

論文

[1108] 腐食した鉄筋内部の弾性波動伝播特性に関する基礎的研究

林 隆浩*1・山田 和夫*2・阿部 秋男*3・桃木 佳子*4

1. はじめに

筆者らは、従来からコンクリートの劣化度評価や内部探査を対象とした弾性波法による非破壊試験方法の確立を目的として、一連の基礎的検討を行ってきた[1]-[9]。本研究は、これらの研究の延長上のもので、コンクリート内部に存在する鉄筋の腐食推定を対象とした弾性波法の適用性・可能性について解析的に検討を行ったものである。

コンクリート内部に存在する鉄筋の腐食推定を目的とした非破壊試験方法としては、すでに自然電位法や分極抵抗法などを用いた方法が提案・実用されているが、これらの方法は、いずれもかぶりコンクリート表面を走査測定する方法であるため、コンクリート支持杭のようにコンクリート表面が地中に埋設されている場合には適用することができない。これに対して、本研究で取り扱う弾性波法は、鉄筋の腐食部分から反射してきた弾性波の速度成分の到達時間と振幅値に着目する方法[10]で、コンクリートが地中に埋設されている場合であっても弾性波を鉄筋に入力でき、かつ反射してきた弾性波を検出できれば試験可能であるため、自然電位法や分極抵抗法のような在来の試験方法と比べて適用範囲は広く、有用な試験方法になり得るものと考えられる。

2. 解析手法

本研究では、鉄筋を線材とみなした取扱いを行った。以下では、本研究で採用した1次元弾性波動伝播解析の手順について述べることにする。

2.1 基礎式

速度依存型の減衰項を考慮した1次元弾性波動方程式は、一般に次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{h}{A \cdot E} \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、u：材軸方向の変位、x：材軸方向の位置、v：速度(=√E/ρ)、
A：鉄筋の断面積、E：ヤング係数、ρ：密度、t：時間、h：減衰係数。

2.2 波動方程式の差分表示

本研究では、上記の波動方程式の解法に差分(中央差分)法を適用し、波動方程式の定式化に際しては、鉄筋はn個の節点から構成されているものと仮定した。

(1)鉄筋内部における差分表示

いま、位置iで腐食によって鉄筋の材質、断面積および鉄筋とコンクリートとの界面性状が変化する一般的な場合を考えると、位置iおよび時刻p+1での波動方程式の差分表示は、表示式中に表れる仮想変位を力の釣合条件と変位の連続条件を用いて消去すると、次のようになる。

*1 ヨーコン(株)技術部工法課課長、工修(正会員)
 *2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)
 *3 (株)東京ソイルリサーチつくば総合試験所特殊試験室
 *4 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻(正会員)

$$\begin{aligned}
& \left\{ \left(\frac{1}{v_1^2} + \frac{1}{v_2^2} \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} \right) \frac{1}{dt^2} + (h_1 + h_2) \frac{1}{A_1 \cdot E_1 \cdot 2 dt} \right\} u_{i, p+1} \\
&= \frac{2}{dx^2} u_{i-1, p} - \left\{ \left(\frac{2}{dx^2} - \frac{2}{v_1^2 \cdot dt^2} \right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} \left(\frac{2}{dx^2} - \frac{2}{v_2^2 \cdot dt^2} \right) \right\} u_{i, p} + \frac{2}{dx^2} \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} u_{i+1, p} \\
&\quad - \left\{ \left(\frac{1}{v_1^2} + \frac{1}{v_2^2} \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} \right) \frac{1}{dt^2} - (h_1 + h_2) \frac{1}{A_1 \cdot E_1 \cdot 2 dt} \right\} u_{i, p-1} \\
&\quad \dots\dots\dots (2)
\end{aligned}$$

ここに、添字 1 および 2 は、材質等が位置 i で種類 1 から 2 へ変化することを示す。

(2) 始点における波動方程式の差分表示

始点 1 における波動方程式の差分表示は、一般に次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{1}{v^2 \cdot dt^2} + \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{1, p+1} \\
&= \frac{1}{dx^2} u_{0, p} - \left(\frac{2}{dx^2} - \frac{2}{v^2 \cdot dt^2} \right) u_{1, p} + \frac{1}{dx^2} u_{2, p} \\
&\quad - \left(\frac{1}{v^2 \cdot dt^2} - \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{1, p-1} \dots\dots\dots (3)
\end{aligned}$$

上式中の仮想変位 $u_{0, p}$ を境界条件に応じて消去すると、時刻 $p+1$ における波動方程式の差分表示は、それぞれ以下ようになる。

①外力が働いていない ($F_p = 0$) 場合：

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{1}{v^2 \cdot dt^2} + \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{1, p+1} \\
&= - \left(\frac{2}{dx^2} - \frac{2}{v^2 \cdot dt^2} \right) u_{1, p} + \frac{2}{dx^2} u_{2, p} \\
&\quad - \left(\frac{1}{v^2 \cdot dt^2} - \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{1, p-1} \dots\dots\dots (4)
\end{aligned}$$

②外力が働いている ($F_p \neq 0$) 場合：

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{1}{v^2 \cdot dt^2} + \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{1, p+1} \\
&= - \frac{2 F_p}{A \cdot E \cdot dx} - \left(\frac{2}{dx^2} - \frac{2}{v^2 \cdot dt^2} \right) u_{1, p} + \frac{2}{dx^2} u_{2, p} \\
&\quad - \left(\frac{1}{v^2 \cdot dt^2} - \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{1, p-1} \dots\dots\dots (5)
\end{aligned}$$

(3) 終点における波動方程式の差分表示

終点における波動方程式の差分表示は、始点の場合と同様に取り扱うことができる。

①自由端の場合：自由境界（応力=0）の終点位置nにおける波動方程式の差分表示は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{v^2 \cdot dt^2} + \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{n,p+1} \\ &= \frac{1}{dx^2} u_{n-1,p} - \left(\frac{2}{dx^2} - \frac{2}{v^2 \cdot dt^2} \right) u_{n,p} \\ & - \left(\frac{1}{v^2 \cdot dt^2} - \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{n,p-1} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

②固定端の場合：固定端の場合、終点位置nにおける変位は、常に次式で与えられる。

$$u_{n,p} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

2.3 安定条件

式(1)の波動方程式を差分法によって解くための安定条件は、一般に

$$v \cdot dt \leq dx \dots\dots\dots (8)$$

ここに、v：波動の伝播速度、dt：時間増分、dx：差分間隔。

与えられるが、波動の伝送が正しく行われるためには、 $v \cdot dt = dx$ となるように、dtおよびdxを設定する必要があることが知られている[11]。

3. 解析モデル

解析の概要を表-1に示す。本解析では、鉄筋の腐食モデルとして断面形状が材軸方向で変化する鉄筋（長さが40cm（鉄筋の両端が各々2cm露出している）、材端における直径が22mm）と鉄筋とコンクリートとの界面性状が変化する鉄筋を取り上げ、これらの鉄筋が10x10x36cmのコンクリートの断面中央に埋設されている場合の波動伝播特性を調査の対象として、弾性波動伝播解析および別報[10]で示した方法に基づく鉄筋の断面形状推定を行った。解析要因としては、断面の変化寸法（ $\Delta d = -8, -4, -2, 0, +2, +4$ および+8mmの7種類）、断面変化の長さ（ $l = 0, 2, 4$ および8cmの4種類）、減衰係数（ $h = 0$ および0.67の2種類）、減衰係数の変化区間（ $h = 0$ の区間（ l ）が0, 2, 4, 8および36cmの5種類）、並びに鉄筋終端の境界条件（自由端および固定端の2種類）を取り上げた。なお、鉄筋の両端2cmの区間（かぶりコンクリートのない区間）の減衰係数（h）は一律に $h = 0$ としたが、一部の解析においては比較のために $h = 0.67$ とした場合についても解析を行った。本解析で用いた解析モデルの一例を図-1に示す。なお、弾性波動伝播解析に際しては、波動の伝播速度（v）を6000m/s、差分間隔（dx）を5mm、解析時間増分（dt）を dx/v に設定して300ステップ（250 μ s）まで解析を行った。

表-1 解析の概要

断面寸法変化 Δd (mm)	断面変化長 l (cm)	減衰定数 h	$h=0$ の 区間 (cm)	境界条件
-8, -4, -2, 0, +2, +4, +8	0, 2, 4, 8	0.0, 0.67	0, 2, 4, 8, 36	自由端 固定端

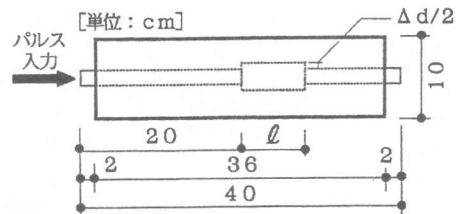
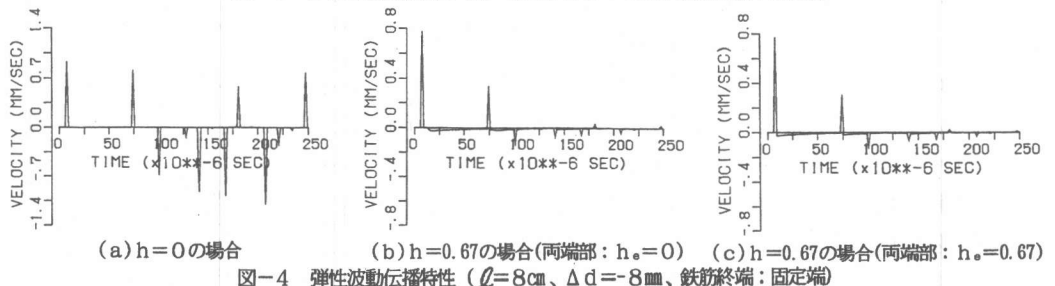
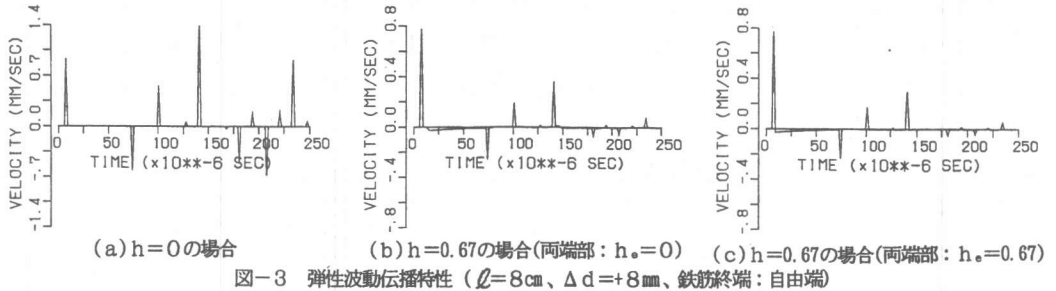
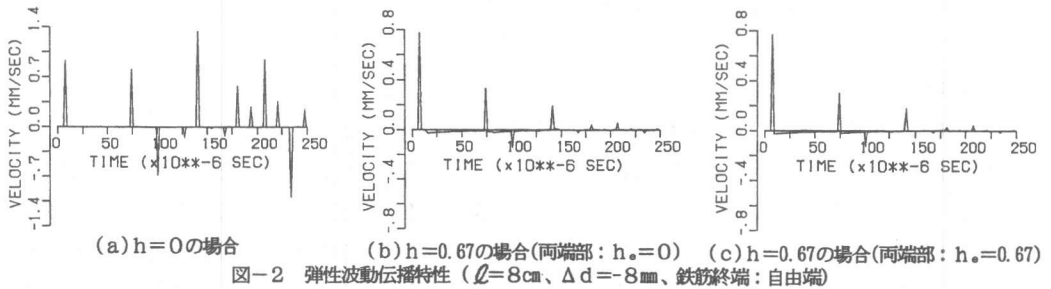


図-1 解析モデルの一例

4. 解析結果とその考察

4.1 弾性波動伝播特性

図-2および図-3は、本解析結果のうち、それぞれ鉄筋断面の変化寸法(Δd)が -8mm および $+8\text{mm}$ 、断面変化長さ(l)が 8cm のモデル試験体で、鉄筋終端の境界条件を自由端に設定したものである。これらの図からわかるように、 $h=0.67$ に設定した場合(図(b)および図(c))には、パルス入力直後に波形が負の方向に変移するアンダーシュート現象が観察されるが、 $h=0$ に設定した場合(図(a))には、このような現象は観察されない。ただし、鉄筋両端 2cm の区間の減衰係数(h_e)を 0 に設定した場合(図(b))には、 $h_e=0$ の区間長さに対応した時間分だけアンダーシュート現象が遅れる傾向を示している。また、検出反射波の波動速度は、減衰の有無によって著しく相違している。さらに、図-2と図-3を比較してみると、 $75\mu\text{s}$ と $100\mu\text{s}$ 近傍で観察される検出反射波の波動速度の値が正負逆転しているのがわかる。これは、図-2の方では材軸方向の途中で鉄筋断面が減少しているのに対して、図-3の方では鉄筋断面が逆に増大しているため、弾性波の反射率(R)がインピーダンス比(Z_i/Z_{i-1} 、ここに $Z_i=A_i \cdot E_i/v_i$ であるが、本解析モデルでは E_i と v_i を鉄筋内部で一定と仮定しているため、断面積比(A_i/A_{i-1})に等しい) $=1$ を境にして正負逆転するからである。一方、図-4は、前掲の図-2のモデル試験体において鉄筋終端の境界条件を固定端に設定した場合の解析結果を示したものである。この図と前掲の図-2とを比較すると、鉄筋終端から反射した波動の到達時刻(約 $134\mu\text{s}$)までは、



鉄筋終端の境界条件の影響を全く受けていないが、鉄筋終端から反射してきた波動の速度成分の正負記号やそれ以後に検出される反射波の出現状況などは、境界条件によって相違しているのがわかる。

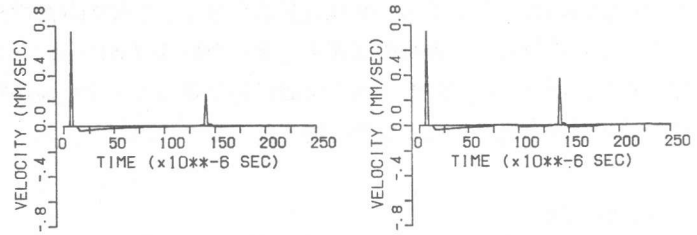


図-5 弾性波動伝播特性 ($\ell=8\text{cm}$, $\Delta d=0\text{mm}$, $h=0.67$, 鉄筋終端: 自由端)

図-5および図-6は、それぞれ鉄筋断面が試験体内部で変化していないモデル試験体において鉄筋終端の境界条件を自由端および固定端に設定して得られた結果のうち、図(a)が減衰係数 (h) を試験体内部で $h=0.67$ の一定と仮定した場合、図

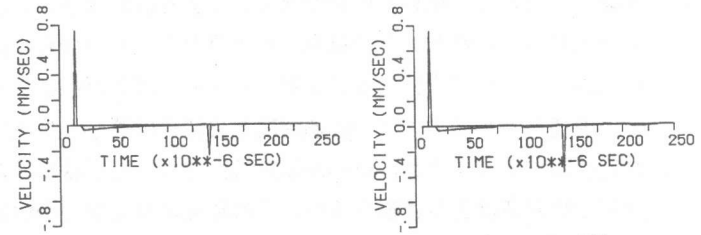


図-6 弾性波動伝播特性 ($\ell=8\text{cm}$, $\Delta d=0\text{mm}$, $h=0.67$, 鉄筋終端: 固定端)

(b)が試験体中央から8cmの区間の減衰係数 (h_c) を 0とし、それ以外の区間を $h=0.67$ とした場合の結果である。これらの図によれば、 h の値を試験体内部の一部で 0とした場合には、鉄筋終端の境界条件にかかわらず、 h の値が変化する境界から反射した波 (約 $75\mu\text{s}$ および $100\mu\text{s}$ の時刻) が僅かに観察される。また、その後に出検される鉄筋終端からの反射波の波動速度度は、減衰係数を試験体内部で 0.67 の一定とした場合に比べて若干大きくなっている。

4.2 鉄筋断面の形状推定

図-7および図-8は、それぞれ前掲の図-2および図-3の解析結果に対して別報[10]で示した方法に基づく鉄筋断面の形状推定を行った結果を示したものである。これらの図によれば、波動の減衰を無視した場合 (各図(a)) には、鉄筋終端から約4cm手前の位置で多重反射による

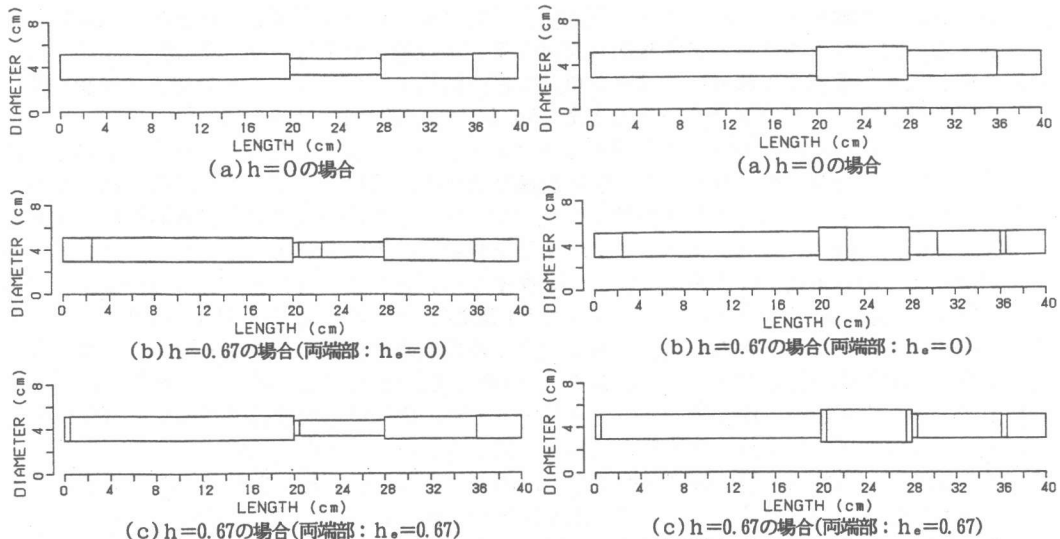


図-7 鉄筋断面の推定結果 ($\ell=8\text{cm}$, $\Delta d=-8\text{mm}$, 鉄筋終端: 自由端)

図-8 鉄筋断面の推定結果 ($\ell=8\text{cm}$, $\Delta d=+8\text{mm}$, 鉄筋終端: 自由端)

影響が認められるが、その効果は比較的小さく、全体的な断面推定精度は極めて優れているといえる。これに対して、波動の減衰を考慮した場合（各図(b)および図(c)）には、鉄筋断面の変化位置および図(a)で観察された位置以外に幾つもの反射波が検出されており、断面の推定精度は、減衰が無い場合に比べて幾分悪くなっているのがわかる。

5. 結 論

本研究では、弾性波法による鉄筋の腐食推定への適用性・可能性について解析的に検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 減衰係数 (h) が $h \neq 0$ の場合、 $h = 0$ と設定した場合には認められないパルス入力直後に波形が負の方向に変移するアンダーシュート現象が観察され、減衰の有無によって反射波の波動速度とパルス入力後の経過時間との関係は著しく相違する。
- 2) 鉄筋終端の境界条件が自由端か固定端かによって、鉄筋終端から反射してきた弾性波の波動速度の絶対値は正負逆転するが、その時点よりも前の弾性波動伝播特性については、鉄筋終端の境界条件の影響を殆ど受けない。
- 3) 鉄筋腐食箇所から反射した弾性波の到達時間とその速度成分の振幅値とを用いることによって鉄筋の断面推定をある程度正確に行うことができるが、推定精度を向上させるためには、多重反射の影響を考慮する必要がある。

謝 辞

本解析プログラムの開発に際して御助力を得た愛知工業大学学部学生の惣田篤子嬢および吉井尚世嬢に対して謝意を表します。

引用文献

- 1) 山田和夫・小阪義夫：火害を受けたコンクリート中を伝播する超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、pp. 361-366、1988. 6
- 2) 山田和夫・小阪義夫：極低温下に曝されたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、pp. 331-336、1989. 6
- 3) 山田和夫・小阪義夫：アルカリ骨材反応を生じたモルタル中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第1号、pp. 773-778、1990. 6
- 4) 山田和夫・小阪義夫：超音波スペクトロスコピー法によるコンクリートの劣化度評価に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 44、pp. 288-293、1990. 12
- 5) 山田和夫・山本正岳：弾性波法を適用したコンクリート内部の空隙および鉄筋位置の推定に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第1号、pp. 485-490、1991. 6
- 6) 山田和夫・山本正岳：弾性波法を適用したコンクリート内部の空隙および鉄筋位置の推定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第1号、pp. 491-496、1991. 6
- 7) 山田和夫・山本正岳：弾性波法による外壁タイルの剝離およびコンクリートのひび割れ評価に関する実験的検討、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 394-399、1991. 12
- 8) 山田和夫・山本正岳：弾性波法による外壁タイルの剝離およびコンクリートのひび割れ評価に関する解析的検討、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 400-405、1991. 12
- 9) 山田和夫・山本正岳・浅井陽一：コンクリート内部の弾性波動伝播特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻、第1号、pp. 697-702、1992. 6
- 10) 桃木佳子・山田和夫・林 隆浩・阿部秋男：衝撃弾性波法を適用した鉄筋の腐食推定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第15巻、第1号、1993. 6 (印刷中)
- 11) 境 友昭：委員会報告4 -波動理論の基礎-、杭の打込み性および波動理論の杭への応用に関するシンポジウム発表論文集、pp. 23-33、1989. 1