

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560445

研究課題名(和文) 電磁波レーダの高性能化とコンクリート診断への適用

研究課題名(英文) Improvement of radar and application to concrete diagnosis

研究代表者

田中 俊幸 (TANAKA TOSHIYUKI)

長崎大学・生産科学研究科・准教授

研究者番号：50202172

研究成果の概要(和文)：ここでは、電磁波を利用した非破壊検査が議論されている。研究内容は以下の4つに大別される。すなわち(1)市販のコンクリートレーダを利用した鉄筋のかぶりと半径およびコンクリートの比誘電率の同時推定の検討、(2)フレッシュコンクリートの水、セメント、細骨材の配合比並びに塩分含有量の診断方法の確立、(3)遺伝的アルゴリズムを利用した並列鉄筋、垂直2鉄筋の検出、(4)電磁波逆散乱問題の解法の一つであるFBTS法を用いたコンクリート中の空洞探査、である。

研究成果の概要(英文)：The nondestructive testing using the electromagnetic wave is discussed. These are divided roughly into the following four：(1) Examination of simultaneous estimation of position and radius of reinforcing bar and relative permittivity of concrete using commercially concrete radar, (2) Establishment of diagnostic approach of fresh concrete, (3) Detection of parallel reinforcing bars and two vertical reinforcing bars using genetic algorithm, (4) Inquiry of cave into concrete structure using FBTS method that is one of methods of inverse scattering problem.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,500,000	5,000,000

研究分野：電磁波工学

科研費の分科・細目：土木工学 ・ 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：電磁波レーダ、非破壊検査、鉄筋探査、コンクリート診断

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の維持管理の重要性が高まっており、とくに健全度診断やそのための非破壊試験技術が望まれている。コンクリート構造物の非破壊検査法として弾性波法、超音波法、電磁波レーダ法、赤外線法、デジタルカメラ法などがある。これらは探査目的によって使い分けられているが、何れ

の方法に対しても十分な診断精度が得られているとは言い難く、正確な検査をするためには円柱コアを採取して検査する部分的破壊検査が行われている。しかし、建物全体を検査する場合に、無数の円柱コアを採取することは現実的でない。

従来技術にも電磁波レーダ法によるコンクリート中の鉄筋調査があるが、この方法

は電磁波の伝搬速度だけに着目しているため、“かぶりが少ない鉄筋の探査の精度は十分でない。”、“コンクリートの比誘電率が未知のために正確なかぶりを推定できない。”、“鉄筋の大きさも推定できない。”という誤解を受けている。本研究では電磁波レーダを利用したコンクリート構造物の非破壊検査について議論している。

2. 研究の目的

コンクリート構造物中の鉄筋調査、複鉄筋探査、空洞探査、塩害の調査および、フレッシュコンクリートの塩分調査、含水率調査などを、1つのレーダで調査する技術を開発することを目的としている。

3. 研究の方法

(1)送受信器一体型電磁波レーダによる鉄筋の探査の高性能化

- ①市販されている送受信器一体型電磁波レーダのパルス照射開始時間の原点を定める校正方法を確立する。
- ②送受信器分離型電磁波レーダの鉄筋探査推定アルゴリズムを送受信器一体型電磁波レーダへ適用する。
- ③コンクリート試験体を作成し、有効性を評価する。
- ④様々なコンクリート試験体に対して鉄筋探査を行い、有効性を調査する。
- ⑤自動的な複鉄筋探査を行う。

(2)GAを利用した送受信器分離型電磁波レーダによるコンクリート構造の内部診断技術の開発

- ①送受信機分離型レーダの改良を行う。
- ②コンクリート内部の鉄筋の正確な位置と半径を推定する。
- ③並列2鉄筋の推定をする。
- ④垂直2鉄筋の推定をする。
- ⑤コンクリート未充填に相当する鉄筋近傍の空洞の探査を行う。
- ⑥探査アルゴリズムを改良し推定時間の短縮を図る。

(3)FBTS法によるコンクリート内部の電気定数の推定

- ①実構造物の探査を2次元探査で行うための方法を実現する。
- ②コンクリート診断に有効な電磁波パルスについて議論する。
- ③コンクリート内部の電気定数の推定、特に空洞探査を行う。

(4)フレッシュコンクリートの評価

- ①評価に有効な試験体の容器、並びに送信機と受信器の配置を決定する。
- ②探査に有効な周波数帯を求める。
- ③水、セメント、細骨材の配合比を変え、電磁波伝搬特性を求め、配合比の推定可能性を検討する。
- ④塩分濃度の推定可能性を検討する。

4. 研究成果

(1)送受信器一体型電磁波レーダによる鉄筋の探査の高性能化

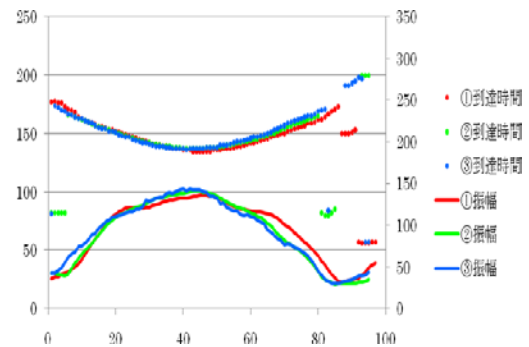


図1 到達時間と最大振幅の関係
かぶり 100mm, 半径 15.9mm

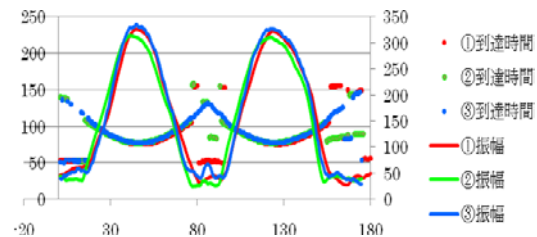


図2 到達時間と最大振幅の関係
かぶり 50mm, 半径 11.1mm

表1 かぶりと比誘電率の推定結果

真値 かぶり10cm 半径1.6cm			
	かぶり	比誘電率	かぶりの誤差
レーダ1	9.34	9.90	-0.66
レーダ2	10.22	8.57	0.22
レーダ3	9.81	9.22	-0.19
真値 かぶり5cm 半径1.1cm			
	かぶり	比誘電率	かぶりの誤差
レーダ1	6.21	6.11	1.21
レーダ2	5.51	7.93	0.51
レーダ3	6.85	5.42	1.85
真値 かぶり5cm 半径1.1cm			
	かぶり	比誘電率	かぶりの誤差
レーダ1	5.50	7.52	0.50
レーダ2	5.51	7.95	0.51
レーダ3	5.83	7.27	0.83

市販されているコンクリートレーダを利用して、鉄筋の位置、比誘電率の同じ推定を行った。半径は真値を仮定した。複数の試験体に対して作成したアルゴリズムを適用した。結果の一部を図1、図2に示す。受信データから鉄筋からの到達時間と最大振幅を自動抽出した結果である。3本の線は異なるレーダによる結果を示している。これらより理論的な結果が得られていることが分かる。これを用いて、かぶりとコンクリートの比誘電率を同時推定した結果を表1に示す。鉄筋が深い場合（かぶりが10cm）の方が推定精度が良いことが分かる。なお、かぶりとはコンクリート表面から鉄筋の上部までの距離であり、建築基準において最低のかぶりは指定されている。しかし、現時点では鉄筋の半径を真値に仮定しているため、半径の同時推定が今後の課題である。

これが実現できれば、市販のレーダによって鉄筋のかぶりが容易に推定できるようになり、非破壊検査の効率化につながる。

(2)GA を利用した送受信器分離型電磁波レーダによるコンクリート構造の内部診断技術の開発

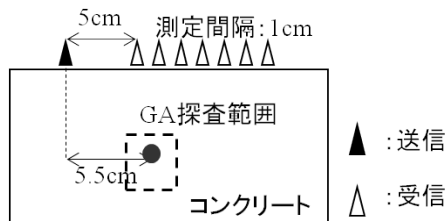


図3 問題の構成図

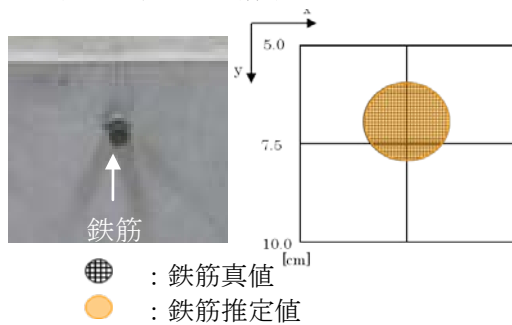


図4-1 1本の鉄筋

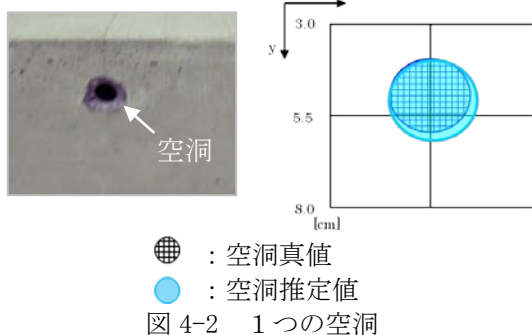


図4-2 1つの空洞

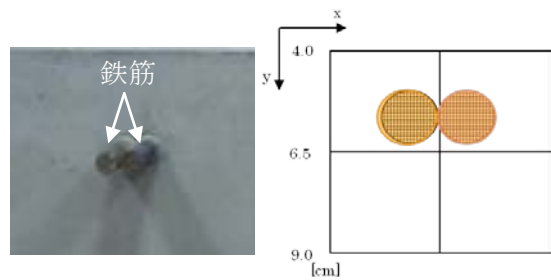


図4-3 並列鉄筋

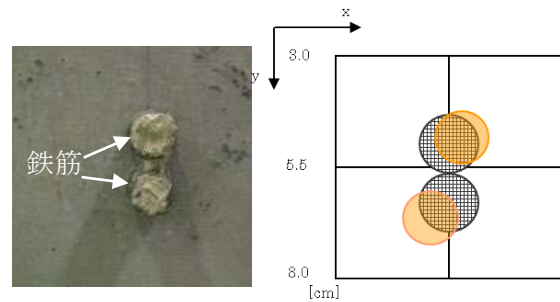


図4-4 垂直2鉄筋

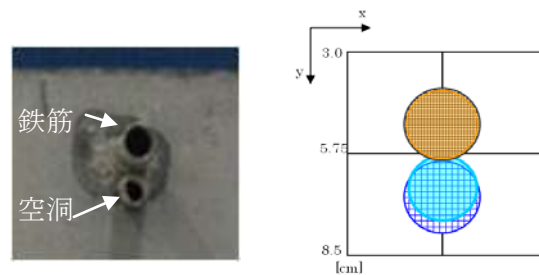


図4-5 鉄筋と空洞

図4 GAによる推定結果

プロファイル測定によって探査すべき領域を決定し、図3のようにその領域の上部に送信アンテナと受信アンテナを配置する。

図4-1より1本の鉄筋は非常に精度良く推定できている。図4-2より1つの空洞は若干大きめではあるが、十分に空洞を検出できている。図4-3より並列鉄筋は精度良く推定できている。図4-4より垂直2鉄筋は下側の鉄筋による反射波の強度が非常に弱いため十分な精度は得られていないが、鉄筋が2本あることは正確に検出できていることが分かる。図4-5より鉄筋の下に空洞が存在する（コンクリートの未充填）の場合でも推定できていることが分かる。

この技術が確立されれば、複雑な配置の鉄筋や空洞が推定できるようになり、保守および維持管理に非常に役立つ。

(3)FBTS 法によるコンクリート内部の電気定数の推定

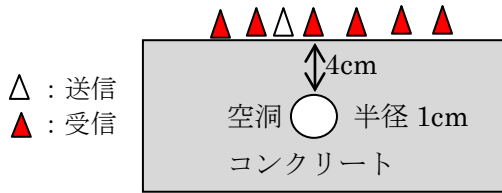


図5 問題の構成図

図5に問題の構成図を示す。送信の位置は5カ所受信位置は6カ所であり、合計30個のデータから、コンクリートの内部構造を推定する。

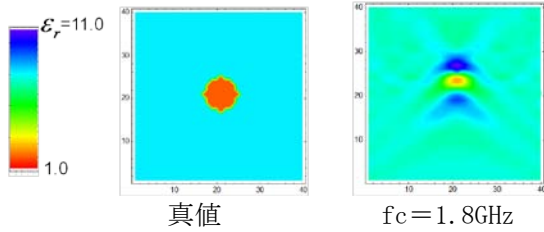


図6 再構成結果

中心周波数 1.8GHz のガウス 2 回微分の波形を入射した時の再構成結果を図6に示す。現在所有している送信機、受信器の仕様により可能な放射波形である。しかし、十分な再構成精度が得られないので、パルスを変化させコンクリートの内部診断に最適なパルスを求める。結果を図7に示す。

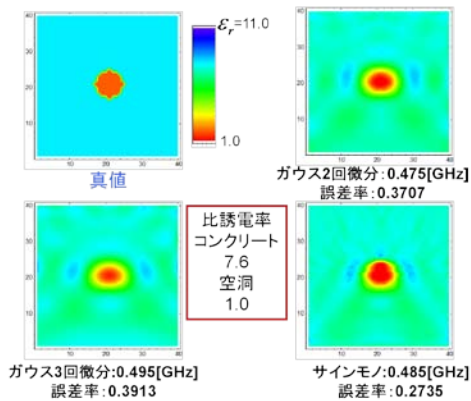


図7 再構成結果

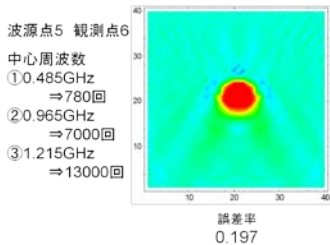


図8 複数のパルスによる再構成結果

図7より中心周波数が 0.485GHz のサインモノパルスを用いた場合が、最も良い推定結果を得ることが分かる。さらにパルスの中心周波数を段階的に増加させることで、空洞の回

りの偽像を取り除くことができることを図8に示す。

今後の課題は低周波を放射できるアンテナの設計と実データによる推定を行うことである。

この技術が確立すれば、コンクリートの内部構造全てを調べることができるので、保守及び維持管理に大きく貢献できる。

(4) フレッシュコンクリートの評価

フレッシュコンクリートの組成比や塩分含有率を評価するための基礎的検討を行った。図9に実験の構成を示す。



図9 実験の構成

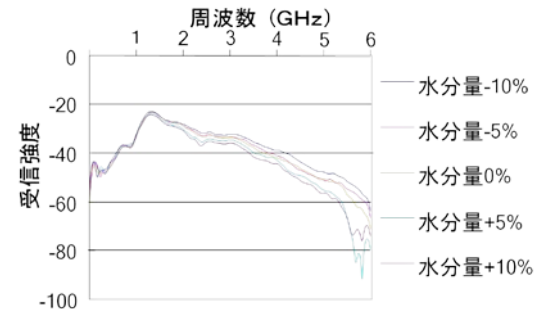


図10 水分量の変化による受信強度

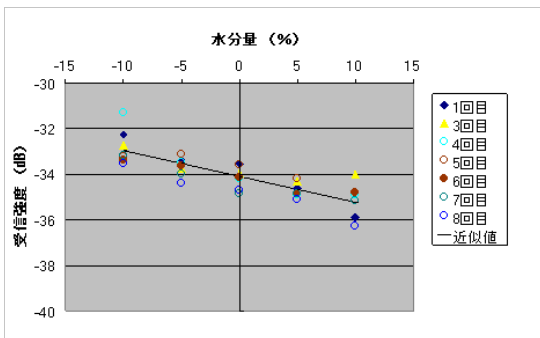


図11 3GHz に対する水分量と受信強度の関係

図10に水、セメント、粗骨材の配合比を変化させたときの受信強度の周波数特性を示す。水分量が多くなると受信強度が低下することが分かる。複数回同じ実験を行い、特定の周波数に対する水分量と受信強度の関係を図11に示す。この結果をもとに3GHz

に対する受信強度と水分量の近似式を求めると次式となる。

$$y = -0.1134x - 34.1$$

ここで、 y は受信強度[dB]を表し、 x は水分比[%]を表す。近似曲線に対する平均誤差は 0.55dB なので、水分比として 5%の精度であれば推定可能である。また、表 1 に角周波数における近似曲線の傾きと平均誤差を示す。これより 5%の精度で推定可能な周波数は 3GHz、5GHz、5.5GHz である。これらを考慮して複数の周波数を利用して水分量を推定する方法を求めれば、5%以下の精度で探査することが可能である。塩分量に関しても推定を行っているが、再現性がある実験ができていないので、ここでは結果を省略する。

表 2 各周波数における近似曲線

周波数 (GHz)	平均誤差	近似直線の傾き	近似直線の傾き×5
2.5	0.8641	-0.1396	-0.698
3	0.5591	-0.1134	-0.567
3.5	0.9074	-0.169	-0.845
4	0.9963	-0.137	-0.685
4.5	1.0707	-0.1923	-0.9615
5	1.198	-0.2713	-1.3565
5.5	2.3289	-0.5734	-2.867

この技術が確立すれば、現場で依頼した配合比のフレッシュコンクリートであるかどうかを即座に判断することができ、構造物の信頼性の向上につながる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件) 総数 2

- ① Toshiyuki Tanaka, Takahiro Matsuoka, Takashi Takenaka, Toshifumi Moriyama, Estimation of Reinforcing bars by using Real GA with Discrete Chromosomes, PIERS Proceedings, Peer Review 有, 2011, 投稿中
- ② Toshifumi Moriyama, Yuji Yamaguchi, Kismet Anak Hong Ping, Toshiyuki Tanaka, and Takashi Takenaka, Parallel Processing of Forward-backward Time-stepping Method for Time Domain Inverse Scattering, PIERS Proceedings, Peer Review 有, 2008, 551 – 556

[学会発表] (計 15 件) 総数 19

- ① 田中俊幸, Estimation of Reinforcing bars by using Real GA with Discrete Chromosomes, PIERS 2011 Marrakesh, H23.3.21 Marrakesh, MOROCCO
- ② 田中俊幸, FBTS 法によるコンクリート中の空洞探査における入射パルスの影響, 電磁界理論研究会, H23. 1. 28 大阪大学
- ③ 田中俊幸, 観測データを用いた GA による鉄筋推定の評価の検討, 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, H23. 1. 27 長崎美術館
- ④ 田中俊幸, 離散化 R-GA による鉄筋推定の評価法, 平成 22 年度沖縄学術合同講演会, H22.12.4, 琉球大学
- ⑤ 田中俊幸, F B T S 法によるコンクリート中の空洞探査, 平成 22 年度電子情報通信学会九州支部学生会第 18 回学生会講演会, H22. 9. 30, 福岡工業大学
- ⑥ 田中俊幸, 電磁波を用いたフレッシュコンクリートの特性評価平成 22 年度電子情報通信学会九州支部学生会第 18 回学生会講演会, H22. 9. 30, 福岡工業大学
- ⑦ 田中俊幸, 離散化した染色体を用いた Real-GA による鉄筋の推定, 電子情報通信学会 2010 年総合大会, H22. 3. 16, 東北大学
- ⑧ 田中俊幸, Real-GA によるコンクリート中の垂直埋設物探査の精度向上, 地下電磁計測ワークショップ, H21. 10. 8, 東北大学東京分室
- ⑨ 田中俊幸, 鉄筋コンクリート中の空洞探査に関する検討, 電子情報通信学会 2009 年ソサイエティ大会講演論文集, H21. 9. 18, 新潟大学
- ⑩ 田中俊幸, コンクリートレーダを用いた Real-GA による垂直鉄筋の探査, 平成 21 年度電子情報通信学会九州支部学生会第 17 回学生会講演会, H21. 9. 30, 九州工業大学
- ⑪ 田中俊幸, ビバルディアンテナを用いた電磁波レーダの高精度化, 電子情報通信学会技術報告 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, H21. 1. 29, 長崎美術館ホール
- ⑫ 田中俊幸, コンクリートレーダの高性能化を目指した送受信部の構成に関する研究, 電気学会電磁界理論研究会, H20. 11. 21, 高山市民文化会館
- ⑬ 田中俊幸, コンクリートレーダの性能評価, 平成 20 年度電子情報通信学会九州支部学生会第 16 回学生会講演会, H20. 9. 26, 大分大学
- ⑭ 田中俊幸, コンクリートレーダ用の送受信部の構成に関する研究, 電子情報通信学会 2008 年ソサイエティ大会, H20. 9. 16, 明治大学
- ⑮ 田中俊幸, 実データを用いた Real-GA によるコンクリート構造物の内部推定, 電気学会電磁界理論研究会, H20. 5. 24, 大分大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

特許第 4 6 9 1 6 5 6 号

発明の名称 構造物内の物体探査方法、コンピュータ・プログラム及び記録媒体

発明者 竹中隆, 田中俊幸, 真弓雄一郎

登録日 平成 23 年 3 月 4 日

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 俊幸 (TANAKA TOSHIYUKI)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 5 0 2 0 2 1 7 2

(2) 研究分担者

竹中 隆 (TAKENAKA TAKASHI)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号: 4 0 1 1 7 1 5 6

森山 敏文 (MORIYAMA TOSHIFUMI)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号: 2 0 4 5 2 8 7 3

藤本 孝文 (FUJIMOTO TAKAFUMI)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 4 0 2 6 4 2 0 4

(H21 年度より追加)

(3) 連携研究者

無し