

論文

[1125] 衝撃弾性波法を適用した異形鉄筋の形状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

筆者らは、従来からコンクリートの劣化度評価[1-3]や内部探査[4-6]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、前報[7,8]では、丸鋼を対象として、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した衝撃弾性波法による鉄筋の腐食推定の可能性について一連の検討を行った。その結果、鉄筋腐食によって生じた鉄筋断面の変化性状は、衝撃弾性波法によって推定可能であることを報告した。しかし、先の実験で用いた試験体では、断面欠損位置が鉄筋長さの1/2であったため、断面欠損位置からの多重反射波と鉄筋終端からの反射波とが重なってしまい、結果の考察上問題があったこと、使用した鉄筋の長さが40cmと実構造物に埋設されている鉄筋と比べてかなり短かったため、本手法の適用限界については明らかにすることができなかつたこと、などの課題も残されていた。そのため、本報では、衝撃弾性波法を適用した鉄筋の腐食推定方法の適用限界を明らかにすることを目的として、埋設鉄筋に入力した衝撃弾性波の伝播・反射特性に及ぼす鉄筋の種類および長さ、並びに断面欠損の程度の影響について一連の実験的検討を行った。

2. 鉄筋の腐食推定方法

2.1 弾性波入力点で検出される反射波の速度比

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 から $i + 1$ 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。

いま、波動の距離減衰を考慮し、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(RV_i)は、以下ようになる。

$$RV_i = 2 \prod_{j=1}^{i-1} \left\{ \frac{4 \eta_j}{(1 + \eta_j)^2} \right\} \frac{1 - \eta_i}{1 + \eta_i} \lambda^{L_i} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\eta_i = Z_{i+1} / Z_i$:インピーダンス比 ($Z_i = A_i \cdot E_i / v_i$ 、 A_i :鉄筋の断面積、 E_i :ヤング係数、 v_i :波動の伝播速度)、 λ :波動速度の単位長さ当りの減衰率、 L_i :入力点から境界 i までの距離。

2.2 パラメータの算定方法

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と境界 $n - 1$ からの反射波の到達速度との比 I_{n-1} を求めると、以下ようになる。

$$I_{n-1} = \frac{RV_n}{RV_{n-1}} = \frac{4 \eta_{n-1}}{1 - \eta_{n-1}^2} \lambda^{L_n - (L_{n-1})} \dots\dots\dots (2)$$

* 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

同様の手順で順次 I_{n-2} 、 I_{n-3} 、 \dots 、 I_2 、 I_1 が求まる。なお、終点（境界 n ）が固定端の場合には、式(2)中の4を-4とする必要がある。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(2)で与えられ、同様の手順で順次 η_{n-2} 、 \dots 、 η_1 が求まる。鉄筋腐食による断面寸法(D_i)の変化(RD_i)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。

$$RD_i = D_{i+1} / D_i = \sqrt{\eta} \quad \dots \dots \dots (3)$$

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)とを用いて次式より計算できる。

$$x_i = 0.5 \cdot t_i / v \quad \dots \dots \dots (4)$$

3. 実験方法

3.1 実験の概要

本実験では、表-1に示す2シリーズの実験を行った。

(1) 実験-I：本実験は、検出波形に及ぼす鉄筋の種類および推定可能な鉄筋長さの限界を調べることを目的としたもので、実験要因として鉄筋の種類（ $\phi 22$ 丸鋼およびD22異形棒鋼の2種類）および鉄筋長さ（50cm、100cm、200cmおよび400cmの4種類）を取り上げた。

(2) 実験-II：本実験は、鉄筋腐食の推定精度を調べることを目的としたもので、実験要因として試験体の種類（鉄筋のみの場合、鉄筋の周りにコンクリートがある場合およびコンクリートが剥落している場合の3種類）、鉄筋の種類（ $\phi 22$ 丸鋼およびD22異形棒鋼の2種類、ただし長さは100cmのみ）、鉄筋断面の欠損深さ（ $\Delta d = 0, 2$ および8mmの3種類）、欠損長さ（ $l = 10$ および20cmの2種類）および欠損の数（無し、1箇所欠損および2箇所欠損の3種類）を取り上げた。試験体の一例を図-1に示す。

3.2 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、猿投山産の山砂(最大寸法=5mm、表乾比重=2.56)および猿投山産の山砂利(最大寸法=10mm、表乾比重=2.60)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。試験材令は約2ヶ月とした。

3.3 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

表-1 実験の概要

実験No.	試験体種類	鉄筋長さ (cm)	断面欠損 深さ Δd (mm)	断面欠損 長さ l (cm)	断面欠損 箇所
実験-I	鉄筋のみ	50, 100 200, 400	0	0	0
実験-II	鉄筋のみ かぶりコンクリート有り コンクリート剥落	100	0, 2, 8	10, 20	0, 1, 2

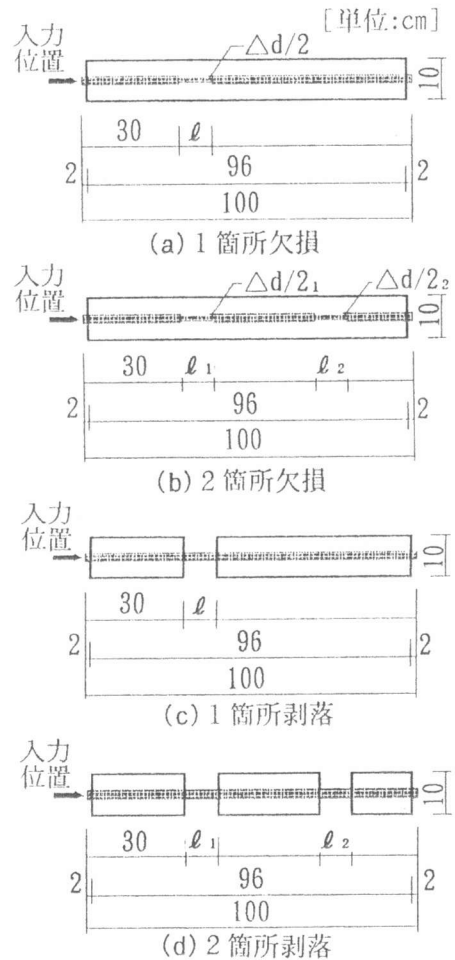


図-1 試験体の一例

表-2 調合表

W/C (%)	標準調合 (kg/m ³)			
	水	セメント	砂	砂利
60	185	308	888	845

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型加速度ピックアップ（PV-90B型）で検出した。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。検出された弾性波は、チャージアンプ

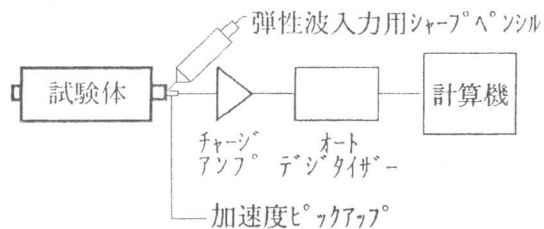


図-2 計測システムのブロック図

（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：鉄筋長さに応じて1、2、3または4 μ sおよび1024個/1データ、分解能：12bit）に記憶させ、その後にGP-IB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、原則として同一試験体に対して繰返し10回行った。ただし、一部の試験体については、処理結果に及ぼす測定回数の影響を調べるために、60回の繰返し計測を行った。

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10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。この図によれば、コヒーレンス関数値は、小試験体を用いた前報[7]の場合と同様に、約150kHz以下の周波数領域においてほぼ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、測定結果は、150kHz以上の周波数域では信頼性が低いものと考えられる。

4.2 測定結果に及ぼす鉄筋種類の影響

図-4 (a)および(b)は、それぞれ長さが400cmの丸鋼と異形棒鋼で得られた生の加速度波形データ

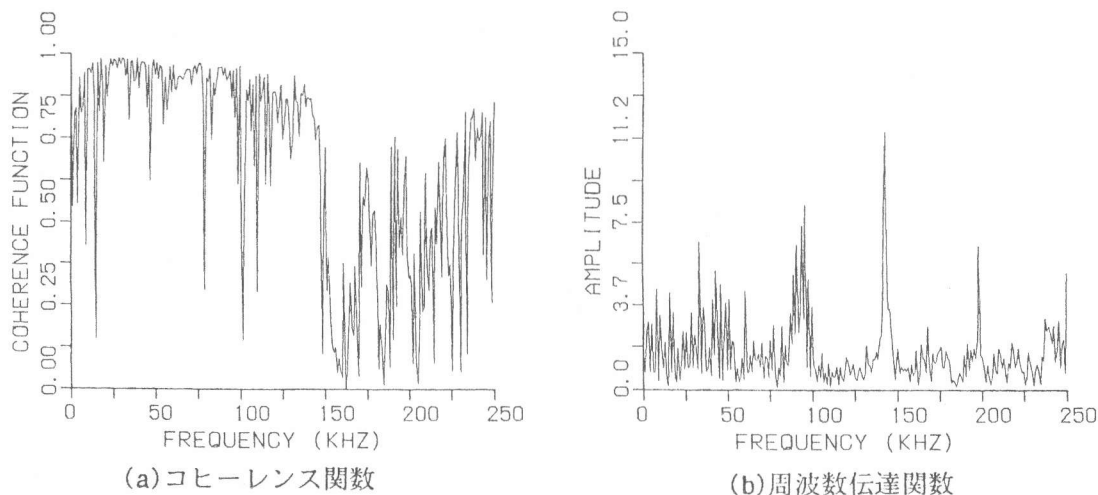


図-3 測定結果の周波数特性の一例(異形棒鋼、鉄筋のみ、 $\ell=10$ cm、 $\Delta d=2$ mm、実験- II)

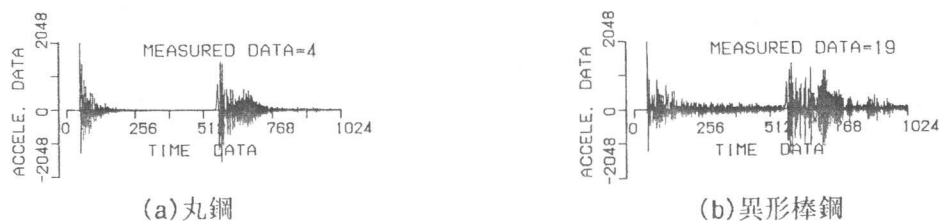


図-4 加速度波形データの一例(鉄筋長さ=400cm、実験- I)

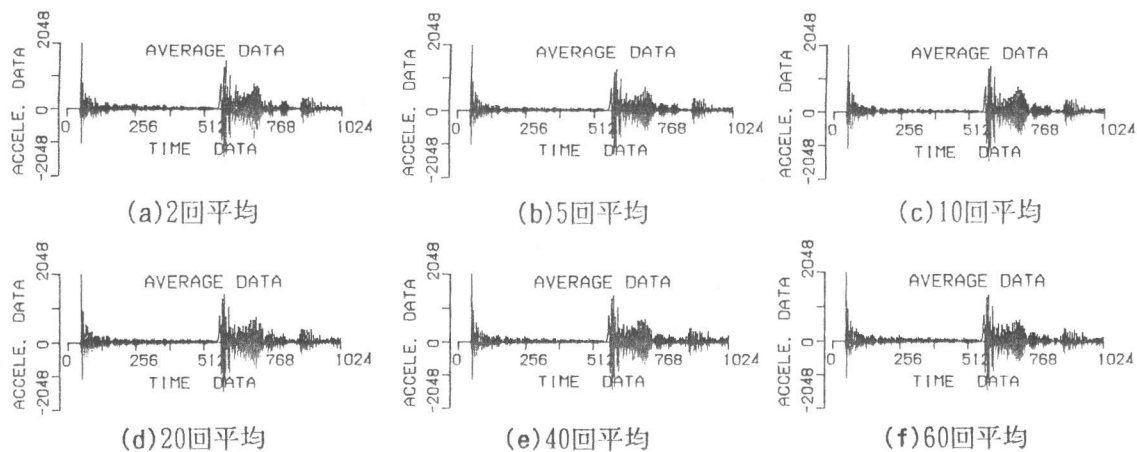
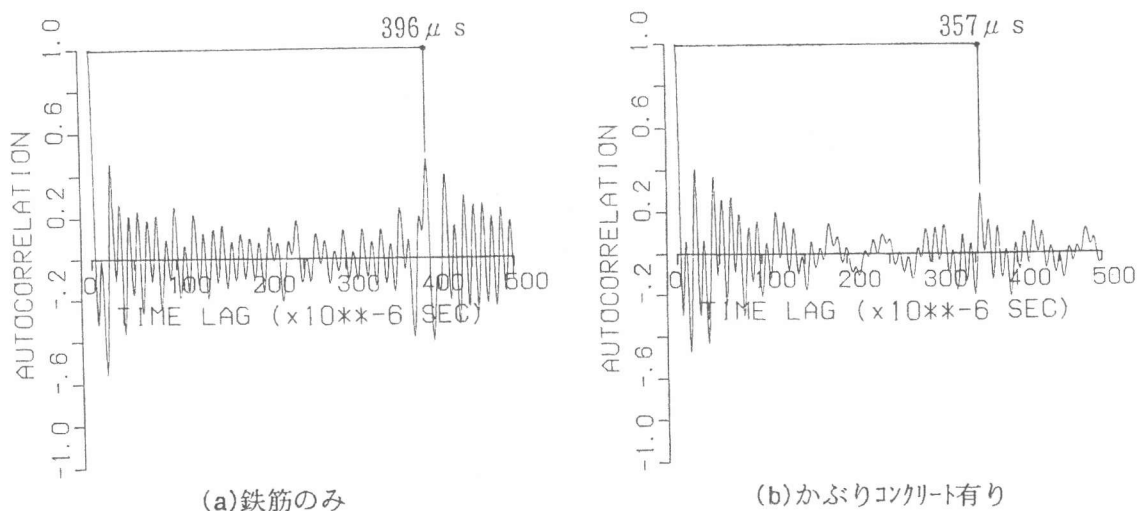


図-5 平均化された加速度波形データの例(異形棒鋼、鉄筋長さ=400cm、実験-I)

一タの一例を示したものである。これらの図によれば、鉄筋長が400cmであっても鉄筋終点位置からの反射波が明確に検出されているのがわかる。ただし、丸鋼の場合の検出波形は、弾性波入力後急激に減衰しているが、異形棒鋼の場合は、鉄筋表面の規則的な凹凸のためか、丸鋼の場合ほどの減衰を示していない。しかし、図-5に示すように、繰返し行った計測の結果の平均値で検出波形を評価すると、2~3回の測定値の平均化によって異形棒鋼で得られる検出波形も丸鋼の結果とほぼ同じとなり、検出波形に及ぼす鉄筋表面の凹凸の影響を低減できることがわかる。

4.3 鉄筋の長さおよび断面欠損位置の推定結果

図-6(a)および(b)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自己相関関数を示したもので、図(a)が鉄筋のみの結果、図(b)がかぶりコンクリートがある場合の結果である。これらの図によれば、鉄筋のみの場合には約 $396\mu\text{s}$ の時間差で、かぶりコンクリートがある場合には約 $357\mu\text{s}$ の時間差でかなり有意な正の相関が認められる。なお、本研究では、有意な相関を示す時間差の特定のために絶対値で評価した自己相関関数の包絡近似曲線を使用し、そのピーク点を有意な時間差とみなした。いま、これらの時間差が鉄筋長さに相当しているものと仮定すると、かぶりコンクリートがある場合の伝播速度は 5602m/s となり、鉄筋のみの場合(5051m/s)に比べて約10%速くなっている。これは、かぶりコンクリートがある場合には、無限媒体とまで



(a)鉄筋のみ

(b)かぶりコンクリート有り

図-6 自己相関関数(断面健全モデル、異形棒鋼、実験-II)

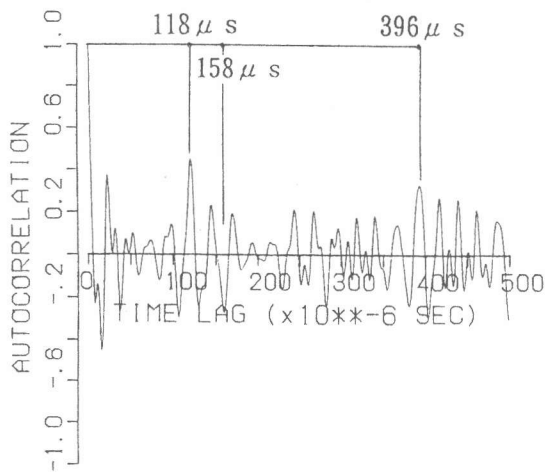


図-7 自己相関関数(断面欠損モデル、異形棒鋼、鉄筋のみ、 $l=10\text{cm}$ 、 $\Delta d=8\text{mm}$ 、実験-II)

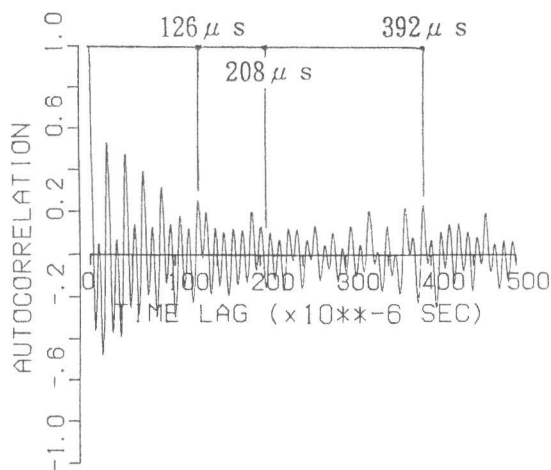


図-8 自己相関関数(コンクリート剥落モデル、異形棒鋼、 $l=20\text{cm}$ 、実験-II)

はいえませんが、少なくとも伝播媒体を細長い棒と仮定できなくなるためと思われる。

図-7は、鉄筋断面の欠損深さ(Δd)が8mmの鉄筋のみ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。この図によれば、約118 μs の時間差(Δt)と約396 μs の時間差においてかなり有意な正の相関のあることがわかる。この時間差118 μs および396 μs は、上記の鉄筋中を伝播する弾性波の伝播速度を用いて距離に換算すると、それぞれ約30cmおよび約100cmとなり、鉄筋断面の欠損部の始点位置および鉄筋長さそれぞれ合致している。また、この試験体の鉄筋断面の欠損終点位置は40cmであり、これを時間に換算すると158 μs となる。図によれば、それほど卓越はしていないものの、この時間差の位置で負の相関が認められる。

図-8は、コンクリートの剥落長さ(l)が20cmの剥落モデル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。この図によれば、約126 μs の時間差と約392 μs の時間差において有意な正の相関があるが、これらの時間差をこの試験体に対して求めた鉄筋中を伝播する弾性波の伝播速度(5102m/s)を用いて距離に換算すると、それぞれ約30cmおよび約100cmとなり、コンクリートの剥落の始点位置および鉄筋長さそれぞれ合致している。また、この試験体のコンクリート剥落終点位置は50cmで、これを時間に換算すると196 μs となるが、図によれば、若干ずれた208 μs の位置で負の相関が認められる。

以上のことから、自己相関関数における相関の有意性を調べることによって、埋設鉄筋の長さおよび断面欠損位置を評価することが可能であるといえるが、波動の伝播速度が埋設鉄筋の形状・寸法や埋設条件などによって変動することは、結果の評価に際して注意が必要といえよう。

4.4 鉄筋の形状・寸法の推定結果

図-9(a)~(h)は、第2章で示した手法を用いて行った内部鉄筋の断面推定の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距離換算で5cmに相当する間隔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、鉄筋のみの試験体の場合には、多重反射波による影響は認められるものの、鉄筋断面の変化性状をかなりの精度で推定できているが、かぶりコンクリートがある場合には、鉄筋断面の推定精度がやや悪くなっているのがわかる。これは、かぶりコンクリートがある場合、反射波が鉄筋のみの試

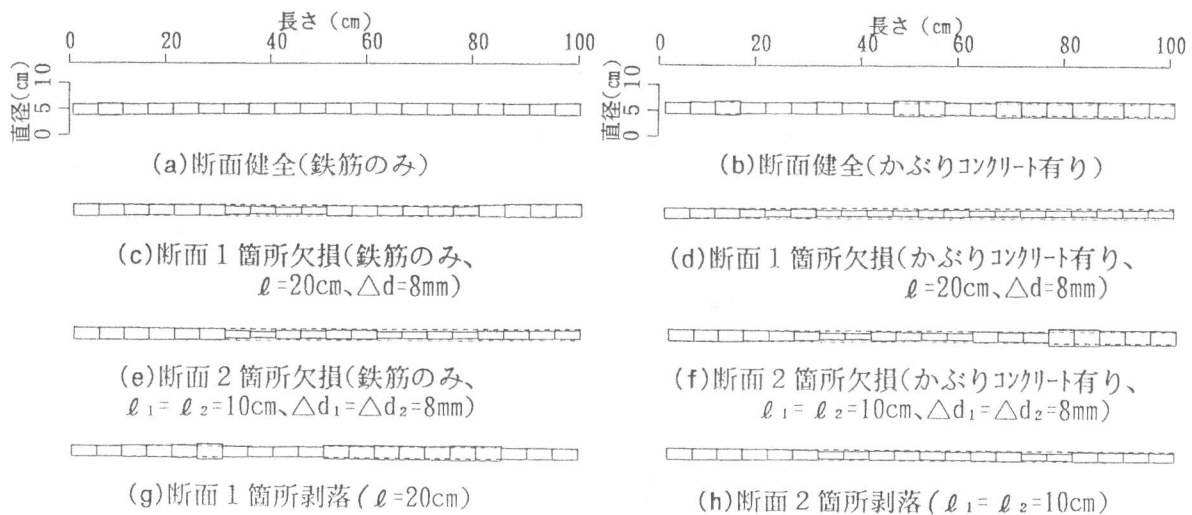


図-9 鉄筋断面の推定結果(異形棒鋼、実験-II)

験体の場合のように明確にとらえられていないためであり、衝撃弾性波の入力方法も含めて、今後更に試験方法について検討する必要がある。

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適用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) 異形棒鋼の場合、検出波形は鉄筋表面の凹凸の影響をかなり受けるが、集合平均化処理を施すことによって、検出波形に及ぼす鉄筋表面の凹凸の影響を低減させることができる。
- 2) 鉄筋のみの試験体であれば、本手法を用いることによって、400cm以上の長さを有する鉄筋の形状推定が可能である。
- 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形状変化性状をある程度の精度で推定できるが、推定精度を向上させるためには、反射波がより明確にとらえられるように、衝撃弾性波の入力方法について検討する必要がある。

謝辞

実験およびデータ整理に際して御助力を得た愛知工業大学学部学生の池田弘治君、稲富孝之君および立川みどり嬢に対して謝辞を表します。

引用文献

- 1) 山田和夫・小阪義夫: 火事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・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
- 5) 山田和夫・山本正岳: 弾性波法による外壁タイルの剥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
- 6) 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
- 7) 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、pp. 607-612、1993. 6
- 8) 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、pp. 649-654、1993. 6