

論文 超音波法による断面修復した鉄筋コンクリートの欠陥検出および鉄筋の影響に関する検討

木村 耕蔵^{*1}・渡辺 健^{*2}・橋本 親典^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨: 断面修復工法によって補修された鉄筋コンクリートにおいては、再劣化などの損傷が生じる可能性がある。そこで、母材と補修材との境界付近に鉄筋と欠陥が存在する供試体を作製し、超音波法による欠陥検出および鉄筋の影響の検討を実施した。その結果、断面修復箇所での境界面上の欠陥検出は、鉄筋下面に欠陥が存在する場合、鉄筋からの反射が影響するものの、計測条件が良好な場合には空隙を検出できる可能性がある。また、鉄筋からセンサを遠ざけることにより、鉄筋の影響を小さくできることが確認された。

キーワード: 超音波法, 断面修復, 欠陥, 反射, 鉄筋

1. はじめに

コンクリート構造物の補修の手法の一つとして断面修復工法がある。これは、コンクリート構造物が劣化により元の断面を喪失した場合の修復や、中性化、塩化物イオンなどの劣化因子を含むかぶりコンクリートを撤去した場合の修復を目的とした手法である。断面修復工法では、施工が適切であっても、経年劣化や進行性の劣化により、修復材料と元のコンクリート部材との間の付着が失われてひび割れや剥離が生じる可能性がある。また、そのひび割れや剥離は表面に変状として表われにくく、目視検査では検出されにくいと考えられる。

本研究では、断面修復後に生じた欠陥を評価する方法として弾性波法の一つである超音波法に着目した。弾性波法を用いた補修後の評価手法として、ひび割れ注入材の充填度評価¹⁾やひび割れおよび浮き等の補修効果²⁾の確認に関する研究がなされている。我々は断面修復における検討として修復断面中に空隙を埋設したコンクリート供試体において超音波法を用いて空隙の検出を試み、一定の成果を得た³⁾。ただし、基礎的な検討であった。無筋コンクリートの供試体での実験であり、鉄筋コンクリートでの検討はなされていない。

そこで、本研究では、断面修復工法によって補修された鉄筋コンクリート部材を対象とした。母材と補修材の境界面付近に欠陥を生じた構造物を想定し供試体を作製し、超音波法による欠陥検出および鉄筋の影響の検討を実施した。

2. 実験概要

超音波法は、センサの使用数、設置方法によって計測

方法を分類できる⁴⁾。本研究では断面修復を行った表面から内部の欠陥を検出することを想定し、二探触子一面法および一探触子一面法での計測を実施した。以下にその実験概要を示す。

2.1 供試体

供試体の寸法は図-1に示すように、縦 900mm×横 900mm×厚さ 150mm のものを作製した。母材と補修材との間に直径 13mm の鉄筋、サイズの異なる欠陥を図のように埋設した。断面修復箇所は、供試体上部の約 56mm とした。かぶりは、30mm となっている。補修材には、市販のプレミックスタイプのポリマーセメントモルタルを使用した。配合は、粉体と液体の重量比を 100 対 18 とした。欠陥として、直径 100mm 厚さ 3mm、直径 50mm 厚さ 3mm、直径 100mm 厚さ 1mm の塩化ビニル板を鉄筋の下に埋設した。既往の研究では厚さ 3 mm のスチロール製の空隙や、気泡緩衝材については検出ができることが確認されており³⁾、ここではさらにひび割れのような幅の狭い空隙を想定して、1mm の塩化ビニル板を使用した。材質の違いによる影響は考慮していない。図-1 中のアルファベットは空隙、鉄筋の位置を示しており、●は厚さ 3mm の塩化ビニル板、○は 1mm の塩化ビニル板を示している。また格子状に引いている線は鉄筋を示している。写真-1(a) (b) (c)にそれぞれ塩化ビニル板の種類、塩化ビニル板の供試体への配置の写真、センサの写真を示す。

ポリマーセメントモルタルの圧縮強度は 43.7 N/mm²、密度は 2.17 g/cm³、超音波伝搬速度は 3868m/s、コンクリートの圧縮強度が 37.1 N/mm²、密度は 2.28 g/cm³、超音波伝搬速度は 3832m/s であった。媒質の密度と伝搬速度

*1 徳島大学 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学 ソシオテクノサイエンス部助教授 博士 (工学) (正会員)

*3 徳島大学 ソシオテクノサイエンス部教授 工博 (正会員)

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生科学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 配合表

骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比(%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤(AE)	
					W	C	S	G	減水剤 補助剤	
20	12±2.5	4±1	50	45	175	350	780	935	35	2.1

との積である音響インピーダンスは、ポリマーセメントモルタルが $8.39 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 、コンクリートが $8.74 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ となる。これらに大きな差は無いが、音響インピーダンスが異なる境界面では弾性波の反射や透過が生じるため、補修が確実に行われていても理論上は小さいながらも反射が生じる。

2.2 超音波による計測

市販の超音波計測装置を用いて計測を行った。この装置のパルスタイプは矩形パルスであり、発信周波数は30KHz～10MHz まで、パルス電圧は10V～600V まで変えることができる。波数は複数個入力可能であるが、今回は単純に1つとした。使用しているセンサは、外径52.0mm の広帯域型センサを使用した。センサを供試体表面に設置する際は、接着面が良好になるように水溶性の接触溶媒を使用し、波形が安定するまで押しつけて波形を計測した。二探触子一面法では二つのセンサを使用して、一つのセンサから超音波を送信し、供試体内を伝達させ、欠陥や底面から反射してきた波をもう片方のセンサで受信を行う。一探触子一面法では二探触子一面法と同じセンサを使用して、送受信を一つのセンサで行っている。一般的には一探触子一面法は、S/N 比が小さくなるため空隙の欠陥検出の感度が低くなると言われているが、センサが一つであることから計測は比較的容易となる。二探触子一面法および一探触子一面法を用いて、図-1 に示す A～L の欠陥および健全個所での計測を行った。本論文では、紙面の都合上、代表的な計測結果を示すこととする。二探触子一面法での計測では、鉄筋上におけるセンサ設置位置の影響を検討するために、C にて鉄筋に対するセンサ設置位置を変えて計測を行った。また、センサと鉄筋および欠陥の距離を変更することにより、鉄筋の影響範囲を検討するために D および J にて計測を行い比較検討した。

欠陥までの深さや供試体の厚さは、反射波の検出された時間より推定が可能であり、「時間 = (欠陥までの距離 × 2) ÷ 超音波の伝搬速度」となる。よって、今回の供試体では、欠陥からの反射波は 30μsec 付近で、鉄筋からの反射は 15μsec 付近で反射波が出現すると考えられる。供試体底面の反射波は 75μsec 付近で出現すると考えられる。今回の計測において反射波は、目視により計測波形の振幅が明らかに増大している個所を反射波と判断した。

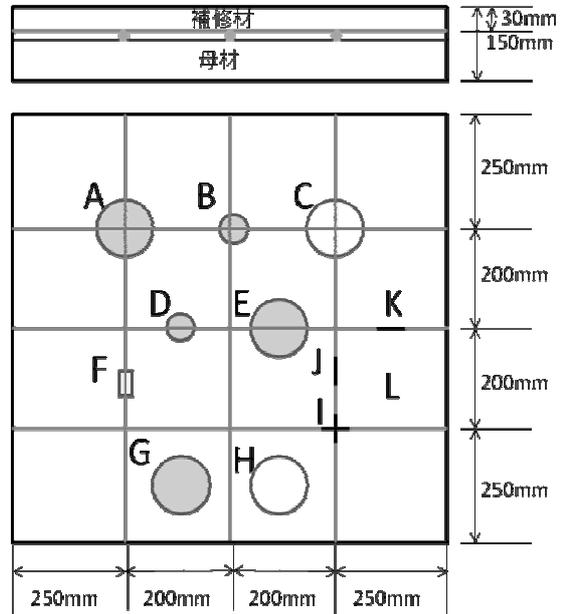
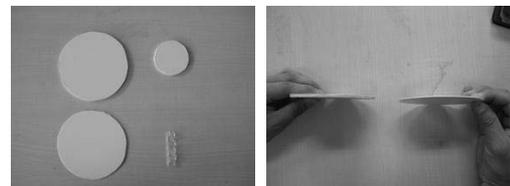
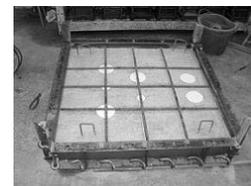


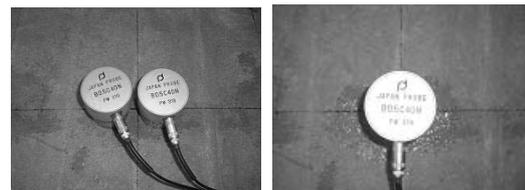
図-1 供試体の寸法・欠陥、鉄筋の配置図



欠陥の種類 欠陥の厚さ
(a) 欠陥の概要

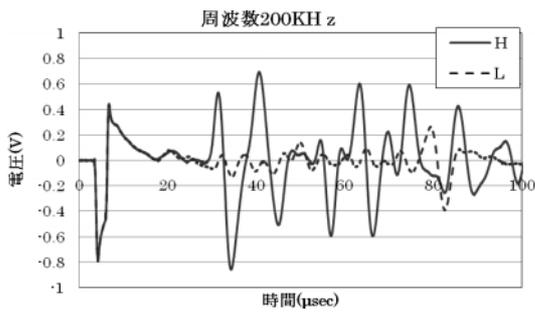


(b) 欠陥の配置図

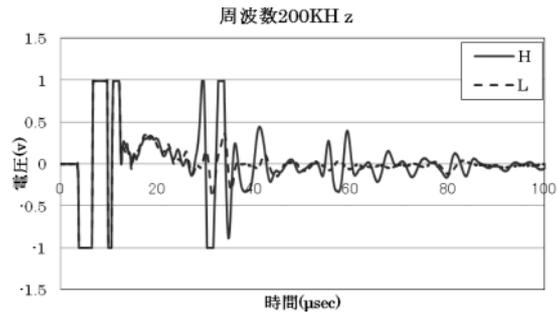


二探触子一面法 一探触子一面法
(c) センサの写真

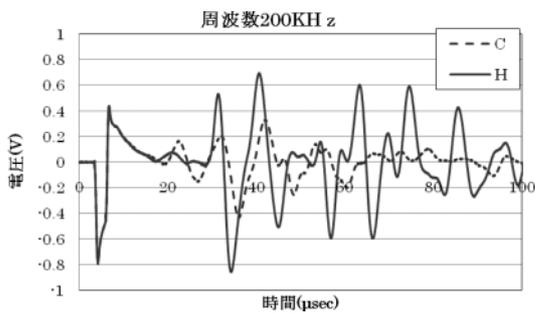
写真-1 供試体の概要



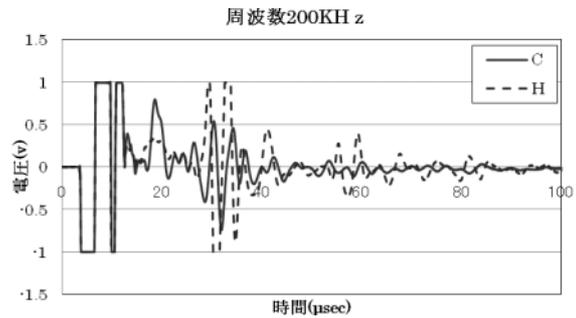
(a) 鉄筋なしの場合の欠陥の有無の比較



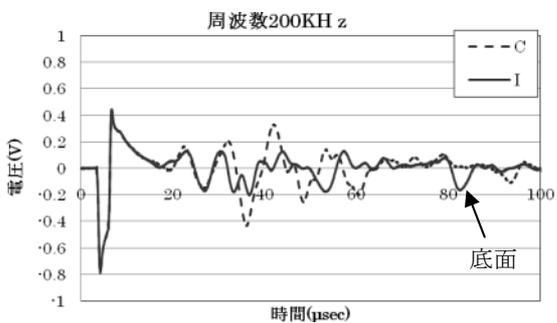
(a) 鉄筋なしの場合の欠陥の有無の比較



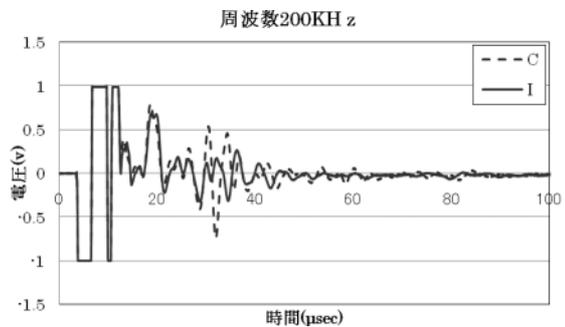
(b) 鉄筋の有無で欠陥が有る場合の比較



(b) 鉄筋の有無で欠陥が有る場合の比較



(c) 鉄筋有で欠陥の有無の比較



(c) 鉄筋有で欠陥の有無の比較

図-2 二探触子一面法の検出結果

図-3 一探触子一面法の検出結果

3. 実験結果および考察

3.1 二探触子一面法の計測

計測条件として、センサを鉄筋または欠陥直上に設置し、周波数を 200KHz、電圧を 300V、サンプリング周波数を 50MHz で記録した受信波形を図-2 に示す。図-2(a)は、図-1 中の鉄筋がなく欠陥が有る場所 H と、鉄筋がなく欠陥もない場所 L の比較を行っている。図-2(b)は、図-1 中の鉄筋が有りで欠陥も有る場所 C と、鉄筋が無く欠陥が有る場所 H の比較をしている。図-2(c)は図-1 中の、鉄筋有り欠陥有りの場所 C と鉄筋有り欠陥無しの場合 I の比較をしている。測定位置で得られた

波形を「波形+アルファベット」で表わし以下の説明を行う。

図-2(a)の波形 H と波形 L を比較すると H の波形では、30μsec 付近に大きな振幅が発生しているのが見られる。これは、計算上欠陥からの反射といえる。また、L の波形での、80μsec 付近の大きな振幅は供試体底面からの反射だといえる。これらは既往の研究³⁾でも同様の結果が得られており、欠陥が明確に検出できたといえる。図-1 の A や B に示す空隙厚が厚いものや径の小さい空隙も検出できることを確認している。図-2(b)の波形 C では波形 H のよりも少し遅い 40μsec 付近に大きな波が

見られるが、その大きさは波形 H よりも小さく、それよりも遅い時間での振幅も小さくなっている。これは鉄筋により超音波の一部が反射したため、空隙からの反射が弱くなったためと考えられる。しかし、 $20\mu\text{sec}$ 付近に波形 H には見られない波が見られる。この波は鉄筋からの反射によるものだと考えられる。図-2(c)での C と I の波形それぞれで $20\mu\text{sec}$ 付近に振幅が出ている。これらは鉄筋が入っていない個所には見られない特徴であるから、鉄筋の影響であると考えられる。また、それらの波形を比較すると、 $40\mu\text{sec}$ 付近で振幅の違いがみられることから、この振幅は空隙によるものであるといえる。波形 C においては見られていないが、I においては $80\mu\text{sec}$ 付近で振幅は見られ、供試体底面からの反射だと考えられる。このことより、鉄筋下面に空隙がある場合、空隙からの反射波や、底面の反射の有無により、計測条件によっては空隙を検出できる可能性がある。ただし、版厚が厚く超音波の減衰が激しい場合や、空隙位置が浅い場合、また、センサ径に対して鉄筋が太い場合は検出が難しくなると予想される。

3.2 一探触子一面法の計測

計測条件は、センサを鉄筋または欠陥直上に設置し、周波数を 200kHz 、電圧を 300V 、サンプリング周波数を 50MHz で記録した受信波形を図-3 に示す。図-3(a)は、鉄筋がなく欠陥が有る場所 H と、鉄筋がなく欠陥もない場所 L の比較を行っている。図-3(b)は、鉄筋が有り欠陥も有る場所 C と、鉄筋がなく欠陥が有る場所 H の比較をしている。図-3(c)は、鉄筋有り欠陥有りの場所 C と鉄筋有り欠陥なしの場所 I の比較をしている。

図-3(a)の波形 H より、 $30\mu\text{sec}$ 付近に大きな振幅が見られる。これは、図-2(a)の結果と同様に欠陥からの反射である。図-3(b)では、欠陥の反射といえる大きな振幅は見られない。図-3(c)で波形を見比べると、波形 C において、 $30\mu\text{sec}$ 付近に振幅が検出されているが小さく、波形 C, I とともに $80\mu\text{sec}$ 付近に振幅は検出されていない。

以上の結果から、鉄筋が入っていない場合は波形の大きさ等から欠陥検出は可能であるが、鉄筋が入ってしまうと波の強さが著しく小さくなってしまい、欠陥検出は難しいといえる。理由としては、一探触子一面法では S/N 比が小さくなるため鉄筋によって減衰した反射をとらえるのが難しいためと考えられる。

3.3 センサの設置位置の影響に関する考察

超音波法で欠陥の検出を行う際、鉄筋がある場合では検出は難しいことから、鉄筋直上に設置してあったセンサを鉄筋から対角にずらし、検出を行った。センサの位置を写真-2 に示す。また、写真中の白の点線は、鉄筋の配置位置を示している。計測条件は 3.1 とほぼ同じで、欠陥の厚さが 1mm の C の場所でセンサの位置を変えて

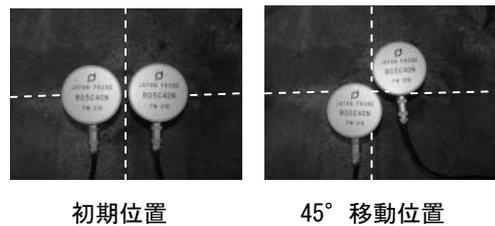
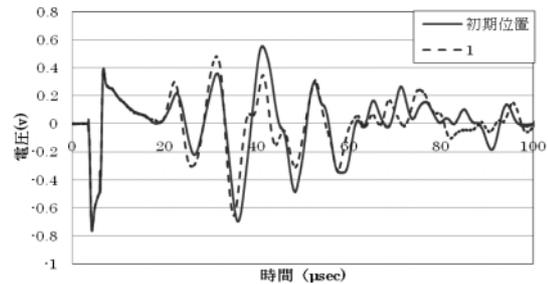
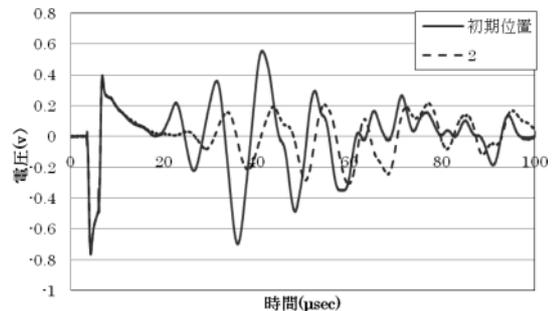


写真-2 センサの位置



(a) センサ位置を 45° 移動させた波形との比較

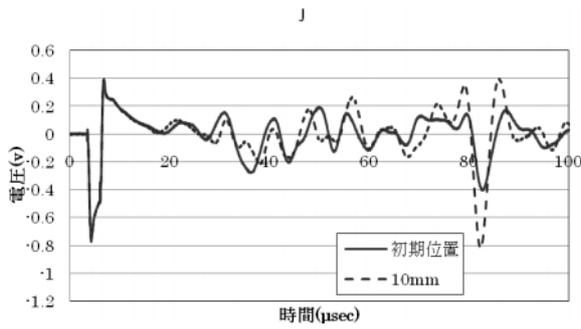


(b) (a)を 200mm 離れたものとの比較

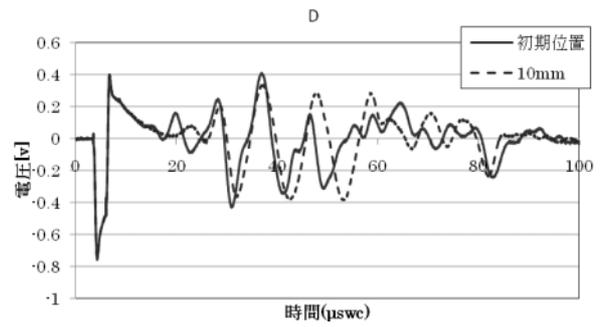
図-4 センサの設置位置による影響比較

設置している。この結果を図-4 に示す。図-4(a)には、設置するセンサ同士の距離を変えず、 45° 移動させ、鉄筋に対して対角上にくるように設置して計測を行い、その波形を 1 とした。図-4(b)では、(a)と同じ条件で、センサ同士の距離を 200mm 離して計測し、その波形を 2 としている。

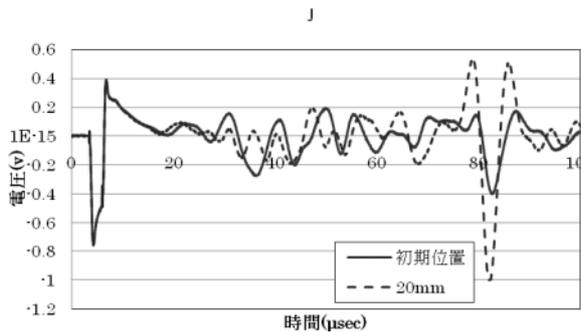
図-4(a)の波形を見てみると、双方に目立った違いはなく、鉄筋の影響を受けていることが分かる。図-4(b)では、 $20\mu\text{sec}$ 付近での振幅がなくなっていることから、鉄筋の影響は少なくなっているといえる。また、 $35\mu\text{sec}$ 付近から振幅がでてきていることから、欠陥検出ができていると考えられる。しかし、その波は小さいもので、欠陥



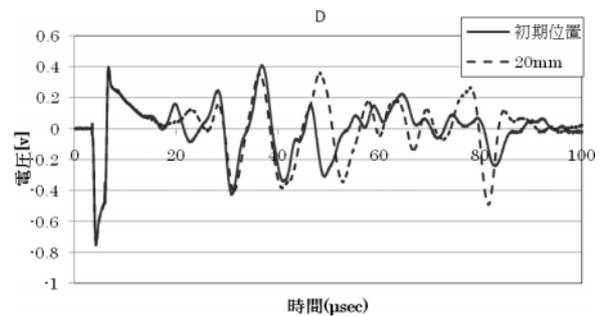
(a) 初期位置と 10mm ずらした波形の比較



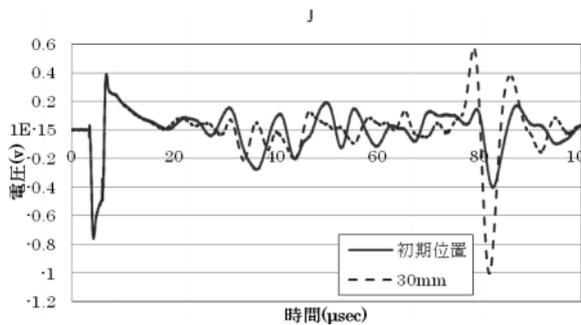
(a) 初期位置と 10mm ずらした波形の比較



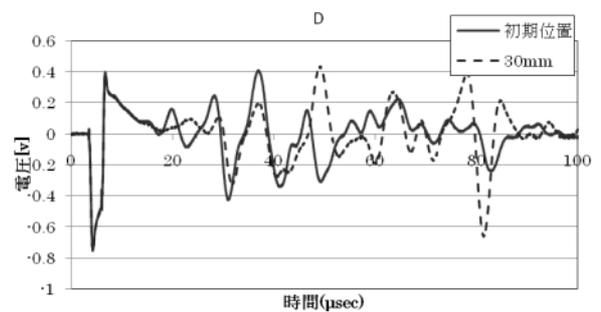
(b) 初期位置と 20mm ずらした波形の比較



(b) 初期位置と 20mm ずらした波形の比較



(c) 初期位置と 30mm ずらした波形の比較



(c) 初期位置と 30mm ずらした波形の比較

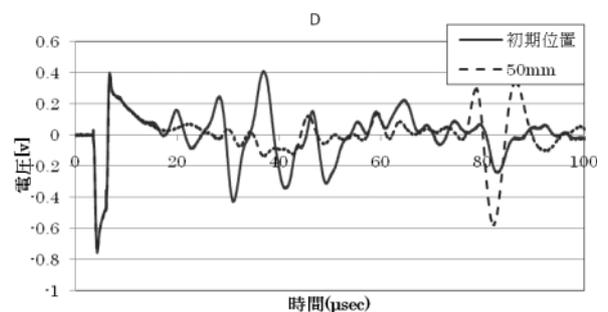
図-5 鉄筋の影響距離の検討

部からの反射としては疑問がある。

以上のことから、今回の条件下ではセンサの間に鉄筋がある場合には、鉄筋の影響を受けてしまい、空隙の検出は困難であった。

3.4 センサの設置距離の影響に関する考察

超音波法で欠陥検出を行う際、今回のように欠陥の位置が分かっている場合は少ない。よってセンサ下面のどの範囲まで計測できているか、また、鉄筋の影響をさけるためにはどの程度センサを離せばよいか検討を行った。計測条件は3.1と同じで、センサの位置を10mmずつずらして計測していく。計測場所をJ,Dとし、その結果をそれぞれ、図-5、図-6に示す。また、(a)(b)(c)(d)はそれぞれ初期位置から10mm, 20mm, 30mm, 50mm,



(d) 初期位置と 50mm ずらした波形の比較

図-6 鉄筋と欠陥の影響の検討

ずらした波形と初期位置の波形を比較した図である。ここでの初期位置とは鉄筋または欠陥の直上を示している。

図-5(a)での初期位置と10mmずらした波形を比較すると、他の波に大きな違いは見られないが、80 μ sec付近にともに波が見られ、特に10mmの波形のほうが大きな振幅が出ている。図-5(b)では、初期位置と20mmずらした波形とを比較している。20mmの波形で、80 μ sec付近に大きな振幅が出ているのは変わらないが、他の振幅がわずかに小さくなっている。図-5(c)では、初期位置と30mmずらした波の比較を行っているが、(b)の波よりさらに小さくなっている。また、このあとの計測は(c)と同じような結果が出ている。

図-6(a)では、初期位置と10mmずらした波形を比較しており、40 μ sec~60 μ secの振幅が大きくなっており、図-2(a)に示した波形Hに近い傾向になっている。図-6(b)は、初期位置と20mmずらした波形とを比較している。20mmずらした波形の80 μ sec付近で大きな振幅が出ているのがわかり、底面の反射がとれていると考えられる。図-6(c)は、初期位置と30mmずらした波形とを比較している。ここでは、30mmずらした波形の30 μ sec付近少し小さくなり、80 μ sec付近の底面からの反射が(b)よりさらに大きくみられている。図-6(d)では、初期位置と50mmずらした波形を比較している。50mmずらした波形では、全体的に波形が小さくなり、底面の反射以外は見られなくなった。このことより、鉄筋、欠陥ともに検出していないと考えられる。

以上のことより、今回の条件下では鉄筋は直上の位置から約20mmから30mmずらすことで影響を受けにくくすることができると考えられる。また欠陥の中心からセンサがずれていても欠陥の検出は可能であるといえる。理由としては、欠陥の形が影響していると考えられる。今回使用したのは直径100mmまたは50mmの円形だったため、センサの中心が欠陥直上にかかっていたら検出は可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では超音波法により鉄筋コンクリートでの断面修復箇所での欠陥検出を試みた。本研究では欠陥、鉄筋の位置が既知な供試体で、健全部との比較を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 鉄筋が入っていなければ、厚さ1mmの欠陥であっても検出は可能である。
- 2) 鉄筋位置よりも深いところに空隙がある場合、空隙からの反射波、底面の反射の有無により、計測条件によっては空隙を検出できる可能性がある。
- 3) 一探触子一面法の計測においては、鉄筋位置より深いところにある空隙の検出は難しいと考えられる。
- 4) センサの設置位置の影響は、鉄筋をまたぐ形でセンサを設置することで、欠陥の検出を容易にすることができるのではないかと考えられたが、鉄筋の影響を受けてしまい、欠陥検出は困難であった。
- 5) 欠陥上にセンサを設置されていれば、空隙の検出は可能である。また、鉄筋の直上を避ければ鉄筋の影響を小さくすることができる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会平成20年度科学研究費補助金の若手研究(B)(課題番号:19760304, 研究代表者: 渡邊 健)に基づき実施されたものであることを付記致し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山口佳祐, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 六郷恵哲: コンクリートひび割れ注入材の充填度評価における超音波伝播特性値の活用, コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.1, pp.1901-1906, 2006
- 2) 濱崎仁, 伊野仁士, 三浦雅仁, 佐藤大輔: 非破壊試験によるひび割れおよび浮き等の補修効果の確認方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.1, pp.1847-1852, 2006
- 3) 宮地孝徳, 渡辺健, 橋本親典, 大津政康: 超音波法による断面修復箇所での欠陥検出に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.721-726, 2008
- 4) 土木学会: 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集, pp.133-139, 2004