

内部欠損を有する構造物内を伝播する弾性波の挙動に関する研究 (電磁パルス法の応用)

商工労働部 工業振興課
(株) アミック
(株) アミック

伊 東 圭 昌
高 鍋 雅 則
長 岡 康 之

電磁パルス法は、鉄筋コンクリートの内部状態を非破壊で検査する新たな手法であり、建築・プラント・エンジニアリングなど多岐にわたる分野から期待されている。現在、実用化を目指した開発段階にあり、実験的な取り組みは行われてきているが、現象の理論的な説明は必ずしも十分ではない。本報では、構造物内を伝播する弾性波の支配方程式に基づいて、数値解析を行う。そして、内部欠損の有無による波動伝播の特徴を明確にする。

キーワード：非破壊検査技術、電磁パルス法、弾性波、数値シミュレーション

1 はじめに

鉄筋コンクリートは、建築・プラント・エンジニアリングなど多岐にわたる分野で用いられている。しかしながら、施工後、すでに数十年経過しているものも数多く存在するため、鉄筋コンクリートのみならず構造物そのものの劣化診断を行う必要がある。一般に、鉄筋コンクリートの検査方法として、非破壊検査技術が用いられている。代表的な方法⁽¹⁾として、超音波探傷法、浸透探傷法、渦電流式探傷法などが知られており、すでに実用化されている。

しかしながら、これらの手法は、コンクリート表面から与えられた入力信号と応答信号との伝達特性より、内部状態を評価する手法であるため、鉄筋が深く埋設された場合には、入力信号が鉄筋に到達する前に減衰してしまうため、その反射波の正確な計測が困難であった。

電磁パルス法は、鉄筋コンクリートの内部状態を非破壊で検査する新たな手法であり、現在、実用化を目指した開発段階にある。図1に、電磁パルス法を用いた非破壊検査法の概略を示す。概略は、以下の通りである。鉄筋コンクリート表面に置いたパルス発生用コイル (Transmitter) に瞬間的に大電流を流し、パルス上の電磁力を、埋設された鉄筋コンクリートに作用させる。その際に、鉄筋には瞬間的な電磁打撃 (Electromagnetic Pulse) により振動が励起され、コンクリート中に振動すなわち弾性波が伝播する。コンクリート表面に伝播した弾性波を、振動検出用コイル (Receiver) により計測する。そして、内部欠損の有無による信号伝達特性の比較より、コンクリート内部の状況を推測する。

電磁パルス法では、コンクリート内に埋設された鉄筋コンクリートを振動発生源とし、そこから伝播する弾性波の特性を検出するため、S/N特性の優れた測定が可能である。

すでに、測定サンプルを用いた実験室レベル、あるいは実際の現場などでの試験計測などが行われており、初期の目標である内部状態の把握などは実現しているものの、理論的な観点からのアプローチは、現状では必ずしも十分ではなかった。

このような理由から、本報では、鉄筋コンクリートを伝播する弾性波の挙動についての基礎的な検討を行う。そして、構造物内の欠損の有無の違いによる弾性波の伝播の様子を理論的に明らかにする。

すなわち、鉄筋コンクリート内を伝播する弾性波を解析するための本質を説明しうる物理モデルを考える。そして、この物理モデルを用いて、弾性波の伝播を支配する基礎方程式を導出する。その上で、弾性波の伝播現象を理解する上で重要となる、縦波および横波の概念を理論的に取り入れ、数値的に解くべき方程式を導出する。解くべき方程式は有限要素法 (FEM) を用いて数値解析する。

得られた結果に基づいて構造物内の内部欠損の有無の違いによる弾性波の伝播の違いおよび特徴を明らかにする。

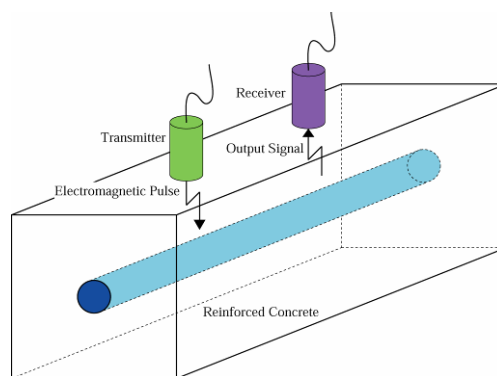


図1 電磁パルス法の概略

2 解析対象となるモデルの設定

本報では、鉄筋コンクリート内に発生する弾性波の伝播現象の本質を理論的に明らかにするために図2に示す解析モデルを考える。

図2は、図1に示す鉄筋コンクリートの断面をあらわしており、鉄筋の軸方向には、均一な電磁パルスが作用するものとする。コンクリートは、幅 L_h 、高さ L_v の断面形状が長方形の均一な弾性体と考える。ここで、密度 ρ_1 、縦弾性係数 μ_1 、Lame 定数 λ_1 とおき、位置 (x, y) における変位ベクトルを $\mathbf{u}_1 = (u_1, v_1)$ とする。

鉄筋コンクリート内には、断面半径 R の円柱状の鉄筋が埋め込まれている。ここで、密度 ρ_2 、縦弾性係数 μ_2 、Lame 定数 λ_2 とおき、位置 (x, y) における変位ベクトルを $\mathbf{u}_2 = (u_2, v_2)$ とする。鉄筋コンクリート内に存在する欠損（空隙）は、幅 D_h 、高さ D_v の長形状のものとする。鉄筋には、外力ベクトル $\mathbf{F}$ で記述される電磁力が軸方向に均一、瞬間的に作用するものとする。

3 構造物内を伝播する弾性波に関する理論解析

鉄筋コンクリートに作用する電磁パルスによる外力を打撃力とみなすことにより、検査過程の現象は、

$$\rho_1 \frac{\partial^2 \mathbf{u}_1}{\partial t^2} = (\lambda_1 + \mu_1) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) + \mu_1 (\nabla \cdot \nabla) \mathbf{u}_1 \quad (1)$$

$$\rho_2 \frac{\partial^2 \mathbf{u}_2}{\partial t^2} = (\lambda_2 + \mu_2) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_2) + \mu_2 (\nabla \cdot \nabla) \mathbf{u}_2 + \mathbf{F} \quad (2)$$

で記述される。境界条件は、それぞれの接触面において

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2 \quad (3)$$

である。

構造物内を伝播する弾性波の伝播を解析するために、式(1)、(2)の両辺の発散および回転をとると、変位 $\mathbf{u}_1$ 、 $\mathbf{u}_2$ の発散 $\nabla \cdot \mathbf{u}_1$ 、 $\nabla \cdot \mathbf{u}_2$ および回転 $\nabla \times \mathbf{u}_1$ 、 $\nabla \times \mathbf{u}_2$ に関する独立した波動方程式が

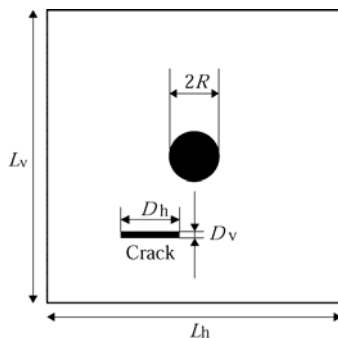


図2 鉄筋コンクリートのモデル

$$\rho_1 \frac{\partial^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}_1)}{\partial t^2} - (2\mu_1 + \lambda_1) \nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) = 0 \quad (4)$$

$$\rho_1 \frac{\partial^2 (\nabla \times \mathbf{u}_1)}{\partial t^2} - \mu_1 \nabla^2 (\nabla \times \mathbf{u}_1) = 0 \quad (5)$$

$$\rho_2 \frac{\partial^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}_2)}{\partial t^2} - (2\mu_2 + \lambda_2) \nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}_2) = \nabla \cdot \mathbf{F} \quad (6)$$

$$\rho_2 \frac{\partial^2 (\nabla \times \mathbf{u}_2)}{\partial t^2} - \mu_2 \nabla^2 (\nabla \times \mathbf{u}_2) = \nabla \times \mathbf{F} \quad (7)$$

と求まる。式(4)、(6)は、それぞれ音速

$$c_{d1} = \sqrt{(2\mu_1 + \lambda_1) / \rho_1}, \quad c_{d2} = \sqrt{(2\mu_2 + \lambda_2) / \rho_2} \quad (8)$$

で伝播する発散 $\nabla \cdot \mathbf{u}_1$ 、 $\nabla \cdot \mathbf{u}_2$ による波動であり、P 波（縦波）をあらわす。一方、式(5)、(7)は、それぞれ音速

$$c_{s1} = \sqrt{\mu_1 / \rho_1}, \quad c_{s2} = \sqrt{\mu_2 / \rho_2} \quad (9)$$

で伝播する回転 $\nabla \times \mathbf{u}_1$ 、 $\nabla \times \mathbf{u}_2$ による波動であり S 波（横波）をあらわす。

式(4)～(7)より、（おもに単純圧縮をあらわす）発散と（おもにせん断圧縮をあらわす）回転とは、互いに連成していない。鉄筋コンクリート試料を均質で等方な弾性体とみなす場合、P 波と S 波とは互いに独立して伝播することがわかる。

ここで、弾性波が境界に到達する際には、入射波とあわせて境界条件を満足するように反射波が生じる。そのため、入射した P 波、S 波がそのまま同じ種類の波で反射する成分と、入射した P 波、S 波が相互に変換して反射する成分が発生する。波のモードの変換は、試料の境界や欠損による超音波伝播を考える上で重要である。

さらに、数回の反射を繰り返すにつれて、波のモード、波形が複雑になることが容易に推測される。したがって、P 波、S 波の測定をするためには、なるべく少ない反射回数でのセンシングが実用化に向けて重要となる。

式(4)～(7)より、P 波すなわち発散 $\nabla \cdot \mathbf{u}_1$ 、 $\nabla \cdot \mathbf{u}_2$ 、および S 波すなわち回転 $\nabla \times \mathbf{u}_1$ 、 $\nabla \times \mathbf{u}_2$ を求め、P 波および S 波の伝播形態を可視化することにより、鉄筋コンクリート内に発生する弾性波の様子を把握することが可能となる。

4 数値解析

4.1 解析条件

本研究では、鉄筋コンクリートの内部欠損が、弾性波の伝播に及ぼす影響を調べる。すなわち、式(4)～(7)で記述される弾性波の支配方程式を有限要素法により離散化し、係数マトリックス方程式を求める。さらに、時間微分項を Newmark- β 法により離散化する⁽²⁾。そして、初期条件を与え、離散化された支配方程式を逐次計算することにより、時々刻々と変化する弾性波の挙動を数値的に求める。

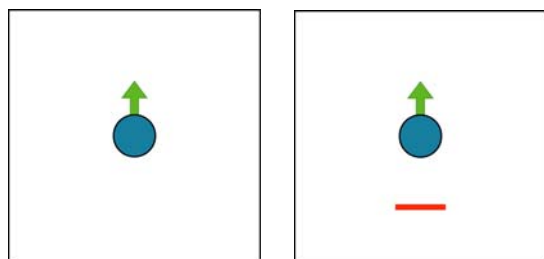
数値解析は、図3に示すモデルを用いて行う。解析条件は、(Case 1) 内部欠損なし、(Case 2) 鉄筋下方に内部欠損あり、とした。そして、電磁力とみなせるパルス入力を、図4に示すバーストサイン入力で鉄筋全体に与えた。

解析条件は、 $L_h = 120\text{mm}$, $L_v = 60\text{mm}$ として、 $R = 9\text{mm}$ とした。ここで、コンクリート内での P 波、S 波の伝播速度 c_{d1} , c_{s1} は、それぞれ $3.2 \times 10^3 \text{ m/s}$, $2.1 \times 10^3 \text{ m/s}$ として、鉄筋内での P 波、S 波の伝播速度 c_{d2} , c_{s2} は、それぞれ $5.9 \times 10^3 \text{ m/s}$, $3.5 \times 10^3 \text{ m/s}$ とした。

4. 2 数値計算結果

Case 1 および Case 2 の場合について、鉄筋コンクリート内を伝播する弾性波 (P 波、S 波) の様子を図5および図6に示す。数値結果は、電磁パルスの入力時間 Δt との相対的な無次元時間であらわすものとする。

図5および図6に示す数値計算結果より、電磁パルスが入力されると、時間の経過とともに P 波は上下方向に、S 波は左右方向に伝播していく様子がわかる。その理由として、外部入力が上下方向に作用するため、当初は内部はおもに圧縮変形を受けるため上下に P 波が生じる。一方、打撃点を中心にせん断変形を主に受ける鉄筋の左右方向に S 波が生じることとなる。なお、P 波の上方に伝播する波は、微小要素が圧縮しながら伝播しており、下方に伝播する波は、膨張しながら伝播しており、上方、下方に伝播する P 波の物理的な意味は異なる。同様に、S 波の左側に伝播する波は、微小要素が時計回りにねじれるように変形しながら伝播しており、右側に伝播する波は反時計回りにねじれるように変形しながら伝播している。



Case 1: 内部欠損なし Case 2: 鉄筋下方に内部欠損

図3 数値解析に用いたモデル

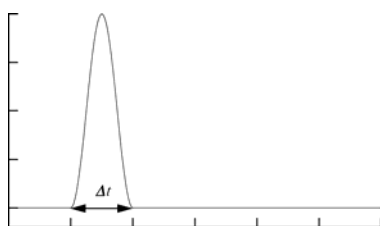
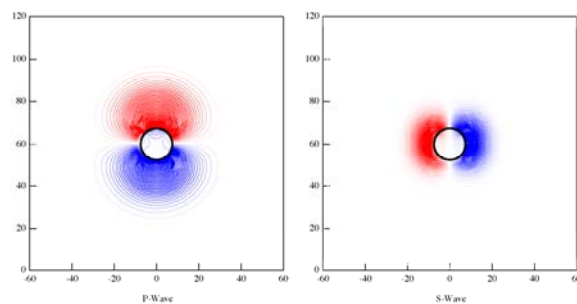
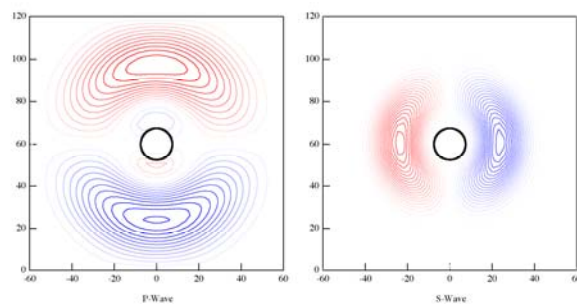


図4 電磁パルスの入力波形

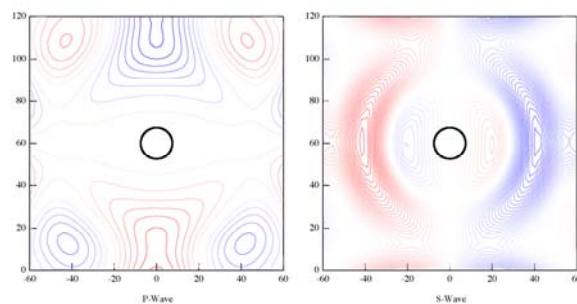
数値解析結果より、内部欠損がある場合、P 波、S 波は欠損部において反射が新たに生じる。そのため、欠損部において、P 波から S 波へのモード変換、S 波から P 波へのモード変換が生じていることがわかる。したがって、内部欠損の有無により、弾性波の伝播が異なる。



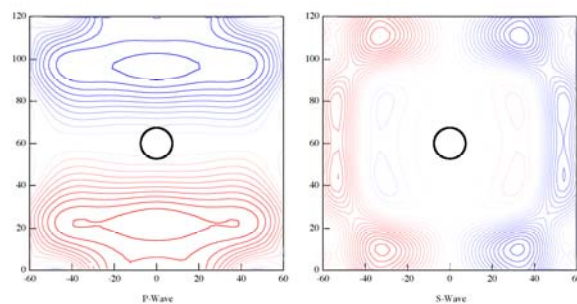
(a) $t = \Delta t/2$



(b) $t = \Delta t$



(c) $t = 3\Delta t/2$



(d) $t = 2\Delta t$

図5 弾性波 (P 波、S 波) の伝播の様子 (Case 1)

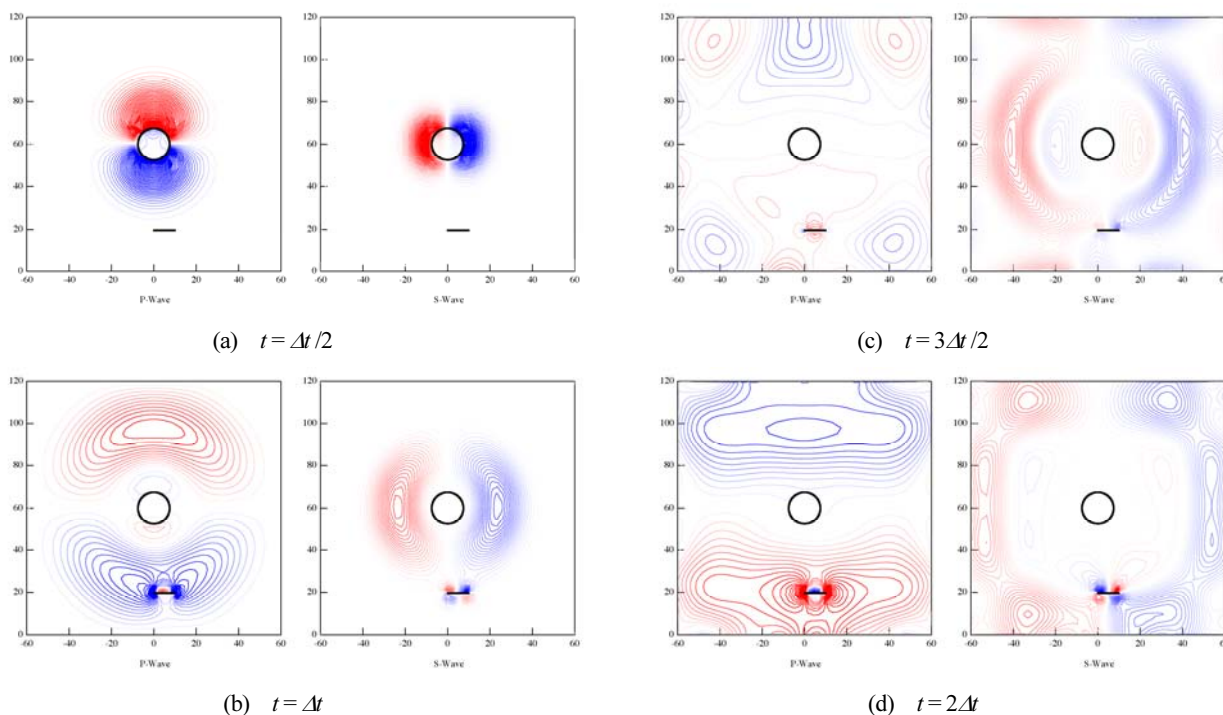


図6 弾性波 (P 波, S 波) の伝播の様子 (Case 2)

さまざまな内部欠損に関する数値解析を行った結果、図6に示すような場合には、弾性波の信号受信を鉄筋コンクリートの下側で行うと受信波形より内部欠損の状況を明確に判断することができる。一方、鉄筋コンクリート上側では、打撃に伴う第一波には内部欠損の情報が含まれていない。この結果より、到達した弾性波の受信位置により、鉄筋のどの部分に欠損があるかを明らかにすることが可能となる。

5 まとめ

本研究では、電磁パルス法に関する基礎的検討として、

内部欠損を有する鉄筋コンクリート内を伝播する弾性波の挙動を数値的に明らかにした。その結果、複数の位置で信号受信することにより、内部欠損の有無を把握できることを数値的に示すことを可能とした。本数値結果に基づいて、実際の試料で得られる測定結果を再評価することにより、電磁パルス法の実用化につながることを期待される。

文 献

- 1) 丸山真一；平成13年度慶應義塾大学博士論文。
- 2) Cook, D. *et. al.*, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, (1989), John Wiley and Sons, Inc.

Effect of Internal Flaw on Acoustic Wave Propagation by Electromagnetic Pulse Method

Yoshiaki ITOH, Masanori TAKANABE, Yasuyuki NAGAOKA

In this paper, effect of internal flaw on acoustic wave propagation by electromagnetic pulse method is examined theoretically to develop nondestructive testing for reinforced concrete. The equations governing wave propagation concerning P-wave and S-wave are solved numerically by two-dimensional FEM. As a result, we can obtain the wave propagation when there exists internal flaw. Using these numerical results, we develop in-operation-inspection technique to detect internal flaw by proposed non destructive testing of the electromagnetic pulse method.