

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 曾我部正道*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。

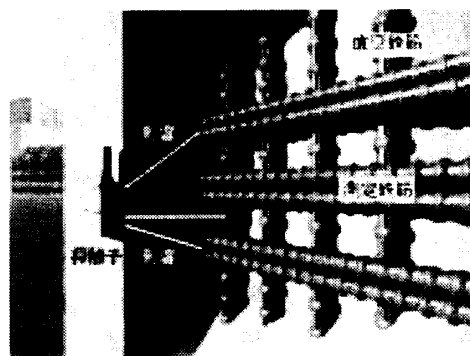
(3) 直交鉄筋の影響

表－ 1 ラーメン高架橋の配筋の例

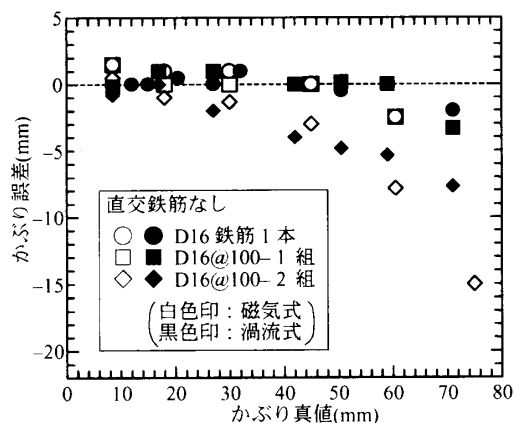
部位		かぶり	測定鉄筋			直交鉄筋	
			鉄筋	組数	間隔	鉄筋	間隔
中間スラブ	上面	30	D16	1.0	250	D13	250
	下面	30	D16	1.0	125	D13	125
梁出スラブ	上面	30	D16	1.0	250	D13	250
	下面	30	D13	1.0	250	D13	250
縦梁下面		30	D16	2.0	150	D32	93
縦梁側面		30	D16	1.0	150	D19	200
横梁下面		30	D16	2.0	125	D32	93
横梁側面		30	D16	1.0	125	D16	200
柱中間		40	D16	1.5	100	D32	93
柱端部		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。

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

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} 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

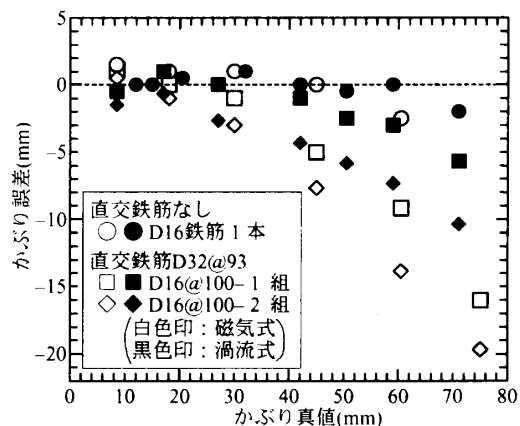
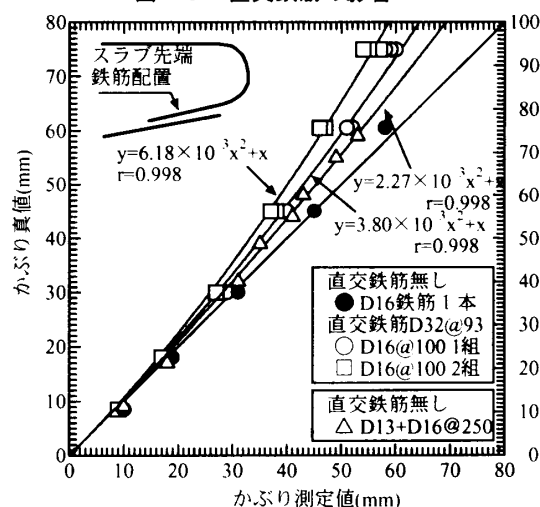
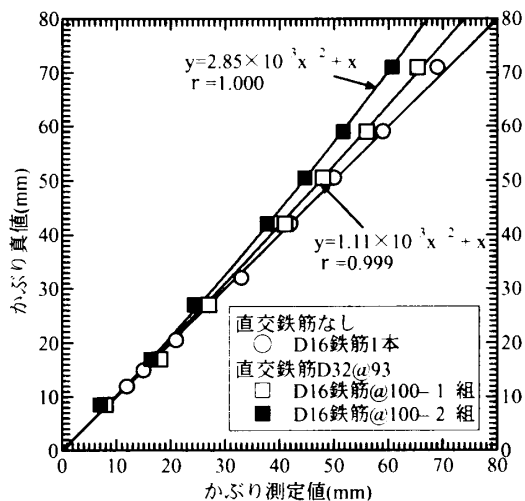


図-3 直交鉄筋の影響



(a) 磁気式による場合の補正値



(b) 渦流式による場合の補正値

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 箇所にかぶりを測定し、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、補正式による補正值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

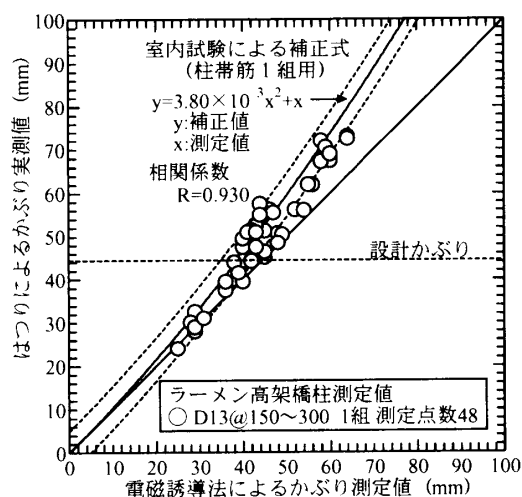
電磁誘導法は、特にかぶりが厚い場合に周囲の鉄筋の影響を受け測定が困難となる傾向にあった。測定限界かぶりは前述のように約 70mm であった。鉄道構造物の中でも例えば橋脚構造などでは、かぶりが 100~150mm となるものも多いが、こうした場合には全く測定が行えなかった。

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。

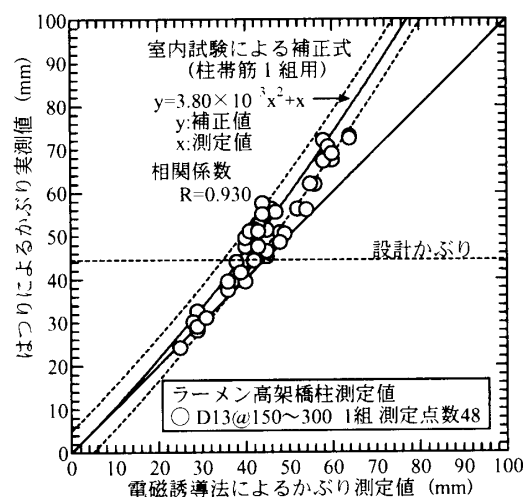
ただし、帯鉄筋やスターラップなどの構造物の維持管理に実質的に必要とされる鉄筋かぶりについては、後述するレーダ法よりも精度が高くまた測定時間も短いため、極めて実用的な手法であると判断できる。

3. レーダ法（電磁波法）の検討

3.1 測定原理と課題



(a) ラーメン高架橋 H=11.0m
経年 24 年, $f_{ck}=27\text{N/mm}^2$



(b) ラーメン高架橋 H=7.2m
経年 32 年, $f_{ck}=27\text{N/mm}^2$

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。

$$d = \frac{C}{2\sqrt{\epsilon_r}} t \quad (2)$$

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 $3 \times 10^8(m/s)$ 、 t は電磁波の往復時間(m)、 ϵ_r 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、 ϵ_r 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 $-16 \sim -1 \text{ mm}$ であった（図中□）。一方、最初のはつり箇所では $\epsilon_r=6.2$ を得て、これにより測定を行った場合、誤差は $-7 \sim +9 \text{ mm}$ であった（図中○）。

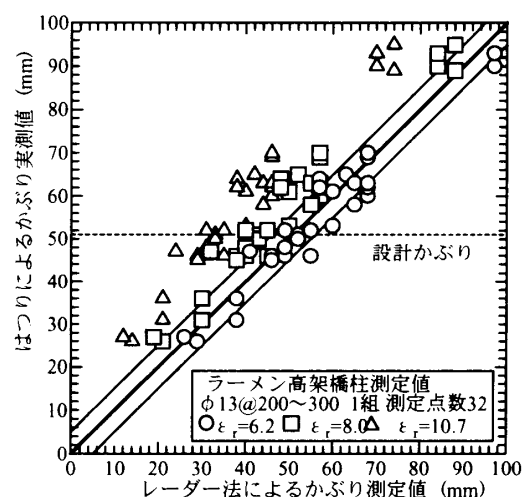
比誘電率の推定方法にもよるが、今回の測定結果では全般的に電磁誘導法よりも大きな誤差となった。

3.3 鉄道高架橋コンクリートの比誘電率

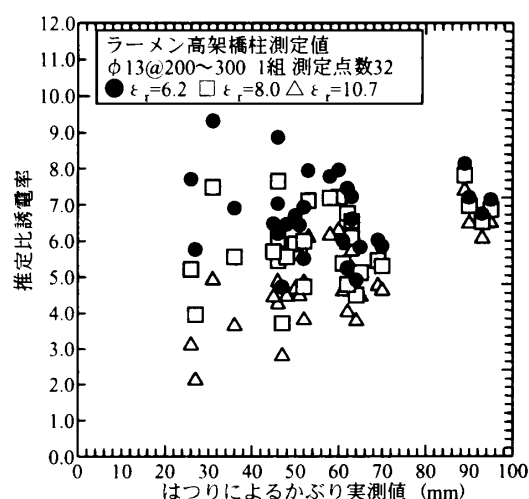
比誘電率は、特定のコンクリート部材に共通の値ではなく、あくまで個々の測定位置に依存していると思われる。図－7 は測定上の誤差が全て比誘電率によるものと考え、真かぶり、測定かぶりから比誘電率を逆算したものである。比誘電率 6.2 とした測定から逆算した場合、同一のコンクリートであっても ϵ_r は 5 から 10 ままで広く分散している。これに伴う図中程度の誤差は避けられないと考えられる。

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。

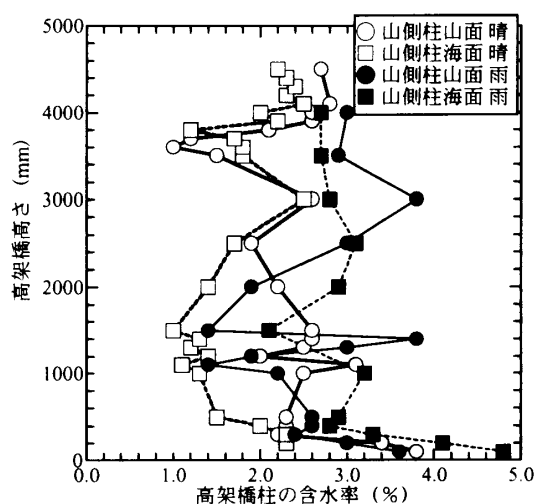
コンクリートの比誘電率と含水率とは相関があることが知られている。また含水率は深さ



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⁹⁷⁾。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⁹⁾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。

- (1) 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