論文 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

宮地 孝徳^{*1}・渡辺 健^{*2}・橋本 親典^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨:断面修復工法により補修されたコンクリート部材では,再劣化や疲労による損傷が生じる可能性がある。そこで母材と補修材の界面付近に欠陥が存在する供試体を作製し,超音波法により欠陥検出を実施した。 その結果,断面修復箇所での境界面上の空隙や剥離によるひび割れは,部材端部からの反射の有無また境界 面から反射の振幅の大きさを利用することにより検出可能である。一つの探触子で計測を行なう場合,計測 条件を適切に設定することにより,欠陥の検出が可能である。

キーワード:断面修復,超音波法,反射,振幅,欠陥

1. はじめに

現在,社会基盤を支えるコンクリート構造物の劣化お よび損傷が大きな問題となっており,維持管理の重要性 が高まっている。劣化や損傷が著しいコンクリート構造 物では補修もしくは補強が実施される。代表的な補修の 手法の一つとして断面修復工法があり,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,進行性の劣化の場合では、 コンクリート内部にある微小なひび割れや剥離が時間 の経過と共に広がっていくが、これらは表面に変状とし て表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。超音 波法による欠陥の検出対象としては、一般にひび割れや 剥離、また打ち継ぎ部の評価などにも適用されている¹⁾。 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²⁾やひび割れおよび浮き等の補修効果 ³⁾の確認に関する研究がなされているが、断面修復にお ける検討については十分とはいえない。

そこで、本研究では、断面修復工法により補修されたコ ンクリート部材を対象とし、母材と補修材の界面付近に 欠陥を生じた構造物を想定した欠陥を有する供試体を 作製し、超音波法により欠陥検出を実施した。

2. 実験概要

超音波法には、探触子の使用数や設置方法によってそ

の計測方法を分類できる⁴⁾。本研究では断面修復を行っ た表面より内部欠陥を検出することを想定し,二探触子 一面配置および一探触子一面配置の二種類での計測を 実施することとした。以下に,それぞれの実験概要を示 す。

2.1 供試体

供試体は補修が良好なもの,断面修復後に欠陥が生じ たことを想定して異なる種類の欠陥を埋設したもの、比 較用に補修を行っていないコンクリート単体のものの 計4種類用意した。各供試体の概要を表-1 に示す。コ ンクリートの配合を表-2に示す。供試体の寸法は図-1 に示すように、高さ200×幅200×長さ200mmのコンク リート供試体とした。断面修復部分は、上供試体上部の 約 50mm とした。補修材には、ポリマーセメントモルタ ルを使用した。欠陥として母材コンクリートと補修材と の界面には,縦100mm×横100mmの気泡緩衝シートま たはプラスチック板を埋設した。写真-1 は気泡緩衝シ ートの写真である。補修材の力学的性質として、ポリマ ーセメントモルタルの圧縮強度が 43.4 N/mm², 密度は 2.13 g/cm³, 超音波伝搬速度は 4051m/s, コンクリートの 圧縮強度が 36.7 N/mm², 密度は 2.25 g/cm³, 超音波伝搬 速度は 4021m/s であった。媒質の密度と伝搬速度との積 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 8.56×10⁶kg/m²s, コンクリートが 9.05×10⁶kg/m²s となる。これらに大きな差は無いが、音響インピーダン

表-1 供試体の概要

供試体	欠陥の種類	補修の有無			
A	無	有			
В	気泡緩衝シート	有			
C	プラスチック板	有			
D	無	無			

*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-2 配合表

組骨材の	スランプ	水セメン ト比	空気量	細骨材率	単位量(kg/m ³)				
最大寸法					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	S	G	А
20	14.5	51	6.5	45	169	333	783	950	0.85248



写真-1 気泡緩衝シートの写真

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 も反射が生じる可能性がある。

2.2 超音波による計測

超音波計測は、市販の超音波計測装置を使用した。使 用した波形はバースト波であり、波数は一つである。発 信側の探触子から発振し,受信側の探触子で受信するこ とで実施した。計測装置は,発信周波数が 30kHz~10MHz まで変えることができる。使用している探触子は、外径 52.0mm の広帯域型探触子を使用した。探触子を供試体 表面に設置する際は,水溶性の接触媒質を使用し,セン サと測定面の接触が良好になるように押し当てた。計測 の値は押し当てる圧力の影響をうけるが、本計測では、 計測時の波形をモニタリングし、その波形が安定するま でしっかりと押しつけ、波形記録を行った。写真-2に 二探触子触子一面法で供試体の計測を行っている様子 を示す。一探触子一面法での計測では、二探触子一面法 と同様の探触子を使用し,発信および受信を一つの探触 子で行っている。一般には,一探触子法での計測では, S/N比が小さくなり計測が難しくなるといわれている。

ポリマーセメントモルタルやコンクリートの超音波 伝搬速度より、断面修復付近から反射が生じる場合、表 面から境界面までの深さが 50mm であるため、反射波が 30µsec 付近に、また供試体底面まで 200 mm であるため 反射は 100µsec 付近に出現すると考えられる。

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、周波数を 300kHz, 電圧を 300V, サ



写真-2 センサの写真



図-1 供試体の概要

ンプリング周波数を10MHz で記録した受信波形を図-2 に示す。図-2 (a)は,供試体 A と D による補修の有無 の比較,図-2 (b)は供試体 A, B および C による欠陥 の有無による比較である。

図-2(a)の供試体AおよびDの波形より100µsec付近 に振幅の大きな箇所が見られる。これは、超音波伝搬速 度および供試体底面までの距離より、底面からの反射で あるといえる。また図-2(b)においては、供試体Aにお いてに見られる100µsec付近の大きな振幅値が供試体 B およびCでは出現していない。供試体BおよびCでは、 そのかわりに28µsec付近から非常に大きな振幅が見ら





れており、これらは気泡緩衝シートおよびプラスチック 板からの反射によるものといえる。供試体 B および C で は、超音波が欠陥と表面の間で反射を繰り返しており、 それらが 50μsec 付近から振幅が大きい部分に相当する と考えられる。また欠陥での反射が卓越するため、供試 体Aで観察された底面からの反射による振幅が計測され ていないと考えられる。

反射による波形を詳しく検討するために,図-2の 50µsecまでの部分を引き延ばしたものを図-3に示す。 図-2と同様,図-3(a)は供試体AおよびDの波形, 図-3(b)は供試体A,BおよびCの波形である。図-3(a) より,一体のコンクリートである供試体Dに比べて供試 体Aでは28µsec付近に波形の乱れが見られる。これは, セメントポリマーモルタルとコンクリートの境界面よ り反射した影響であると考えられる。図-3(b)より,供 試体Aに比べると供試体BおよびCでは,非常に大き な振幅が28µsec付近に出現していることが分かるが,供 試体BとCではその振幅の大きさが異なっており,供試 体 C が大きくなっている。これは、気泡緩衝シートの表 面は凹凸があり、超音波の反射方向が一定でないこと、 空気の入っていない部分ではシートの厚さはプラスチ ック板より薄く超音波が透過したことより、プラスチッ ク板の反射に比べてその振幅が小さくなったと考えら れる。

これらの波形では、振幅の大きな所を特定することは 比較的簡単であるが、図-3に示すように、超音波の反 射波の初動を正確に捉えることが今回の実験条件およ び供試体では容易ではなく、初動到達時間と超音波伝搬 速度から正確に欠陥深さを算出することは難しいとい える。

以上の結果より,断面修復の境界面の欠陥を部材端部 からの反射の有無また境界面から反射の振幅の大きさ を利用すれば可能であるといえる。

3.2 一探触子一面法の計測

図-4 に一探触子一面法の結果を示す。計測条件は、 周波数を 300kHz, 電圧を 500V, サンプリング周波数を







図-5 一探触子表面法での欠陥検出波形

10MHz である。図-4(a)は、供試体 A と D の比較、図-4(b)は供試体 A, B および C の比較である。

図-4(a)の供試体AおよびDの波形より100µsec付近 に振幅の変化が見られる。これは図-2の結果と同様に 供試体底面からの反射である。ただし、この図は非常に 増幅した波形であり、入力波の信号と比較するとその振 幅の信号は非常に小さいといえる。また供試体Aでは、 Dを比較すると25~30µsec付近に振幅が大きな波形が出 現しており、二探触子での計測と同様に、セメントポリ マーモルタルとコンクリートの境界面より反射した影 響であると考えられる。

図-4(b)においては、供試体 A においてに見られる 100µsec 付近の大きな振幅の差が供試体 B および C では 出現していない。供試体 B および C では、30µsec 付近か ら非常に大きな振幅が見られており、これも二探触子で の計測と同様に気泡緩衝シートおよびプラスチック板 からの反射によるものといえる。供試体 B および C では、 超音波が欠陥と表面の間で反射を繰り返しており、それ らが 50µsec 付近から振幅が大きい部分に相当すると考 えられる。これらも増幅されたものであり、入力信号と 比較すると非常に小さい値である。

反射による波形を詳しく検討するために、計測条件を

若干変更し計測した結果を図-5 に示す。計測条件は, 周波数を 300kHz, 電圧を 300V, サンプリング周波数を 20MHz である。

図-5(a)より、一体のコンクリートのである供試体 D に比べて供試体 A では 28µsec 付近に波形の乱れが見ら れる。これは、セメントポリマーモルタルとコンクリー トの境界面より反射した影響であると考えられる。図-5(b)より、供試体 A に比べると供試体 B および C では、 非常に大きな振幅が 28µsec 付近に出現していることが 分かる。図-3と同様に、供試体 B と C ではその振幅の 大きさが異なっており、供試体 C が大きくなっている。

以上のことより,一探触法においても計測条件を適切 に設定することにより,欠陥を反射の振幅の大きさで判 定できると考えられる。しかし,S/N比が小さいため, 供試体端部からの反射については検出が困難になる可 能性もあるといえる。

3.3 周波数の影響に関する考察

超音波法をコンクリートに適用する際には、高い周波 数は減衰が大きいことが指摘されており、使用する周波 数により検出結果に変化が生じると予想される。ここで は減衰を考慮し、図-2および図-4と同じ計測条件で、 周波数のみを 100kHz と低くした計測を行った。その結



(a) 二探触子表面法での波形

(b) 一探触子表面法での波形







果を図-6 に示す。この際,超音波伝搬速度と周波数に より入力波長は約4cm程度である。これは補修境界面ま での深さ5cmよりも短く,境界面の影響および欠陥検出 が可能であると考えられる。

図-6(a)より,100kHzにおいても図-2(b)と同様に欠陥を有する供試体 B,Cと供試体 A の違いが観察できる。 図-6(b)の一探触子での計測では、S/N 比が小さくなり 計測が難しくなることから、入力波を増幅して計測を行った。そのため、入力波と出力波とが重なるので、欠陥 の反射からの到達時間が分かりにくくなっている。超音 波の減衰が小さいため、供試体Aの 100µsec 付近に生じ る供試体底部の反射の振幅は、図-4(b)の結果に比べて 大きくなっていることが分かる。

3.4 剥離後の波形の計測

補修部分が剥離したとき,波形がどのように変化する かを検討した。実験方法として,補修した供試体 A の補 修部分を**写真-3**のように,補修部分界面に荷重を載加 させ,割裂させた。その後割裂した二つを押し合わせて, 擬似的な剥離の状態を再現した。打音法のようにたわみ



写真-3 荷重の載加状況

振動により剥離を検出する場合は,剥離端部の境界条件 が大きく影響するが,超音波では剥離によるひび割れか らの反射波を計測するため境界条件の影響は少ないと 判断した。

計測は二探触子一面法,一探触子一面法の両方行ない, 計測条件として,二探触子一面法,一探触子一面法とも に,周波数を300kHz,電圧300V,サンプリング周波数 を10MHzとした。剥離の前後での計測結果を図-7に示 す。図-7より、二探触子一面法でも一探触子一面法で も、30µsecから40µsecでの波形の振幅が、荷重載加前の 健全な状態の供試体の波形よりも荷重載加後の割裂し た供試体の波形の方が大きくなっていることがわかる。 また、40µsec以降では、二探触子一面法、一探触子一面 法ともに、荷重載加前の健全な供試体と荷重載加後の割 裂した供試体とでは、大きく異なった波形になっており、 割裂面での反射が大きく卓越していると考えられる。

4. まとめ

本研究では超音波法により断面修復箇所での欠陥検 出を試みた。本研究では欠陥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。

- 二探触子一面法の計測より、断面修復の境界面の空隙上の欠陥、剥離の検出の判定は、部材端部からの反射の有無また境界面から反射の振幅の大きさを利用すれば可能であるといえる。
- 2) 一探触子一面法の計測においては、計測条件を適切 に設定することにより、二探触子一面法と同様に欠 陥を反射の振幅の大きさで判定可能である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会平成 19 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: 渡邉 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

- 桑原常晃,林承燦,国枝稔,鎌田敏郎,六郷恵哲: 超音波によるコンクリートの打ち継ぎ部の欠陥評 価,土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, pp.777-779, 2002.
- 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
- 3) 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
- 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