

論文

[1101] 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

桃木 佳子*1・山田 和夫*2・林 隆浩*3・阿部 秋男*4

1. はじめに

自然電位法や分極抵抗法などといった鉄筋の腐食推定方法は、何れもかぶりコンクリートの表面を走査する方法であるため、コンクリート表面が露出していない場合にはこれらの試験方法を適用することはできない。これに対して、鉄筋の腐食部分から反射してきた弾性波の各種特性値に着目する弾性波法は、鉄筋の一部を露出させる必要はあるが、かぶりコンクリートが露出していない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という利点がある。筆者らは、従来からコンクリートの劣化度評価[1]-[4]や内部探査[5]-[9]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。また、別報[10]では弾性波法による鉄筋の腐食推定の可能性を解析的に検討した。本研究は、それら一連の研究の延長上のもので、弾性波法の中でも特に機械的方法によって発生させた衝撃弾性波の伝播特性を利用した鉄筋の腐食推定方法の可能性を実験的に検討したものである。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、鉄筋の腐食モデルとして鉄筋断面が材軸方向で欠損している場合およびコンクリートと鉄筋との界面性状が変化している場合を取り上げ、鉄筋断面の欠損深さ ($\Delta d = 0, 2, 4$ および 8mm の4種類)、欠損長さ ($l = 0, 2, 4$ および 8cm の4種類) およびコンクリートと鉄筋との付着特性低減長さ ($l = 0, 2, 4$ および 8cm の4種類、ただし $\Delta d = 0\text{mm}$ の試験体のみ) の変化した鉄筋 (長さが 40cm (鉄筋の両端が各々 2cm 露出している)、材端おける直径が 22mm の丸鋼) を、図-

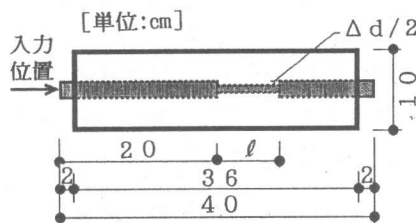


図-1 試験体の一例

表-1 実験の概要

断面欠損 Δd (mm)	断面欠損長 l (cm)	付着低減長 l (cm)
0, 2, 4, 8	0, 2, 4, 8	0, 2, 4, 8

1に示すように、 $10 \times 10 \times 36\text{cm}$ のコンクリート断面中央に埋設し、これらの鉄筋の断面変化を衝撃弾性波法を適用して推定した。なお、コンクリートと鉄筋との付着特性は、鉄筋をガムテープでテーピング (厚さ $= 1\text{mm}$) することによって低減させた。実験の概要を表-1に示す。

2.2 試験体の製作および養生方法

コンクリートの製作に際しては、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂 (最大寸法 $= 5\text{mm}$ 、表乾比重 $= 2.60$) および天竜川産の川砂利 (最大寸法 $= 20\text{mm}$ 、表乾比重 $= 2.65$) を用いた。コンクリートの調合は、水セメント比 (W/C) を 0.6 、設計スランプを 18cm に設定して試し練りによって決定した。本実験で用いたコンクリートの調合表を表-2に示す。試験体は、打設後 24

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

時間で脱型後直ちに、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $80 \pm 5\%$ の養生室内で空中養生を行った。試験材令は約6ヶ月である。なお、試験体の個数は、各要因毎に1個とした。

2.3 計測・処理方法

本実験で用いた計測システムのブロックダイアグラムを図-2に示す。計測に際しては、まず直径が0.5mmで硬さがHBのシャープペンシルの芯を圧折することによって発生させた衝撃弾性波を鉄筋端面から入力し、伝播弾性波を検出用の超小型圧電形

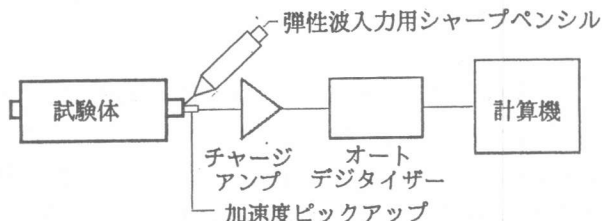


図-2 計測システムのブロックダイアグラム

加速度ピックアップ (PV-90B型) で検出した。検出された弾性波は、チャージアンプ (6D07型) で増幅した後、一旦オートデジタイザ (サンプリング間隔および個数: $1 \mu\text{s}$ および1024個/1データ、分解能: 12bit) に記憶させ、その後GP-1Bインターフェースを介して計算機に転送して各種の波形処理を行った。計測は同一試験体に対して繰返し20回行い、計測波形の集合平均化処理を施して雑音の影響を極力低減させるよう工夫した。なお、加速度ピックアップは、ピックアップ接着用ワックス (YJ-0216型) を用いて鉄筋断面中央に直接接着した。

表-2 調合表

W/C (%)	標準調合 (kg/m^3)			
	水	セメント	砂	砂利
60	200	333	740	1060

3. 内部鉄筋の形状推定方法

ここでは、本研究で用いた検出反射波の到達時刻と速度成分に着目した鉄筋の形状推定方法について述べる。

3.1 波動速度の反射・透過

鉄筋中を伝播する波動が腐食によって材質や断面積が種類 $i-1$ から i へと変化する境界面 i に到達すると、一部は境界面を透過するが、一部は反射する。この時、透過率 (T_i) および反射率 (R_i) を波動速度で評価すると、 T_i および R_i は、それぞれ

$$T_i = \frac{2\eta_{i-1}}{1 + \eta_{i-1}}, \quad R_i = \frac{1 - \eta_{i-1}}{1 + \eta_{i-1}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表されることが知られている。ここに、 $\eta_{i-1} = Z_i / Z_{i-1}$: インピーダンス比 (Z_{i-1} および Z_i は、それぞれ入力側および透過側の機械インピーダンス)。なお、鉄筋のような棒材の機械インピーダンス (Z) は、次式で与えられる。

$$Z_i = A_i \cdot E_i / v_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A_i : 鉄筋の断面積、 E_i : ヤング係数、 v_i : 波動の伝播速度。したがって、ヤング係数 (E) および波動の伝播速度 (v) が鉄筋内部で一定と仮定できる場合には、インピーダンス比 η は鉄筋の断面積比となる。

3.2 弾性波入力点で検出される反射波の速度比

(1) 鉄筋内部の境界面で反射した波動

波動の距離減衰を考慮し、かつ多重反射の影響を無視すると、 i 番目の境界から反射した波動

が入力点に到達したときの波動速度の入力速度に対する比率 (V_i) は、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \text{— } i \text{ 境界面からの反射} \\
 V_i &= 2 \left\{ \underbrace{T_1 \cdot T_2 \cdots T_{i-1}}_{\text{入力方向の透過}} \cdot R_i \cdot \underbrace{\{T_{i-1}' \cdots T_1'\}}_{\text{反射方向の透過}} \right\} \lambda^{L_i} \\
 &= 2 \prod_{j=1}^{i-1} \left\{ \frac{4 \eta_j}{(1 + \eta_j)^2} \right\} \frac{1 - \eta_i}{1 + \eta_i} \lambda^{L_i} \cdots \cdots \cdots (3)
 \end{aligned}$$

ここに、 λ : 波動速度の単位長さ当たりの減衰率、 L_i : 入力点から i 番目の境界までの距離。

(2) 終点の境界で反射した波動

終点の境界 n が自由端の場合には、自由端からの反射率 R_n が 1 となるため、入力点に到達した波動速度の入力値に対する比率 (V_n) は、次のようになる。

$$V_n = 2 \prod_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{4 \eta_i}{(1 + \eta_i)^2} \right\} \lambda^{L_n} \cdots \cdots \cdots (4)$$

また、終点の境界 n が固定端の場合には、固定端からの反射率 R_n が -1 となるため、この場合の V_n は、次式で与えられる。

$$V_n = -2 \prod_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{4 \eta_i}{(1 + \eta_i)^2} \right\} \lambda^{L_n} \cdots \cdots \cdots (4)'$$

3.3 パラメータの算定方法

鉄筋が n 個の節点 (始点が 1、終点が n) で分割されている場合を考える。いま、終点 (境界 n) が自由端で、その境界からの反射波の到達速度 (式(4)) と境界 $n-1$ からの反射波の到達速度 (式(3)) との比 I_{n-1} を求めると、以下のようになる。

$$I_{n-1} = \frac{V_n}{V_{n-1}} = \frac{4 \eta_{n-1}}{1 - \eta_{n-1}^2} \lambda^{L_n - (L_{n-1})} \cdots \cdots \cdots (5)$$

ただし、終点が固定端の場合には、式(4)の代わりに式(4)' を用いなければならない。また、境界 $n-1$ からの反射波の到達速度と境界 $n-2$ からの反射波の到達速度との比 (I_{n-2}) は、

$$I_{n-2} = \frac{V_{n-1}}{V_{n-2}} = \frac{4 \eta_{n-2}}{1 - \eta_{n-2}^2} \frac{1 - \eta_{n-1}}{1 + \eta_{n-1}} \lambda^{(L_{n-1}) - (L_{n-2})} \cdots \cdots \cdots (5)'$$

となり、同様の手順で順次 I_{n-3} 、 \cdots 、 I_2 、 I_1 を求めることができる。

断面の形状変化に関連するインピーダンス比 η_{n-1} は、減衰率 λ が仮定されれば、式(5)より次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \eta_{n-1} &= \left[-2 \lambda^{L_n - (L_{n-1})} + \left\{ 4 \lambda^{2(L_n - (L_{n-1}))} + (V_n / V_{n-1})^2 \right\}^{1/2} \right] \\
 & \quad / (V_n / V_{n-1}) \cdots \cdots \cdots (6)
 \end{aligned}$$

同様の手順で、 η_{n-2} 、 \cdots 、 η_1 を順次求めることができる。

上式中のパラメータ (λ および η_i) は、以下の手順で算定する。まず、仮定した λ を式(6) に代入して $\eta_1 \sim \eta_{n-1}$ を算定する。次に、この値を式(3) ($i=1, 2, \cdots, n-1$) および 式(4) (ま

たは式(4')に代入して V_i を計算し、速度の計算結果と測定結果(V_{i-exp})との残差の二乗和が最小となる λ を繰返し計算によって決定する。本研究では、準ニュートン法による非線形最小二乗法を用いて λ の値を決定した。

鉄筋腐食による断面寸法(D)の変化は、波動の伝播速度(v)と鉄筋のヤング係数(E)を一定と仮定すると、次式を用いて算定できる。

$$RD_{i-1} = D_i / D_{i-1} = \sqrt{A_i / A_{i-1}} = \sqrt{Z_i / Z_{i-1}} = \sqrt{\eta_{i-1}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なお、鉄筋腐食による断面寸法の変化位置(x_i)は、反射波の到達時間(t_i)と波動の伝播速度(v)とを用いて、 $x_i = 0.5 \cdot t_i / v$ から計算できる。

4. 実験結果とその考察

4.1 測定結果の信頼性

図-3(a)および(b)は、それぞれ20回の計測によって得られたコヒーレンス関数および周波数伝達関数の振幅スペクトルの一例を示したものである。図-3(a)によれば、コヒーレンス関数値は、約150kHz以下の周波数領域においてはほぼ1に近い値を示しているが、それ以上の周波数域になると著しく低下する傾向を示している。したがって、測定された周波数伝達関数は、150kHz以上の周波数域では信頼性が小さいものと考えられる。この点を踏まえて、本研究では150kHzのローパス・フィルターで処理した結果を以後の解析に用いることとした。

4.2 鉄筋の長さおよび断面変化位置の推定結果

図-4は、鉄筋断面の欠損深さ(Δd)が8mmの試験体によって得られた自己相関関数を示したものである。これらの図によれば、いずれの場合も約64 μ sの時間間隔(Δt)毎にかなり有意な正の相関があることがわかる。この時間間隔64 μ sは、鉄筋中を伝播する弾性波の伝播速度($V_L=6250$ m/s)を用いて距離に換算すると約20cmとなり、鉄筋断面の欠損部の始点位置と合致する。また、図-5は、鉄筋断面の欠損部が存在しない試験体によって得られた結果である。この図において、 $\Delta t \approx 64\mu$ s、192 μ sおよび320 μ sの相関と $\Delta t \approx 128\mu$ s、256 μ sおよび384 μ sの相関との関係に注目してみると、前掲の図-4に示した鉄筋断面が材端から20cmの位置から欠損している試験体の場合と比較して、前者の相関値は後者の相関値よりもそれほど大きくな

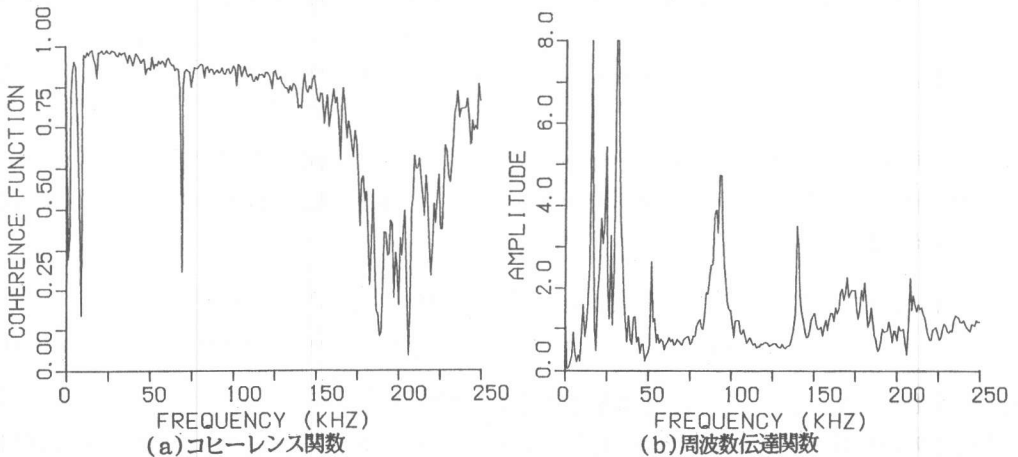
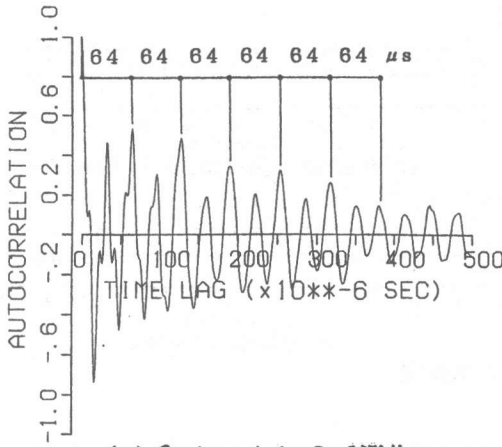
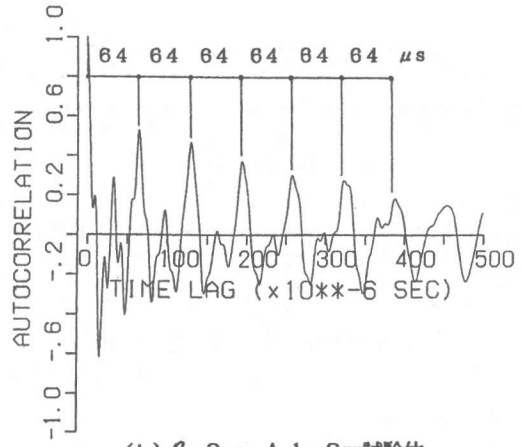


図-3 測定結果の周波数特性の一例 ($L=8$ cm, $\Delta d=8$ mm)



(a) $\phi=4\text{cm}$ 、 $\Delta d=8\text{mm}$ 試験体



(b) $\phi=8\text{cm}$ 、 $\Delta d=8\text{mm}$ 試験体

図-4 自己相関関数 (断面欠損モデル)

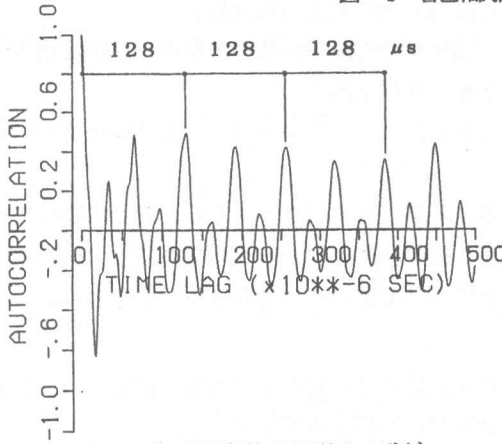


図-5 自己相関関数 (断面健全モデル)

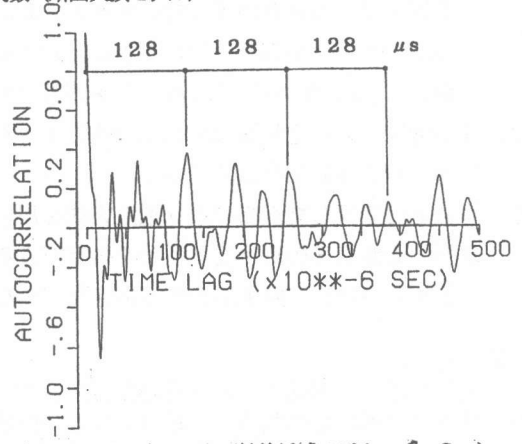


図-6 自己相関関数 (附着低減モデル、 $\phi=8\text{cm}$)

っていないことがわかる。したがって、この場合の基本周期は $64\mu\text{s}$ ではなくて $128\mu\text{s}$ と考えることができる。すなわち、この時間間隔は距離に換算すると 40cm となり、鉄筋長さと合致する。図-6は、鉄筋の表面をガムテープでテーピングした試験体によって得られた結果であるが、傾向は前掲の図-5とほぼ同様である。ただし、前掲の図-5の結果と比較すると、鉄筋断面の欠損部が存在しない試験体よりもガムテープでテーピングを施した試験体の方が時間間隔の増大に伴う相関値の減少が著しくなっており、弾性波動の距離減衰が大きくなる傾向を示している。

4.3 鉄筋の形状推定結果

図-7(a)~(d)は、第3章で示した手法を用いて得られた内部鉄筋の断面推定結果の例を示したものである。なお、内部鉄筋の断面推定に際しては、まず前処理を施した加速度データを数値積分によって速度データに変換した後、さらに得られた速度データを $6.4\mu\text{s}$ 間隔 (距離換算で 2cm に相当する) のパルス列データに変換したものを解析用データとして用いた。これらの図によれば、本実験で検出された波形には断面変化境界面からの反射波以外にも数多くの波が検出されていたため、推定精度は十分とはいえないが、鉄筋断面のおおよその変化性状は推定できていることがわかる。今後、推定精度を向上させるための雑音除去方法や波形処理方法などについて更に検討を加える必要がある。

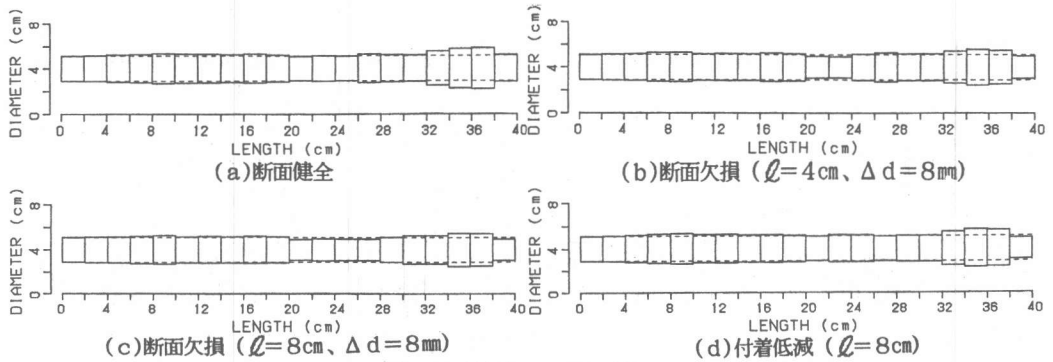


図-7 鉄筋断面の推定結果

5. 結論

本研究では、衝撃弾性波法を適用した鉄筋の腐食推定方法の可能性について実験的に検討を行った。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) シャープペンシルの芯を圧折することによって発生させた衝撃弾性波を利用した測定結果の信頼性は、約150kHz以下の周波数領域において比較的良好である。
- 2) 検出弾性波の自己相関関数の周期性を調べることによって、鉄筋の長さおよび断面変化位置をある程度正確に推定できる。
- 3) 本研究で適用した鉄筋の形状推定方法を用いることによって、コンクリート内部に存在する鉄筋のおおよその形状変化性状を推定できるが、推定精度を向上させるためには、検出波形に含まれる雑音の除去方法や波形処理方法などについて更に検討を加える必要がある。

謝辞

本実験に際して御助力を得た愛知工業大学大学院生の浅井陽一君および渡部 憲君、並びに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) 林 隆浩・山田和夫・阿部秋男・桃木佳子：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、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)