

パルス着磁を用いた鉄筋コンクリートの 鉄筋位置とかぶり厚の推定に関する研究

九州工業大学 先端機能システム工学専攻
博士後期課程
博士論文

2017年3月
堀 充孝

目次

第1章 序論	3
1.1 本研究の社会的意義	5
1.1.1 鉄筋コンクリート構造物の種類と特徴とかぶり厚について	5
1.1.2 鉄筋コンクリート構造物の劣化とその要因	7
1.1.3 要因に対する検査・調査について	9
1.1.4 鉄筋コンクリート構造物における鉄筋探査に関する世の中の情勢	12
1.1.5 鉄筋検査における電磁誘導法と電磁波レーダ法について	13
1.1.6 特許調査	15
1.1.7 文献調査	17
1.2 本研究の目的	19
第2章 パルス着磁を用いた鉄筋のかぶり厚と直径の新しい評価方法	21
2.1 鉄のかぶり厚と直径の評価方法	22
2.1.1 パルス着磁法	22
2.1.2 磁気の測定について	30
2.1.3 かぶり厚と直径の推定	31
2.2 実験装置および実験方法	33
2.2.1 実験装置	33
2.2.2 実験方法	35
2.3 実験結果・考察	37
2.3.1 着磁結果と鉄筋の直径について	37
2.3.2 磁束密度分布と鉄筋位置の評価	41
2.3.3 鉄筋のかぶり厚評価	45
2.3.4 鉄筋直径の評価	53
2.4 まとめ	55
第3章 パルス着磁による鉄筋位置の推定法	56
3.1 単独鉄筋の着磁と位置推定方法	57
3.1.1 基礎となる鉄筋の位置推定法	57
3.1.2 実験装置の構成	61
3.2 順次着磁による複数鉄筋の位置の推定	62
3.2.1 鉄筋位置の推定法	62
3.2.2 実験と磁場解析の方法	63
3.2.3 実験と磁場解析の結果	64
3.3 最適な複数の鉄筋位置の推定	70
3.3.1 鉄筋位置の推定方法	70
3.3.2 実験方法	71
3.3.3 位置推定の磁場解析結果と実験結果	72
3.4 まとめ	79

第4章パルス着磁を用いた複数鉄筋かぶり厚の推定-----	80
4.1 複数鉄筋におけるかぶり厚推定法-----	81
4.1.1 鉄筋の着磁方法と磁束密度測定-----	81
4.1.2 鉄筋のかぶり厚推定法-----	82
4.2 磁場解析によるかぶり厚推定-----	84
4.2.1 磁場解析方法-----	84
4.2.2 磁場解析によるかぶり厚の推定結果-----	85
4.3 かぶり厚推定実験-----	92
4.3.1 実験方法-----	92
4.3.2 実験結果-----	92
4.4 まとめ-----	100
第5章 結論-----	101
5.1 本研究の総括-----	101
5.2 今後の課題-----	102
謝辞 -----	103
参考文献 -----	104

論文概要

本論文では 本章を含めて 5 章で構成しており、以下にその概要を示す。

第 1 章では、本研究の社会的意義を明確にし、コンクリート構造物の劣化とその調査法、従来の鉄筋の位置、かぶり厚の推定方法を示す。しかし、従来の推定方法においても課題があり、今もなお研究がつづけられている一端を示す。本研究に関わる特許調査、文献調査を行い、本論文において提案する鉄筋の位置、かぶり厚の推定方法は、今までにない全く新しい手法であることを示すとともに本研究の目的を示す。

第 2 章では、鉄筋をコンクリート表面からパルス着磁し、コンクリート表面における磁束密度の分布を測定することにより鉄筋の位置、かぶり厚、鉄筋の直径を推定する全く新しい手法について研究を行なった。単独で配筋した鉄筋における着磁後の磁束密度分布を分析し推定する方法を提案し、実験と磁場解析により本手法の妥当性について確認を行ったので報告する。パルス着磁法、磁束密度分布を測定するための磁気センサについても詳述する。本研究において、実験は、一般的にコンクリートは非磁性材のみにより構成されているため空気層と考えて行った。磁場解析に JSOL 社製の市販ソフト JMAG を用いて行った。

第 3 章では、鉄筋位置を推定することは、かぶり厚の推定に重要な情報である。複数配置された鉄筋の位置を推定するためには、着磁する位置を順次変えながら磁束密度分布の測定を繰り返し行うことで、その特徴点から鉄筋の位置を推定することが可能であることを示す。しかし、鉄筋の位置を効率良く推定することが必要であり、本研究では、最適回数のパルス着磁を行い、その磁束密度分布から鉄筋の位置を推定する方式を提案し、磁場解析と実験により検証を行ったので報告する。

第 4 章では、複数配置された鉄筋のかぶり厚を推定する方法を提案した。複数配置された鉄筋の位置を推定した後に、2 個のコイルをコンクリート表面の鉄筋位置に配置し、異極と同極でパルス着磁を行い、各々の測定した磁束密度分布の結果から複数配置された鉄筋のかぶり厚を推定する。本手法は今までに無い全く新しい手法であり、磁場解析と実験によりかぶり厚の推定法の妥当性を

確認した。

最後に第 5 章では、本研究の総括を行い、今後の研究課題を述べる。

第1章 序論

鉄筋コンクリート造りの技術は、1850年頃にフランス人の Joseph Monier によって発明され^[1]、鉄筋をコンクリートの欠点である引張力を受け持つものとして配置することで鉄筋コンクリートの構造物が普及した。日本に鉄筋コンクリートが導入され本格的な鉄筋コンクリート構造の建築第一号は、1911年完工した三井物産横浜支店と言われている^[2]。コンクリートの材料（セメント、砂利、砂、水）が比較的廉価であることと、以外に自由自在に成形できる、寿命が長い、という特性が構造物を造るのに適しているからである。圧縮に強いコンクリートを、引っ張りに強い鉄筋で補強したのが鉄筋コンクリートであり、コンクリートは鉄筋や鉄骨と一体になることで、耐震性、耐火性、遮音性、耐久性にすぐれた構造物をつくることができる。鉄筋コンクリートによって建造された構造物は、いわゆる社会資本（インフラストラクチャー）の一部として整備・蓄積され、今世紀における代表的な構造物として機能している。土木・建築のダム・橋梁や建築物から、LNGタンク・海洋構造物・原子力発電所など大型構造物にも及び、その構造形式が多様化・複雑化していることも近年の特徴で、社会的な要求度も増すばかりである。

永く厳しい自然環境の中で、構造物が所要の使用性・耐久性を維持し、公共の用に供し続けるには、材料・施工・設計などあらゆる観点から多くの研究者・技術者の努力とその積重ねにより今日に至っている。大地震による震害や早期劣化などの手痛い経験をし、未だ不十分なる点もある。これまでの耐力算定にとどまらず、耐震解析、疲労解析などより高度で入念な解析技術および設計手法の合理化が要求される。高度成長期以降に整備された道路橋、トンネルは高度経済成長期に集中的に整備され、今後急速に老朽化することが懸念されている。今後20年間で、建設後50年以上経過する施設の割合は加速度的に高くなる見込みであり、老朽化するインフラを戦略的に維持管理・更新することが求められている^[3]。

このような背景の中で、鉄筋コンクリート構造物の劣化診断が重要視され、鉄筋の位置、鉄筋のかぶり厚など非破壊試験により探査することが重要となって来ている。鉄筋の位置、鉄筋のかぶり厚の探査では、非破壊の手法として電磁誘導法、電磁波レーダ法、X線法、超音波法などの技術が用

いられている¹⁴⁾。電磁波レーダ法は、簡便な手法で短時間に広範囲の調査を行うことができるが、誘電率の補正を行うなど各種研究が盛んに行われている¹⁵⁻⁷⁾。電磁誘導法は隣接鉄筋の間隔が測定精度に影響を及ぼすため補正を行う研究がなされている¹⁸⁾。また、パルス電磁力により鉄筋を振動させその音響を利用した AE (Acoustic Emission) 法による研究¹⁹⁾など独自手法による研究も盛んである。現在において鉄筋の評価法は、まだ完全に確立されていないようであり、より良い鉄筋評価法が望まれている。

1.1 本研究の社会的意義

1.1.1 鉄筋コンクリート構造物の種類と特徴とかぶり厚について

コンクリート系部材は、一般にコンクリート材料にある補強材（Reinforcement）もしくは初期応力を施すことにより構造部材として機能する。一般に図 1.1 に示すように補強されたコンクリートである鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete)、あらかじめ応力が導入されたプレストレストコンクリート(Prestressed Concrete)、鉄骨コンクリート(Steel-framed Concrete)の三者に大別することができる^[10]。

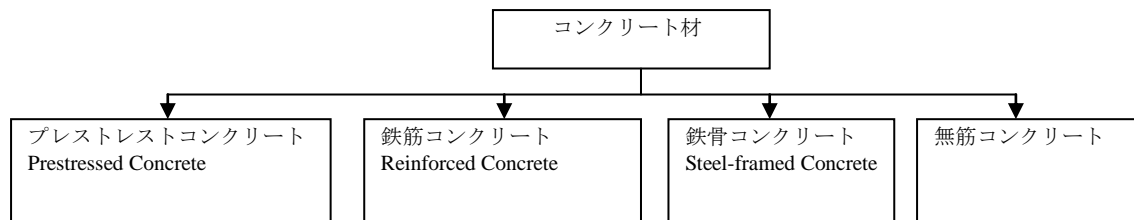
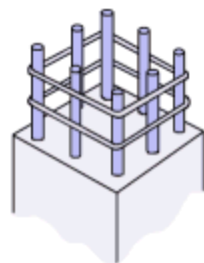
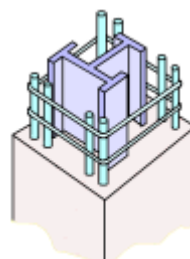


図 1.1 コンクリート部材の種類と分類

コンクリート内部では、いろいろな形状の鉄筋が配筋されている。圧縮に強いコンクリートを、引っ張りに強い鉄筋で補強したのが鉄筋コンクリートであり、図 1.2(a), (b)に示すような標準的な造りとして鉄筋コンクリート、鉄骨鉄筋コンクリートがある。今回の研究テーマとして鉄筋コンクリートについて取り上げた。



(a) 鉄筋コンクリート



(b) 鉄骨鉄筋コンクリート

図 1.2 標準的なコンクリート構造物

コンクリートは、骨材とよばれる砂や砂利、砕石などが、接着剤であるセメントやアスファルトによって結合された固形体であり、コンクリートの構成を表 1.1 に示す。その過程、用途に応じてセメントペースト、モルタルなどが存在する。コンクリートの素材である砂、砂利は 5mm を境に大きいものを粗骨材、小さいものを細骨材と言われている。この様に一般にコンクリートは非磁性材と考えることが出来る。

表 1.1 コンクリートの構成要素

セメント	セメントペースト	モルタル	コンクリート
水			
砂（細骨材）			
砂利（粗骨材）			

(1) 鉄筋コンクリートの特徴

鉄筋とコンクリートの良好な複合性を有する鉄筋コンクリートは、以下に示す特徴を持つ。コンクリートと鉄筋との間の付着が十分で、ひび割れ後も両者がほぼ一体となって変形する。温度変化によって両者の間に温度応力が生じないようにコンクリートと鉄筋の熱膨張係数がほぼ同じである。コンクリート中に埋め込まれた鉄筋が劣化しないよう配合やかぶり厚を考慮してコンクリートが弱アルカリ性を確保する。鉄筋コンクリートは、構成材料である鉄筋とコンクリートの長所を活かし、欠点を補完し合う優れた複合材料であるといえる。

(2) かぶり厚

かぶり厚は、鉄筋表面からコンクリート表面までの最短距離のコンクリートの厚みのことを言う。付着力の確保・鉄筋の錆による強度低下を防止する。コンクリートから鉄筋が見えてしまうようでは、強度は発揮できない。一般的なかぶり厚を表 1.2 に示す。最近では 100mm～500mm まで広くかぶり厚を有する構造物が存在するようである。

表 1.2 鉄筋の最小かぶり厚

構造部分の種別			最小かぶり厚さ[mm]	
土に接しない部分	スラブ，耐力壁以外の壁	仕上げ有り	30	
		仕上げ無し	30	
	柱，梁，耐力壁	屋内	仕上げ有り	30
			仕上げ無し	30
		屋外	仕上げ有り	30
			仕上げ無し	40
擁壁，耐圧スラブ			40	
土に接する部分	柱，梁，スラブ，壁		40	
	基礎，擁壁，耐圧スラブ		40	
煙突など高熱を受ける部分			60	

1.1.2 鉄筋コンクリート構造物の劣化とその要因

鉄筋コンクリート構造物は、ひび割れ、錆汚れ、ポップアウトなど劣化現象が発生するが、劣化を引き越す要因として中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的腐食、凍害などがある。代表的な要因である中性化、塩害、アルカリ骨材反応について詳述する^[11]。

(1) 中性化

コンクリート中の鉄筋は、高アルカリ性の物質によって保護されている。正常なコンクリート中の鋼材は、表面に不動態皮膜が形成されているので長い年月を経ても劣化しない。しかし、空気中の炭酸ガスによって中性の物質に変化してしまい、この現象を中性化と言う。コンクリートが中性化すると、鉄筋の保護機能が失われ鉄筋が劣化し始め、膨張圧によってかぶり厚となるコンクリートにひび割れを生じる。このひび割れから劣化が促進され、かぶりコンクリートの浮き、剥落等の劣化を引き起す。

(2) 塩害

塩害は、塩化物イオンによって生じる鉄筋コンクリートの劣化の一つである。コンクリートに一定量以上の塩化物イオンが存在すると、鉄筋の劣化が進行する。コンクリートが中性化した場合、

劣化の進行はさらに加速されることになる。

(3) アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応は、反応性骨材によって生じる鉄筋コンクリートの劣化の一つである。アルカリ・シリカ反応は、セメント中に存在するナトリウム、カリウムなどのアルカリ成分と骨材中の反応性シリカが水の共存下でアルカリ・シリカゲルを生成する反応をいい、このアルカリ・シリカゲルは水を吸収して膨張を起し、コンクリートにひび割れを発生させる。

(4) 鉄筋コンクリートの劣化と本研究の重要性

コンクリート構造物を長期にわたって維持・管理するためには、図 1.3 に鉄筋コンクリートの劣化推移を示すように、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の状態を正確に把握する必要がある。国内においてさまざまな鉄筋の劣化診断装置が開発されているが、劣化の程度および速度を正確に判断することはできず、装置が大きく重いため、高所や狭い場所での作業は非常に困難である。劣化を引き起こす要因から鉄筋を守るためかぶり厚は非常に重要であり、鉄筋コンクリートの健全性を評価するためにも、かぶり厚、鉄筋径、鉄筋位置を正確に知ることは重要である。本研究において、鉄筋コンクリートの鉄筋位置、鉄筋径、かぶり厚の推定について研究を行った。

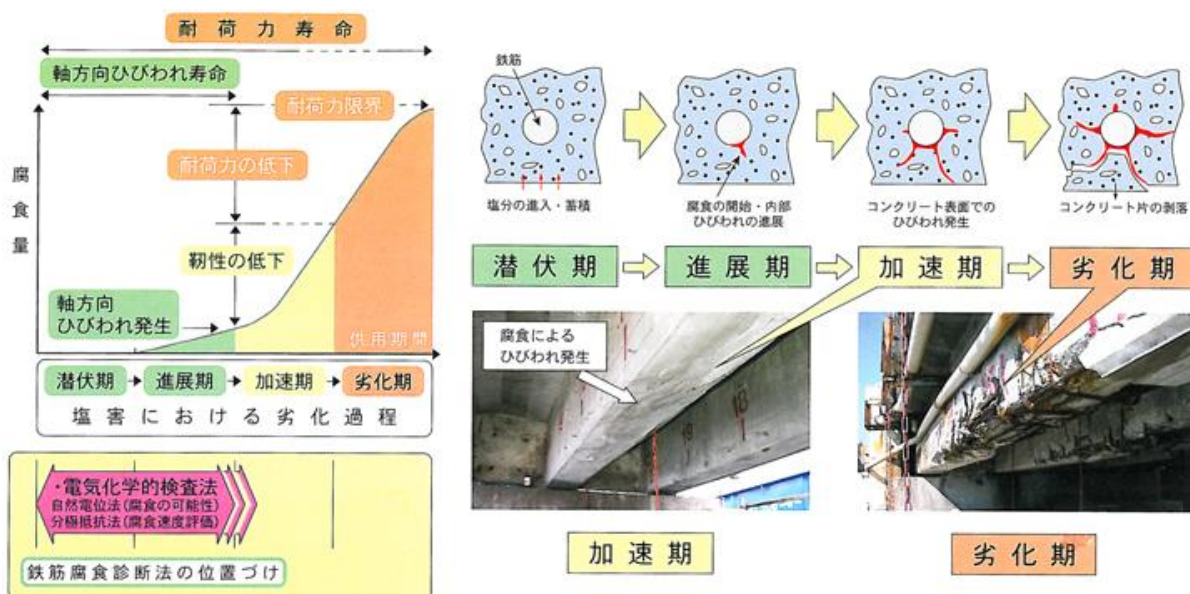


図 1.3 鉄筋コンクリートの劣化推移

1.1.3 要因に対する検査・調査について^[12]

鉄筋コンクリートの要因等に対して劣化状態を評価する必要があり以下に調査方法の一例を示す。

(1) 目視調査

中性化に対する点検の基本は外観調査になり，図 1.4 に示すように劣化状態の程度を外観から判断する。特に調査は，ひび割れ，錆汁，浮き，剥落および鉄筋の露出になる。



図 1.4 目視調査の様子

(2) 中性化深さの測定

中性化がある程度進行しても一般的に外観上の変状は認められず，中性化深さを正確に測定することは，コンクリート構造物の劣化の程度を知るうえで極めて重要なことである。簡便に用いられるフェノールフタレイン法による測定方法には，はつり法がある。図 1.5(a)に示すようにコンクリート面を電動ピック等によりはつり取り，図 1.5(b)に示すようにコンクリート凹部にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧し，その呈色反応を利用して測定する。



(a) はつり状況



(b) 中性化深さ測定状況

図 1.5 はつり法による中性化深さ測定の様子

(3) 塩害の目視調査

塩害に対する点検の基本は外観目視調査になり、劣化状態の程度を外観から判断するものである。特に調査する損傷の種類は、ひび割れ、錆汁、浮き、剥落および鉄筋の露出になり図 1.6 にその例を示す。図 1.6(a)は、栈橋梁のかぶりコンクリートが剥落し鉄筋露出した状況であり、図 1.6(b)は、栈橋柱のかぶりコンクリートが剥落し鉄筋露出した状況を示す。



(a) 栈橋梁のコンクリート剥落状況



(b) 栈橋柱のコンクリート剥落状況

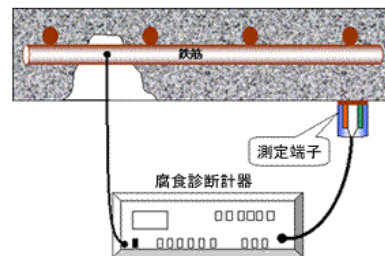
図 1.6 塩害の例

(4) 自然電位測定

図 1.7(a), (b)に自然電位測定の様子を示す。コンクリート表面に照合電極を接触させ、構造物内部の鋼材の自然電位を測定することで、鋼材の腐食傾向を判定する。



(a) 自然電位による測定の様子



(b) 自然電位測定構成

図 1.7 自然電位測定の様子

以上のように代表的な調査方法として目視調査，中性化深さ測定，自然電位測定について説明を行った。表 1.3 に示すように鉄筋コンクリート構造物においては，外観調査，コンクリートの強度，ひび割れ，腐食，鉄筋・かぶりなど多くの調査内容がある。本論文では，これら多くの調査内容の中で，鉄筋コンクリートを維持管理して行く上で重要視されている鉄筋の径，鉄筋の位置，かぶり厚の調査について，今までにない全く新しい調査方法を提案する。

表 1.3 鉄筋コンクリート構造物の調査内容と調査方法

調査内容	調査方法
外観調査	目視調査
コンクリートの強度	コア強度・反発度法・局部破壊試験
ひび割れ・剥離・空洞	弾性波・電磁波レーダー
鉄筋・かぶり厚・埋設物	電磁誘導・X線・電磁波レーダー
コンクリートの微細構造・化学成分	走査電子顕微鏡・電子線マイクロアナライザー
鉄筋腐食	中性化深さ・塩化物イオン含有量・鉄筋腐食量 自然電位・分極抵抗・電気抵抗
アルカリ骨材反応	偏光顕微鏡観察・走査電子顕微鏡・残存膨張量

1.1.4 鉄筋コンクリート構造物における鉄筋探査に関する世の中の情勢

国土通産省において平成 24 年 3 月に「非破壊試験によるコンクリート構造物中の配筋状態及びかぶり測定要領」を発行している^[13]。本要領書は、鉄筋の配筋状態及びかぶりを対象として、探査装置を用いた非破壊試験にて測定を行なうにあたり、施工管理（品質管理）及び発注者の監督・検査における実施内容を定めたものである。図 1.8 に測定を行う対象となる配筋状態の断面と正面図を示す。

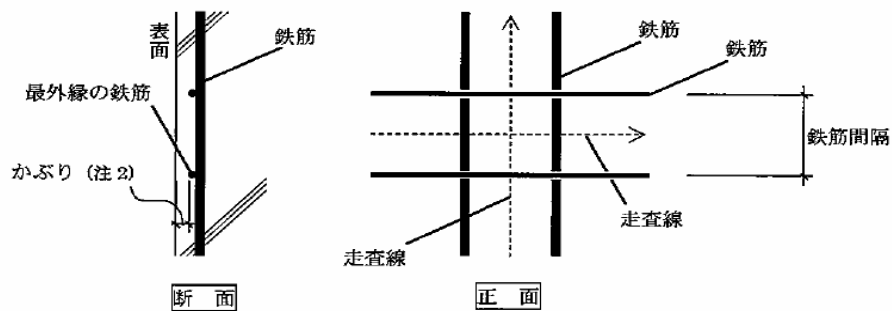


図 1.8 測定対象

適用範囲は、橋梁上部工・下部工及びボックスカルバートであり、測定対象及び測定箇所を含み探査試験方法について明確にしている。表 1.4 に探査装置の性能について示している。探査に用いる試験方法は、電磁誘導法と電磁波レーダ法の 2 種類であり、各試験方法での測定精度などが記述されている。

表 1.4 探査装置の性能（電磁誘導、電磁波レーダ法）

種別	項目		要求性能（電磁誘導、レーダ共）	
基本性能	対象となる鉄筋の種類		呼び名 D10～D51（注1）を測定できること	
	分解能	距離	5mm 以下であること	
かぶり		2～3mm 以下であること		
測定精度	間隔の測定精度		±10mm 以下であること	
	かぶりの測定精度		±5mm 以下であること	
	測定可能な鉄筋の間隔（中心間距離）	電磁誘導法（注3）	設計かぶりが 50mm 未満の場合	75mm の鉄筋間隔が測定できること
			設計かぶりが 50mm 以上の場合	設計かぶり×1.5 の距離の鉄筋間隔が測定できること
		電磁波レーダ法	設計かぶりが 75mm 未満の場合	75mm の鉄筋間隔が測定できること
			設計かぶりが 75mm 以上の場合	設計かぶりの距離の鉄筋間隔が測定できること

1.1.5 鉄筋探査における電磁誘導法と電磁波レーダ法について

鉄筋位置・かぶり厚の推定において、従来技術として「電磁波レーダ法」、「電磁誘導法」、「X線法」などがある。国土交通省の測定要領書で示される中で、研究テーマの主目的である鉄筋の位置、かぶり厚を推定するための電磁波レーダ法、電磁誘導法について以下に詳述する。

(1) 電磁誘導法

電磁誘導法の簡単な原理図を図 1.9 に示す。コイルに交流電流を流すと、磁界が発生する（一次磁界）。この磁界内に鉄筋が存在する場合、その鉄筋に誘導電流が発生し別の磁界が発生する（二次磁界）。磁界を発生するスキャナーを移動して、鉄筋が発生する二次磁界の強さや変化を読み取ることにより鉄筋の配置・かぶり厚を推定する^[3,4]。

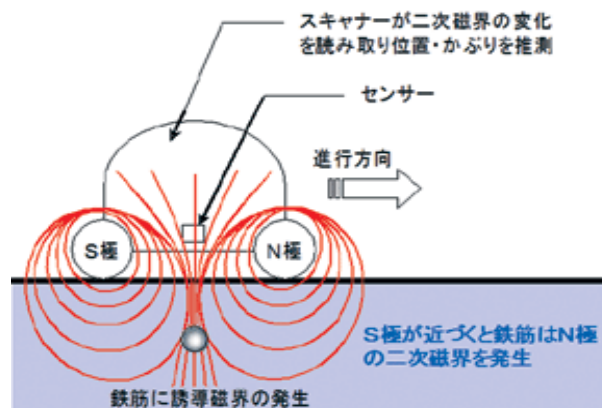


図 1.9 電磁誘導法の原理

鉄筋の位置、かぶり厚を推定するための電磁誘導法の基本原理について示したが、1.1.7 項に示すような課題があり、現状でも種々より良い方法について研究がなされている。

(2) 電磁波レーダ法

電磁波(600~800MHz)を放射し、その電磁波がコンクリートと電氣的性質の異なる物質(鉄筋、配管、空洞など)から反射して戻ってくる際の伝達時間を計測し、距離・位置を測定する。鉄筋までの距離を D とすると式(1.1)により求めることが出来る。図 1.10 に電磁波レーダ探査法の概略図を示す。

$$D = C \times T / (2 \times \epsilon_r^{1/2}) \times 10^{-3} \text{mm} \quad (1.1)$$

ただし、 C : 真空中での電磁波速度(3×10^8 [m/sec])、 ϵ_r : コンクリートの比誘電率、 T : 測定される往復伝播時間[sec]、である^[3,4]。

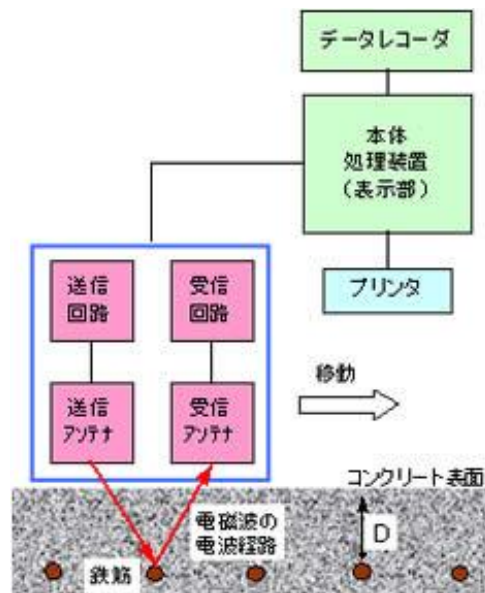


図 1.10 電磁波レーダ法の概略図

鉄筋の位置、かぶり厚を推定するための電磁波レーダ法の基本原理について示したが、後述する 1.1.7 文献調査に示すような課題があり、現状でも種々より良い方法について研究がなされている。

1.1.6 特許調査

本研究ではパルス磁場により鉄筋を着磁し，鉄筋の残留磁束密度を測定することにより，鉄筋位置，かぶり厚を推定する（第2章以降で詳述する）手法について，特許を調査した結果を以下に示す。鉄筋をパルス磁化し，その残留磁束密度により鉄筋位置，かぶり厚を推定する特許は見当たらず，若干ではあるが鉄筋コンクリートの評価に関する特許が見受けられたので紹介する。

(1) 特開 2005-3405 「コンクリート構造物の鉄筋破断検知方法」^[14]

本特許では，鉄筋の残留磁気（5～500 μ T）を検出し，鉄筋の破断検知のみを行う。図 1.11 に本特許の原理図を示す。鉄筋が持つ残留磁気，場合によっては着磁後の残留磁気による破断部分の磁束の漏洩個所を探索するために，鉄筋に沿って磁気センサを移動し，磁束が大きく変化する個所を検出して鉄筋の破断部分を検知する。本特許によってかぶり厚，鉄筋の位置を検知するものではなく本研究とは異なるものである。

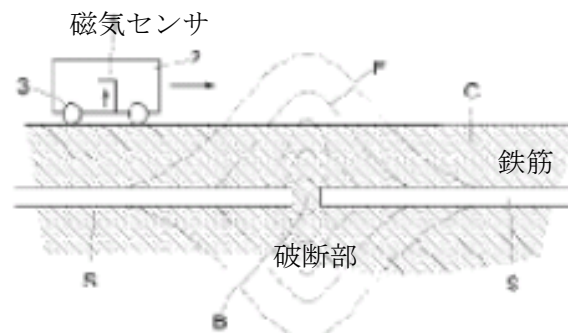


図 1.11 鉄筋破断検知の測定方法

(2) 特開 2001-194341 「鉄筋 コンクリートの健全性判定装置」^[15]

鉄筋の腐食により発生する電位により，誘電体であるコンクリートを通して電流が流れる。図 1.12 に示すように，腐食による電流により発生する磁場分布を水平方向と垂直成分で検出する。図 1.13 (a), (b)に腐食周辺に発生する水平成分と垂直成分の磁場分布の様子を示す。磁場分布の分析を行うことにより腐食度合いを検知する。磁気センサを用いて磁場分布を測定するが，鉄筋位置，かぶり厚を検知するものでなく，本研究とは目的が違う特許となっている。

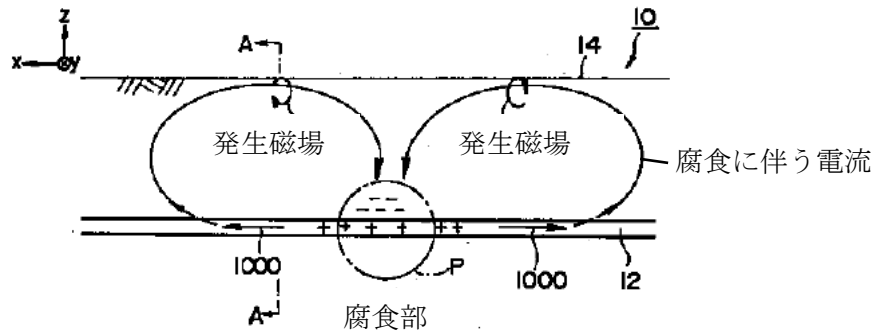
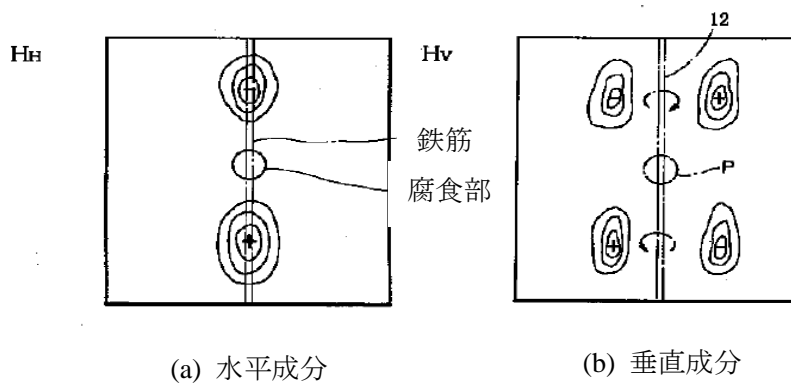


図 1.12 鉄筋腐食時の磁場発生の説明図



(a) 水平成分

(b) 垂直成分

図 1.13 腐食に伴う発生磁場分布

1.1.7 文献調査

鉄筋コンクリートにおける鉄筋探査，かぶり厚の検査について文献を調査した結果を代表例として2件について以下に示す。

(1) 「レーダ法，電磁誘導法によるかぶり厚推定方法に関する検討」

平成21年シンポジウム・コンクリート構造物の非破壊検査論文集にて，電磁波レーダ法，電磁誘導法について各課題への対策，誤差等について論じている^[16]。電磁波レーダ法によるかぶり厚の測定には，コンクリートの比誘電率が重要な要素となるが，比誘電率はコンクリート中の含水状態に影響を受ける。図1.14に示すように，かぶり厚，コンクリートの状態(白丸は常時乾燥状態，黒丸は自然環境に暴露状態)により比誘電率が変化するため測定精度が悪くなる場合がある。縦筋と横筋のかぶり厚を測定し，その差は鉄筋直径に相当することからその差が鉄筋の直径の相当するよう比誘電率を補正する方法を提案している。電磁誘導法において，図1.15に示すように鉄筋間隔を75mm, 100mm, 125mm, 150mmと変化させたとき，近接の鉄筋による誘導電流が重なり合い，かぶり厚の測定値に誤差が発生する。この誤差関数よりかぶり厚を補正する方法を提案している。

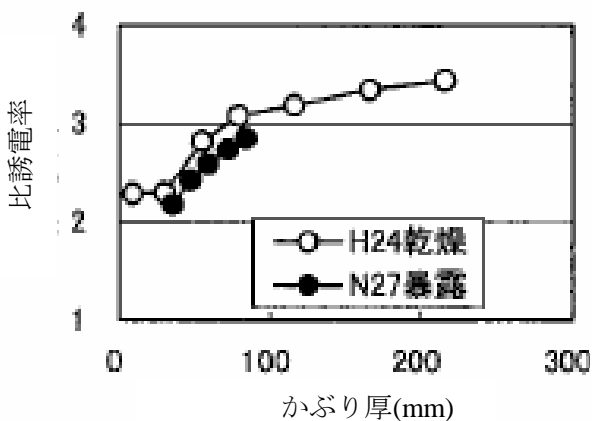


図 1.14 比誘電率分布

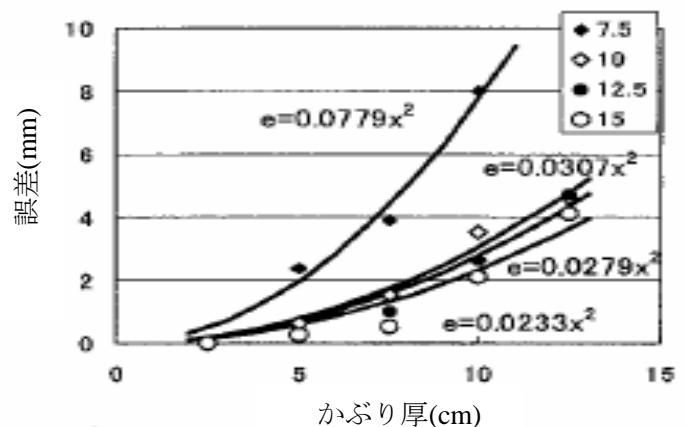


図 1.15 電磁誘導法による測定

電磁波レーダ法と電磁誘導法によるかぶり厚の測定範囲のガイドラインがあり図1.16に示す。電磁誘導法は，かぶり厚100mm以下で使用し，かぶり厚が50mm以下においては鉄筋間隔が十分大きい場合での測定を行う必要があり測定範囲に制約を受けることが分かる。鉄筋間隔，比誘電率の

問題を把握した範囲でかぶり厚の測定範囲を規定しており、測定器として容認した形となっている。

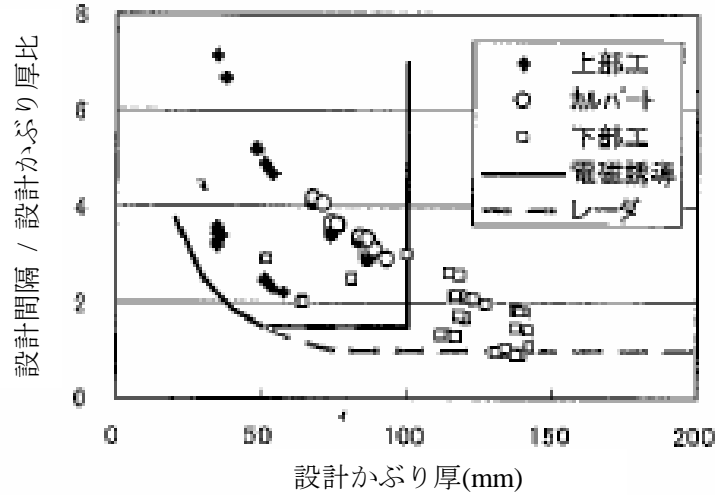


図 1.16 設計かぶり厚と鉄筋間隔の関係

(2) 「パルス電磁力音響法を用いた鉄筋かぶり深さの検討」

平成 18 年シンポジウム・コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集にて、パルス電磁力音響法と称し、かぶり厚を推定する方法を提案している。図 1.17 に測定原理図を示すようにパルス電磁力発生部と音響受信部とで構成される。パルス磁場を鉄筋コンクリート表面で発生させ、鉄筋は磁歪効果により音響を発する。コンクリート表面の任意範囲で音響受信部により音響の到達時間を測定し、その到達時間を解析してかぶり厚を推定する。今回セメントペーストにて簡易実験装置を作成し、パルス電磁力音響法により試験を行いかぶり厚測定の可能性を示した^[17]。

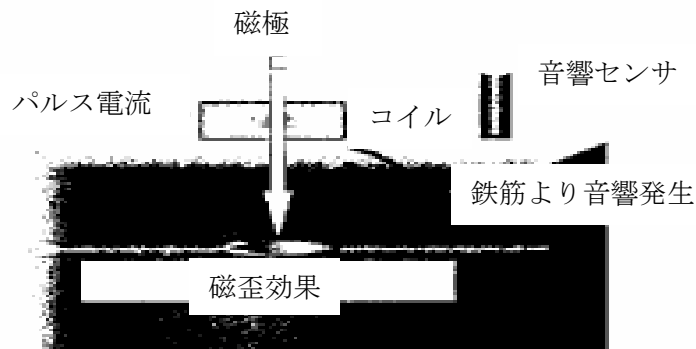


図 1.17 測定原理図

1.2 本研究の目的

鉄筋コンクリート構造物におけるコンクリートは、鉄筋の劣化を防ぐため重要な働きをする。鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋の位置、鉄筋径、かぶり厚など非破壊試験法により探査・推定が行われている。近年、鉄筋の位置、鉄筋のかぶり厚の推定は電磁波レーダ法、電磁誘導法の技術を使用して行われる。電磁波レーダ法は簡便な手法で短時間に広範囲の調査を行うことができ、コンクリートの誘電率を用いて鉄筋までの距離を測定できる。そのため誘電率の変化を補正する必要があり、その補正方法について研究がなされている^[18-20]。電磁誘導法は隣接鉄筋の間隔が測定精度に影響を及ぼすため、鉄筋間の距離が短いときの補正を行う研究がなされている^[21-22]。現在において鉄筋位置、鉄筋かぶり厚を推定する方法として、それぞれ解決すべき課題を有している。パルス電磁力により鉄筋を振動させその音響を利用してコンクリート中の鉄筋かぶり厚を推定する研究も行われているが、コンクリートの密度のばらつきなどにより誤差を有することが考えられる。このため、各手法の研究が盛んに進められている^[23-25]。

鉄筋のかぶり厚は、一般的に 30~50mm 程度であるが、最近大手建設メーカから 300mm のかぶり厚の検知への要望もあり、鉄筋位置がコンクリート表面から深い位置にあることへのニーズに応じて行く必要がある。電磁誘導法においては、かぶり厚 100mm に測定限界があると言われている。電磁放射レーダ法においては、かぶり厚 300mm まで測定できるとしているが、コンクリート内部の水分含有量により誘電率が変化するため、誘電率のばらつきにより正確な測定が出来ないと言われている^[26]。超音波による測定法もあるが、コンクリート内での超音波の減衰が大きくかぶり厚測定には用いることは難しい。X線も考えられるがフィルムを設置する必要があり適用範囲が限られ、危険性を伴うなど課題が多い。このような状況の中、パルス磁界による電磁誘導法の研究^[27,28]、鉄筋の評価とともに画像化の技術開発^[29,30]など、各種鉄筋コンクリートにおける評価の研究^[31-33]が盛んにおこなわれている。

本研究において鉄筋の位置、直径、かぶり厚を全く新しい方法により推定することを提案する。鉄筋をパルス着磁し、その鉄筋の残留磁気を磁気センサで測定し、その磁束密度分布を分析するこ

とにより行う手法である。永久磁石により着磁をする手法^[34,35]も提案されているが、磁化力は弱くパルス着磁では、磁界の強さを強くすることでかぶり厚が大きい鉄筋も十分着磁が可能であるため、世の中のニーズに対応して行くことが可能な手法であると考えている。

本論文においては、今回提案する新しい手法についての有効性を磁場解析と実験により評価・検証したので報告する。

第2章 パルス着磁を用いた鉄筋のかぶりと直径の新しい評価方法

鉄筋コンクリート表面においてパルス磁界を印加して鉄筋を着磁し、コンクリート表面において鉄筋の磁束密度を測定し、その磁束密度分布を解析することで鉄筋の位置、鉄筋のかぶり厚、更には鉄筋の直径を推定する方式について研究を行った。本方式は、広範囲な磁束密度分布を測定し、その分布から鉄筋の位置、かぶり厚、鉄筋の直径を一度に推定できることから推定に要する時間を短縮でき、比較的安価に装置を構築することができるので実用的であると考えている。本章においてパルス着磁による単独に配置した鉄筋の磁束密度分布から鉄筋の直径、位置、かぶり厚を評価する新規な手法について報告する^[36,37]。

2.1 鉄筋のかぶり厚と直径の評価方法

2.1.1 パルス着磁法

本手法においてコンクリート表面から鉄筋を着磁して、コンクリート表面で磁束密度分布の測定を行うことから、鉄筋を十分に着磁することが重要である。コンクリート内部に存在する鉄筋を着磁する方法として、強磁界を発生する希土類磁石を近づける、コイルに励磁電流を通電し磁界を発生させるなどが考えられる。かぶり厚が大きい場合は、希土類磁石の磁力では不十分でありパルス磁場による着磁が必要である。

(1) 着磁の一般的な原理

着磁を行う技術は、永久磁石の特性を得るために重要な工程であったり、非破壊検査における磁粉探傷試験における被検査物（強磁性材）の磁化において実用的な分野で培われて来た。永久磁石の着磁においては、任意有効磁界を加えた後に零にする方法、キュリー温度より高い温度から磁界中で冷却する方法、化学変化に伴う方法などがある。NdFeB系焼結磁石では、高温度（50℃～80℃）中において小さい磁界で着磁する方法があるが、磁石形状等によりパーミアンス係数が小さい場合に屈曲点を越えない状態で着磁する必要があり、注意が必要である。室温において飽和磁化以上の有効磁界を加えて着磁を行うコンデンサ式着磁方式が一般的であり広く使用されている。コンデンサ式着磁方式は、コンデンサバンクに電荷を蓄え、その電荷を瞬時にコイルに放電し、パルス状の高磁界を発生する方式である^[38,39]。着磁は、このパルス状の高磁界を被着磁物に印加して磁化をするものである。コンデンサ式着磁装置の概略構成を図 2.1 に示す。着磁装置は、着磁に必要な磁界を発生するための着磁コイルと着磁電流を流すためコンデンサバンクを有した着磁電源からなる。着磁電源は、大容量・高圧コンデンサに精度良く充電するため、充電電流を制御する充電制御回路（サイリスタを用いた位相制御）と、充電電荷を瞬時に着磁コイルに通電するための放電回路（サイリスタによるスイッチ制御）からなる。着磁コイルは、高磁界を発生するため銅線をコイル状に巻いたものであるが、コイルとヨーク（珪素鋼板）を組み合わせる場合もある。

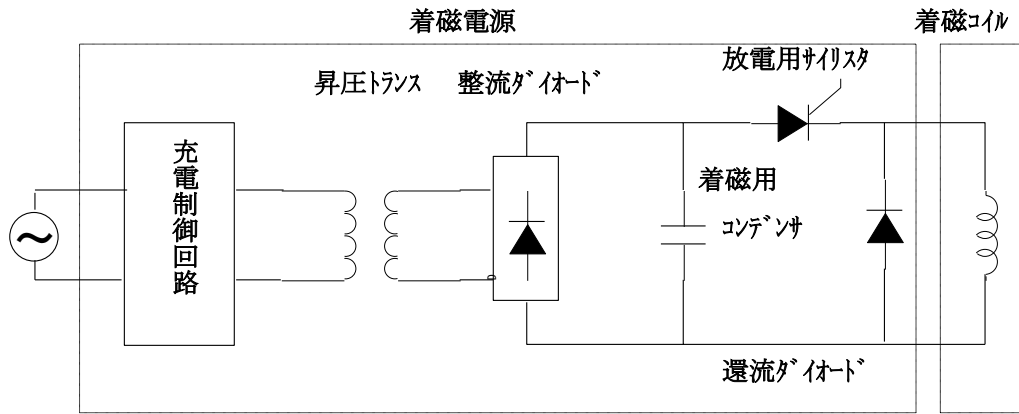


図 2.1 着磁装置の概略構成

コンデンサ式着磁装置における着磁電流について以下に説明する。コンデンサ式着磁装置は、コンデンサに充電された状態でサイリスタを ON し、着磁コイルに通電するとき等価的に式(2.1)で表され、コンデンサ電圧について変換すると式(2.2)となる。

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt = 0 \quad (2.1)$$

$$L \cdot C \cdot \frac{d^2 V_c}{dt^2} + R \cdot C \cdot \frac{dV_c}{dt} + V_c = 0 \quad (2.2)$$

ただし、 L :着磁コイルインダクタンス+着磁電源内部インダクタンス、 R :着磁コイル抵抗+着磁電源内部抵抗、 C :着磁コンデンサ容量、 i :着磁電流、 V_c :コンデンサ電圧、である。式(2.2)の解を式(2.3)とおくと式(2.4)となる。

$$V_c = A \cdot e^{pt} \quad (2.3)$$

$$p = -R/2L \pm j\sqrt{1/CL - (R/2L)^2} \quad (2.4)$$

根号内が正になれば p は複素数となり V_c は振動型となり、負になれば p は実数となる V_c は過減衰型になる。すなわち次の三つの場合に分類する事が出来る。

Case A : $R < 2\sqrt{L/C}$	(減衰振動)
Case B : $R = 2\sqrt{L/C}$	(臨界減衰)
Case C : $R > 2\sqrt{L/C}$	(過減衰)

着磁コイルは抵抗が小さいことが望ましく、強磁界を発生するために CaseA の条件を満たした減衰振動型が良い。コンデンサ充電電圧を V_c のとき減衰振動電流 i は、式(2.5)で表される。

$$i = (V_c/y \cdot L)e^{-xt} \cdot \sin yt \quad (2.5)$$

ただし、 $x = R/2L$ 、 $y = \sqrt{1/CL - (R/2L)^2}$ 、である。この時最大電流 i_m 、周期 T は、それぞれ式(2.6)、式(2.7)となる。

$$i_m = V_c \sqrt{L/C - R^2/4} \quad (2.6)$$

$$T = 2\pi / \sqrt{1/CL - (R/2L)^2} \quad (2.7)$$

簡単化のために抵抗 R を零とすると最大電流は、式(2.8)となる。

$$i_m = V_c / \sqrt{L/C} \quad (2.8)$$

かぶり厚が大きい場合、発生磁場を大きくするためにはコンデンサ容量、充電電圧を大きくし、着磁装置における抵抗、インダクタンスを最小にする必要がある。

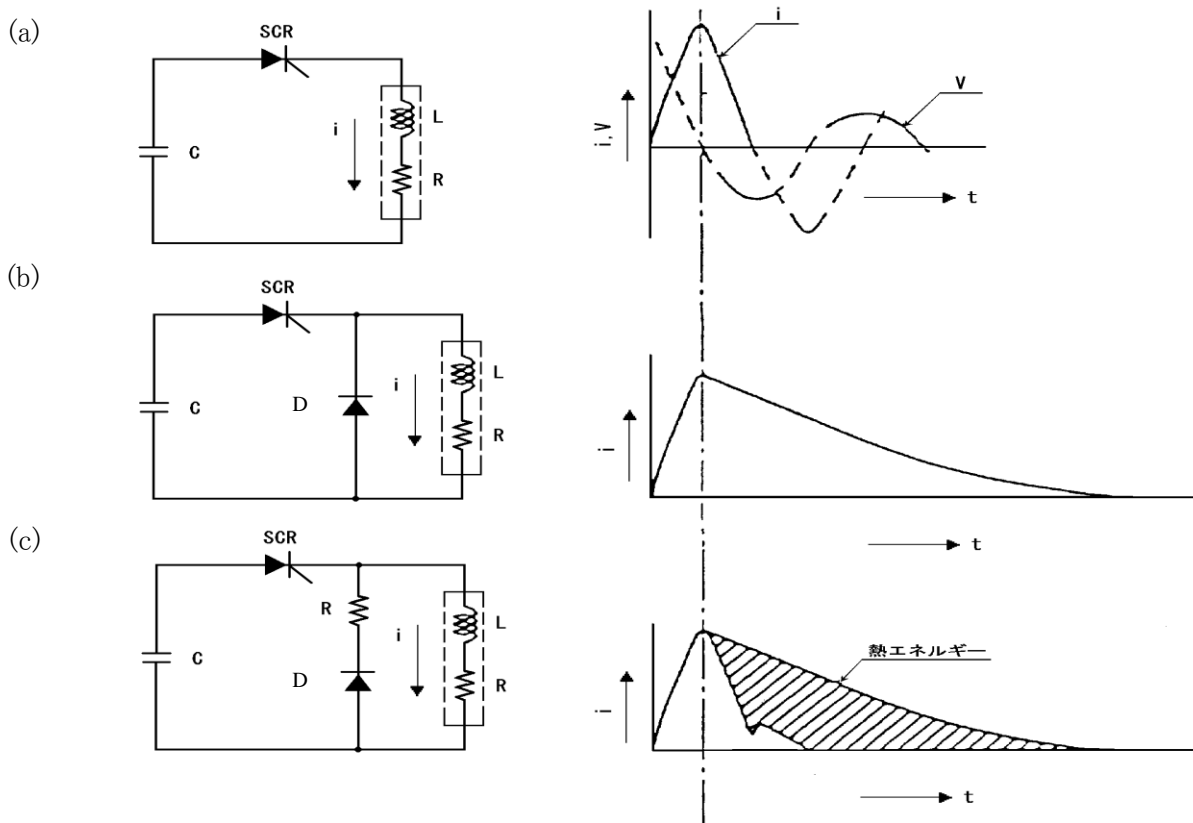


図 2.2 コンデンサ式着磁装置の簡易構成図

コンデンサ式着磁装置の基本的な回路構成について図 2.2 を用いて説明する。図 2.2(a)に示す回路構成は、共振電流の初期半波のみ着磁コイルに通電するがコンデンサに逆電圧が印加されるため問題がある。図 2.2(b)に示す回路構成は、着磁電流が最大に達するとダイオードと着磁コイルに循環電流が流れ、着磁コイルにジュール損失が大きくなるが空芯コイルを用いた汎用的な着磁装置に使用される。図 2.2(c)に示す回路構成は、最大電流後の減衰電流は着磁には寄与しない為、この減衰電流を D(ダイオード)とシリーズに接続した抵抗 R で吸収する。破線部分の電流が着磁ヨーク・コイルには流れない為発熱と衝撃が軽減され最適な着磁電流となり高効率な着磁電源として使用される。着磁コイルの様に巻き数が多い場合は、着磁電源内での抵抗容量が膨大となり大型化、更には冷却装置を付ける必要がある。そのため一般的なコンデンサ式着磁装置においては、図 2.2 (b)

が用いられている。着磁装置において磁界を発生する方法として着磁コイルがある。着磁コイルは、一般に空芯コイルを用い、本研究においても空芯コイルを用いる。着磁コイルはコイル内面に垂直の磁界しか発生しないため N-S 一对の着磁しかできない。永久磁石など着磁する場合、50kOe 以上の高磁界が要求される場合もあり電磁応力により巻線が破損しない様に外周に特殊繊維を巻く工夫がなされるなど、着磁コイル技術も実用的に確立されて来ている。図 2.3 の着磁コイルについて考える。着磁コイルの中心に発生する磁界の強さは一般に式(2.9)で表される^[40]。

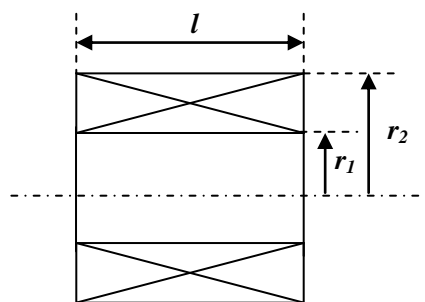


図 2.3 着磁コイルの構成

$$H = \frac{N \cdot I}{2(r_2 - r_1)} \cdot \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + (l/2)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (l/2)^2}} \quad (2.9)$$

ただし、 H :コイル中心磁界、 N :コイル巻数、 I :着磁電流、である。例えば、永久磁石を着磁する場合を例に取って、着磁装置に要求される着磁電源と着磁コイルの着磁条件を説明する。広く一般に使用されているフェライト磁石を着磁するために要求される 10kOe を得るためには、巻線 2mm×4mm 角線、内径 30mm、高さ 100mm、巻数 10 巻の着磁コイルを用いると、着磁電源はコンデンサ容量 2000μF、充電電圧 1000V により着磁電流 9kA が要求される。高保磁力を有する NdFeB 系焼結磁石を着磁するために 30kOe を得るためには、同着磁コイルでコンデンサ容量 2000μF、充電電圧 3000V により着磁電流 27kA が要求される。着磁電源の内部構成を図 2.4 に示すとともに、着磁コイルの一例を図 2.5 に示す。着磁電源内部には、コンデンサバンク、昇圧トランス、充電回

路部，放電回路部からなることが分かる。

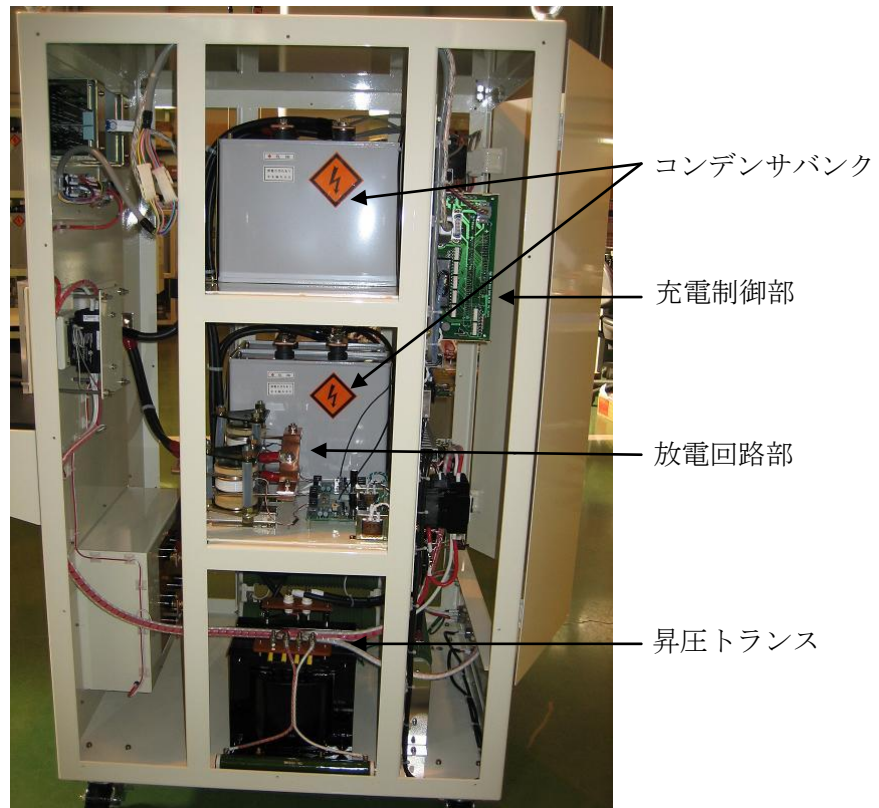


図 2.4 着磁電源内部の構成

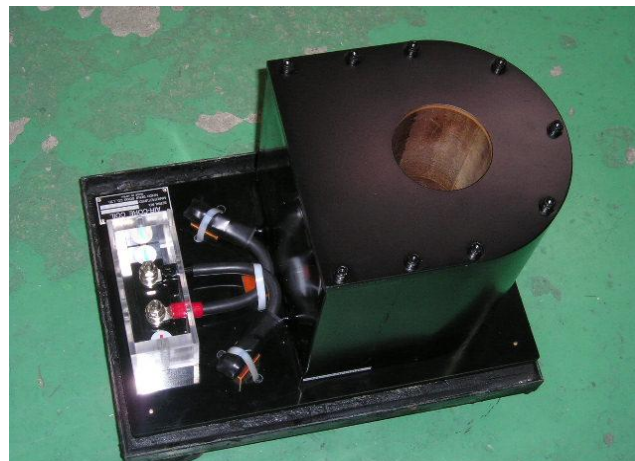


図 2.5 着磁コイル

(1) 鉄筋コンクリートにおける鉄筋の着磁について

鉄筋コンクリート表面から 100mm 程度離れて内部に存在する鉄筋を着磁するためには、強力な磁界が必要となる。希土類磁石を用いるだけでは磁界が弱く鉄筋まで十分な磁界を与えることが出来ない。また、コイルに直流電流を流して磁界を発生させる場合、コイル発熱が大きくなり、冷却装置が必要になる。このため、効率良くかつ高磁界を発生させることが可能なパルス着磁法を用いる。パルス着磁法とは、コイルにパルス電流を流すことによって、瞬間的に強力な磁界を発生させ、その磁界を鉄筋に印加することにより磁化する方法である。この手法では、コイルに対して瞬間的に大電流を流して高磁界を発生させるため、大型コイルなどを必要とせず、装置の小型化・低価格化を図ることができ、機器に組み込んだでの着磁が可能であるなど実用性がある。鉄筋のかぶり厚が深くなるなど要求は様々であり、パルス着磁磁界を強くすることは可能であり、かぶり厚の変化に十分対応可能な着磁法であると考えている。鉄筋を着磁した様子について図 2.6 を用いて説明する。図 2.6 に示すようにコンクリート表面にコイルを配置し、鉄筋を着磁する。コイルにより発生する磁場により鉄筋は図 2.6 に示すように磁化される。着磁した結果、残留磁気による磁束の流れは図 2.7 の様になり、着磁点においてラジアル方向に磁場が発生する。このラジアル方向に発生する磁界を利用し、その残留磁束密度の情報から鉄筋のかぶり厚、直径など評価推定する。

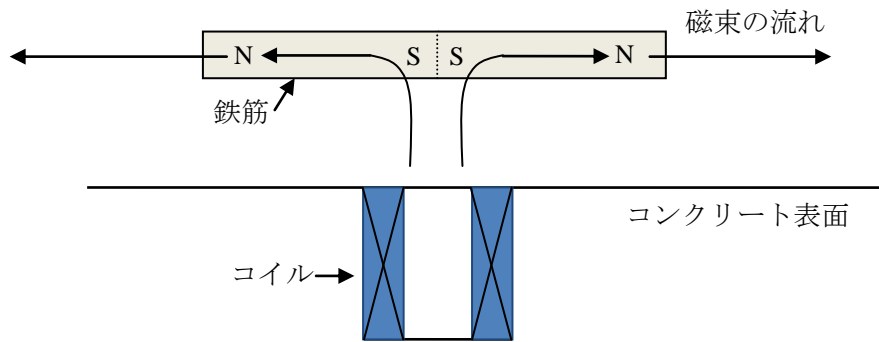


図 2.6 コンクリート表面にコイルを配置した着磁

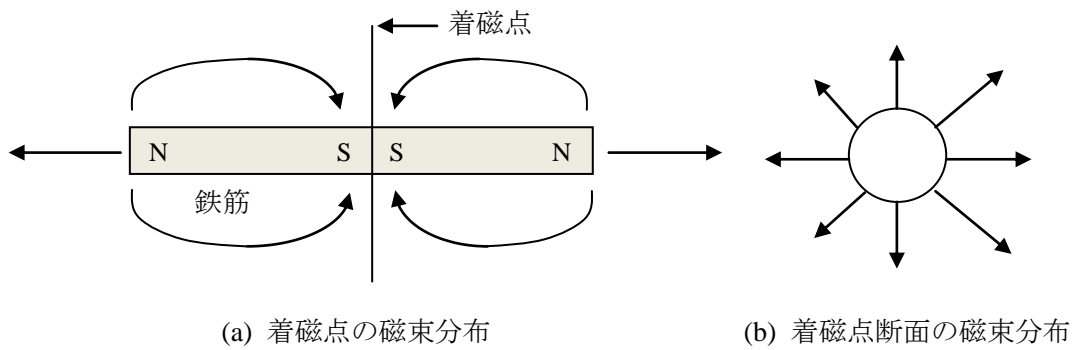


図 2.7 着磁後の磁場の流れと着磁点における鉄筋断面磁場の方向

2.1.2 磁気の測定について

鉄筋を着磁した後、コンクリート表面において微小な残留磁気を測定することが必要であり、磁気インピーダンス素子（MI センサ）を用いた。MI センサは、アモルファス合金ワイヤなどの高透磁率合金磁性材の磁気インピーダンス効果に基づくものである。図 2.8 に示すようにアモルファス合金ワイヤ表面の電子スピン方向が外部磁界により変化しているとき、パルス電流を流すと電子スピンの方向が揃う。高透磁率合金磁性材の表皮効果により外部磁界によってインピーダンスが敏感に変化し、インピーダンスの変化を計測し磁界を測定するものである。一般的な磁気センサであるホール素子の磁気感度は 0.1mT ～数 T であるが、MI センサは 0.001mT ～ 1mT と微小な感度に優れている。本研究において、コンクリート内部に設置された鉄筋の残留磁気をコンクリート表面にて微小な磁気として測定することを考え、市販品で入手性も良いことから最適であると判断し、MI センサを用いた。使用した MI センサは磁気感度が 5.0V/mT 、感磁エリアは $1\text{mm}\times 2\text{mm}$ である。

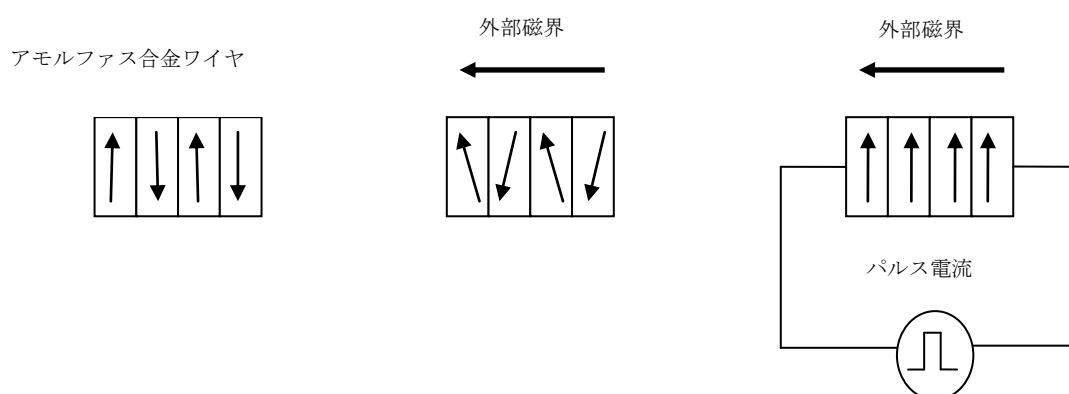


図 2.8 MI センサの磁気検出方法

2.1.3 かぶり厚と直径の評価

鉄筋コンクリート構造物における鉄筋位置は以下の方法により推定する。コンクリート表面よりパルス着磁により鉄筋を着磁した後に、コンクリート表面において各方向成分の磁束密度を測定する。測定した磁束密度分布において、磁束密度の方向が変わるところ、最大の磁束密度を示す点などの特徴点を見出すことにより鉄筋の位置を推定できる。かぶり厚は、各方向の磁束密度分布を解析することにより推定する。着磁後にコンクリート表面上で得られる鉄筋の磁束密度を測定し、その分布を解析することにより鉄筋のかぶり厚を推定する手法を図 2.9 示す。

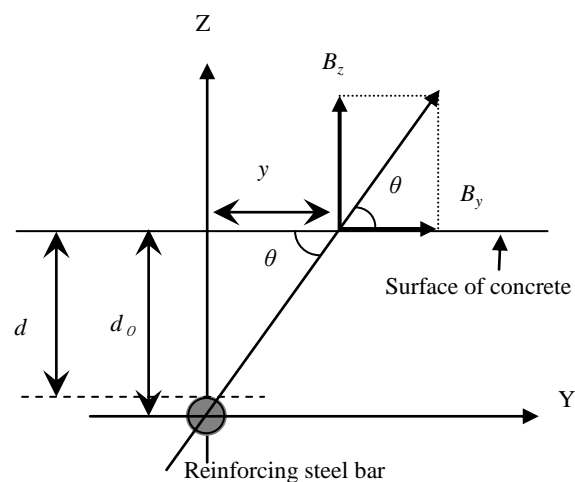


図 2.9 鉄筋かぶり厚の推定方法

図 2.9 に示すように鉄筋は、着磁コイル直下の部分においては、ラジアル方向に磁束は発生する。

図 2.9 に着磁コイル直下の鉄筋の断面図を示す。このとき、コンクリート表面に相当する面（鉄筋からコンクリート表面までの距離 d_0 ）における X 軸方向の磁束密度 B_x 、Y 軸方向の磁束密度 B_y 、Z 軸方向の磁束密度 B_z を計測する。

コンクリート表面からの鉄筋中心までの距離 d_0 は、式(2.10)で表される。

$$d_0 = \frac{B_z}{B_y} \times y \quad (2.10)$$

ただし、 B_y : Y 方向の磁束密度、 B_z : Z 方向の磁束密度、 y : 鉄筋直上からの距離、である。また、かぶり厚 d は、鉄筋の半径を差し引けば良く、式(2.11)で表される。

$$d = d_0 - \phi / 2 \quad (2.11)$$

ただし、 $\phi / 2$: 鉄筋の半径、である。

2.2 実験装置および実験方法

2.2.1 実験装置

本手法における鉄筋のかぶり厚と直径の評価の有効性を確認するための実験装置を図 2.10 に示す。鉄筋を着磁するための着磁コイルと着磁電源、磁束密度を測定するための磁気センサからなり、着磁コイルから距離 d 離れた位置に鉄筋を設置する。この距離 d は、鉄筋のかぶり厚に相当する。

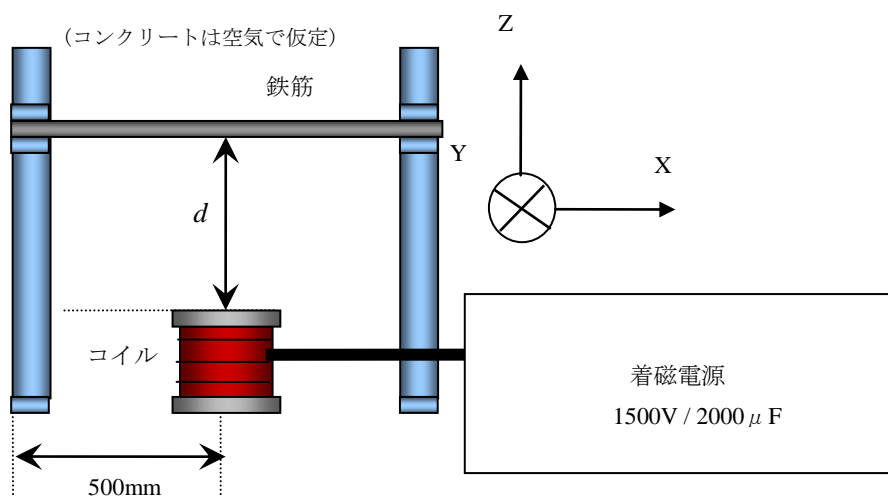


図 2.10 かぶり厚推定における実験装置構成図

実験に使用する着磁電源の仕様を表 2.1 に、着磁コイルの仕様を表 2.2 に示す。出力電圧は 50V ~1500V まで調整することができ、発生磁界を制御することが可能である。コンデンサ容量は 2000 μ F であり、着磁電流は 20kA まで通電可能である。着磁コイルを着磁電源に接続し、着磁電源内部のコンデンサに電圧を充電した後に、着磁回路に直列に接続した電力用半導体サイリスタを ON することにより、コンデンサ容量と着磁コイルの抵抗・インダクタンスにより決定されるパルス幅とピーク値のパルス電流を流すことが出来る。本着磁装置はコンデンサと着磁コイルにより減

衰する減衰振動電流を流すこともでき、減衰交流磁界を得られることから鉄筋の脱磁を行うことも可能である。鉄筋の残留磁気を取り除くため、着磁を行う前に脱磁を行っている。

表 2.1 着磁電源の仕様

入力電源	単相 AC200V, 20A
出力電圧	50V~1500V
出力最大電流	20kA (着磁時) 7kA (脱磁時)
コンデンサ容量	2000 μ F

表 2.2 着磁コイルの仕様

内径	40mm
外径	82mm
高さ	86mm
線径	1.5mm
巻数	690 turns

2.2.2 実験方法

実際には、コンクリート中の鉄筋をパルス磁界により着磁して、着磁後にコンクリート表面において、その磁束密度を測定する。本実験においては、図 2.10 に示すように着磁コイルの直上にかぶり厚 d の位置に鉄筋を配置し、一般にコンクリートには磁気特性を持つ物質を含んでいないので磁気特性への影響は無視できると考え、空気中での実験を行なった。着磁後にコンクリート表面にて磁束密度を測定し、その磁束密度の分布から鉄筋の位置・かぶり厚を推定した。推定された鉄筋のかぶり厚と真値の誤差を明確にし、更に鉄筋の直径を推定した。本実験を通して鉄筋のかぶり厚・直径推定の有効性を確認する。実験は鉄筋のかぶり厚 d を 100mm として行なった。実験において鉄筋は、長さを全て 1.0m とし、鉄筋の直径は 8, 10, 12mm の 3 種類の丸棒鋼を用意した。鉄筋の材質は一般構造用鋼材 (SS400) を使用した。かぶり厚 d 離れた仮想平面上において鉄筋中央に図 2.11 に示すように X, Y, Z 方向の座標を取る。鉄筋長手方向を X 軸、長手方向へ垂直な方向を Y 軸、コンクリート厚み方向を Z 軸とする。X 軸の原点は左端で、Y 軸の原点は鉄筋中心軸の直上である。計測の方法は、X 方向に 50mm 間隔、Y 方向に 20mm 間隔の 20×15 点において各方向の磁束密度 B_x , B_y , B_z をそれぞれ測定した。地磁気、電線回りの磁場などの外部環境による磁気の影響をキャンセルするために、鉄筋を脱磁し着磁前にコンクリート表面の磁束密度を測定しておき測定データから除去している。

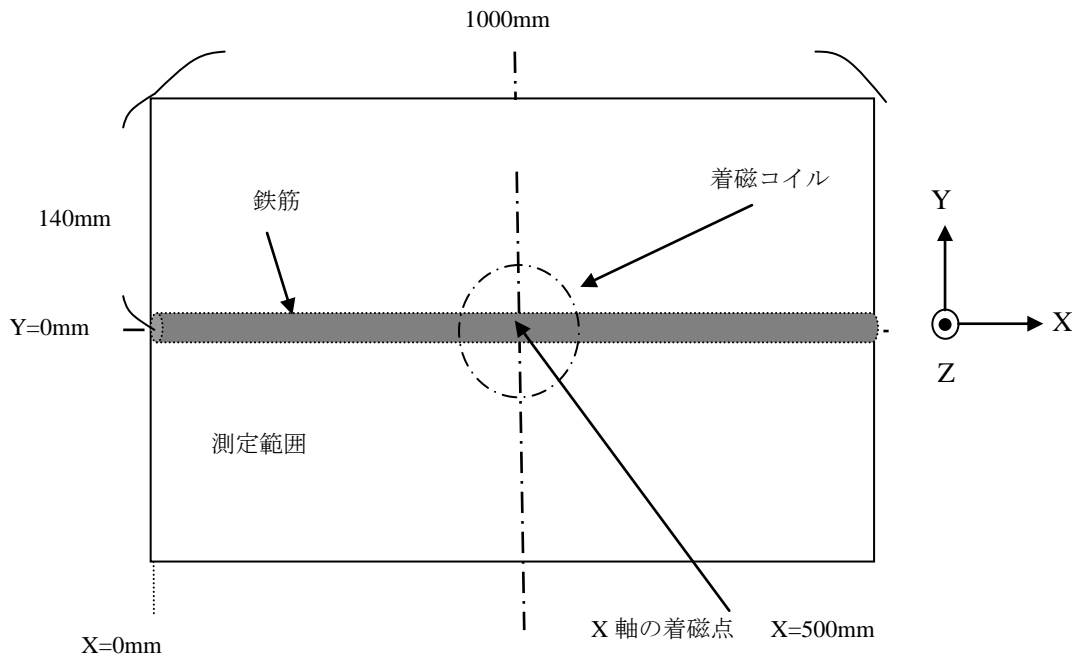


図 2.11 磁束密度測定範囲

2.3 実験結果・考察

2.3.1 着磁結果と鉄筋の直径について

鉄筋を着磁するためコンクリート表面にコイルを配置し、パルス電流を通電し瞬時に大きな磁界を発生することが必要である。着磁電源に有するコンデンサへの充電電圧（着磁電圧）に対するコイル中心に発生する磁束密度の波形を図 2.12 に示し、充電電圧とコイル中心の磁束密度と電流の関係を図 2.13 に示す。コイル中心の磁束密度はホールセンサを用いて測定した。コイル中心の磁束密度と電流は、充電電圧に比例して大きくなるのが分かる。充電電圧 1500V(コンデンサ容量 2000 μ F)の時、コイル中心の磁束密度は約 5.0T であった。

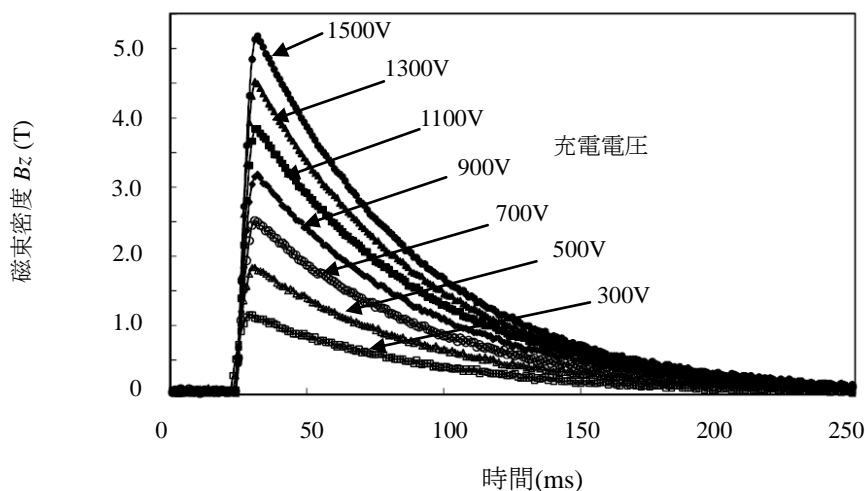


図 2.12 着磁コイル中心における磁束密度（実験）

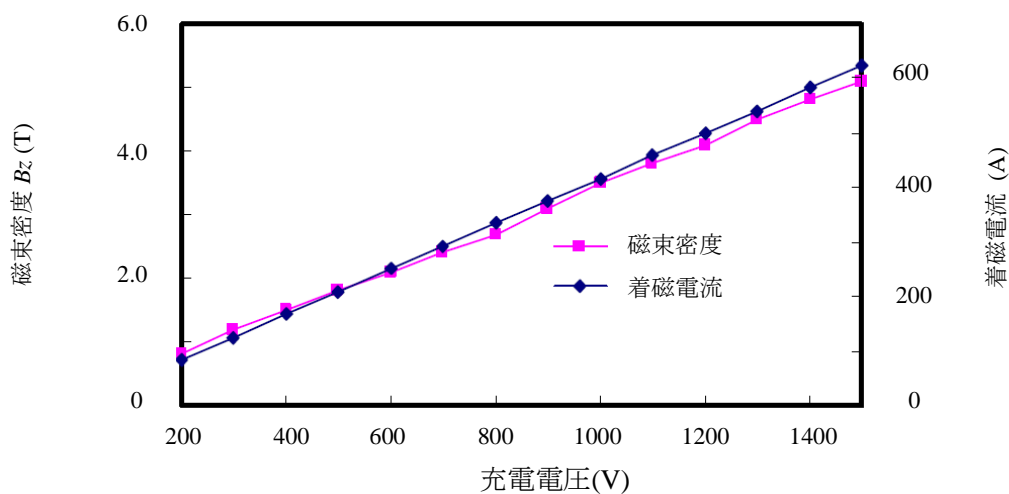


図 2.13 着磁コイル中心における磁束密度と着磁電流（実験）

着磁条件 $2000\ \mu\text{F}$ - 1500V 時において、コイル長手方向の中心軸上におけるコンクリート表面から $90\sim 120\text{mm}$ 位置での Z 軸方向の磁束密度 B_z を磁場解析ソフトを用いて解析した。図 2.14 に示すよう横軸にコンクリート表面を 0mm として Z 軸方向の位置を示し、縦軸に Z 軸方向の磁束密度 B_z を示す。コンクリート表面から 100mm 位置において凡そ 90mT 程度であった。この時、コンクリート表面から 100mm 位置における X 軸、 Y 軸、 Z 軸の磁束密度 B_x 、 B_y 、 B_z それぞれの分布図を図 2.15 に示す。 X 軸の位置 500mm は鉄筋の中心であり、 Y 軸の位置 0mm は鉄筋を設置位置であり、 X 軸の位置と Y 軸の位置 $(X, Y)=(500\text{mm}, 0\text{mm})$ が着磁点である。

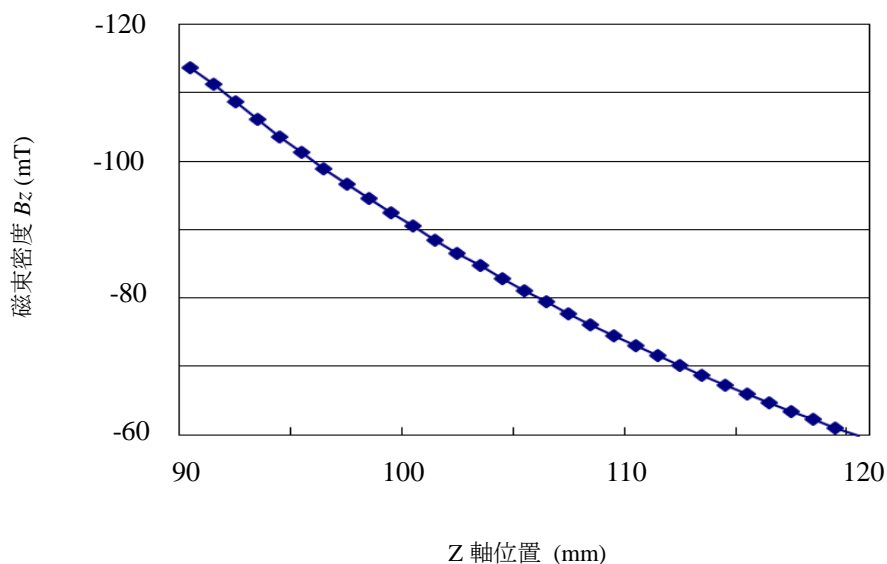
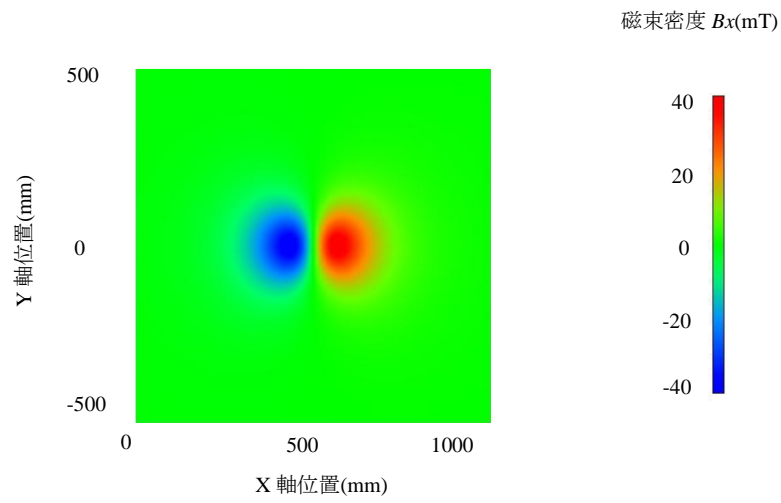
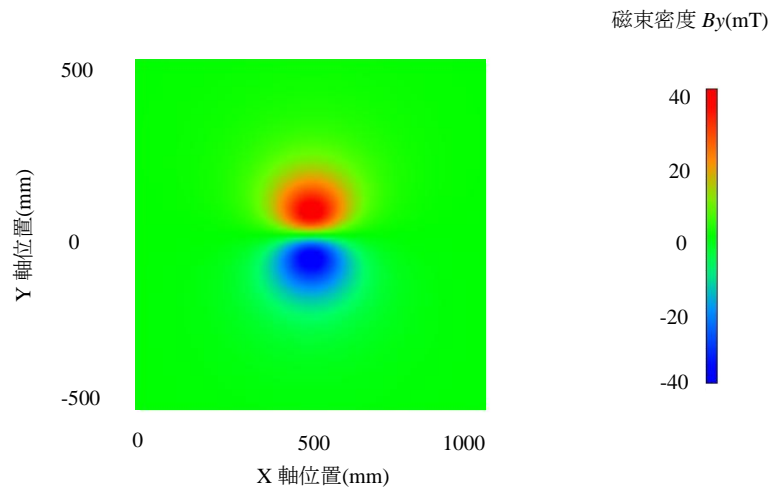


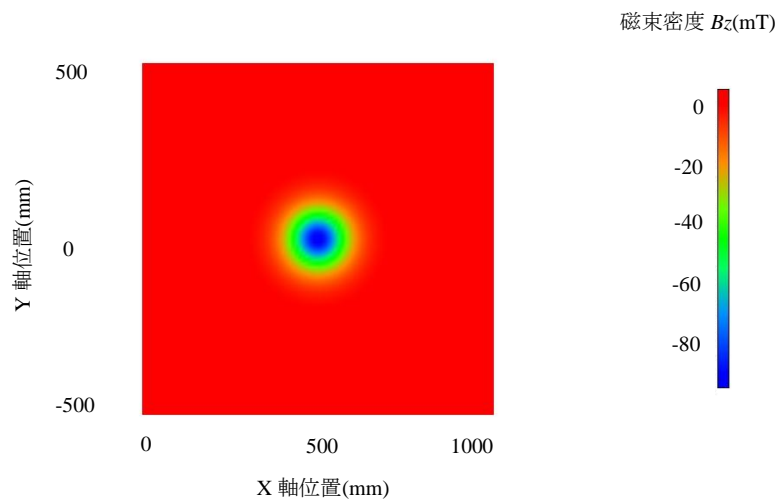
図 2.14 コンクリート表面からの位置における磁束密度 B_z



(a) 磁束密度 B_x の分布



(b) 磁束密度 B_y の分布



(c) 磁束密度 B_z の分布

図 2.15 コンクリート表面から 100mm 位置における磁束密度 B_x, B_y, B_z の分布

鉄筋を着磁するための着磁条件は、充電電圧 1500V、コンデンサ容量 2000 μ F であり、着磁コイル中心の磁束密度は約 5.0T で実験を行なった。着磁後に図 2.11 に示すように着磁コイルの位置(着磁点 X=500mm, Y=0mm)において Z 方向の磁束密度を測定した。Z 方向の磁束密度 B_z の絶対値と着磁回数との関係を図 2.16 に示す。同一直径の鉄筋において着磁回数を増やして行くと磁束密度 B_z は増加する。しかし、5 回程度で磁束密度はほぼ一定で変化が小さくなるのが分かる。そこで、本研究においては、着磁を 5 回繰り返し行うこととした。今回の実験より鉄筋の直径が大きくなると磁束密度が大きくなり、直径 12mm 鉄筋の磁束密度は 0.245mT 程度、直径 10mm 鉄筋の磁束密度は 0.22mT 程度、鉄筋 8mm 鉄筋の磁束密度は 0.21mT 程度であることが分かる。

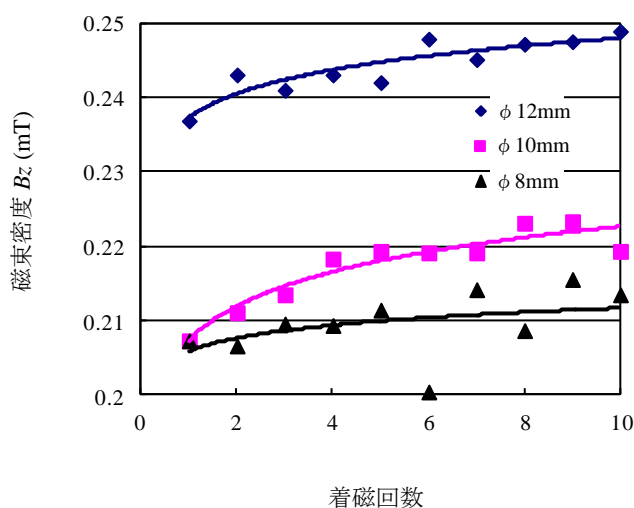
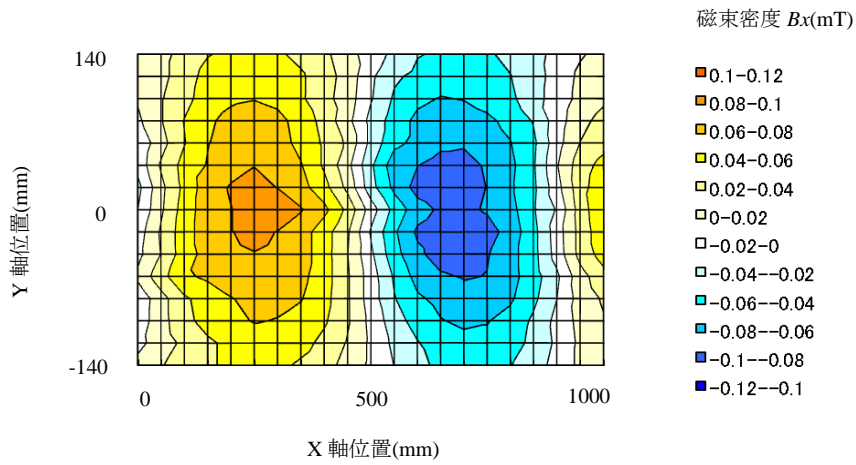


図 2.16 着磁回数と磁束密度の関係

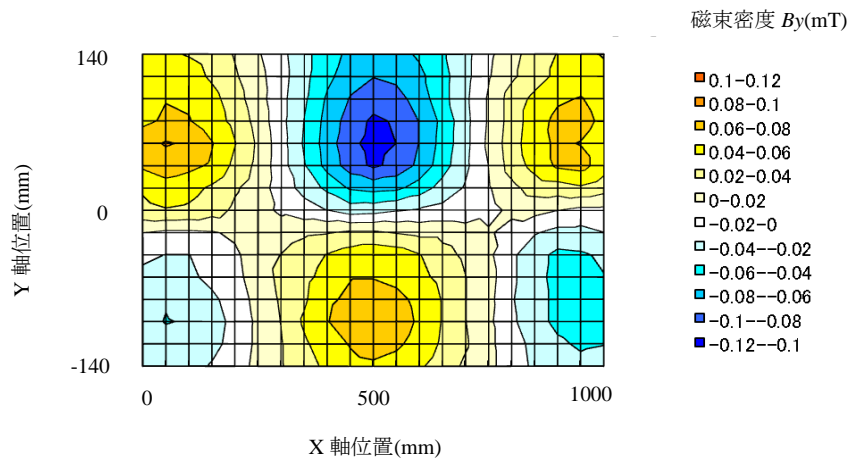
2.3.2 磁束密度分布と鉄筋位置の評価

かぶり厚 100mm において、着磁後に各軸方向の磁束密度分布 B_x , B_y , B_z を測定し、鉄筋直径 8mm と 12mm の結果を図 2.17, 2.18 に示す。横軸に X 軸方向の位置、縦軸に Y 軸方向の位置を示し、擬似カラー表示で測定した磁束密度の大きさを示した。鉄筋直径 8mm 時の磁束密度の測定結果を図 2.17 に、鉄筋直径 12mm 時の磁束密度の測定結果を図 2.18 に示す。基本的に鉄筋の直径が大きい方が、発生する磁束密度が大きいことが分かる。X 軸方向の磁束密度 B_x の分布は、鉄筋の中央(着磁点 $X=500\text{mm}$) を境界にして磁束密度の符号が変わっていることが分かる。これは、着磁後に鉄筋の長手方向(X 軸方向)左右より磁束が鉄筋中央に入り込む様子を示している。Y 軸方向の磁束密度 B_y の分布は、鉄筋を境界にして磁束の方向が逆転しており、 B_y の分極点に鉄筋が配置されていることが分かる。これにより鉄筋がどの位置に配置されているかが推定でき、図 2.17, 2.18 の Y 軸方向の磁束密度 B_y の分布が正負境界である $Y=0\text{mm}$ 付近に鉄筋があることが分かる。Z 軸方向の磁束密度 B_z の分布は、鉄筋が設置してある着磁点の磁束密度が最も強く、鉄筋の両側に反対向きの磁束密度の分布が形成されている。 B_z の分布の中央の最大値を示す場所の直下に鉄筋が存在していることが分かる。このように、鉄筋の位置は磁束密度分布により推定できることを確認した。

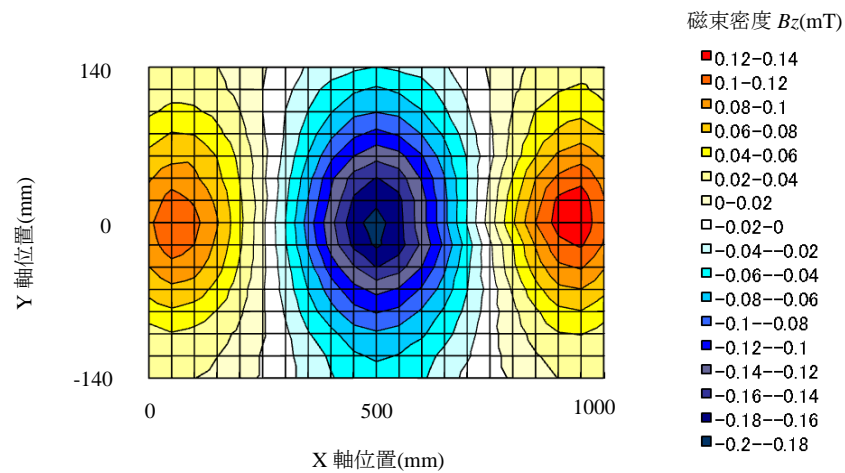
実験結果の検証として磁場解析を行った。磁場解析には市販されている磁場解析ソフト JMAG を使用し、静磁場解析で行った。かぶり厚 100mm において鉄筋直径 12mm、長さ 1.0m とし、コンクリート部は空気とした。実験により得られた磁束密度と同等の大きさとなるように鉄筋の保磁力を設定し、着磁条件は実験と同じ充電電圧 1500V、コンデンサ容量 2000 μF 時とした。着磁後のコンクリート表面での磁束密度分布を図 2.19 に示す。実験と同様に、横軸に X 軸方向の位置、縦軸に Y 軸方向の位置を示し、擬似カラー表示で測定した各軸方向の磁束密度の大きさ B_x , B_y , B_z を示した。磁場解析によって得られた各軸方向の磁束密度は、実験結果と同様の傾向を示しており、Z 軸方向の磁束密度 B_z の分布は、鉄筋が設置してある着磁点の磁束密度が最も強く B_z の分布の中央の最大値を示す場所の直下に鉄筋が存在していることが分かる。



(a) 磁束密度 B_x

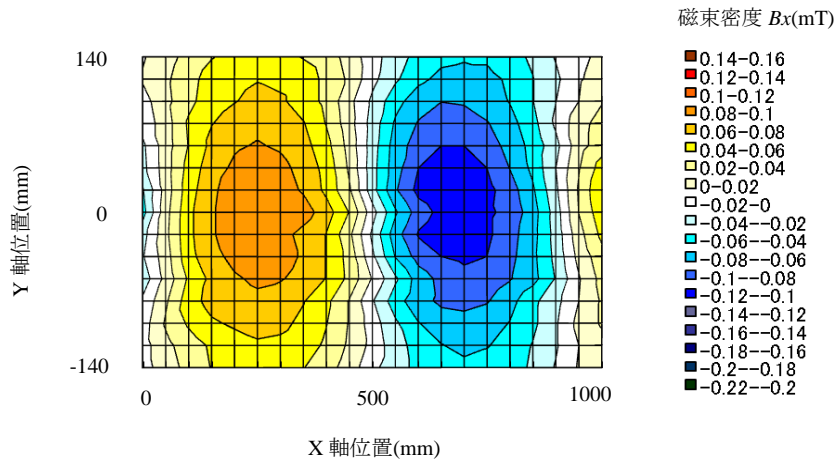


(b) 磁束密度 B_y

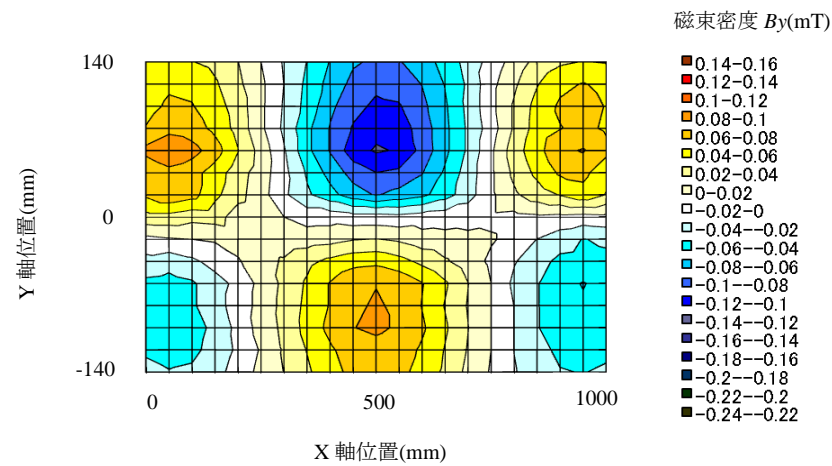


(c) 磁束密度 B_z

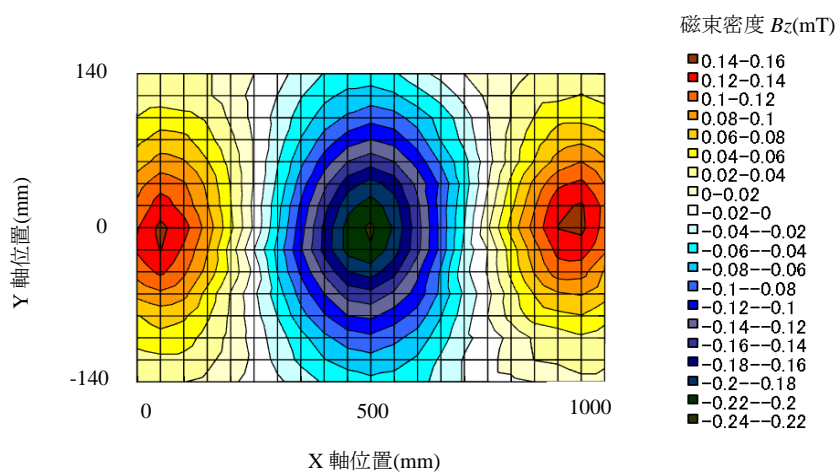
図 2.17 鉄筋直径 8mm の磁束密度分布 (実験)



(a) 磁束密度 B_x

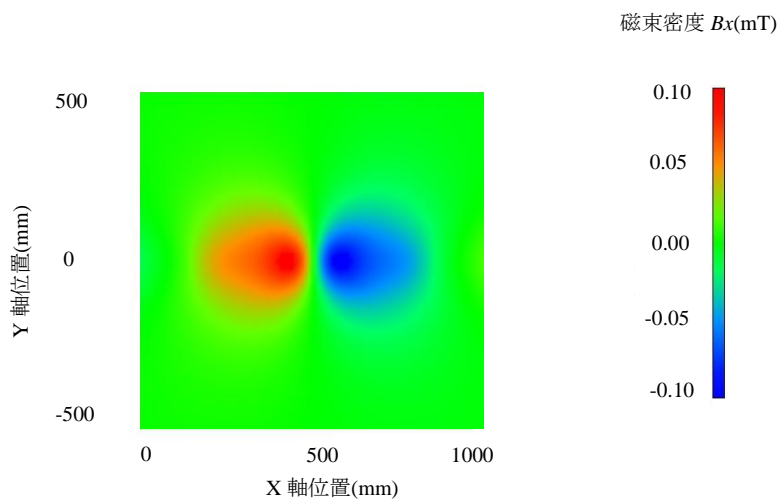


(b) 磁束密度 B_y

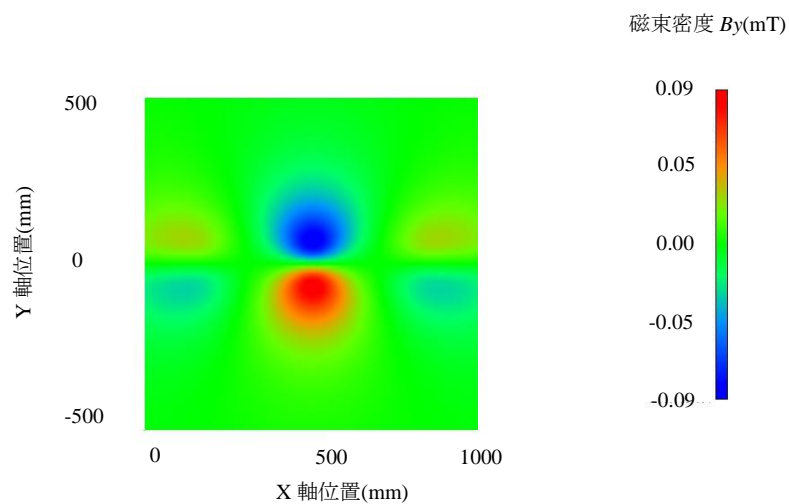


(c) 磁束密度 B_z

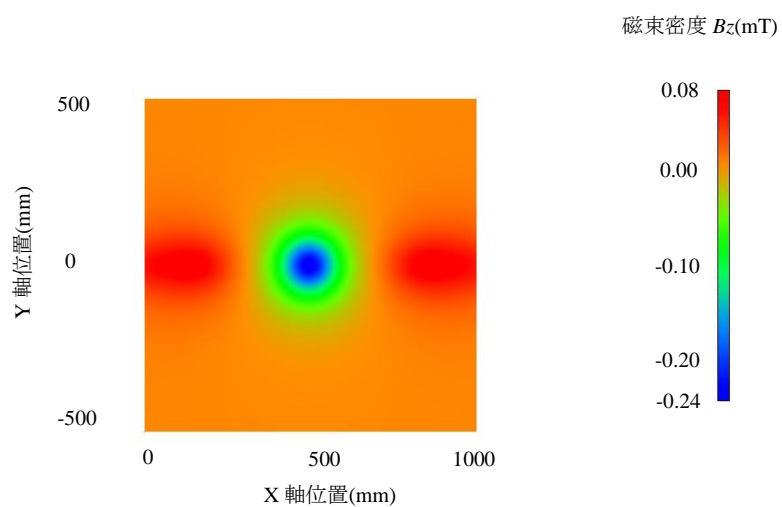
図 2.18 鉄筋直径 12mm の磁束密度分布 (実験)



(a) 磁束密度 B_x



(b) 磁束密度 B_y

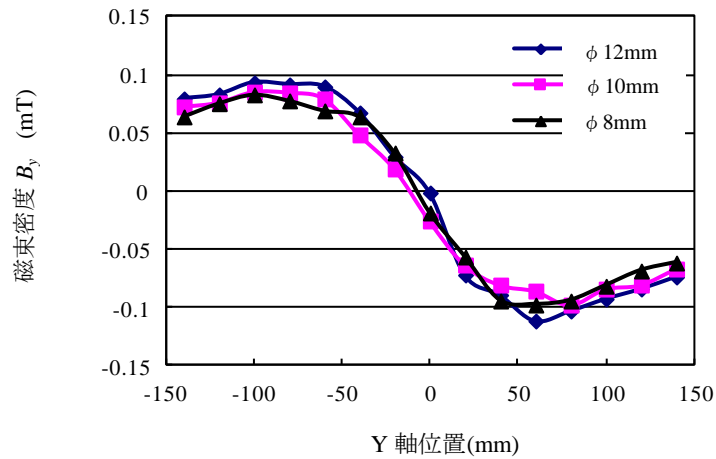


(c) 磁束密度 B_z

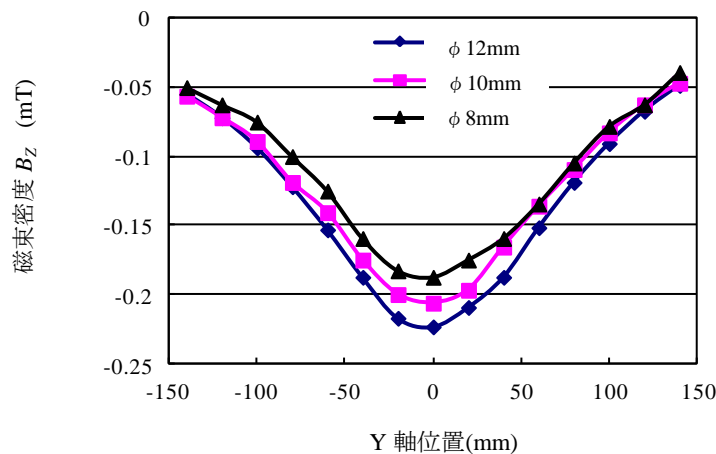
図 2.19 鉄筋直径 12mm の磁束密度分布 (解析)

2.3.3 鉄筋のかぶり厚評価

かぶり厚の推定を行うため2.1.3項に示したように, 着磁後のY軸方向とZ軸方向の磁束密度 B_y , B_z と着磁点と測定点間の距離 y が必要となる。実験によって得られた磁束密度分布をもとに鉄筋のかぶり厚の推定を行った。図 2.17 (b), (c)に代表されるように着磁後の磁束密度分布において $X=500\text{mm}$ 位置におけるY軸方向の磁束密度 B_y , Z軸方向の磁束密度 B_z の測定結果を図 2.20(a), (b)に示す。各磁束密度 B_y , B_z は, $X=500\text{mm}$ と固定し $-140\text{mm}<Y<140\text{mm}$ の範囲を 20mm 間隔で測定値した値である。 $Y=0\text{mm}$ 位置に鉄筋が配置されており, Y方向の磁束密度 B_y は, 鉄筋配置位置で符号が変化している。Z方向の磁束密度 B_z は鉄筋直上で最大値を示している。



(a) 磁束密度 B_y



(b) 磁束密度 B_z

図 2.20 磁束密度 B_y , B_z の分布 (実験)

この測定結果を用いて 2.1.3 項に記述した式(2.10)と式(2.11)を用いて鉄筋のかぶり厚を推定し、その結果を図 2.21 に示す。図 2.21 において推定結果の変動が少ない範囲 ($Y < -50\text{mm}$, $Y > 50\text{mm}$) で平均のかぶり厚を求めた。鉄筋との距離 100mm に対して測定結果から求められたかぶり厚は、直径 8mm の場合 97.8mm, 直径 10mm の場合 105.1mm, 直径 12mm の場合 97.3mm であった。以上の結果に示すように、測定結果である B_y , B_z と式(2.10), (2.11)を用いることにより、多少の誤差はあるものの数 mm 程度の誤差で鉄筋のかぶり厚を推定することが可能であることを確認した。誤差の原因は、磁束密度の測定誤差によるものと考えている。

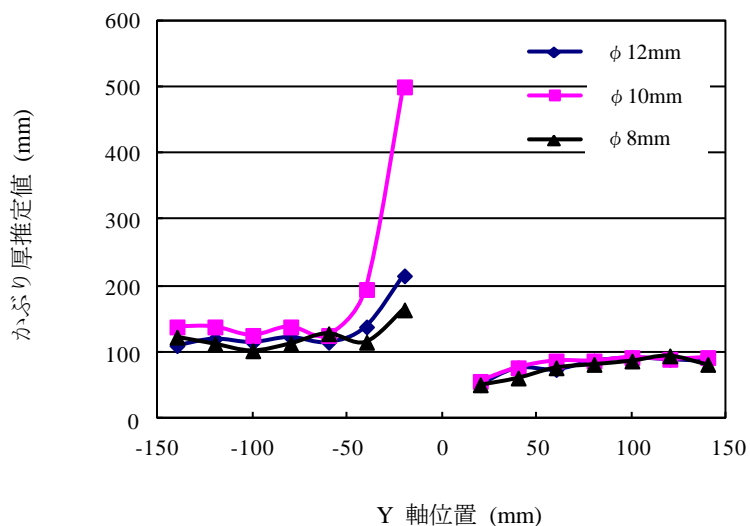


図 2.21 かぶり厚推定 (実験)

次に、鉄筋のかぶり厚を変化させたとき、鉄筋の直径 8mm, 10mm, 12mm について同様に着磁後に磁束密度を測定し、推定した鉄筋のかぶり厚と真値の関係を図 2.22 に示す。かぶり厚の設定値 80mm, 100mm, 120mm, 140mm, 150mm に対して、実験により推定したかぶり厚を示している。本手法により推定した鉄筋のかぶり厚は、真値に比例していることが分かる。

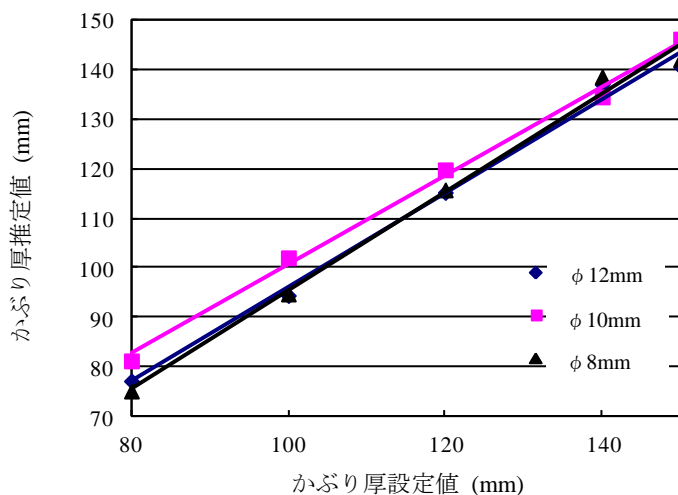


図 2.22 実験によるかぶり厚推定

本手法により推定した直径が違ふ鉄筋毎に、かぶり厚と真値の誤差を図 2.23 に示す。平均誤差は数%であるが、鉄筋のかぶり厚の変化に対して、本手法により鉄筋のかぶり厚を推定することが可能であることを確認した。

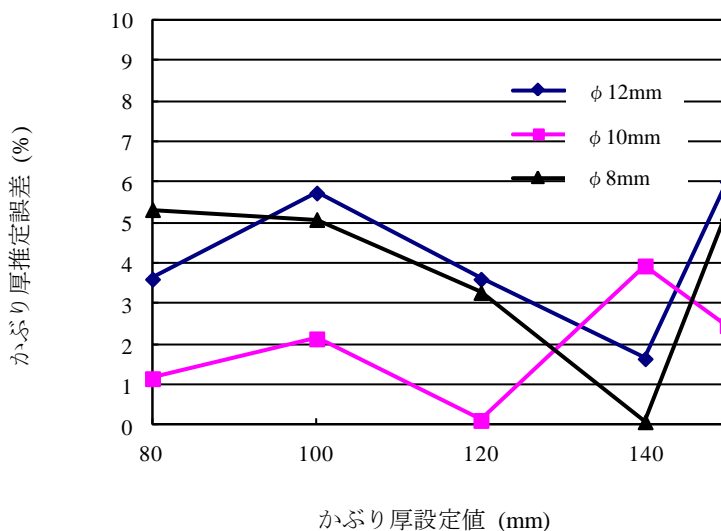
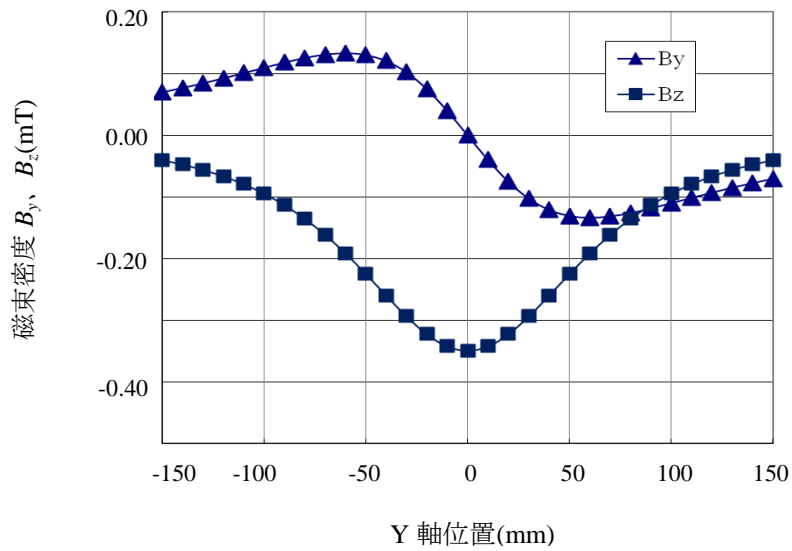
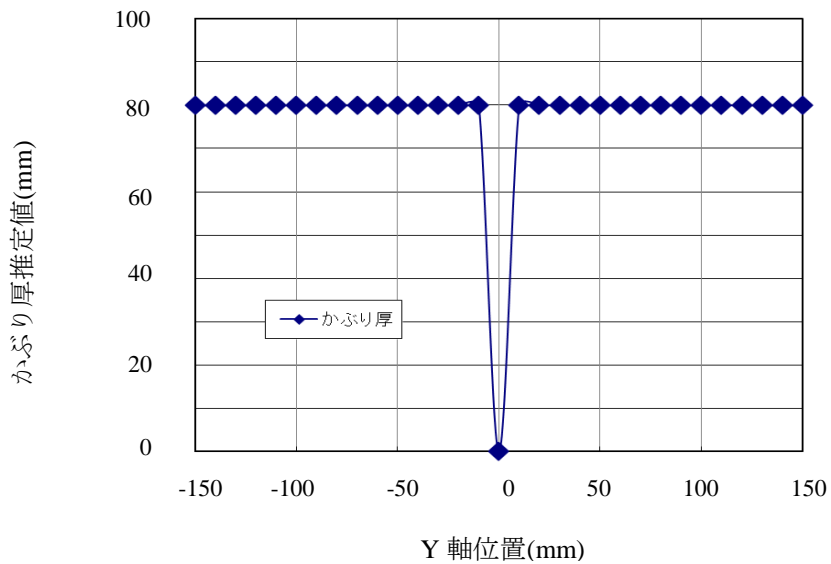


図 2.23 かぶり厚推定誤差 (実験)

次に、磁場解析によりかぶり厚の推定を行った。代表例としてかぶり厚 100mm 時において、鉄筋直径 12mm を着磁後にコンクリート表面での磁束密度分布を解析した結果を図 2.19 示したが、鉄筋直径 12mm においてかぶり厚 80mm, 100mm, 120mm, 140mm において磁場解析を行った。その結果、X 軸位置=500mm において Y 軸方向の位置が -150~150mm における Y 軸方向と Z 軸方向の磁束密度 B_y , B_z 分布を図 2.24~2.27 それぞれの(a)に示す。Y 軸方向と Z 軸方向の磁束密度 B_y , B_z 分布を用いて式(2.10), (2.11)によりかぶり厚を推定した。その結果、Y 軸位置=0mm においてかぶり厚の計算は出来ないが、図 2.24~2.27 それぞれの(b)に示すようにかぶり厚 80mm, 100mm, 120mm, 140mm において誤差無く正確にかぶり厚を推定できることを確認した。本手法によるかぶり厚の推定法により精度良くかぶり厚を推定することが可能であると考えられる。

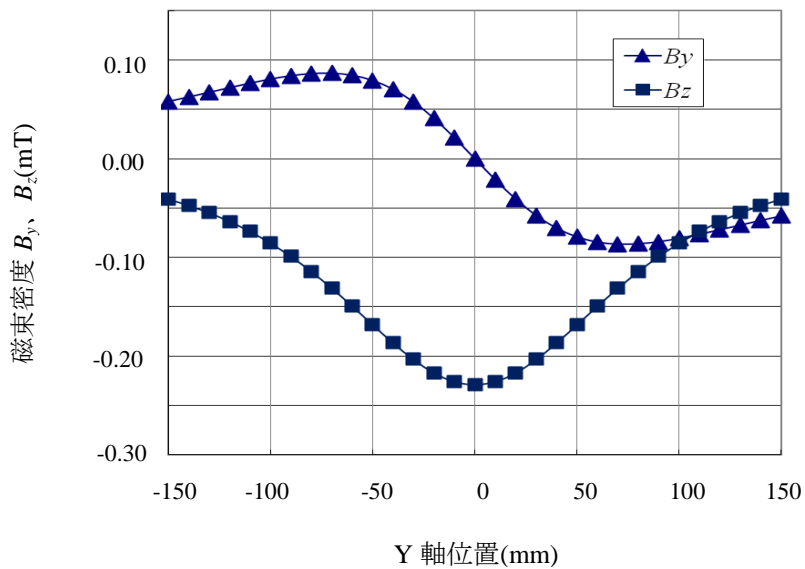


(a) 磁束密度 B_y , B_z の分布

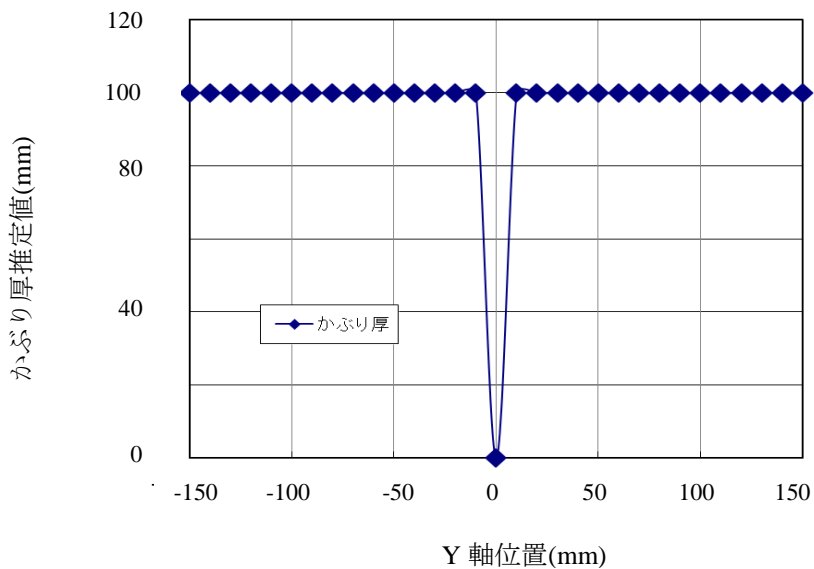


(b) かぶり厚推定

図 2.24 鉄筋直径 12mm におけるかぶり厚 80mm 時の推定 (解析)

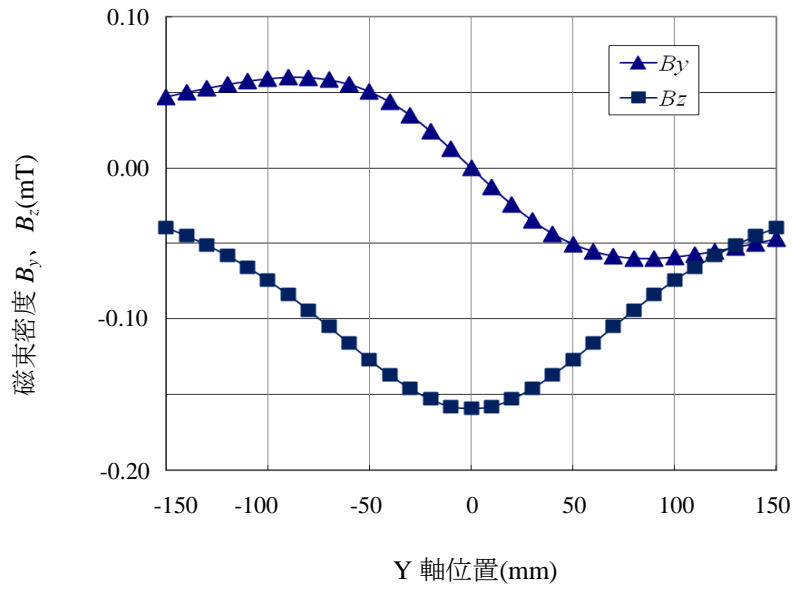


(a) 磁束密度 B_y , B_z の分布

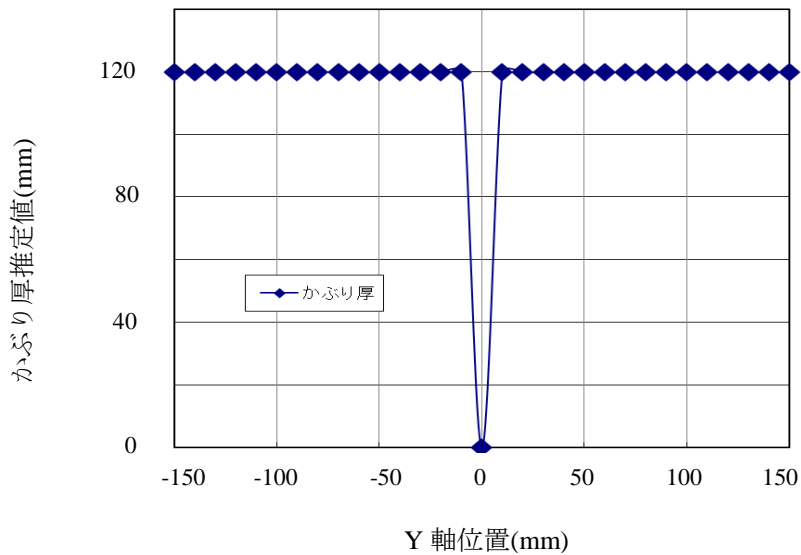


(b) かぶり厚推定

図 2.25 鉄筋直径 12mm におけるかぶり厚 100mm 時の推定 (解析)

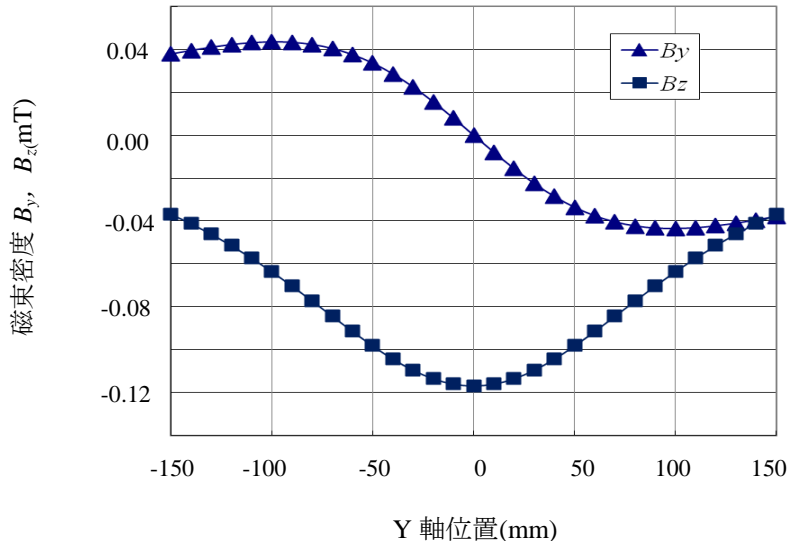


(a) 磁束密度 B_y, B_z の分布

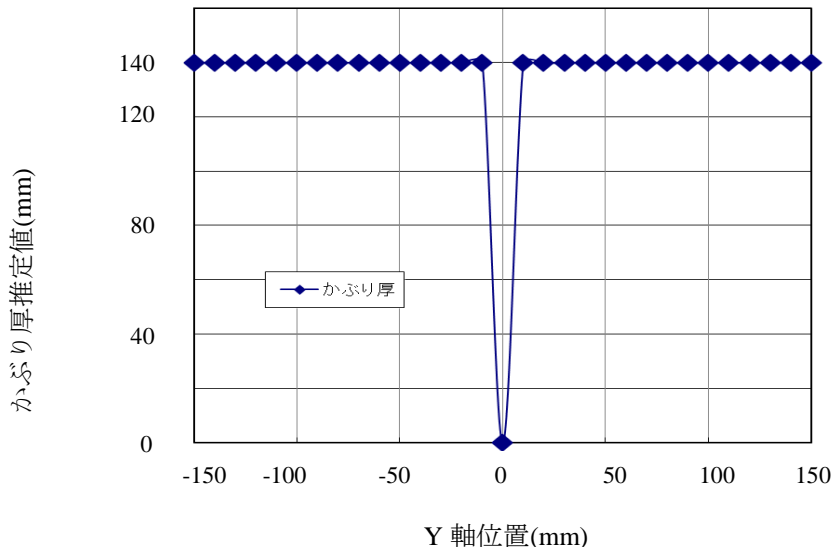


(b) かぶり厚推定

図 2.26 鉄筋直径 12mm におけるかぶり厚 120mm 時の推定 (解析)



(a) 磁束密度 B_y , B_z の分布



(b) かぶり厚推定

図 2.27 鉄筋直径 12mm におけるかぶり厚 140mm 時の推定 (解析)

2.3.4 鉄筋直径の推定

着磁点で測定される最大の磁束密度 B_z は鉄筋の直径に依存すると考え、鉄筋までの距離と最大の磁束密度から直径を推定した。図 2.28 に鉄筋のかぶり厚 d (鉄筋中心までの距離 d_0) に対する Z 軸方向の磁束密度 B_z 最大値の関係を示す。鉄筋のかぶり厚が浅い範囲では、鉄筋の直径によって磁束密度に差異が見られるが、かぶり厚が大きくなると磁束密度の差が減少していることが分かる。これは、鉄筋と着磁コイルの距離が長くなると同時に測定距離も長くなり、磁束密度の変化が小さくなったためと考えられる。しかし、これは着磁磁界をより強くすることで改善できるのではないかと考えている。鉄筋を着磁した後に測定した Z 軸方向の磁束密度 B_z の再現性は 2.3.1 項に記載した。鉄筋の直径を求めるには、鉄筋中心までの距離 d_0 を推定し、図 2.28 を用いて鉄筋中心までの距離における Z 軸方向の磁束密度 B_z と着磁後に測定した Z 軸方向の磁束密度 B_z の最大値を照合して鉄筋の直径を推定する。鉄筋の直径が 12mm について考えてみる。鉄筋の直径が 12mm の場合には、図 2.18(c) に示すように着磁後の Z 方向の磁束密度 B_z の分布から得られる最大の磁束密度は -0.24mT であり、鉄筋中心までの距離 d_0 は 103.3mm であると推定した。図 2.28 のグラフより鉄筋中心までの距離 d_0 が 103.3mm の距離における Z 軸方向の磁束密度 B_z はおおよそ -0.25mT であり、着磁後の Z 軸方向の最大磁束密度 0.24mT とほぼ同等であり鉄筋の直径は 12mm であると判断できる。着磁後の Z 軸方向の磁束密度 B_z の最大値と鉄筋の直径毎におけるかぶり厚 d (または鉄筋中心までの距離 d_0) に対する Z 軸方向の磁束密度 B_z のデータを照合することにより鉄筋の直径を推定することができる。すなわち、本手法により鉄筋の直径を推定することが可能であると考えられる。

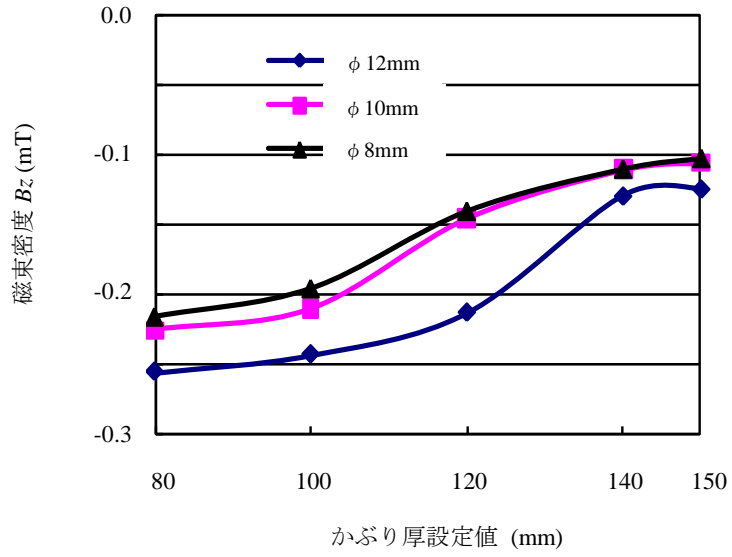


図 2.28 鉄筋直径によるかぶり厚と磁束密度 B_z の関係

2.4 まとめ

鉄筋のかぶり厚，直径を推定するため，鉄筋の着磁，磁束密度測定法の検討を試みた。コンクリート表面からパルス着磁法を用いることで鉄筋を十分に着磁する可能性を見出し，着磁後に鉄筋の残留磁束密度をコンクリート表面において測定が可能であることを確認した。測定した各方向の磁束密度 B_x ， B_y ， B_z の分布から鉄筋の位置，かぶり厚，直径を推定する方法を提案した。鉄筋の直径とかぶり厚に対して着磁に再現性があることを確認した。また，鉄筋を着磁して磁束密度分布を測定することで鉄筋の位置を推定し，鉄筋の直径，かぶり厚を推定することができることを確認した。今後の課題として，本手法によるデータの蓄積を行い，推定の信頼性を図ることが挙げられる。更に複数の鉄筋に関する推定手法の確立が必要である。

第3章 パルス着磁による鉄筋位置の推定法

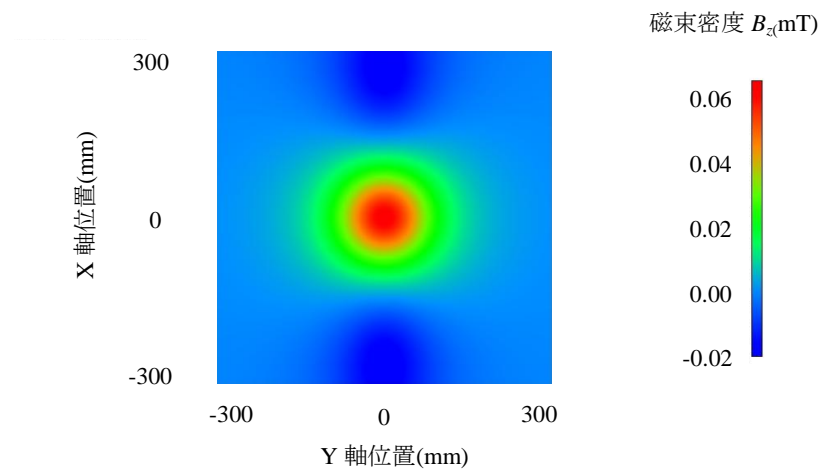
先に単独でコンクリート中に配置された鉄筋をパルス磁界により着磁し、コンクリート表面において磁束密度分布を測定・解析することにより、鉄筋の位置、鉄筋のかぶり厚、更には鉄筋の直径を推定する全く新しい手法を提案した。鉄筋が複数配置された状態において、2個のコイルを用いてパルス磁界により着磁し、かぶり厚を推定する方法を提案する。かぶり厚を推定するためには、鉄筋の位置を推定することが重要であり、パルス着磁を用いてかぶり厚を推定することから、同システムを使用して鉄筋の位置を推定することにより効率が向上すると考えられる。

コンクリート表面にて着磁後の鉄筋の残留磁束密度分布を測定・解析することにより、複数の鉄筋の位置を検出する手法について提案し、その有効性を実験と磁場解析により確認したので報告する^[41-43]。

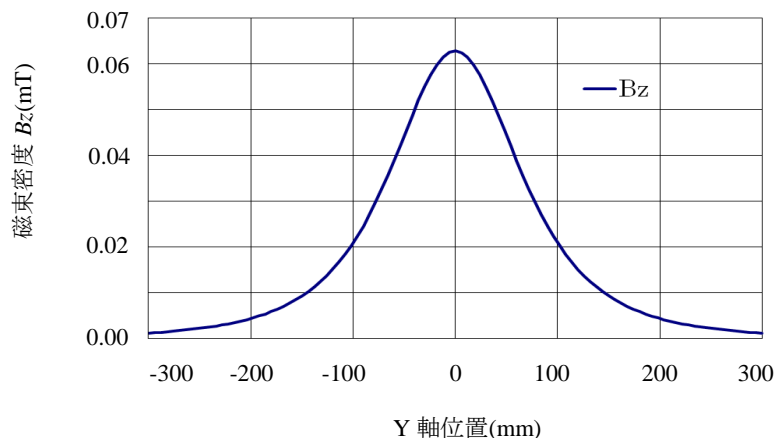
3.1 単独鉄筋の着磁と位置推定方法

3.1.1 基礎となる鉄筋の位置推定法

鉄筋の位置は、コンクリート表面から鉄筋を着磁した後に磁気センサにより磁束密度分布を測定し、その磁束密度の特徴点から推測する。第2章において鉄筋位置の推定は、鉄筋が設置してある着磁点のZ軸方向の磁束密度 B_z が最も大きいことを示した。本節において更に鉄筋位置の推定について検討を進める。第2章においては、鉄筋直下において着磁した場合であり、着磁点が鉄筋直下からずれた場合においても、Z軸方向の磁束密度 B_z が最も強い位置に鉄筋が設置されているか確認を行った。磁場解析により、鉄筋の直下で着磁した場合、鉄筋の直下からY軸方向に100mmずれた場合、150mmずれた場合のZ軸方向の磁束密度 B_z を求めた。本章において鉄筋の位置推定のために実験で用いた鉄筋は、直径25mm、長さ1.0mであり、かぶり厚は100mmを想定し、コンクリートは非磁性体と考え空気として磁場解析を行った。3.1.2項以降で詳述する実験結果からZ軸方向の磁束密度 B_z の大きさが同じとなるように鉄筋の保磁力を7000A/mとしてJMAGにおける着磁ソフトを用いて静磁場により解析を行った。着磁後のコンクリート表面に相当する位置での磁束密度分布を解析により求めた。鉄筋の直下で着磁した場合のZ軸方向の磁束密度 B_z の分布図を図3.1(a)に示す。また、横軸をY軸の位置、縦軸をZ軸方向の磁束密度の大きさとの関係を図3.1(b)に示す。この結果、鉄筋はZ軸方向の磁束密度分布が最大となる位置に設置されていることを確認した。



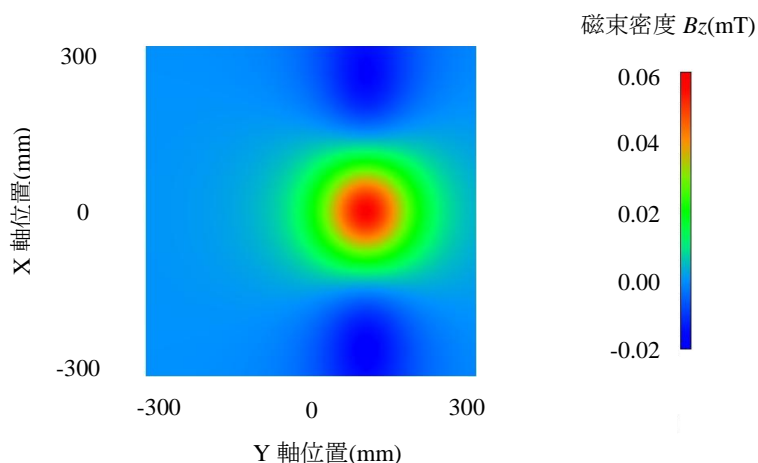
(a) 磁束密度 B_z の分布



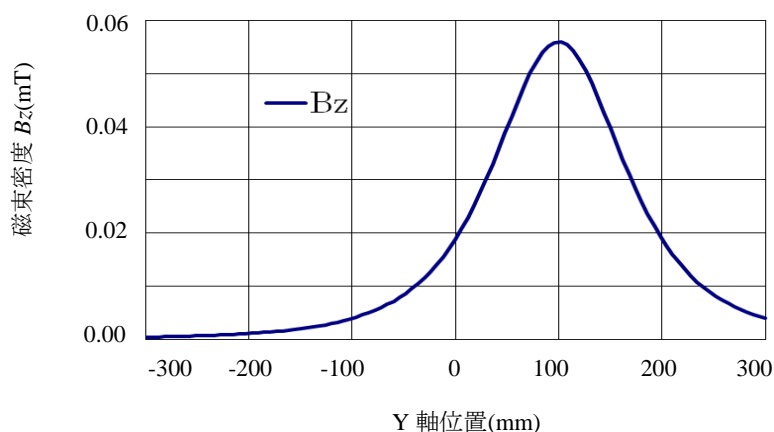
(b) 磁束密度 B_z の分布 (X 軸位置=0mm)

図 3.1 鉄筋 Y=0mm 位置における磁束密度分布

同様に着磁点と鉄筋の位置を Y 軸方向へ 100 mm, 150mm ずらした場合に, 同様の結果が得られるか検討した。Y 軸方向へ 100mm ずらした場合の結果を図 3.2(a), (b)に示す。Y 軸方向へ 150mm ずらした場合の結果を図 3.3(a), (b)に示す。その結果, Z 軸方向の磁束密度が鉄筋位置において最大値を示すことが分かる。鉄筋を着磁した後に Z 軸方向の磁束密度 B_z を測定し, その最大値の位置に鉄筋が位置すると考えられる。

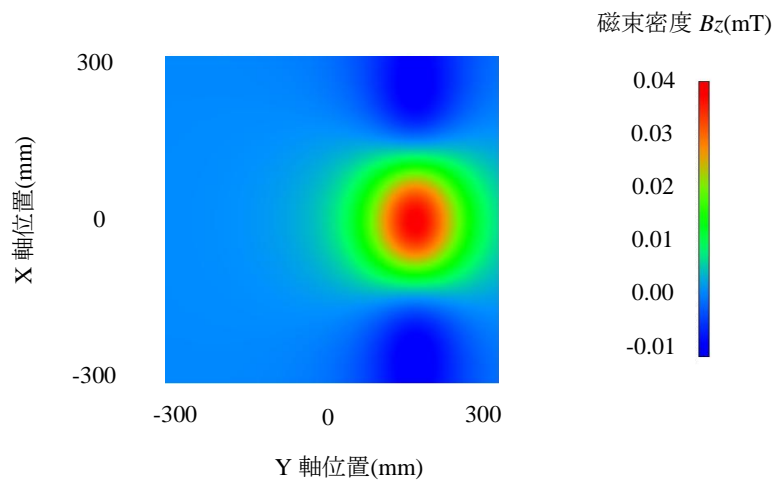


(a) 磁束密度 B_z の分布

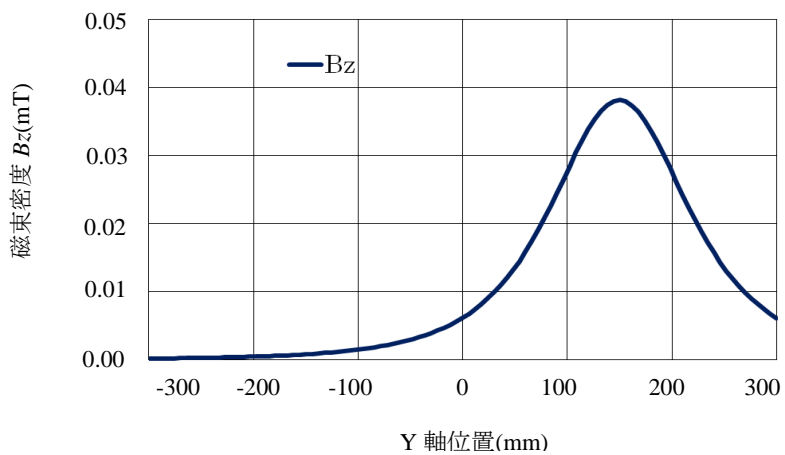


(b) 磁束密度 B_z の分布 (X 軸位置=0mm)

図 3.2 鉄筋 Y=100mm 位置における磁束密度分布



(a) 磁束密度 B_z の分布



(b) 磁束密度 B_z の分布 (X 軸位置=0mm)

図 3.3 鉄筋 Y=150mm 位置における磁束密度分布

3.1.2 実験装置の構成

鉄筋の位置検出は、コンクリート表面から鉄筋を着磁して、コンクリート表面で磁束密度分布の測定・解析を行う。コンクリート表面からコンクリート内部に配置された鉄筋を着磁するため高磁界を発生させることが必要である。磁界を発生する手法は様々であるが、効率良く高磁界を発生することが可能なパルス着磁法を用いた。鉄筋を着磁するための構成と座標の関係を図 3.4 に示す。鉄筋長手方向を X 軸，長手方向へ垂直な方向を Y 軸，コンクリートのかぶり厚の方向を Z 軸とする。

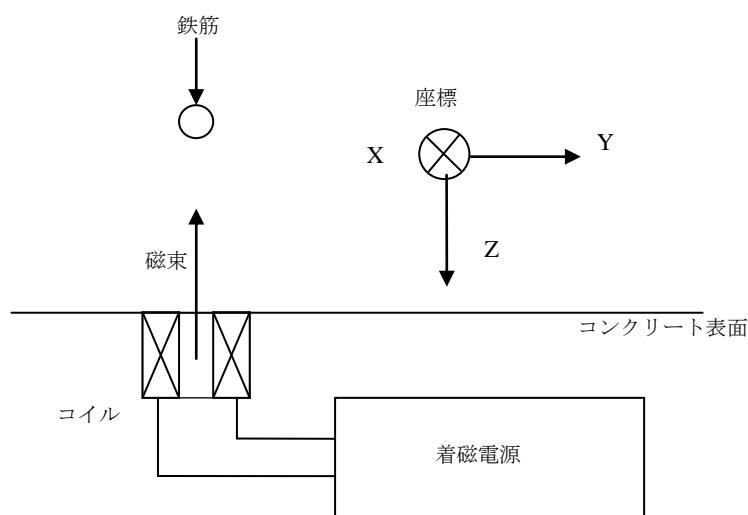


図 3.4 パルス着磁構成図

実験に使用した鉄筋は、直径 25 mm，長さ 1.0 m であり，かぶり厚は 100 mm を想定し，コンクリートは非磁性体と考え空気として取り扱った。実験に用いたコイルは，内径 30mm，外径 118mm，高さ 86mm，690 巻である。鉄筋間隔は一般に 200 mm 程度と考えられ，コイル外径から 2 個のコイルを配置したときコイル中心間の距離は 150 mm とした。パルス磁界は，400 V，2000 μ F の着磁条件によりピーク磁界までの立ち上がり時間は 5.4 ms であり，鉄筋位置において磁界の強さは 8.8 kA/m とした。鉄筋の残留磁気を取り除くため，必要に応じて着磁を行う前に脱磁を行っている。地磁気や外部磁気の影響は，あらかじめ測定した磁束密度値を減算することで除去している。

3.2 順次着磁による複数の鉄筋位置の推定

3.2.1 鉄筋位置の推定法

第4章において複数鉄筋のかぶり厚を推定する方法を提案し、その推定法において鉄筋の着磁はコイルを2個用いて、それぞれのコイルを2本の鉄筋の直下に設置して着磁を行う必要がある。このため鉄筋の位置を検知することは重要である。また、コイル2個を用いて効率良く鉄筋の位置を推定出来る方法を提案する。第3.1節において1個のコイルを用いてZ軸方向の磁束密度の最大値を示す位置に鉄筋があることを確認した。鉄筋の位置を2個のコイルを用いて推定する方法を検討した。鉄筋の直下においてZ軸方向の磁束密度 B_z が最大値となると考え、一定距離に配置した2個のコイルにより鉄筋を着磁する。2個のコイルによる磁界の方向が逆極性となる様にして着磁を行い、着磁後にコンクリート表面においてZ軸方向の磁束密度 B_z の分布を測定し、その最大値を用いて鉄筋の位置を推定することを提案する。

3.2.2 実験と磁場解析の方法

2個のコイルを用いて提案する方法により複数配置された鉄筋の位置を推定することが出来るか実験と磁場解析により確認を行った。図3.5に示すように鉄筋3本をY軸方向の位置0 mm, ± 150 mmに150 mm間隔で設置した。かぶり厚は100 mmとし、コンクリートは非磁性材であり、空気と仮定して行った。鉄筋は直径25mm, 長さ1.0mを3本用いて行った。

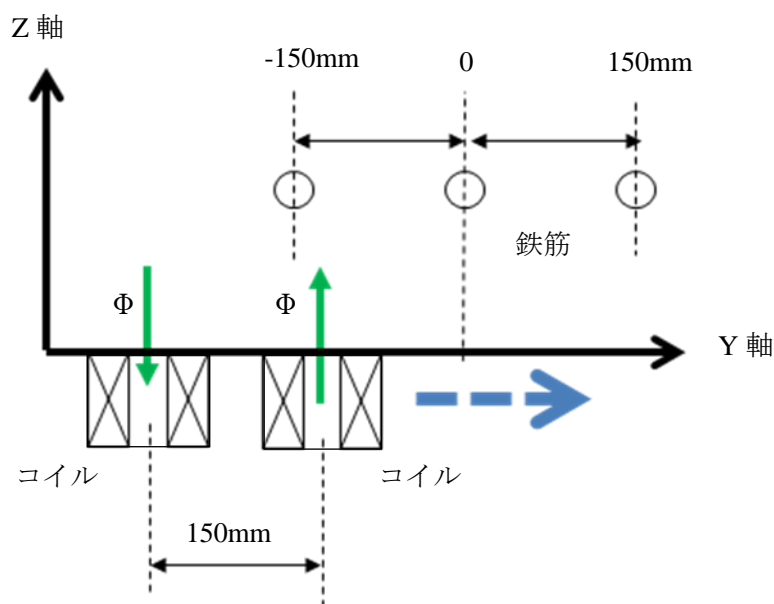


図 3.5 鉄筋位置を推定するための実験と磁場解析の構成

3.2.3 実験結果と磁場解析結果

鉄筋をY軸0mm, ± 150 mmの位置に配置し, 最初に正コイルを $(X,Y)=(0,-125)$, 負コイルを $(X,Y)=(0,-275)$ の位置で着磁を行った後に測定を行った。2回目の着磁は, Y軸方向に25mm移動させた位置の $(X,Y)=(0,-100)$, $(X,Y)=(0,-250)$ に正コイルおよび負コイルをそれぞれ移動し, 着磁を行った後に測定を行った。その後も25mmずつ移動させて着磁を行った後に測定を行うことを繰り返した。 $(X,Y)=(0,100)$, $(X,Y)=(0,-50)$ に正コイルおよび負コイルを配置するまでの計10回の着磁および測定を行った。そのZ軸磁束密度分布を図3.6に示す。その結果 -150 mm, 0 mm, 150 mmにZ軸方向の磁束密度に最大値があることが分かる。

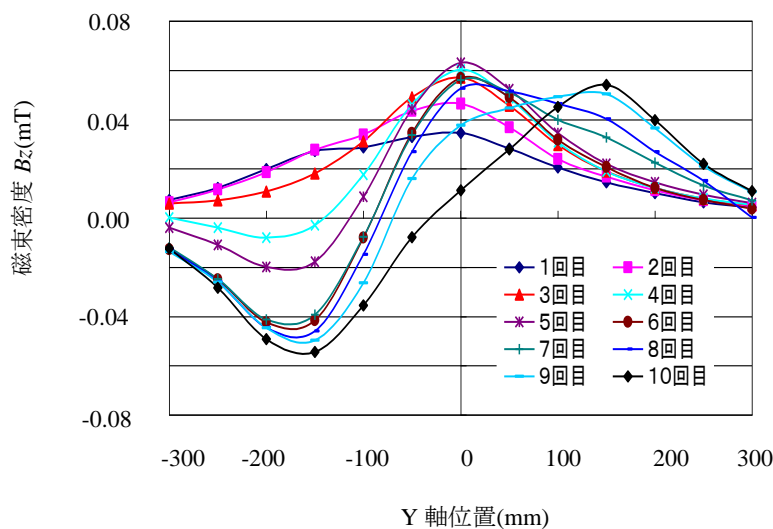
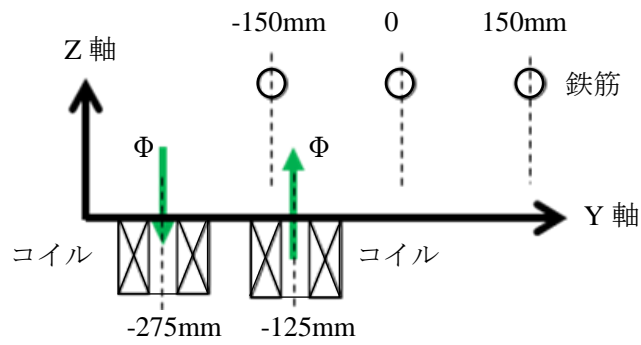
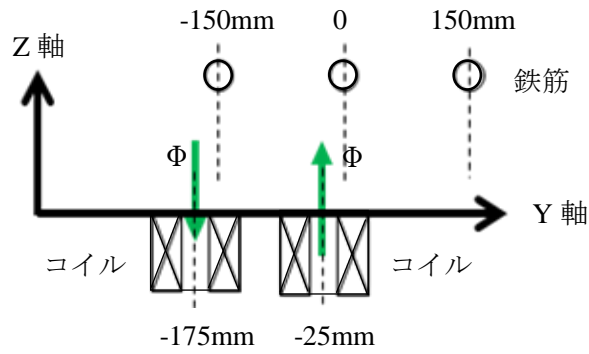


図 3.6 各回における磁束密度 B_z

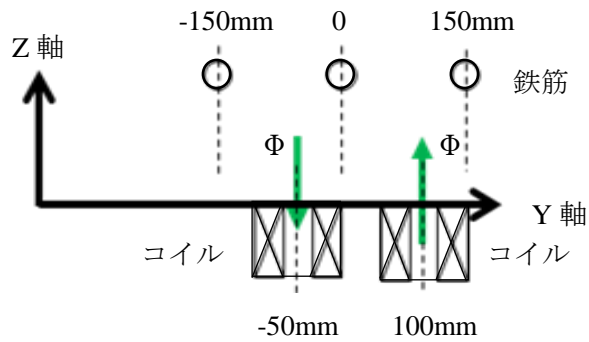
2つのコイルをY軸方向に25mm毎ずらしながら着磁, 測定を繰り返したとき, 1回目, 5回目, 10回目の測定結果について詳細を示す。図 3.7(a), (b), (c)にそれぞれの鉄筋とコイルの位置関係図を示す。1回目の着磁の際の正コイルおよび負コイルの位置はそれぞれ $(X,Y)=(0,-125)$, $(0,-275)$ であり, 5回目の着磁のときは $(X,Y)=(0,-25)$, $(0,-175)$ であり, 10回目の着磁のときは $(X,Y)=(0,100)$, $(0,-50)$ である。



(a) 1回目の鉄筋とコイルの位置関係



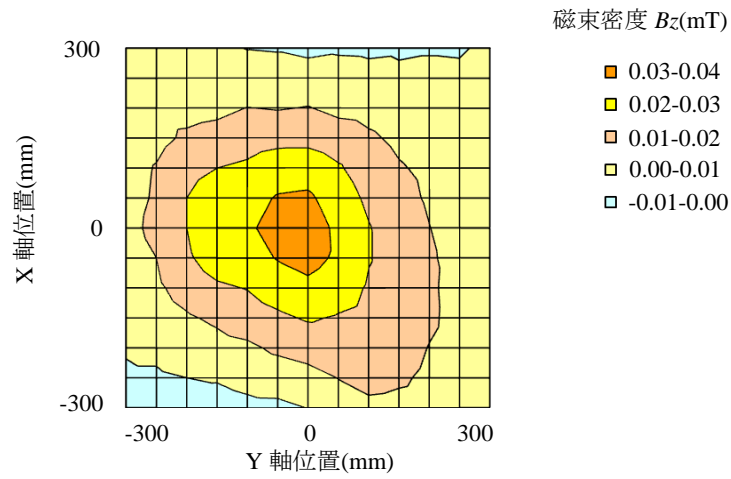
(b) 5回目の鉄筋とコイルの位置関係



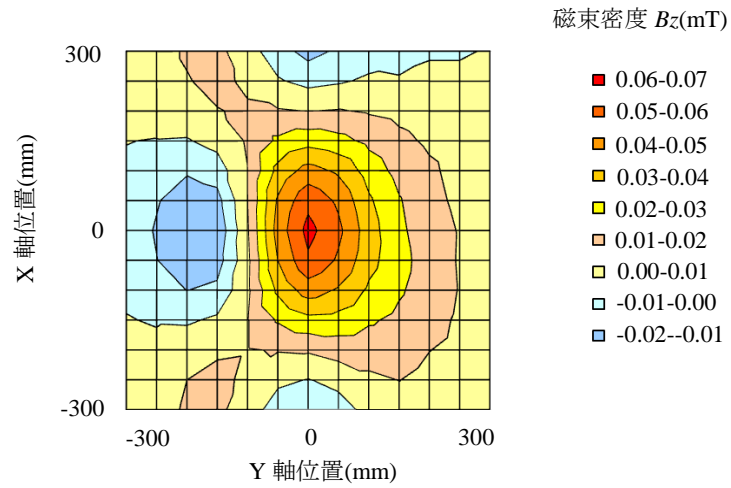
(c) 10回目の鉄筋とコイルの位置関係

図 3.7 鉄筋とコイルの位置関係

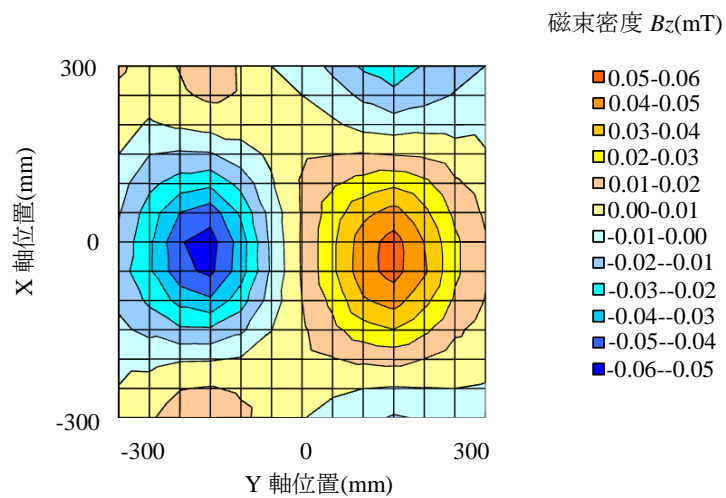
この時、着磁後のZ軸方向の磁束密度分布を $(-300, -300) \leq (X, Y) \leq (300, 300)$ の範囲で図3.8(a), (b), (c)に示す。



(a) Positions $(X, Y) = (0, -125), (0, -275)$ of coils



(b) Positions $(X, Y) = (0, -25), (0, -175)$ of coils



(c) Positions $(X, Y) = (0, 100), (0, -50)$ of coils

図 3. 8 磁束密度分布 B_z (実験)

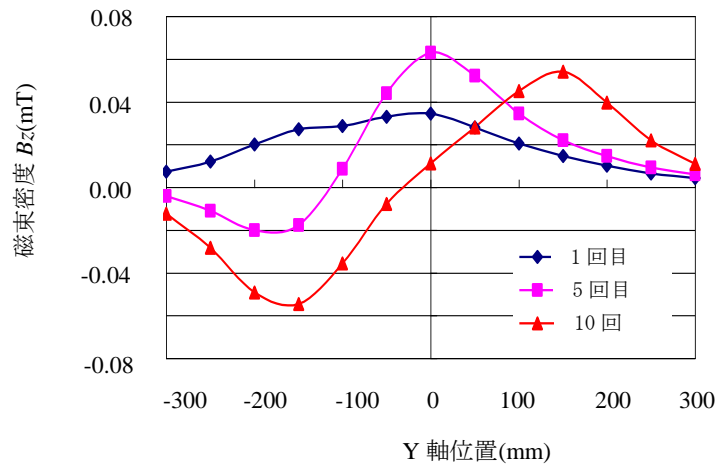
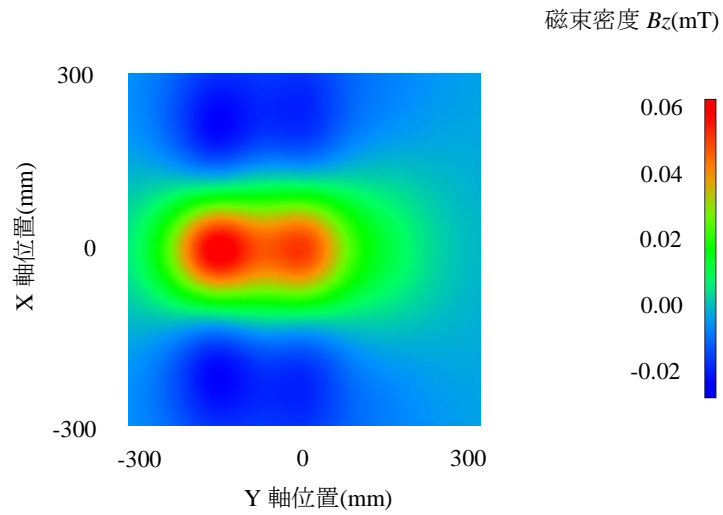
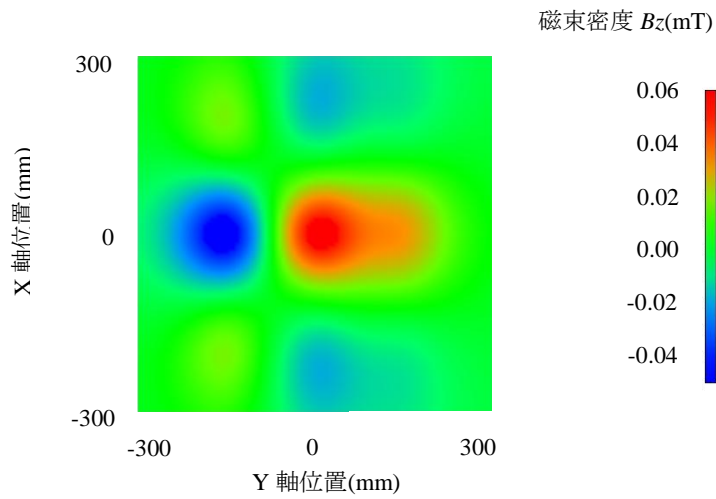


図 3.9 1, 5, 10 回目における磁束密度 B_z 分布

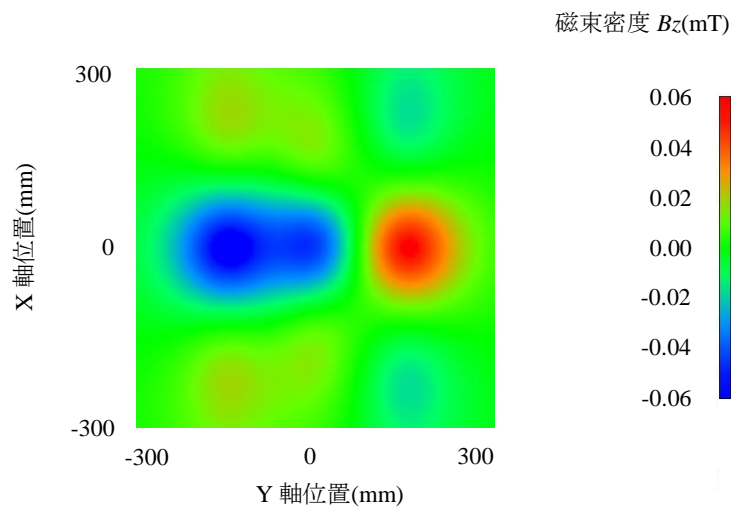
1, 5, 10 回目の $X=0$ 上の Z 軸方向の磁束密度分布を図3.9に纏めて示す。実験の結果、鉄筋が配置されている Y 軸方向の位置 0 mm , $\pm 150 \text{ mm}$ においては磁束密度 B_z が最大値となることが分かる。磁場解析も同様に、鉄筋3本を Y 軸方向の位置 0 mm , $\pm 150 \text{ mm}$ に 150 mm 間隔で設置し、正コイルおよび負コイルの位置は、1回目の着磁とのときは $(X, Y) = (0, -125), (0, -275)$ であり、5回目の着磁のときは $(X, Y) = (0, -25), (0, -175)$ であり、10回目の着磁のときは $(X, Y) = (0, 100), (0, -50)$ として解析を行った。着磁後の $(-300, -300) \leq (X, Y) \leq (300, 300)$ の範囲において Z 軸方向磁束密度分布を図3.10(a), (b), (c)に示すとともに、 $X=0$ 上の Z 軸方向の磁束密度分布を図3.11(a), (b), (c)に示す。鉄筋が配置されている Y 軸方向の位置 0 mm , $\pm 150 \text{ mm}$ においては Z 軸方向の磁束密度 B_z が最大値となることが分かる。これらの結果から、鉄筋をコンクリート表面からパルス着磁し、 Z 軸方向の磁束密度 B_z 分布を測定して磁束密度 B_z が最大値を示す位置に鉄筋が設置されていると推定できる。この磁場解析、実験においては2個のコイルを任意に移動して鉄筋の位置を推定する方法の確認を行った。次節においては鉄筋の推定を効率良く行う方法について詳述する。



(a) コイル位置(X, Y) = (0, -125), (0, -275) 時の磁束密度分布

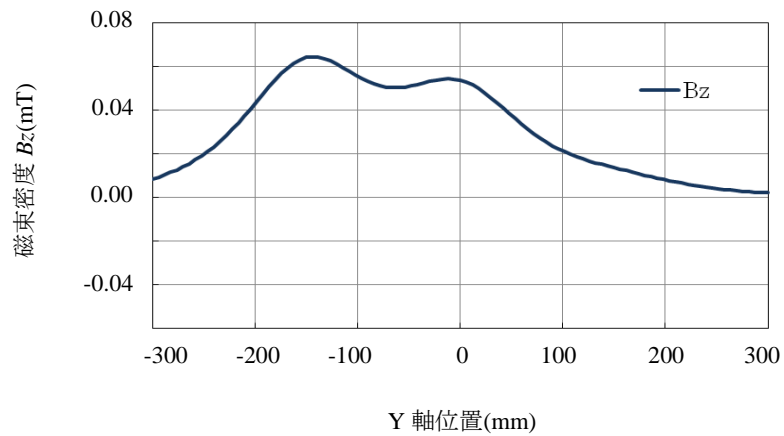


(b) コイル位置(X, Y) = (0, -25), (0, -175) 時の磁束密度分布

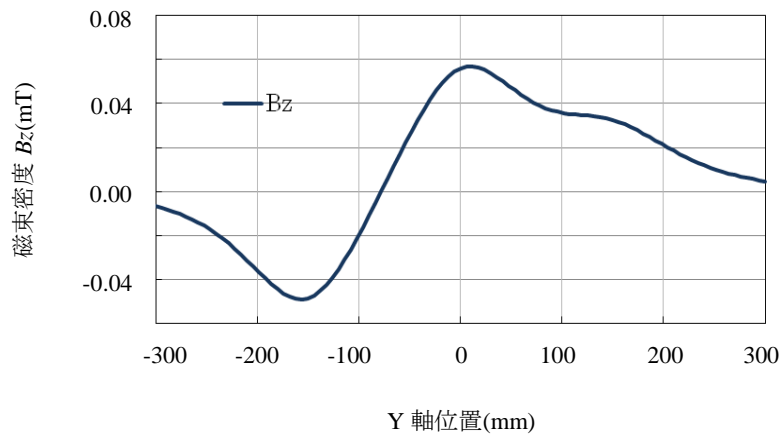


(c) コイル位置(X, Y) = (0, 100), (0, -50) 時の磁束密度分布

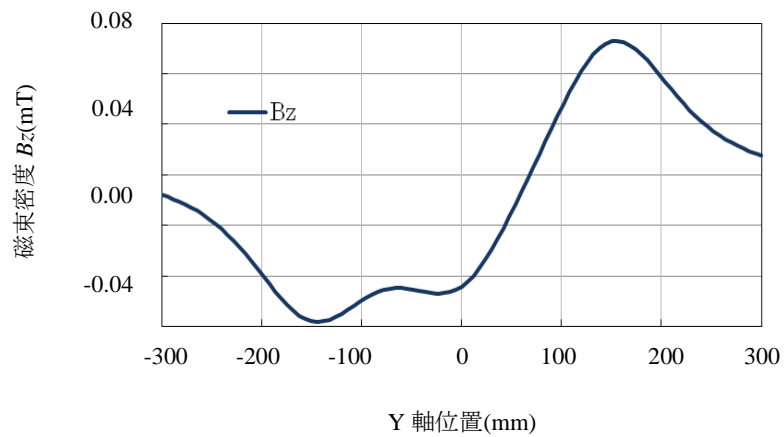
図 3.10 各位置での磁束密度分布 (解析)



(a) コイル位置(X, Y) = (0, -125), (0, -275) 時の磁束密度分布



(b) コイル位置(X, Y) = (0, -25), (0, -175) 時の磁束密度分布



(c) コイル位置(X, Y) = (0, 100), (0, -50) 時の磁束密度分布

図 3.11 各位置での磁束密度 B_z の分布 (解析)

3.3 最適な複数の鉄筋位置の推定法

3.3.1 鉄筋位置の推定法

複数鉄筋の位置を最少のパルス着磁回数にて推定する方法を提案する。その推定方法を以下に詳述する。図3.12(a) に示すように任意の位置にて鉄筋を着磁し、Z軸方向の磁束密度を測定する。図3.12(b)に示すようにその磁束密度の最大値の位置に第1の鉄筋が配置されていると推定する。次に、図3.12(c)に示すように磁束密度 B_z が最大値を示す位置を中心に極性が異なる2個の着磁コイルが等間隔になるように配置し、再度着磁を行なう。その後、Z軸方向の磁束密度分布を測定し、その最大値の位置に第2の鉄筋があると推定する。2個のコイルを用いて最低2回の着磁と磁束密度分布の測定により得られた第1の最大値を示す位置と第2の最大値を示す位置に鉄筋があると考え、最大値の位置とその間隔により鉄筋位置と間隔を推定する。

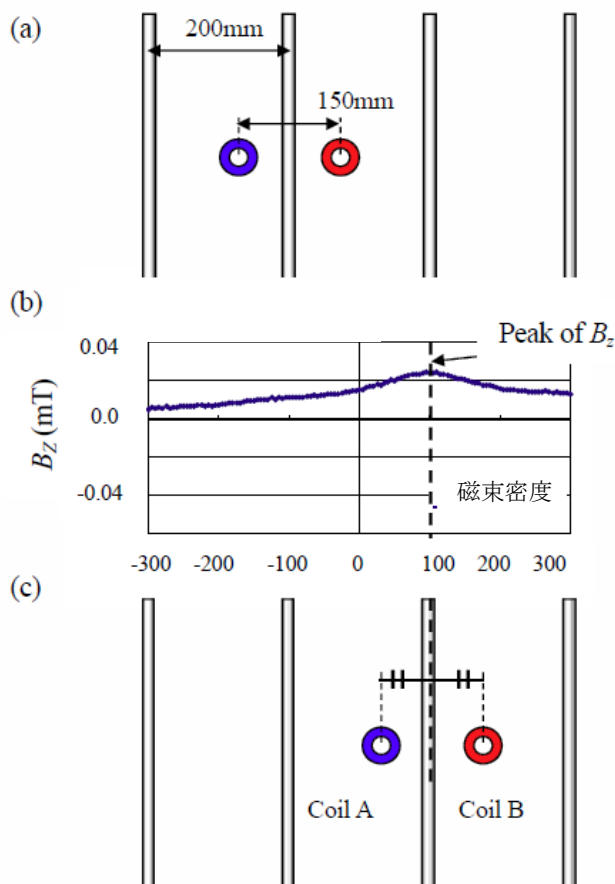


図 3.12 最適な鉄筋位置の推定法の順序

3.3.2 実験方法

鉄筋位置の推定法を確認するため図3.13示す構成により実験と磁場解析を行った。2個の着磁コイルの距離は150 mm固定として、鉄筋間隔が200mm, 175mm, 150mmの3パターンで確認を行った。鉄筋は直径25mm, 長さ1.0mを4本用いて行った。

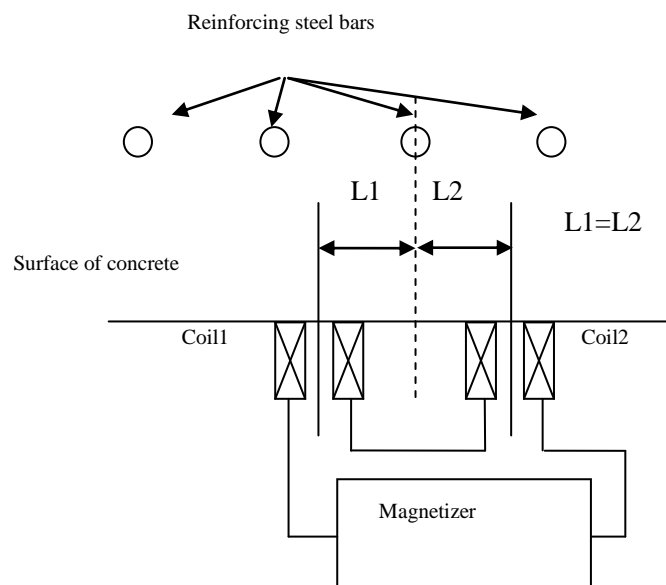


図 3.13 鉄筋位置推定における鉄筋とコイルの位置関係

3.3.3 位置推定の磁場解析結果と実験結果

(1) 鉄筋間隔 200mm の場合

鉄筋4本を等間隔200 mmとしてY軸方向の位置−300 mm, −100 mm, 100 mm, 300 mmに配置した。着磁コイルCoil 1のY軸方向の位置は100 mm, Coil 2は−50 mmの位置に配置して着磁を行い、着磁後のZ軸方向の磁束密度 B_z の分布を解析した。 $(-300, -300) \leq (X, Y) \leq (300, 300)$ の範囲においてZ軸方向の磁束密度分布の解析結果を図3.14に示す。X=0上のZ軸方向の磁束密度分布を図3.15に示す。その結果、鉄筋が位置する−100 mm, 100 mmが磁束密度 B_z の最大値となることが分かる。

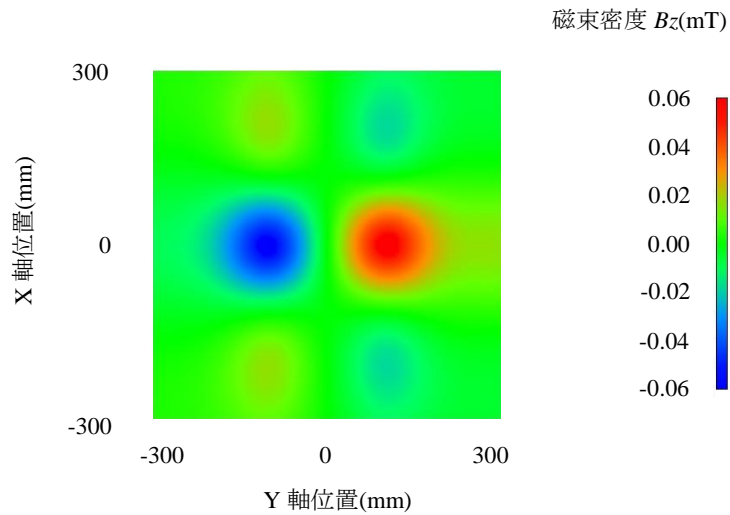


図 3.14 鉄筋間隔 200mm 時の磁束密度 B_z の分布

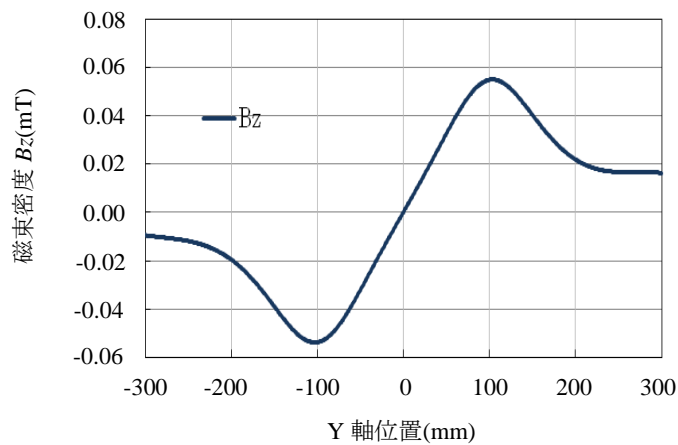


図 3.15 鉄筋間隔 200mm 時の X=0 における磁束密度 B_z

磁場解析を行った構成において実験により鉄筋の位置を推定することを試みた。着磁コイルは、鉄筋位置の推定を行なうため任意点に設置し着磁を行った。実験は、鉄筋直下に着磁コイルがある場合を想定し、Y軸方向において着磁コイルCoil 1は100 mm、Coil 2は-50 mmの位置に配置して着磁を行った。この結果、図3.16の1回目に示すように磁束密度 B_z の最大値はY軸110 mmにあり、Y軸110 mmが2個のコイルの中央となるようにCoil1を185 mm、Coil2を35 mmに配置して再度着磁を行った。その結果、図3.16 2回目に示すように磁束密度 B_z の最大値がY軸-95 mmとなった。2回の着磁により若干の誤差を有するが、鉄筋はY軸110 mmと-95 mmに存在し、鉄筋間隔は205 mmであると推定できる。

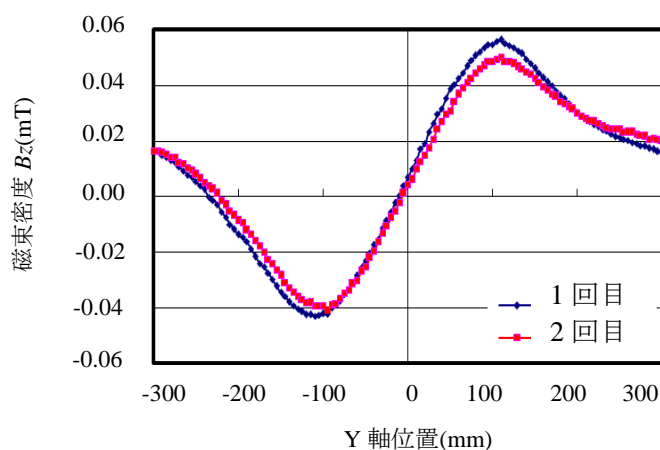


図 3.16 鉄筋間隔 200mm 時の $X=0$ における磁束密度 B_z

(2) 鉄筋間隔 175mm の場合

鉄筋間隔を175 mmした場合についてY軸方向の位置-250 mm, -75 mm, 100 mm, 275 mmに鉄筋を配置した。Y軸方向において着磁コイルCoil 1を0 mmにCoil 2を-150 mmの位置に配置して行った。着磁後のZ軸方向磁束密度 B_z の分布を解析した。 $(-300, -300) \leq (X, Y) \leq (300, 300)$ の範囲においてZ軸方向磁束密度分布の解析結果を図3.17に示す。X=0上のZ軸方向の磁束密度分布を図3.18に示す。その結果、鉄筋が位置する-275mm, 100 mmが磁束密度 B_z の最大値となることが分かる。

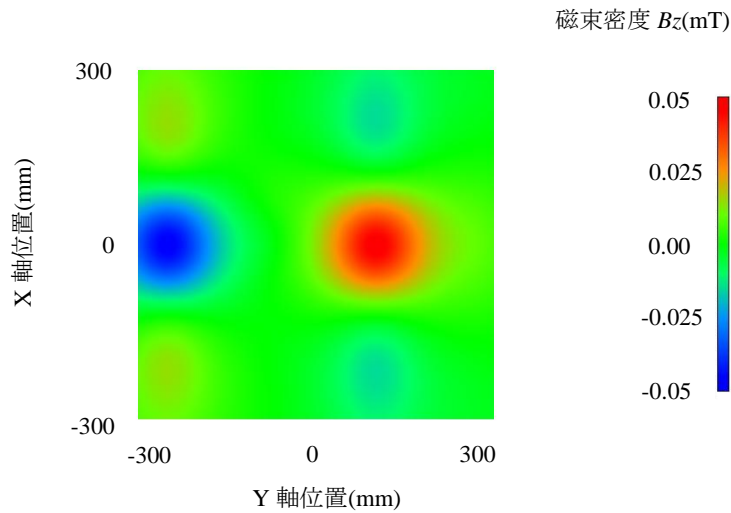


図 3.17 鉄筋間隔 175mm 時の磁束密度 B_z 分布

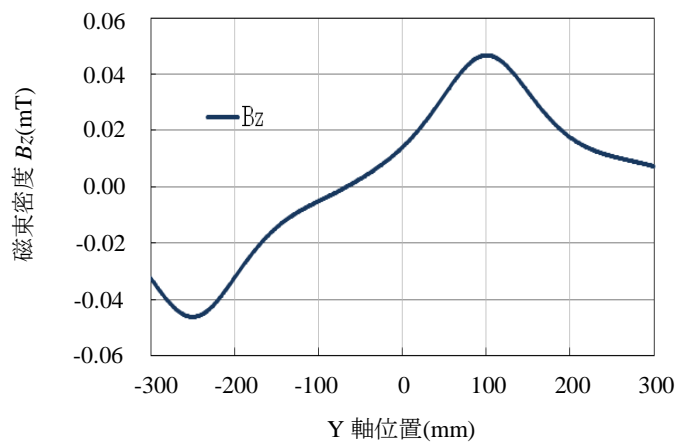


図 3.18 鉄筋間隔 175mm 時の X=0 における磁束密度 B_z

鉄筋間隔 200 mm の場合と同様に実験による磁束密度 B_z の測定結果を図 3.19 の 1 回目を示す。1 回目の着磁により最大値の位置は Y 軸方向 100 mm であり、2 回目は Coil1 を Y 軸 175 mm, Coil2 を Y 軸 25 mm に配置し着磁を行った。その結果、図 3.19 の 2 回目示すように磁束密度 B_z の最大値が Y 軸 -80 mm となった。2 回の着磁により若干の誤差を有するが、鉄筋は Y 軸 100 mm と -80 mm に存在し、鉄筋間隔は 180 mm であると推定できる。

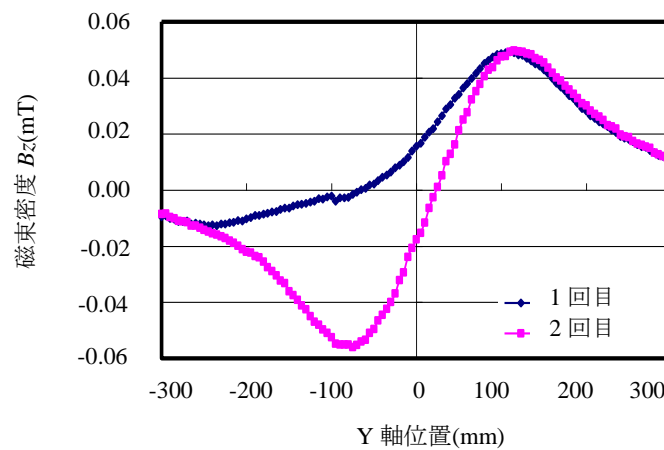


図 3.19 鉄筋間隔 175mm の $X=0$ における磁束密度 B_z

(3) 鉄筋間隔 150mm の場合

鉄筋間隔を150 mmした場合についてY軸方向の位置-200 mm, -50 mm, 100 mm, 250 mmに鉄筋を配置した。Y軸方向において着磁コイルCoil 1を200 mmにCoil 2を50 mmの位置に配置して行った。着磁後のZ軸方向磁束密度 B_z の分布を解析した。 $(-300, -300) \leq (X, Y) \leq (300, 300)$ の範囲においてZ軸方向磁束密度分布の解析結果を図3.20に示す。X=0上のZ軸方向の磁束密度分布を図3.21に示す。その結果、鉄筋が位置する-50mm, 250 mmが磁束密度 B_z の最大値となることが分かる。

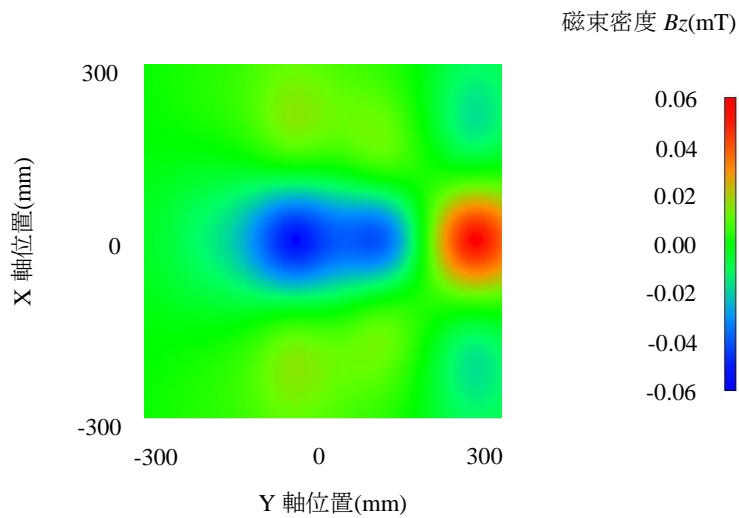


図 3.20 鉄筋間隔 150mm 時の磁束密度 B_z 分布

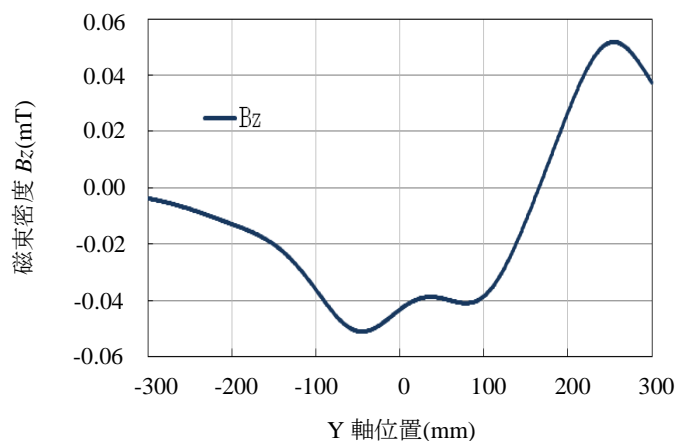


図 3.21 鉄筋間隔 150mm 時の X=0 における磁束密度 B_z

鉄筋間隔 200 mm の場合と同様に実験による磁束密度 B_z の測定結果を図 3.22 の 1 回目に示す。最大値の位置は Y 軸方向 -20 mm であり 2 回目は Coil 1 を Y 軸 -95 mm, Coil 2 を Y 軸 55 mm に配置し着磁を行った。その結果, 図 3.22 の 2 回目に示すように磁束密度 B_z の最大値が Y 軸 120mm となった。2 回の着磁により若干の誤差を有するが, 鉄筋は Y 軸 -20 mm と -120 mm に存在し, 鉄筋間隔は 140 mm であると推定できる。

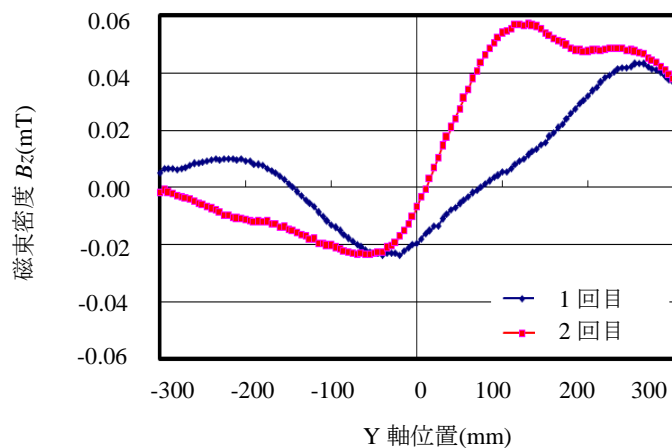


図 3.22 鉄筋間隔 150mm 時の $X=0$ における磁束密度 B_z

(4) 鉄筋位置推定の考察

鉄筋間隔を 200 mm, 175 mm, 150 mm と変えて、実験により着磁、磁束密度測定を行うことで鉄筋の位置と鉄筋間隔を推定することを試みた。鉄筋間隔 200 mm, 175 mm, 150 mm における各々の鉄筋位置の推定誤差を図 3.23 に示す。鉄筋位置は、200 mm, 175 mm において鉄筋間隔の推定誤差は 2~3% であり、150 mm において推定誤差が 7% 程度であった。本手法により鉄筋の位置を推定できることを確認した。今後、鉄筋間隔と誤差の関係とその要因について明確にして行く。

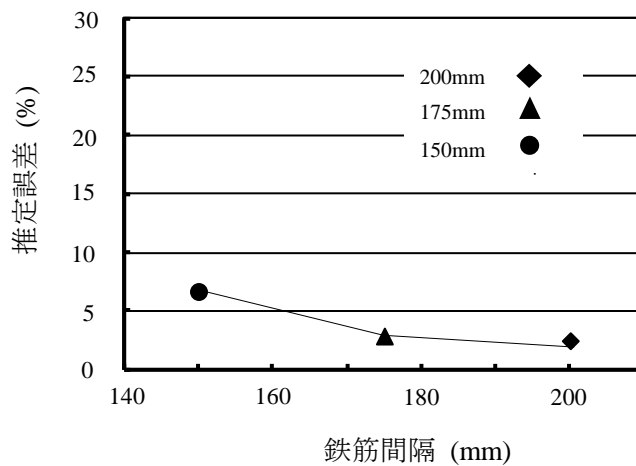


図 3.23 実験による鉄筋位置推定の誤差

3.4 まとめ

コンクリート表面からコンクリート内部の鉄筋をパルス着磁し、コンクリート表面において鉄筋の磁束密度分布を測定した。その結果、Z軸方向の磁束密度 B_z が鉄筋位置に最大値を示す特徴があることを確認した。複数鉄筋における鉄筋の位置・間隔を推定することは、鉄筋コンクリート構造物におけるかぶり厚を推定する上で重要な課題である。2個の着磁コイルを用いて順次移動しながら着磁と磁束密度の測定をすることで、鉄筋の位置を推定することが可能であることを確認した。しかしながら順次移動しての作業では効率が悪いため、2個の着磁コイルを用いて最低2回のパルス着磁と磁束密度 B_z の測定から鉄筋の位置・間隔を推定することが可能であることを実験と磁場解析により確認した。今後、様々な鉄筋の配置状態における鉄筋位置の推定法について研究を進める予定である。

第4章 パルス着磁を用いた複数鉄筋かぶり厚の推定

鉄筋をコンクリート表面からパルス着磁し、コンクリート表面における磁束密度の分布を測定することにより鉄筋の位置、かぶり厚、鉄筋の直径を推定する手法について研究を行なった。先に単独で配筋した鉄筋の位置、かぶり厚、直径は、磁束密度分布を測定し、鉄筋位置において磁束密度の方向が変わるところ、最大の磁束密度を示す点などの特徴点から推定する方式を提案した。さらに、複数配置された鉄筋を最適回数のパルス着磁を行い、その磁束密度分布から鉄筋の位置を推定する方式を提案した。次に、2個のコイルをコンクリート表面の鉄筋位置に配置し、異極と同極でパルス着磁を行い、各々に測定した磁束密度から複数配置された鉄筋のかぶり厚を推定する方式を提案する。かぶり厚推定方式を検証するため、磁場解析と実験によりかぶり厚を推定することを試みた。本章において、パルス着磁を用いた複数鉄筋におけるかぶり厚の推定法を提案し、その有効性を磁場解析と実験により確認したので報告する^[44,45]。

4.1 複数鉄筋におけるかぶり厚推定法

4.1.1 鉄筋の着磁方法と磁束密度測定

コンクリート表面から鉄筋を着磁し、コンクリート表面で磁束密度分布の測定を行うことから、鉄筋を十分に着磁するためパルス着磁法を用いた。パルス着磁に使用する着磁装置は、磁界を発生するための着磁コイルと着磁コイルにパルス状の電流を流すための着磁電源により構成される。着磁電源のコンデンサ容量は $2000\mu\text{F}$ であり、出力電圧 $50\text{V}\sim 1.5\text{kV}$ の調整により発生磁界を可変することが可能である。着磁コイルは、内径 30mm 、外径 118mm 、高さ 86mm 、 690 巻の空芯コイルを使用した。鉄筋の着磁は、着磁コイルに数 ms のパルス電流を通電して行った。本章において、コイル中心の磁束密度は数 T であり、透磁率は無視できコンクリート領域を空気領域と仮定した。パルス着磁法は、装置の小型化・低価格化を図ることができ、機器に組み込んで着磁が可能であるなど実用性があると考えている。コンクリート表面において鉄筋の初期の残留磁化に応じた磁束密度を測定する。鉄筋の残留磁化を取り除くため、必要に応じて着磁を行う前に消磁を行っている。磁束密度は、磁気感度 5.0V/mT 、感磁面 $1\text{mm}\times 2\text{mm}$ の磁気センサにより測定した。地磁気や外部磁気の影響は、あらかじめ測定した磁束密度値を減算することで除去している。

4.1.2 鉄筋のかぶり厚推定法

鉄筋のかぶり厚を推定する方法として、第1章では単独に配置された鉄筋をパルス着磁し、その磁束密度分布を測定し、Z軸方向の磁束密度とY軸方向の磁束密度を用いてかぶり厚を推定する方法を提案した。実際にはコンクリート内部には複数配筋されており、複数の鉄筋におけるかぶり厚推定方法について詳述する。複数の鉄筋位置は、最適な着磁回数により着磁を行い、磁束密度分布を測定し、Z軸方向の磁束密度 B_z が鉄筋位置において、最大値を示す特徴を用いて推定することが可能であることを確認した。複数鉄筋におけるかぶり厚の推定法を以下に詳述する。2本の鉄筋の直下に2つの着磁コイルを設置して行う。各鉄筋の直下にて図4.1(a), (b)に示すように着磁コイルから発生する磁界が逆方向（異極）の場合と同方向（同極）の場合の着磁を行い、それぞれの磁束密度分布を鉄筋間の中央点にて測定する。異極で着磁した場合及び、同極で着磁した場合における着磁後の磁束密度のベクトル図を図4.2に示す。Z軸方向の磁束密度 $B_{z1,2}$ 、Y軸方向の磁束密度 $B_{y1,2}$ とすると、異極で着磁した場合、図4.2(a)に示すようZ軸方向の磁束密度 $B_{z1,2}$ 、Y軸方向の磁束密度 $B_{y1,2}$ とすると、異極で着磁した場合、図4.2(a)に示すように B_{z1} と B_{z2} は打ち消し合い、 B_{y1} と B_{y2} は合成され、合成された磁束密度を B_y とする。また、同極で着磁した場合、図4.2(b)に示すように B_{y1} と B_{y2} は打ち消し合い、 B_{z1} と B_{z2} は合成され、合成された磁束密度を B_z とする。コンクリート表面から鉄筋中心までの距離 d_0 は、磁束密度 B_z 、 B_y および鉄筋から鉄筋間の中央点までの距離 y の関係より式(4.1) で表される。

$$d_0 = y \times B_z / B_y \quad (4.1)$$

ただし、

$$B_y = B_{y1} + B_{y2} \quad (4.2)$$

$$B_z = B_{z1} + B_{z2} \quad (4.3)$$

かぶり厚 d は、鉄筋の半径を差し引けば良く、式(4.2)で表される。

$$d = d_0 - \phi / 2 \quad (4.4)$$

ただし、 d : かぶり厚、 $\phi / 2$: 鉄筋の半径、とする。

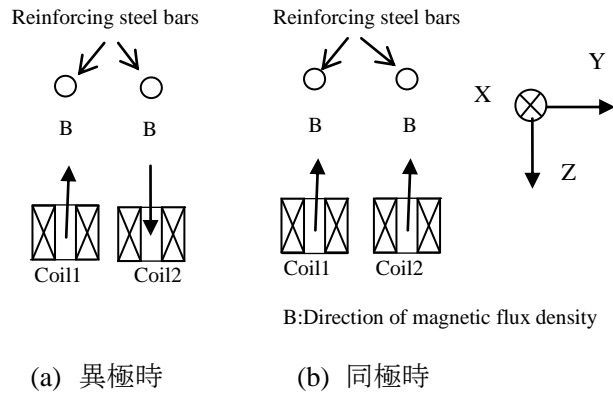


図 4.1 鉄筋かぶり厚推定のための着磁方法

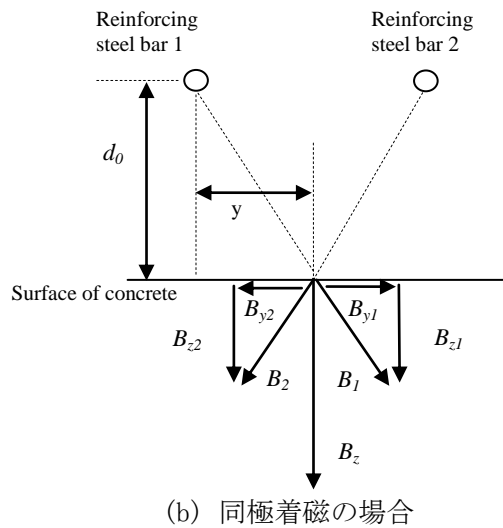
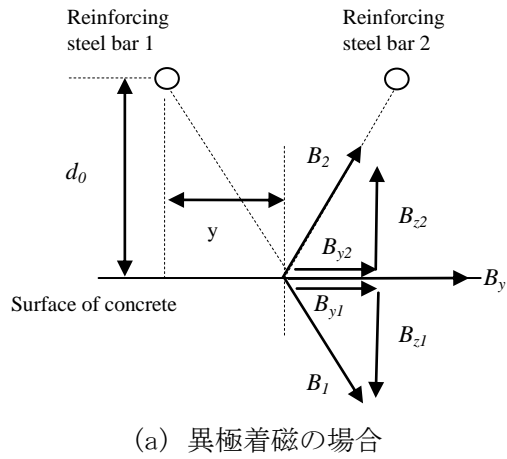


図 4.2 鉄筋かぶり厚推定方法の説明図

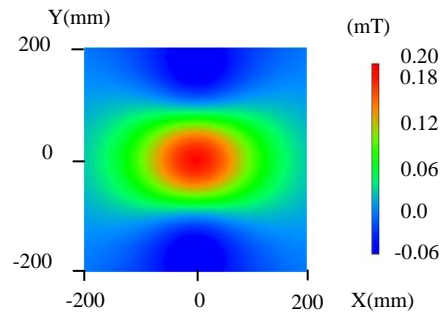
4.2 解析によるかぶり厚推定

4.2.1 解析方法

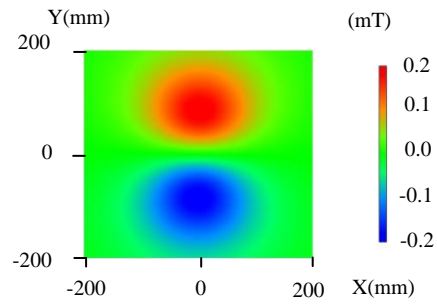
鉄筋のかぶり厚を推定するため、2本の鉄筋に対して異極着磁と同極着磁を行う。鉄筋の異極着磁後と同極着磁後にコンクリート表面における磁束密度を解析した。磁場解析ソフト JAMG を用いて行った。Z 軸方向の磁束密度 B_z の最大値が同じとなる様に、鉄筋の磁気特性は保磁力 7000A/m として着磁率、リコイル透磁率を任意に設定し静磁場解析を行った。鉄筋は長手方向に磁化され、鉄筋の着磁点においてはラジアル方向に磁束が発生する。かぶり厚 100mm にある鉄筋に対して2個の着磁コイルに 450A を通電して解析を行った。2本の鉄筋は長さ 1.0m, 直径 25mm, 鉄筋間隔を 150mm, 200mm, 250mm とした。鉄筋は、図 4.2 に示すように X 軸方向を鉄筋の長手方向とし、鉄筋間の中央点を Y 軸原点として2本配置した。X 軸原点は着磁点である。鉄筋間隔が 150mm の時は、Y 軸 -75mm と 75mm に鉄筋2本を配置した。解析領域は、鉄筋を中央部に配置し、X 軸方向 3m, Y 軸方向 2m, Z 軸方向 2m の空間であり、磁束密度分布は X 軸, Y 軸とも ± 200 mm の範囲を求めた。同様に鉄筋間隔 200mm の時は、Y 軸 -100mm と 100mm に鉄筋2本を配置し、250mm の時は、Y 軸 -125mm と 125mm に鉄筋2本を配置して解析を行った。

4.2.2 解析によるかぶり厚の推定結果

鉄筋間隔 150mm におけるコンクリート表面での磁束密度分布を図 4.3, 図 4.4 に示す。図 4.3(a), (b)は異極着磁における磁束密度 B_y , B_z をそれぞれ示し, 図 4.4(a), (b)は同極着磁における磁束密度 B_y , B_z をそれぞれを示す。横軸は X 軸方向, 縦軸は Y 軸方向を示し 400mm×400mm の平面における磁束密度分布を示す。異極で着磁した場合, 図 4.2(a)で示したように磁束密度 B_y は, 2 本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなることが分かる。磁束密度 B_z は, 逆に鉄筋の磁束密度が打ち消し合いゼロとなることが分かる。同極で着磁した場合, 図 4.2(b)で示したように磁束密度 B_y は, 2 本の鉄筋の磁束密度が打ち消し合いゼロとなることが分かる。磁束密度 B_z は, 逆に 2 本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなることが分かる。鉄筋間隔 200mm におけるコンクリート表面での磁束密度分布を図 4.5, 図 4.6 に示す。図 4.5(a), (b)は異極着磁における磁束密度 B_y , B_z をそれぞれ示し, 図 4.6(a), (b)は同極着磁における磁束密度 B_y , B_z をそれぞれを示す。鉄筋間隔 250mm におけるコンクリート表面での磁束密度分布を図 4.7, 図 4.8 に示す。図 4.7(a), (b)は異極着磁における磁束密度 B_y , B_z をそれぞれ示し, 図 4.8(a), (b)は同極着磁における磁束密度 B_y , B_z をそれぞれを示す。鉄筋間隔 200mm, 250mm とともに鉄筋間隔 150mm と同じで異極で着磁した場合, 磁束密度 B_y は, 2 本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなることが分かる。同極で着磁した場合, 磁束密度 B_z は, 逆に 2 本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなることが分かる。

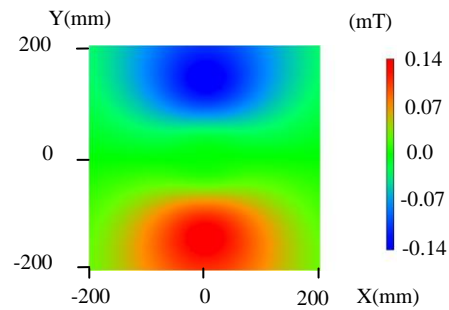


(a) 磁束密度 B_y の分布

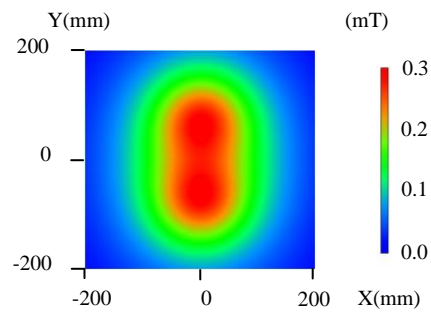


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.3 異極着磁 (鉄筋間隔 150mm)

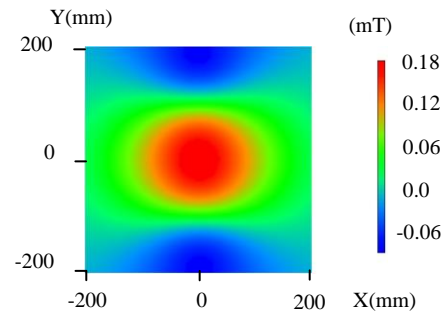


(a) 磁束密度 B_y の分布

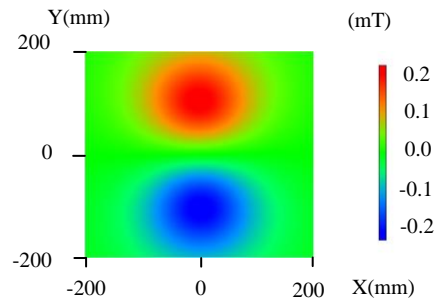


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.4 同極着磁 (鉄筋間隔 150mm)

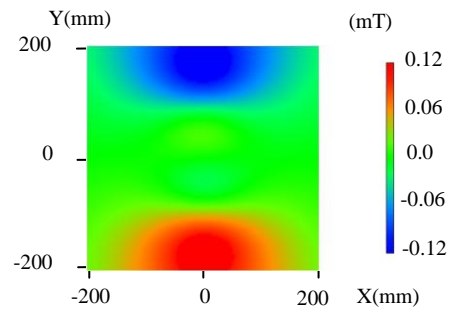


(a) 磁束密度 B_y の分布

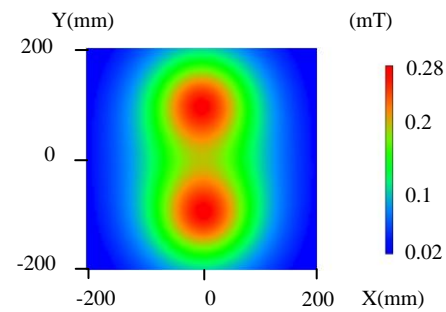


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.5 異極着磁 (鉄筋間隔 200mm)

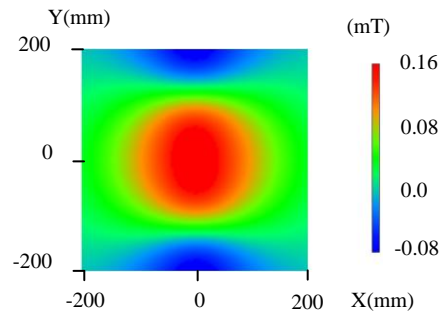


(a) 磁束密度 B_y の分布

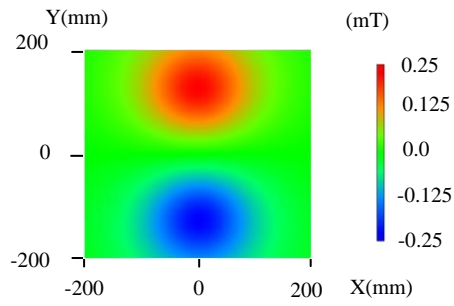


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.6 同極着磁 (鉄筋間隔 200mm)

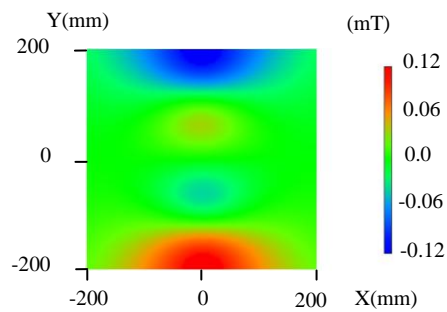


(a) 磁束密度 B_y の分布

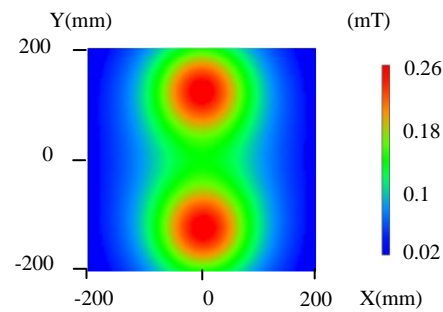


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.7 異極着磁 (鉄筋間隔 250mm)



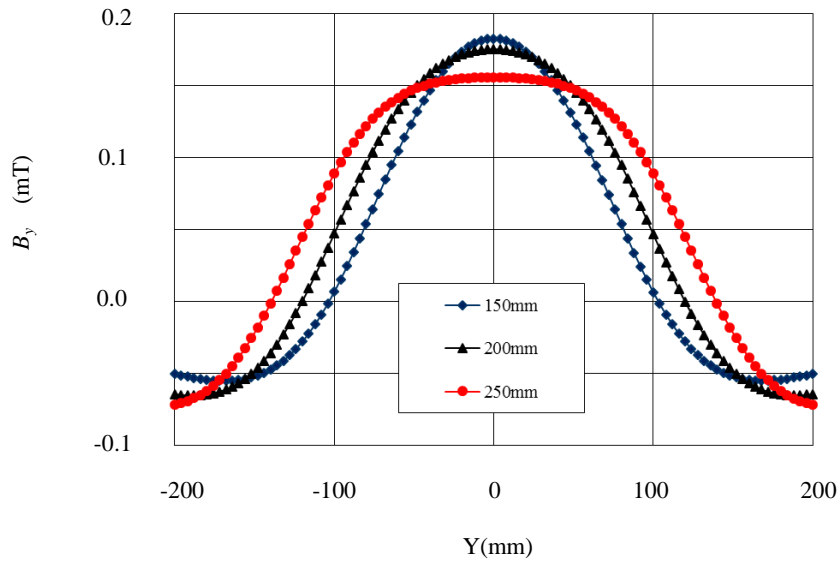
(a) 磁束密度 B_y の分布



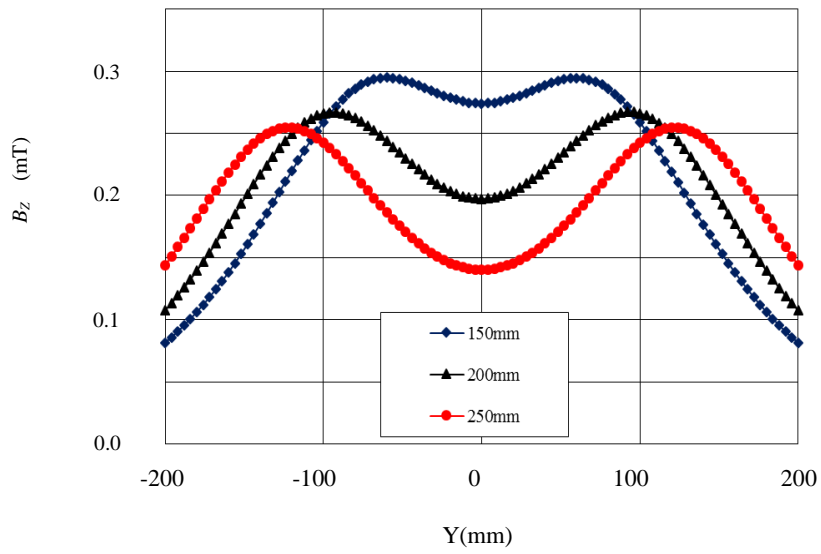
(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.8 同極着磁 (鉄筋間隔 250mm)

鉄筋間隔 150mm, 200mm, 250mm において鉄筋中心における Y 軸方向 -200~200mm までの磁束密度分布を図 4.9 に示す。図 4.9(a)は異極着磁後における磁束密度分布 B_y を示し、図 4.9(b)は同極着磁後における磁束密度分布 B_z を示す。鉄筋間の中央点における磁束密度(B_y, B_z)は、鉄筋間隔 150mm 時に(0.182mT, 0.274mT), 200mm 時に(0.175mT, 0.197mT), 250mm 時に(0.156mT, 0.140mT) であり、これらの磁束密度と鉄筋から測定位置までの距離 y を用いて式(4.1)に基づき鉄筋までの距離 d の推定し、鉄筋の半径 12.5mm を減算してかぶり厚を推定した。測定は、2本の鉄筋間の中央点で行っており、鉄筋から測定位置までの距離 y は、鉄筋間隔 150mm, 200mm, 250mm に対してそれぞれ 75mm, 100mm, 125mm である。推定したかぶり厚と鉄筋間隔の関係を図 4.10 に示す。鉄筋間隔 150mm, 200mm, 250mm においてかぶり厚 100mm を精度良く推定することが可能であることが分かる。この結果、鉄筋直下において同極と異極で着磁し、その磁束密度 B_y, B_z の測定結果と鉄筋から測定点までの距離 y を用いて式(4.1), (4.4)により鉄筋のかぶり厚を推定できることを確認した。



(a) 異極着磁の磁束密度 B_y の分布



(b) 同極着磁の磁束密度 B_z の分布

図 4.9 磁束密度 B_y, B_z の分布 (解析)

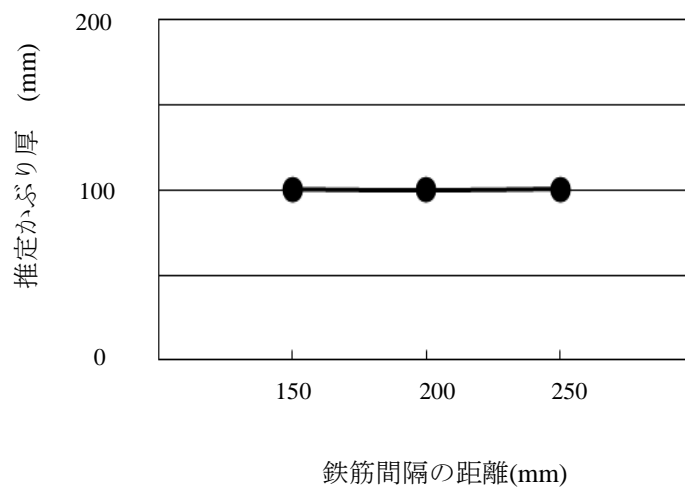


図 4.10 かぶり厚 (解析)

4.3 かぶり厚推定実験

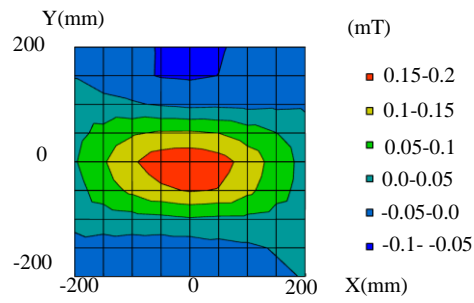
4.3.1 実験方法

次に、実際に鉄筋を着磁し磁束密度分布からかぶり厚を推定する実験を行った。実験に用いた鉄筋は、直径 25mm の異形鉄筋 2 本を用い、かぶり厚 100mm を想定し、コンクリートは空気と仮定して実験を行った。鉄筋間隔は、磁場解析を行った 150mm, 200mm, 250mm とした。着磁条件は、着磁電圧 1500V, コンデンサ容量 2000 μ F により着磁した。着磁はコイル 2 個を使用して行った。2 本の鉄筋は、かぶり厚 100mm に相当する位置に、各鉄筋間隔に非磁性材であるベーク板の上に設置した。異極着磁の場合、鉄筋 2 本の直下にコイルを配置し、コイルの発生磁場が異極となるようにパルス電流を通電して着磁を行った。また同極着磁の場合、鉄筋 2 本の直下にコイルを配置し、コイルの発生磁場が同極となるようにパルス電流を通電して着磁を行った。これらの 2 本の鉄筋は、非磁性材であるベーク板の上に設置してあり、コンクリート表面に相当する 100mm 離れた位置において磁気センサを走査して磁束密度を測定し、かぶり厚推定を行った。

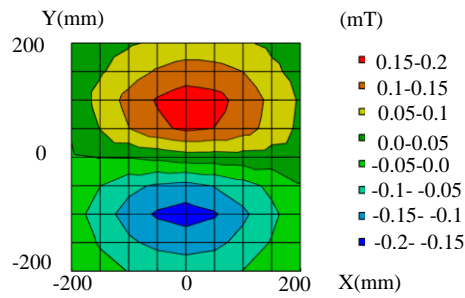
4.3.2 実験結果

磁場解析より得られた磁束密度分布と比較するため実験で得られた鉄筋間隔 150mm におけるコンクリート表面に相当する位置での磁束密度分布を図 4.11, 4.12 に示す。図 4.11(a), (b)は異極着磁による磁束密度 B_y, B_z をそれぞれ示す。解析結果と同様に磁束密度 B_y は、2 本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなり、磁束密度 B_z は、逆に鉄筋の磁束密度が打ち消し合いほぼゼロとなっている。図 4.12(a), (b)は同極着磁による磁束密度 B_y, B_z をそれぞれ示す。解析結果と同様に磁束密度 B_y は、2 本の鉄筋の磁束密度が打ち消し合いほぼゼロであり、磁束密度 B_z は、逆に 2 本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなっている。鉄筋間隔 200mm におけるコンクリート表面に相当する位置での磁束密度分布を図 4.13, 4.14 に示す。図 4.13(a), (b)は異極着磁における磁束密度 B_y, B_z をそれぞれ示す。図 4.14(a), (b)は同極着磁における磁束密度 B_y, B_z をそれぞれ示す。鉄筋間隔 250mm におけるコンクリート表面に相当する位置での磁束密度分布を図 4.15, 4.16 に示す。図 4.15(a), (b)は異極着

磁における磁束密度 B_y, B_z をそれぞれ示す。図 4.16(a), (b) は同極着磁における磁束密度 B_y, B_z をそれぞれ示す。実験結果は、磁場解析結果と同様の分布傾向を示していることを確認した。

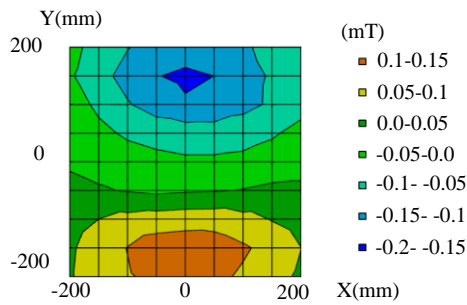


(a) 磁束密度 B_y の分布

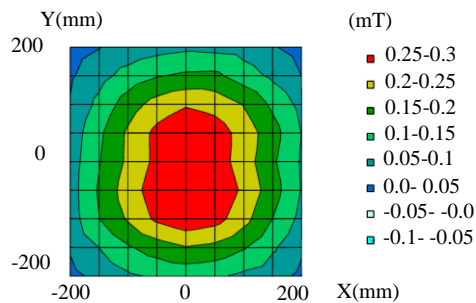


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.11 鉄筋間隔 150mm における異極着磁による磁束密度分布 (実験)

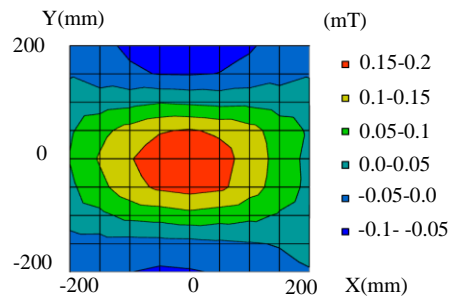


(a) 磁束密度 B_y の分布

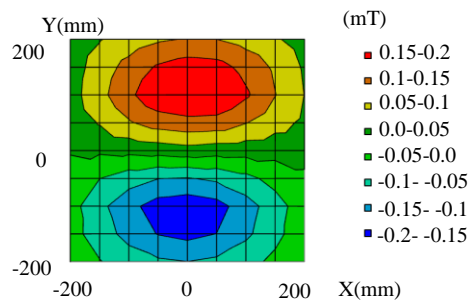


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.12 鉄筋間隔 150mm における同極着磁による磁束密度分布 (実験)

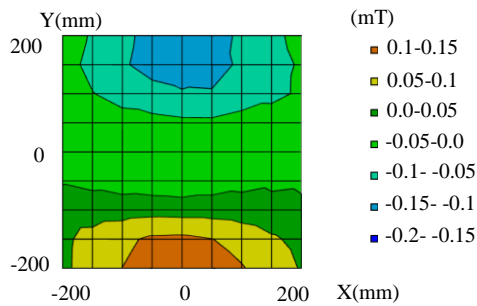


(a) 磁束密度 B_y の分布

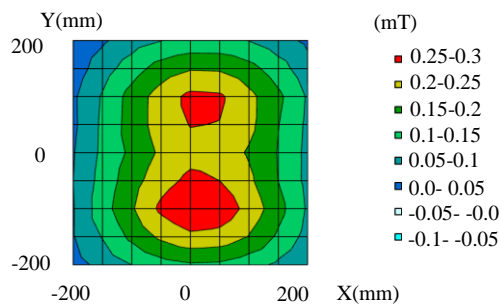


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.13 鉄筋間隔 200mm における異極着磁による磁束密度分布 (実験)

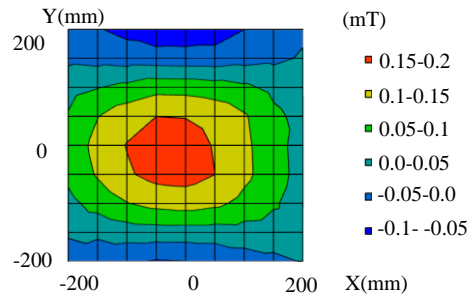


(a) 磁束密度 B_y の分布

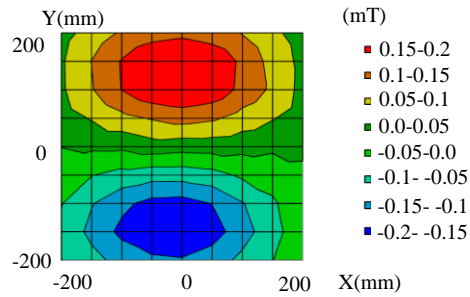


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.14 鉄筋間隔 200mm における同極着磁による磁束密度分布 (実験)

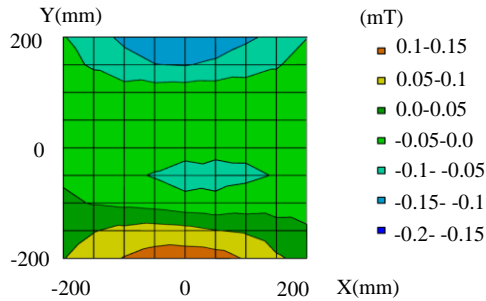


(a) 磁束密度 B_y の分布

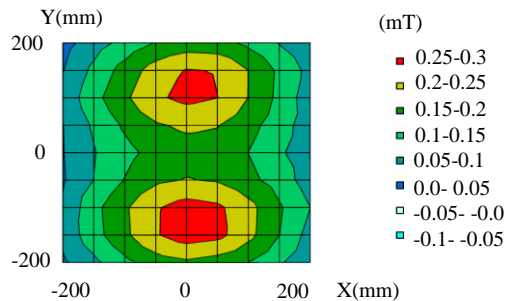


(b) 磁束密度 B_z の分布

図 4.15 鉄筋間隔 250mm における異極着磁による磁束密度分布 (実験)



(a) 磁束密度 B_y の分布

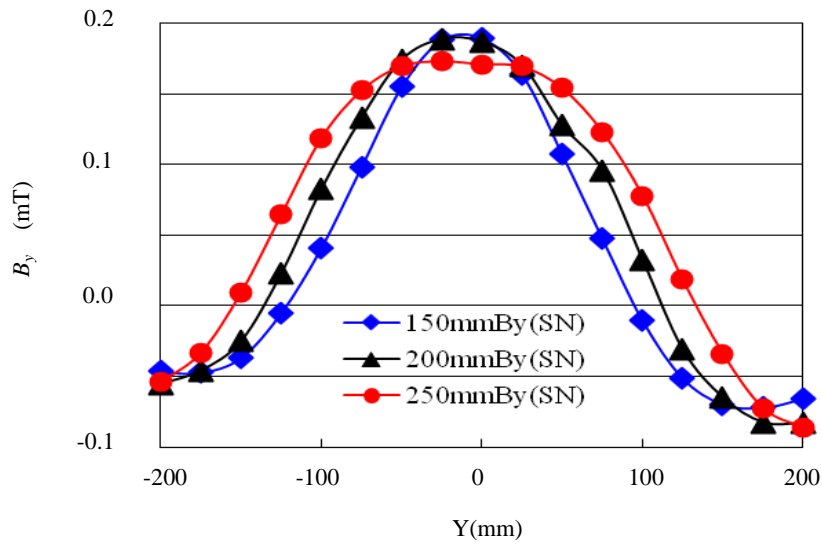


(b) 磁束密度 B_z の分布

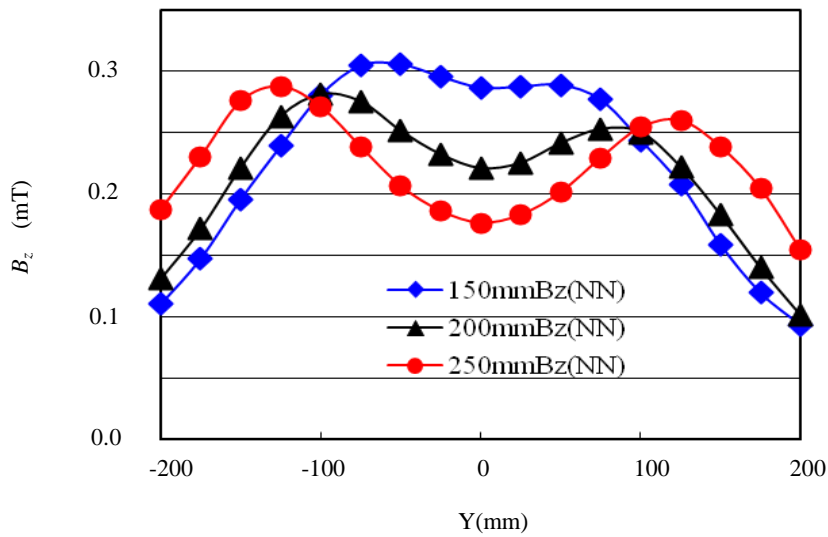
図 4.16 鉄筋間隔 250mm における同極着磁による磁束密度分布 (実験)

鉄筋間隔 150mm, 200mm, 250mm における鉄筋中央部での実験で得られた磁束密度分布を示す。

図 4.17(a)は、鉄筋を 2 本同時に異極となるように着磁した場合の磁束密度 B_y の分布を示す。磁場解析結果と比較すると 150mm と 200mm のピーク値の差異が小さいようであるが、実験結果は磁場解析結果と同様の傾向を示している。図 4.17(b)は、鉄筋を 2 本同時に同極となるように着磁した場合の磁束密度 B_z の分布を示す。磁場解析結果と比較すると、それぞれの鉄筋間隔での実験による磁束密度分布は、磁場解析結果を再現している。また、鉄筋位置付近でピーク値を示し、2 本の鉄筋のピーク値はほぼ一致している。実験により測定した異極着磁による磁束密度 B_y と同極着磁による磁束密度 B_z 、及び鉄筋から測定位置までの距離 y を用いて 式(4.1), (4.4)に基づき鉄筋の半径 12.5mm を減算してかぶり厚 d の推定を行った。その結果、かぶり厚と鉄筋間隔の関係を図 4.18 に示す。この結果、かぶり厚の推定値は実測 100mm に対して数 mm の誤差を有する。かぶり厚推定を行った誤差は、測定誤差によるものであると推測するが、本方式によりかぶり厚を推定することができることを確認した。



(a) 異極着磁による磁束密度 B_y の分布



(b) 同極着磁による磁束密度 B_z の分布

図 4.17 磁束密度 B_y, B_z の分布 (実験)

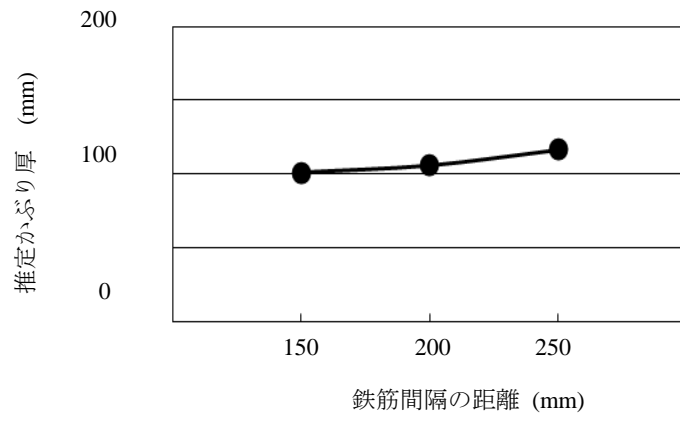


図 4.18 かぶり厚 (実験)

4.4 まとめ

鉄筋コンクリート構造物において劣化診断を行ううえで、鉄筋のかぶり厚を推定することは重要である。パルス磁界を用いて鉄筋の位置を推定する手法を提案し、本章において鉄筋の位置を推定した後にパルス着磁を用いてかぶり厚を推定する方法を提案した。位置が既知である2本の鉄筋の直下に2個のコイルを配置し、異極で着磁し磁束密度 B_y を測定する。更に同極で着磁し磁束密度 B_z を測定する。測定した磁束密度 B_y, B_z 用い、本方式により鉄筋のかぶり厚を推定できることを磁場解析および実験により確認した。今後、効率良くかぶり厚を推定できる様に改良を加えるとともに、メッシュ構造の配筋状態におけるかぶり厚の推定、さらに測定精度向上について基礎研究を行っていく予定である。

第5章 結論

5.1 本研究の総括

第2章において、単独鉄筋における鉄筋のかぶり厚・直径を推定するため鉄筋の着磁方向、磁束密度測定装置の検討、着磁特性の評価を試みた。コンクリートからの着磁にパルス着磁法を用いることでその可能性を見出し、着磁後に鉄筋の残留磁束密度をコンクリート表面における漏洩磁束密度として測定可能であることを確認した。測定した各方向の磁束密度 B_x , B_y , B_z の分布から鉄筋の状態を評価する方法を提案した。鉄筋の直径と着磁距離によって鉄筋の着磁に再現性があることを確認した。また、鉄筋を着磁して、その磁束密度分布を測定することで鉄筋の位置を推定し、鉄筋の直径、かぶり厚を推定することができることを確認した。

第3章において、コンクリート表面からコンクリート内部の鉄筋をパルス着磁し、コンクリート表面において鉄筋の磁束密度分布を測定した。その結果、Z軸方向の磁束密度 B_z が鉄筋位置に最大値を示す特徴があることを確認した。複数鉄筋における鉄筋の位置・間隔を推定することは、鉄筋コンクリート構造物の劣化診断を行なう上で重要な課題である。2個の着磁コイルを用いて最低2回のパルス着磁と磁束密度 B_z の測定から鉄筋の位置・間隔を推定することが可能であることを実験と磁場解析により確認した。

第4章において、鉄筋が複数設置された場合におけるかぶり厚の推定方法を提案した。第3章にて複数鉄筋の位置を推定することが可能であり、位置が既知である2本の鉄筋の直下に2個のコイルを配置し、異極で着磁し磁束密度 B_y を測定する。更に同極で着磁し磁束密度 B_z を測定する。異極時と同極時それぞれに測定した磁束密度 B_y , B_z と測定位置の情報により、複数の鉄筋が設置された場合におけるかぶり厚を推定できることを磁場解析および実験により確認した。

5.2 今後の課題

今後の課題として、本手法によるデータの蓄積を行い、評価の信頼性を図ることが挙げられる。効率良くかぶり厚を推定できる様に改良を加えるとともに、メッシュ構造の配筋状態におけるかぶり厚の推定、さらに測定精度向上について基礎研究を行っていく予定である。更に既に実用的に使用されている電磁波レーダ法、電磁誘導法での測定に対して本手法の優位性を明確にし、様々なコンクリート構造物での調査の一手法として確立して行く必要がある。計測器として外部環境のノイズ（鉄道、送電などによる外部磁場の影響）、磁気センサをスキャンニングする場合の駆動系の磁気ノイズへの対策など実用化に向けた評価・検証を行う必要があると考えている。実用化に向けて基礎実験と並行して実用試験と製品化設計を行う予定である。

謝辞

本論文は、著者が九州工業大学工学府博士後期課程 先端機能システム工学専攻において「パルス着磁を用いた鉄筋コンクリートの鉄筋位置とかぶり厚の推定に関する研究」に関して纏めたものである。本研究の遂行にあたって懇切なるご指導とご鞭撻を頂きました九州工業大学工学府先端機能システム工学研究系小森望充教授に心からの感謝の意を表し、厚く御礼を申し上げます。

本論文を纏めるにあたり数々な有益なご教示と懇切丁寧なるご指導を賜りました九州工業大学工学府先端機能システム工学研究系本田崇教授，九州工業大学工学府先端機能システム工学研究系大門秀朗准教授，九州工業大学工学府建設社会工学研究系日比野誠准教授，九州工業大学工学府先端機能システム工学研究系坂井伸朗准教授に深く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり，数々のご協力を頂きました九州工業大学工学府先端機能システム工学小森研究室の院生ならびに卒業生の皆様に心から感謝致します。

参考文献

- [1] 一般社団法人建設業振興基金, 工種別技術史(鉄筋コンクリート編), <http://www.shinko-web.jp/recall/000218.html>
- [2] 依田彰彦, 著名な鉄筋コンクリート造建物の耐久性診断を経験して, 非破壊検査, Vol.57, No.2, pp.54-57, 2008
- [3] 魚本健人, 加藤佳孝, コンクリート構造診断工学, オーム社, pp.1-10, pp.64-88, 2000
- [4] 魚本健人, 加藤潔, 広野進, コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, pp.6-20, 2000
- [5] 笠井芳夫, コンクリート構造物への非破壊検査の展開, コンクリートの非破壊試験・検査の進展状況, 非破壊検査, Vol.56, No.2, pp.77-83, 2007
- [6] 森濱和正, 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査 (1) 共同研究の内容と成果の概要, 非破壊検査, Vol.58, No.4, pp.126-131, 2009
- [7] T.Uomoto, Non-Destructive Testing In Civil Engineering 2000, published by Elsevier, pp. 615-678, 2000
- [8] 飯田洋志, 松本功, 久富真悟, 森濱和正, 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査 (2) 非破壊試験によるコンクリート構造物の鉄筋かぶり厚さの測定, 非破壊検査, Vol.58, No.4, pp.132-137, 2009
- [9] 高鍋雅則, 橋本光男, 鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案, 非破壊検査, Vol.52 No.11, pp.628-632, 2003
- [10] 吉兼亨, コンクリートのおはなし, 財団法人日本規格協会, pp.13-29, 2005
- [11] 武蔵工業大学工学部都市工学科, もっと知りたいコンクリート講座 <http://c-pc8.civil.teu.ac.jp/RC/story/story01.htm>
- [12] 化工建設株式会社, コンクリート構造物の劣化原因 <http://www.kako-ken.co.jp/kouhou/11-2/>
- [13] 国土交通省大臣官房技術調査課, 非破壊試験によるコンクリート構造物中の配筋状態及びかぶり測定要領, 2014
- [14] 藤岡宇太郎, コンクリート構造物の鉄筋破断検知方法, 公開特許公報, 特開 2005-003405
- [15] 戸田建設, 三井金属資源開発, 西松建設, 鉄筋コンクリートの健全性判定装置, 公開特許公報, 特開 2001-194341,
- [16] 森濱和正, 飯田洋志, 松本功, 久富真悟, レーダ法, 電磁誘導法によるかぶり厚さ推定方法に関する検討, シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.3, pp.217-224, 2009
- [17] 高鍋雅則, 長岡康之, 橋本光男, 三田紀行, パルス電磁力音響法を用いた鉄筋かぶり深さの検討, シンポジウム コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集, Vol.2, pp.233-236, 2006
- [18] 田中正吾, 岡本昌幸, 電磁波レーダを用いた鉄筋の腐蝕厚計測 (第二報), 日本非破壊検査協会, 平成 21 年度春季大会講演概要集, pp.157-160, 2009
- [19] S. Tanaka, M. Wakabayashi, On Measurement of the Depth and the Diameter of Steel Bars in Reinforced Concrete Using Electromagnetic Wave (Radar), SICE-ICASE International Joint Conference, No. 18-21, pp. 2555-2559, 2006
- [20] 松田耕作, 廣瀬誠, 横田優, 前田龍己, 電磁波レーダ法による鉄筋かぶり厚さの測定方法の高精度化, シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.229-236, 2012
- [21] 中野英, 佐藤孝一, 大沼薫春, 非破壊試験による鉄筋のかぶり厚さ測定方法に検討, シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.3, pp.225-230, 2009
- [22] 中野英, 佐藤孝一, 大沼薫春, 電磁誘導法による鉄筋かぶり厚さ測定技術に関する実験的検討, シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.13-16, 2012
- [23] S.S.Hubbard, Zhang J., Monteiro P.J.M., Petron J.E., Rubin Y., Experimental detection of reinforcing bar corrosion using nondestructive geophysical techniques, ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 6, pp. 501-509, 2003
- [24] M.R.Shaw, Millard S.G., Molyneaux T.C.K., Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks, NDT & E International, Vol. 38, No. 3, pp. 203-212, 2005.
- [25] Y.Bissessur, C.Bhurtun, Imaging of steel reinforcement bars using planar electromagnetic induction tomography, IEEE 3rd International Conference on Computational Cybernetics, Vol.13-16, pp. 255 -258, 2005

- [26] 西田敬, 大下英吉, 電磁波反射強度に着目した鉄筋かぶり厚さ・径の非破壊検査手法に関する研究, シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.237-242, 2012
- [27] Humboldt Mfg., <http://www.humboldtmfg.com/pdf/Profoscope-Brochure.pdf>
- [28] ElcometerInc., http://www.elcometer.com/pv/technicalpapers/Reprints/Concrete_Covermeter_LectureNotesP92.htm
- [29] P. Gaydecki, B. Fernandes, S. Quek, D. Benitez, G. Miller, M. Zaid, Inductive and magnetic field inspection systems for rebar visualization and corrosion estimation in reinforced and pre-stressed concrete, *Nondestructive Testing and Evaluation* published by Taylor & Francis, Vol.22, No.4, pp. 255-298, 2007
- [30] G.Miller, P.Gaydecki, S.Quek, B.Fernandes, M.Zaid, Detection and imaging of surface corrosion on steel reinforcing bars using a phase-sensitive inductive sensor intended for use with concrete, *NDT and E International*, Vol. 36, No. 1, pp. 19-26(8), 2003
- [31] 星島一輝, 中田成幸, 木村建次郎, 美馬勇輝, コンクリート中の鉄筋の磁気イメージング, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.5, pp.337-340, 2015
- [32] D.S.Benitez, S.Quek, P.Gaydecki, Efficient image enhancement algorithm for images of steel reinforcing bars in concrete obtained by a new solid-state sensor-based system, *Science, Measurement & Technology, IET Vol. 1, No. 5*, pp. 255-260, 2007
- [33] D.S.Benitez, Quek Sung, P.Gaydecki, V.Torres, A 1-D Solid-State-Sensor-Based Array System for Magnetic Field Imaging of Steel Reinforcing Bars Embedded Within Reinforced Concrete, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 9, pp. 3335-3340, 2009
- [34] J. Makar, R. Desnoyers, *Magnetic Field Techniques for The Inspection of Steel under Concrete Cover*, *NDT and E International*, Vol. 34, pp. 445-456, 2001.
- [35] J. Mietz, J. Fischer, Evaluation of NDT methods for detection of prestressing steel damage at post-tensioned concrete structures, *Materials and Corrosion*, Vol. 58, pp. 789-794, 2007
- [36] 小森望充, 堀充孝, 深川卓哉, パルス着磁を用いた鉄筋のかぶりと直径の新しい評価方法, *日本 AEM 学会誌*, Vol. 19, No. 1, pp. 63-67, 2011
- [37] M. Hori, R. Sana, M. Komori, Proposal of non-destructive evaluation method for reinforcing steel bars by using pulsed-magnetization, *International Conference Electrical Engineering (Hong Kong , July, 2011)* pp. 1-6
- [38] 佐川真人, 浜野正昭, 平林眞, 永久磁石-材料科学と応用-, アグネ技術センター, pp.424, 2007
- [39] 俵好夫, 大橋健, 希土類永久磁石, 森北出版, pp.64, 1999
- [40] 近角聡信, 磁気, 共立出版, pp.136-162, 1968
- [41] 堀充孝, 眞 亮介, 小森望充, パルス着磁による鉄筋位置の推定法, *日本 AEM 学会誌*, Vol. 21, No. 2, pp. 176-181, 2013
- [42] M. Hori, R. Sana, M. Komori, Estimation Method of the Positions of Reinforcing Steel Bars by using Pulsed-Magnetization, *International Conference Electrical Engineering (Hong Kong , July, 2013)* pp.1-6
- [43] M. Hori, R. Sana, M. Komori, Estimation Method of the Positions of Reinforcing Steel Bars by using Pulsed-Magnetization, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, Vol.4, No.4, pp.315-318, 2014
- [44] M. Hori, R. Sana, M. Komori, Depth Estimation of Reinforcing Steel Bars by Using Pulsed-magnetization, *International Conference Electrical Engineering (Hong Kong, July, 2011)*, pp. 1-6.
- [45] 堀充孝, 眞 亮介, 小森望充, パルス着磁を用いた複数鉄筋かぶり厚の推定, *産業応用工学会論文誌*, Vol. 4, No. 1, pp. 7-13, 2016