

論文 鉄筋中を伝播する弾性波の減衰特性に及ぼす周辺媒体の影響

桃木 佳子*1・山田 和夫*2・林 隆浩*3・阿部 秋男*4

要旨：本研究では、鉄筋中を伝播する衝撃弾性波の減衰特性を明らかにするために、鉄筋周辺の媒体種類およびコンクリート打設後の経過時間を実験要因に取り上げて一連の検討を行った。その結果、鉄筋をとりまく媒体が無い場合、水および砂の場合には、ほぼ同様の検出波形が得られ、鉄筋終端までの弾性波の伝播時間も同程度であるが、周辺媒体がコンクリートの場合には、かぶり厚さが大きいほど、またコンクリートの硬化が進展するほど弾性波伝播時間が速くなることがわかった。

キーワード：衝撃弾性波法、鉄筋の形状・寸法、減衰特性、伝播速度、周辺媒体

1. はじめに

筆者らは、これまでに衝撃弾性波法を適用した鉄筋の腐食推定方法を確立するための基礎的研究として、コンクリートに埋設された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、長さおよび断面欠損の程度の影響について一連の検討を行ってきた[1-3]。本報では、これらの研究の延長として、衝撃弾性波の伝播・反射特性に及ぼす鉄筋をとりまく媒体の種類やかぶり厚さなどの影響について調査した。

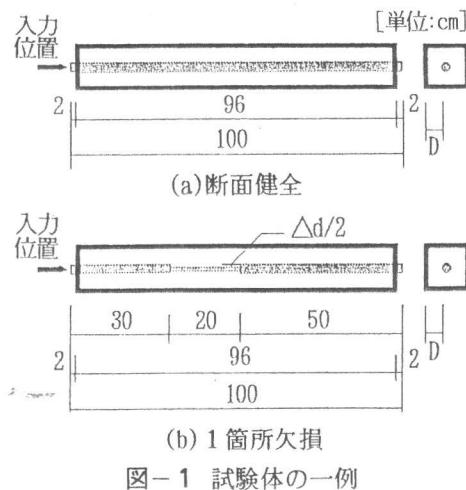
2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、表-1に示すように、実験要因として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($l = 0$ および20cmの2種類)、欠損の数(無しおよび1箇所欠損の2種類)、鉄筋をとりまく媒体の種類(コンクリート、水および砂の3種類)、並びに媒体の巻き厚($D = 2$ 、4および10cmの3種類)を取り上げた。なお、媒体がコンクリートの場合には、コンクリート打設前、打設の直後、0.5、1、2、3、4、5、8および24時間、3、7および28日の時点で計測を行い、計測結果に及ぼすコンクリート打設後の経過時間の影響についても調査した。本実験で用いた鉄筋

表-1 実験の概要

断面欠損 深さ Δd (mm)	断面欠損 長さ l (cm)	断面 欠損 箇所	媒体 の種類	材 齢	媒体の 厚さ D (cm)
0, 2, 8	0, 20	0, 1	コンクリート	$\pm 0, 0.5, 1, 2,$ $3, 4, 5, 8, 24$ (h) $3, 7, 28$ (d)	2, 4, 10
			水 砂	0	



*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)技術部工法課次長、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

はD22異形棒鋼、長さは100cmとした。試験体の一例を図-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=5mm、表乾比重=2.60)および天竜川産の川砂利(最大寸法=20mm、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を表-2に示す。

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

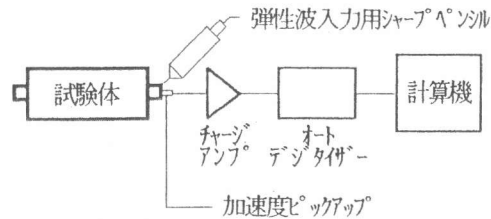


図-2 計測システムのブロックダイアグラム

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加速度ピックアップ(PV-90B型、振動数範囲=1~25,000Hz)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(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:1μsおよび1024個/1データ、分解能:12bit)に記憶させ、その後に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、原則として同一試験体に対して繰返し15回行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 計測結果に及ぼす断面欠損深さの影響

図-3(a)および(b)は、それぞれ鉄筋断面の欠損深さ(Δd)が2mmおよび8mmで欠損の数が1箇所の鉄筋を空中につるした試験体で得られた生の加速度波形データの一例を示したものである。これらの図によれば、いずれの場合も鉄筋終端、欠損の始点および終点位置からの反射波は検出できるが、欠損深さが8mmの試験体の方が反射波が明確であり、欠損が深いほど反射波の検出が容易であることがわかる。

3.2 計測結果に及ぼす媒体種類の影響

図-4および図-5は、それぞれ欠損が無い場合および欠損が1箇所の場合の鉄筋を空中につるした試験体によって得られた結果を示したもので、図(a)が検出加速度波形データの一例、図(b)がその自己相関関数を示したものである。これらの図によれば、欠損の有無にかかわらず検出加速度波形データから打撃波および鉄筋終端からの反射波の検出は可能であるが、自己相関関数を用いると鉄筋断面の欠損の始点および終点位置からの反射波も検出可能であることがわかる。すなわち、欠損の有無にかかわらず約

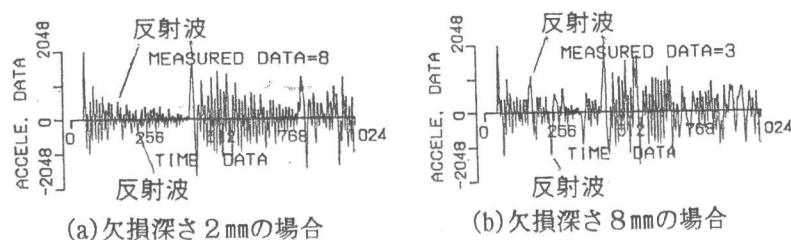
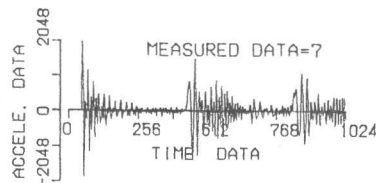
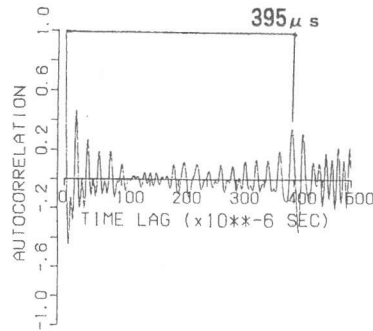


図-3 検出加速度波形の一例(断面1箇所欠損モデル)

395 μ s の時間差 (Δt) でかなり有意な正の相関が認められるが、この時間差395 μ s は、鉄筋中を伝播する弾性波の伝播速度(約5063m/s)を用いて距離に換算すると100cmとなり、鉄筋長さと合致する。また、1箇所欠損の場合には、約122 μ s および約195 μ s の時間差でそれぞれ有意な正の相関および負の相関が認められるが、これらの時間差を距離に換算すると、それぞれ鉄筋断面の欠損始点位置および終点位置とほぼ合致している。

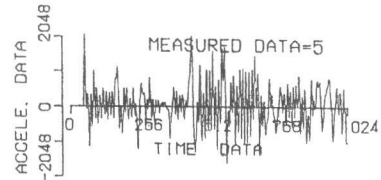


(a) 検出波形

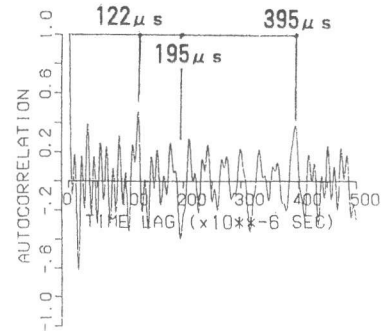


(b) 自己相関関数

図-4 反射波の検出性能 (断面健全モデル、空中)



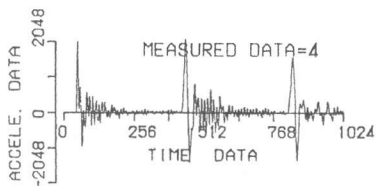
(a) 検出波形



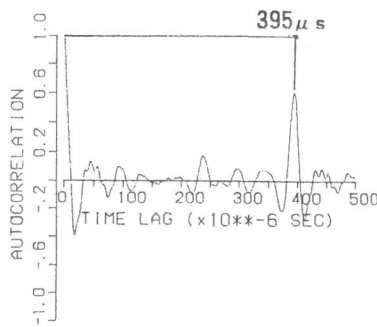
(b) 自己相関関数

図-5 反射波の検出性能 (断面1箇所欠損モデル、空中、 $\Delta d=8$ mm)

図-6~8は、鉄筋断面が健全なモデル試験体によって得られた結果を媒体の種類別に示したもので、図(a)が検出加速度波形データの一例、図(b)がその自己相関関数を示したものである。これらの図によれば、媒体が水および砂の場合には、鉄筋終端からの反射波が明確に検出され、鉄筋終端位置に相当する時間差(約395 μ s)で有意な正の相関が認められる。一方、媒体が硬化コンクリート(材齢7日)の場合には、約354 μ s の時間差で有意な正の相関が認められるが、この時間差が鉄筋長さに相当しているものと仮定すると伝播速度は5650m/sとなり、媒体が無い場合、水および砂の場合(約5063m/s)に比べて約10%速くなっている。これは、コンクリート

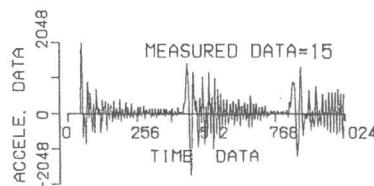


(a) 検出波形

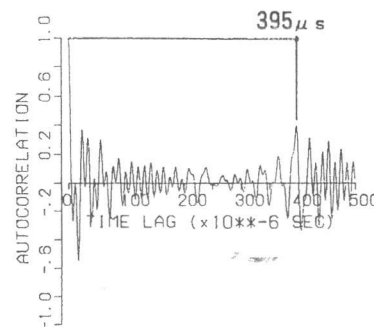


(b) 自己相関関数

図-6 反射波の検出性能 (断面健全モデル、水、D=4cm)

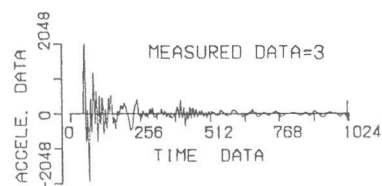


(a) 検出波形

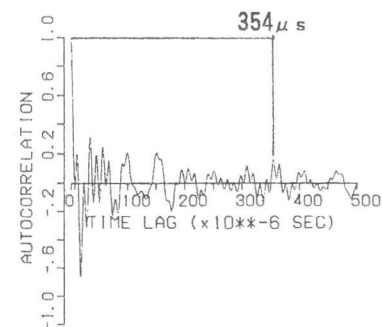


(b) 自己相関関数

図-7 反射波の検出性能 (断面健全モデル、砂、D=4cm)



(a) 検出波形



(b) 自己相関関数

図-8 反射波の検出性能 (断面健全モデル、コンクリート、D=4cm)

が硬化すると、無限媒体とまではいえないが、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。

3.3 計測結果に及ぼすコンクリートの材齢およびかぶり厚さの影響

図-9~11は、それぞれコンクリートのかぶり厚さが2、4および10cmの断面健全モデル試験体によって得られた検出波形およびその自己相関関数の経時変化を示したものである。これらの図を比較すると、いずれの図もコンクリート打設後1時間では鉄筋終端からの反射波到達時間は約 $395\mu\text{s}$ となっているが、コンクリート打設後の時間がそれ以上経過すると、鉄筋終端からの反射波の到達時間は、経過時間およびかぶりコンクリートの厚さによってかなり相違することがわかる。すなわち、コンクリートのかぶり厚さが2cmの試験体では、コンクリートの硬化が進

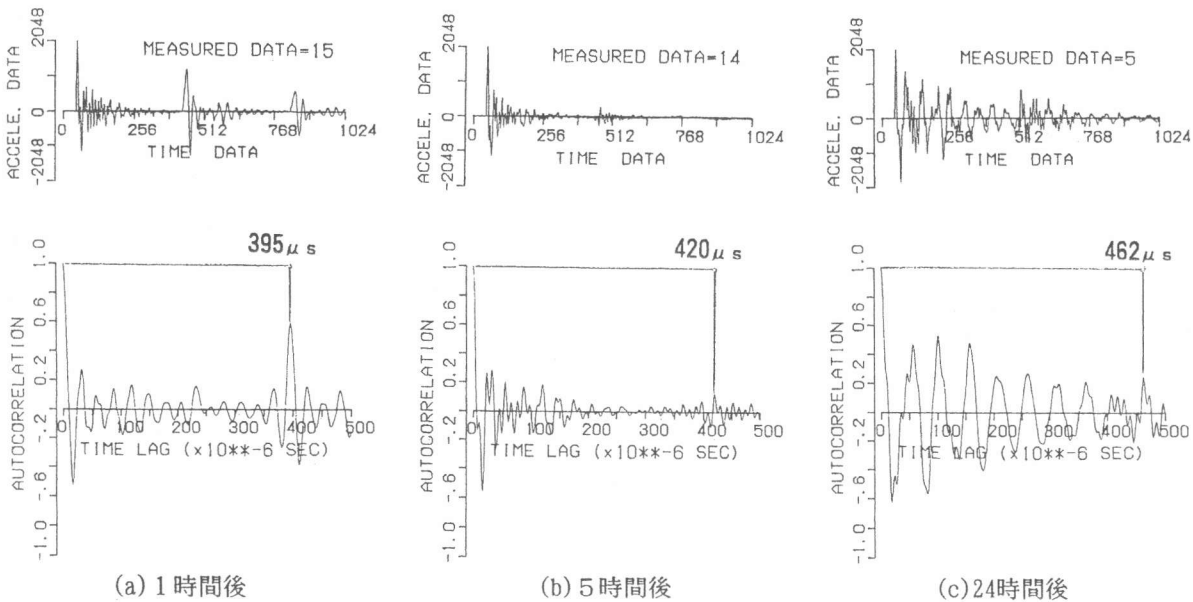


図-9 測定結果の経時変化 (断面健全モデル、D=2cm)

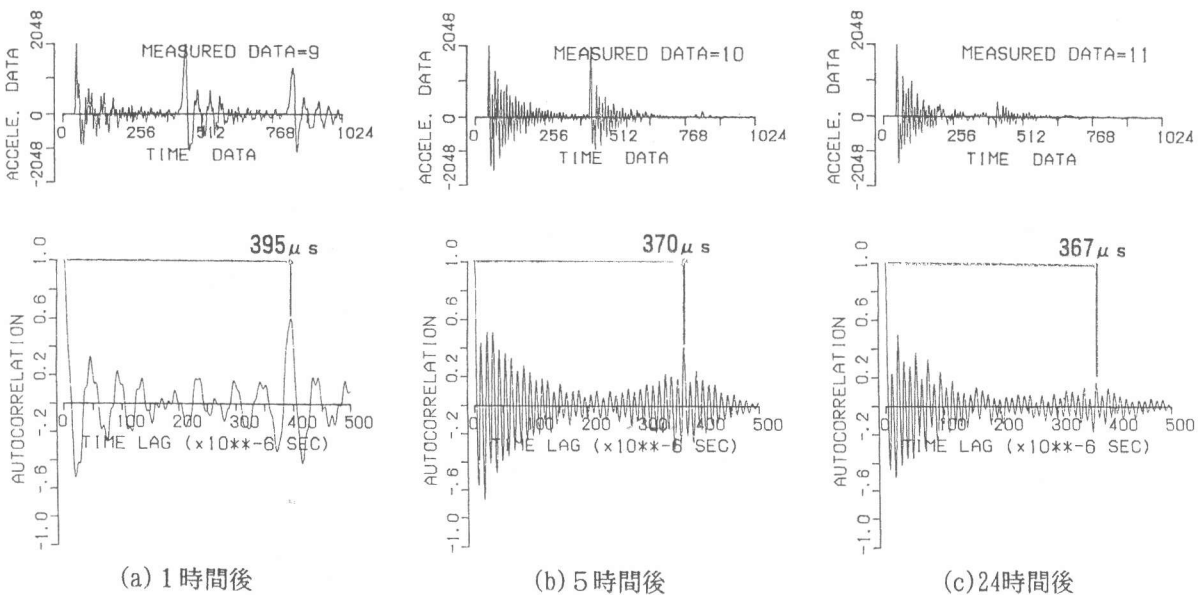


図-10 測定結果の経時変化 (断面健全モデル、D=4cm)

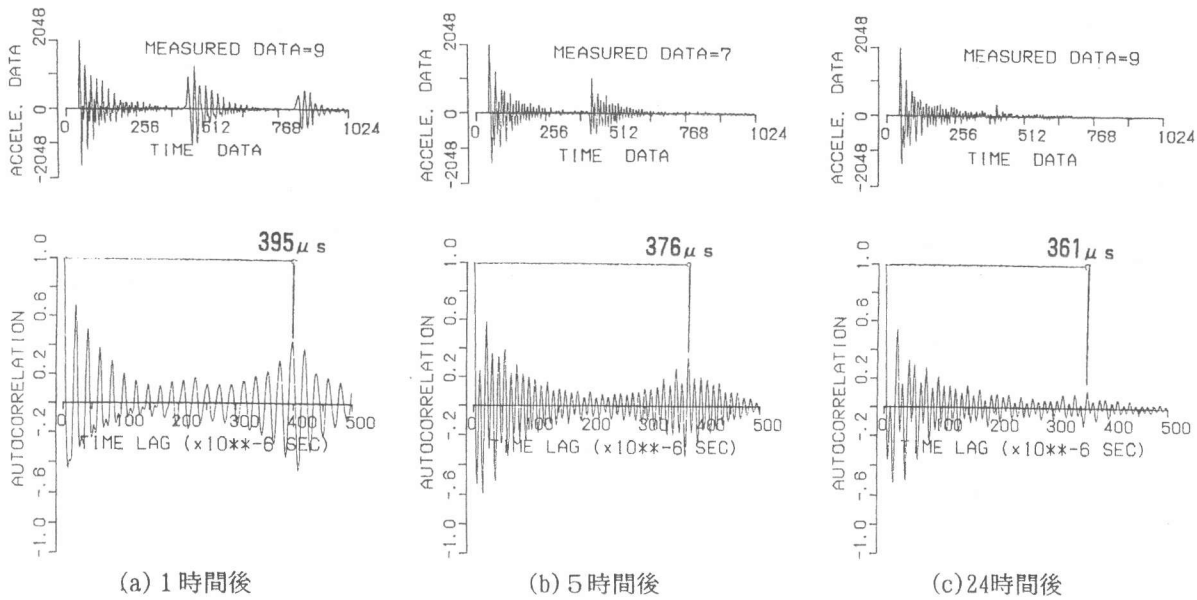


図-11 測定結果の経時変化 (断面健全モデル、D=10cm)

展するとともに弾性波の減衰する効果の方が卓越するようになるためか、鉄筋終端からの反射波到達時間は、見掛け上5時間経過後が $420\mu\text{s}$ 、24時間経過後が $426\mu\text{s}$ というように次第に遅くなっているが、かぶり厚さが4および10cmの試験体の場合には、上述のように伝播媒体を細長い棒と仮定できなくなる効果の方が卓越するためか、かぶり厚さが4cmの場合には5時間経過後が $370\mu\text{s}$ 、24時間経過後が $367\mu\text{s}$ 、かぶり厚さが10cmの場合には5時間経過後が $376\mu\text{s}$ 、24時間経過後が $361\mu\text{s}$ 、というように逆に速くなっていくのがわかる。なお、これらの反射波の到達時間を用いて弾性波の伝播速度を算定すると、コンクリートのかぶり厚さが2cmの場合、打設後1時間： 5060m/s 、打設後5時間： 4760m/s および打設後24時間： 4330m/s 、かぶり厚さが4cmの場合、打設後1時間： 5060m/s 、打設後5時間： 5410m/s および打設後24時間： 5470m/s 、かぶり厚さが10cmの場合、打設後1時間： 5060m/s 、打設後5時間： 5320m/s および打設後24時間： 5550m/s となる。ただし、コンクリートがフレッシュの状態では、打撃波および鉄筋終端からの反射波は明確に検出できるが、コンクリートの硬化が進展するとともに、検出可能ではあるが鉄筋終端からの反射波がとらえ難くなる傾向を示している。また、図には示していないが、コンクリート打設後24時間以上の時間が経過すると、検出波形はほぼ一定となることがわかった。

4. 鉄筋の形状・寸法の推定結果

図-12(a)~(l)は、前報[1-3]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パルス列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、鉄筋断面の欠損が深いものほど断面欠損位置が明確に推定できていることがわかる。また、鉄筋をとりまく媒体が砂および水の場合には、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、媒体がコンクリートの場合には、コンクリート打設後の時間が経過するに従って推定精度が悪くなっている。

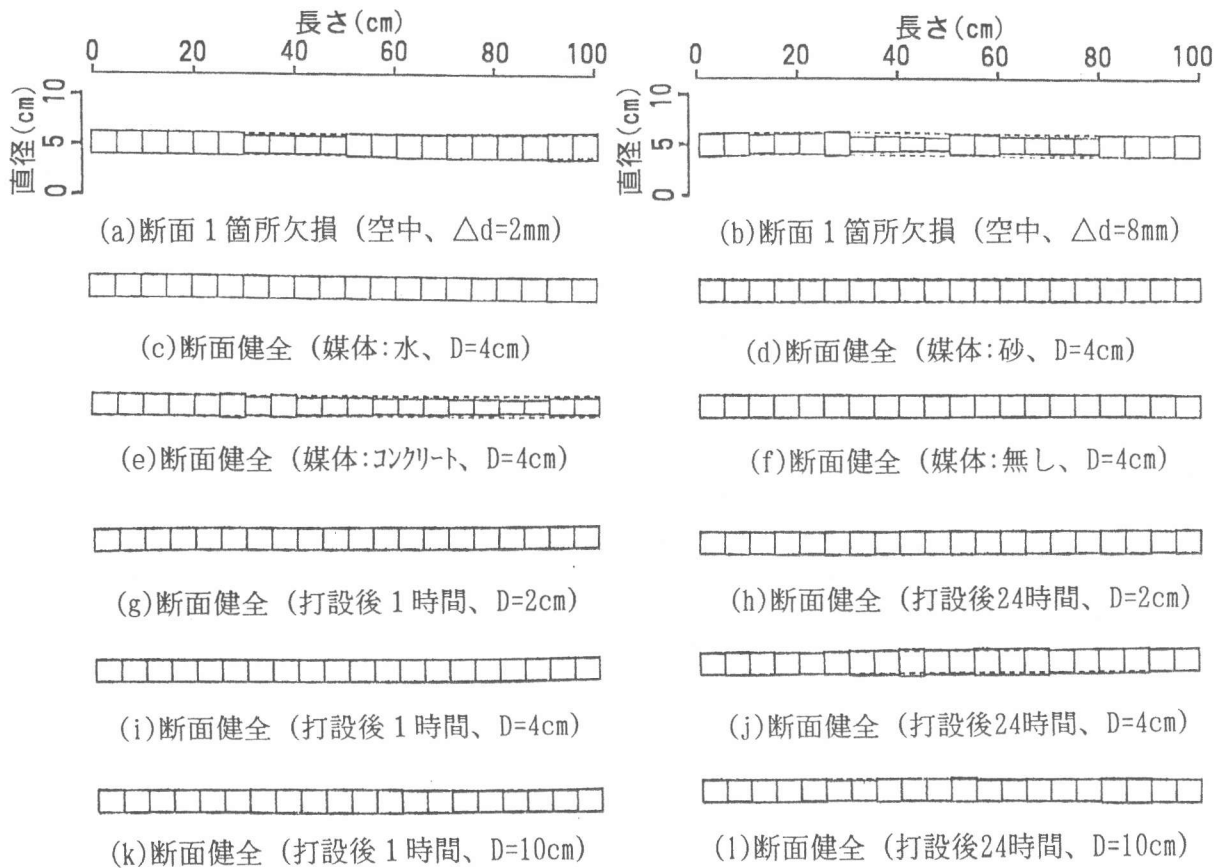


図-12 鉄筋断面の推定結果

5. 結論

本研究では、鉄筋中を伝播する衝撃弾性波の減衰特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) 衝撃弾性波法を適用する場合、鉄筋断面の欠損深さが深いほど鉄筋の欠損位置の検出精度は向上する。
- 2) 鉄筋をとりまく媒体が無い場合、水および砂の場合には、ほぼ同様の波形が検出され、鉄筋終端までの弾性波の伝播時間も同程度であるが、コンクリートの場合には、かぶり厚さが大きいほど、コンクリートの硬化が進展するほど弾性波伝播時間が速くなる。
- 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本多貴広君、松井 勝君および桃木昌子嬢（現：愛知工業大学大学院生）に対して謝辞を表します。

引用文献

- 1) 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、Vol.15、No.1、pp.607-612、1993.6
- 2) 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、Vol.15、No.1、pp.649-654、1993.6
- 3) 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異形鉄筋の形状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、Vol.16、No.1、pp.759-764、1994.6