mm 以内の高い精度で検知することが可能であった。他の 3 機種種に関しては、コア抜きのための位置出しなどに用いるには信頼性が低いと判断された。

6. まとめ

本検証で得られた知見を以下に示す。

- (1) 今回検証した各種鉄筋探査機は、かぶり 70mm～80mm 程度までの、一般的な鉄道ラーメン高架橋に対しては高い精度でかぶり測定を行うことが可能である。
- (2) 渦流式と併用式の鉄筋探査機は、磁気式に比べ精度が高く、測定したかぶり誤差は磁気式の半分以下となっている。
- (3) 今回検証した各種鉄筋探査機は、柱や梁下面などの複数組の帯鉄筋、スターラップ、太径かつ密な直交鉄筋の影響を受ける。これらの影響は室内試験で算定した補正式で補正することが可能であり、一般的な配筋の鉄道ラーメン高架橋に適用可能である。

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) 谷村幸裕ほか：鉄道 RC ラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究，土木学会論文集，No.760/V-63，pp147-157，2004.5
- 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，

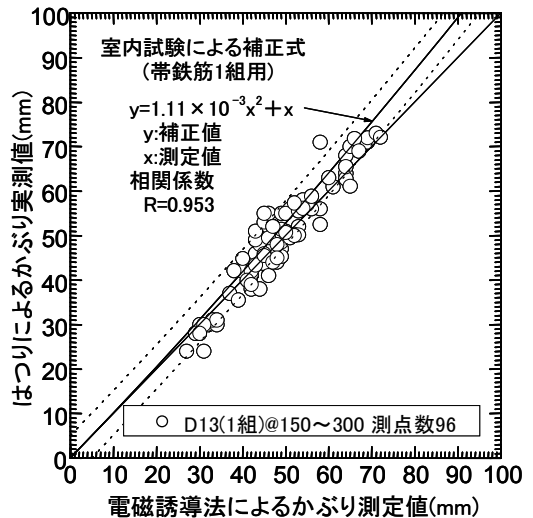


図-9 実構造物での渦流式 a2 タイプの検証

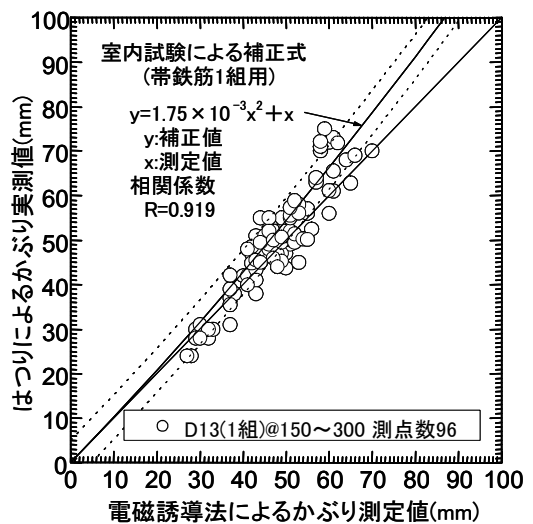


図-10 実構造物での併用式 b タイプの検証

径，かぶりー，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) 東川孝治ほか：鉄筋検査機の鉄道構造物への適用に関する研究，鉄道総研報告，Vol.16，No.9，pp.17-22，2002.9