

超音波モード変換波法による鋼板巻き立て 補強鉄筋コンクリート橋脚の樹脂密着率の定量評価

Quantitative Evaluation of Filling of Resin for Refreshment
of Bridge-Piers by Ultrasonic Mode Conversion Wave Method

戸田裕己*, 吉川 紀**, 垣下 賢***, 横山計次****, 呉 尚弘*****

Hiroki TODA, Osamu YOSIKAWA, Satoshi KAKISITA, Keiji YOKOYAMA and Yoshihiro GO

- *工博 和歌山大学システム工学部 (〒640 和歌山市栄谷930)
- **工博 (財)阪神高速道路管理技術センター (〒541 大阪市中央区南本町4-5-7)
- *** (財)阪神高速道路管理技術センター (〒541 大阪市中央区南本町4-5-7)
- ****工博 (株)酒井鉄工所 テクノサービス部 (〒590 堺市出島西町3-1)
- ***** (株)酒井鉄工所 テクノサービス部 (〒590 堺市出島西町3-1)

Many reinforced concrete bridge piers are damaged by the Great Hanshin-Awaji Earthquake. Their strengthening is seriously demanded. The strengthening method is that the RC bridge pier is armored with the steel plate, and the resin is poured into the in-between gap for fixation. This paper presents a new contrivance of detecting and examining methods of the voids in resin by means of ultrasonic mode conversion wave. Ultrasonic mode conversion wave is the longitudinal wave that travels the steel plate, decreasing its own power into the resin. The attenuation of ultrasonic mode conversion wave is related to the ratio of the filling to the resin.

Key Words : Bridge pier, Resin, Ultrasonic mode conversion wave method

1. はじめに

平成7年1月17日の兵庫県南部地震によって、コンクリート構造物は広範囲にわたって多様な損傷を受けた。今回の地震が予想をはるかに超える大きいものであったことが損傷の主原因であるが、損傷調査から現在のところ、その他種々の原因がかなり明らかになってきている。

今後の耐震設計の方針としては、コンクリート構造物の耐荷力ならびに、じん性を所要のレベルに高めておくことがきわめて重要である。そこで、新設構造物に対しては帯鉄筋による拘束効果を得るために帯鉄筋間隔を10cmとする。また軸方向鉄筋の段落しを行わないことなどを実施している。一方、既設構造物には鋼板接着工法、カーボンファイバ接着工法、アラミドテープの接着工法やPC鋼線の巻き立て工法などをコンクリート橋脚に採用してコンクリート部材の補強を行っている。

阪神高速道路公団の既設鉄筋コンクリート橋脚の補強に主として採用しているものに、コンクリート部材に鋼板をアンカーボルトで固定し、コンクリートと鋼板との間隙をエポキシ樹脂などで充填することで一体化させ、耐荷性の向上、じん性の向上を図る工法が実施されている。

この場合、コンクリートと鋼板が常に一体でなくてはならない。このため、注入した樹脂の部分に空洞があってはならない。しかし、この空洞の有無を定量的に確認

する方法はなく、現状では鋼板の表面を木製ハンマーによる槌打ち試験が行われている。この方法では空洞の大きさ、形状および樹脂の密着状況などを定量的に評価することはとても困難である。

本論文は、この槌打ち試験に替わるものとして、簡便で、かつ定量的な評価が可能な超音波を利用する新手法について検討したので報告する。

2. 超音波の概要

鋼板と樹脂(レジン)の接着状況を非破壊評価する方法として従来から用いられている方法に超音波垂直法がある。この方法では鋼板の板厚方向に反射を繰返すことで生じる多重反射波の振幅の減衰の様子からレジンの接着状況を調べることができる。しかし、この方法で、大きい鋼板の検査をするには、鋼板の面を2次元的にスキャンする必要があり、多大な労力と時間を要するため、実用的でない。そこで本研究では、超音波を長さ1mにわたって伝ばさせ、1方向にスキャンするだけで広範な面の検査を可能にするモード変換波法を提案する。

本測定法を実構造物へ適用する際のフローチャートを図1に示す。まず、短時間で検査できるモード変換波法を用いて、超音波が伝ばする領域(約幅30mm×長さ1000mmの長方形領域)毎のレジン密着率を調べる。ここでいう

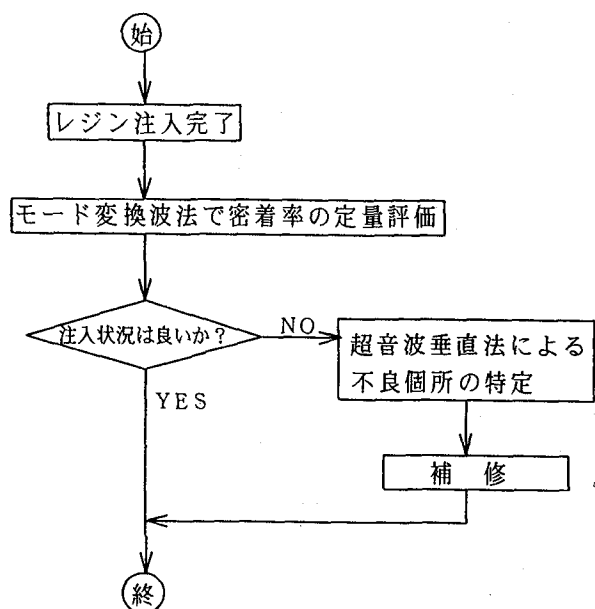


図1 実構造物への適用のフローチャート

密着率とは、超音波伝ば領域に対するレジン密着面積の割合のことである。次に密着率が悪い領域については、超音波垂直波法で時間をかけて精密探傷を行い、密着不具合箇所の細かい特定を行う。

2.1 モード変換波法

一般的に、鋼板巻き立て補強工法では、鉄筋コンクリート橋脚柱と鋼板との隙間を3mmとし、レジンが充填剤として注入される。補強鋼板の表面に沿って超音波縦波を伝ばさせたとき、レジンの接着の有無に関わらずモード変換波が生じる。このモード変換波の振幅変化に影響を与える主な因子として、レジンの音響インピーダンスと密着率が考えられる。

ここで音響インピーダンスとは、媒質の密度と音速の積で定義される物性値のことである。

(1) 反射波の振幅

2媒質が平面境界面で接着したモデルに、平面波の縦波あるいは横波が入射した際に生じる反射波の振幅の解析は、境界面での応力と変位の連続性から連続波の平面波理論を用いて行うことができる。^{1)~3)}

図2は媒質1が鋼板で媒質2がレジン(商品名: ショーボンドグラウト)かモルタルで、媒質1の縦波と横波の音速が共に媒質2のそれらより大きい場合の反射波、透過波の伝ば方向を模式的に示したものである。

モード変換波法では、媒質2の接着している面で入射超音波が反射する際に生じるモード変換波の振幅が媒質2の音響インピーダンスに依存して変化する現象を利用して媒質2の密着状況を調べる。そこで、媒質2の密度を実際に使用するショーボンドグラウトの密度1.13を基準にし、密度0.5と密度2.0、および媒質2が空気の場合(密度0

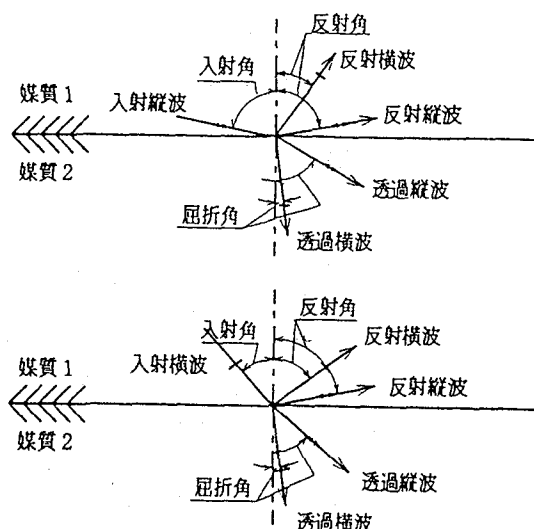


図2 反射波と透過波の模式図

相当)について、反射縦波と反射横波の振幅を平面波理論で解析した。

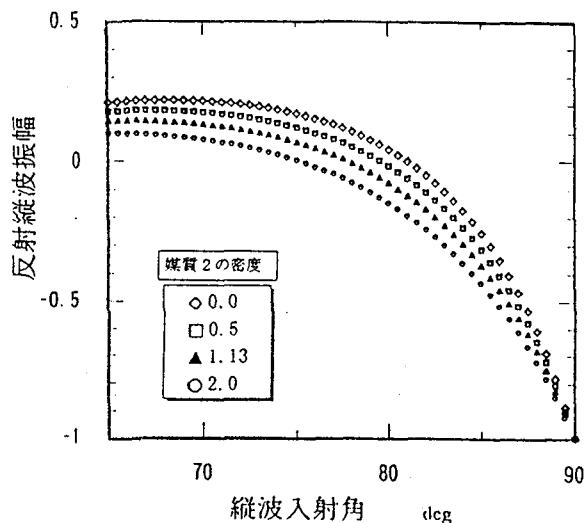
図3は縦波入射、図4は横波入射の結果を示す。

なお、縦波入射では入射角が $65^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲で行った。入射角 90° は鋼板の表面に沿う方向である。横波入射では、入射角 $22^{\circ} \sim 33.75^{\circ}$ の範囲で行った。ここで入射角 33.75° は媒質1を鋼板としたとき、縦波入射角 90° に対して得られるモード変換した反射横波の最大の反射角(臨界角と呼ぶ)に相当とする。

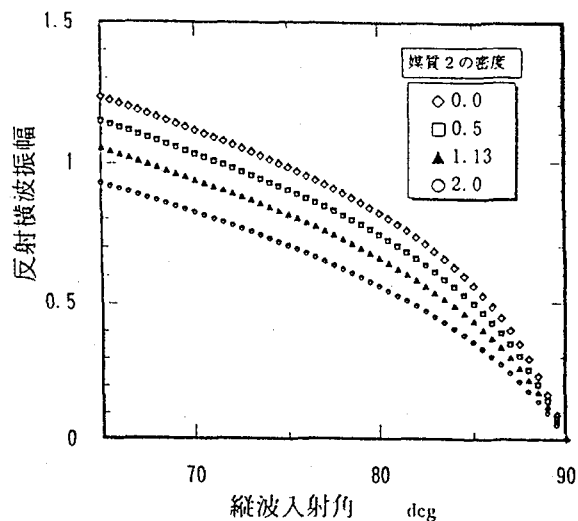
図3の(a)は反射縦波、(b)は反射横波の振幅(入射波の変位振幅を基準にした変位振幅)と入射角との関係を示している。図中のパラメータは媒質2の密度である。これらの図より、次のことがわかる。

入射角が 90° 、つまり接着面に沿うように入射する縦波は全くモード変換せず、縦波のまま反射するが、振幅が-1で位相が反転し、圧縮波が引張波になって反射する。しかし、入射角が 90° より小さくなるにつれて反射波の振幅が小さくなり、モード変換した反射横波の振幅が次第に大きくなる。さらに媒質2の音響インピーダンス(ここでは音速を一定とし密度だけを変化させた)が大きくなるほど、つまり鋼板の媒質1の音響インピーダンスに近づくほど、モード変換した反射横波の振幅が小さくなっている。これは入射縦波のエネルギーがより多く媒質2に透過するためである。

一方、入射横波では臨界角付近で反射波の振幅が急変しているが、反射横波とモード変換した反射縦波は共に媒質2の音響インピーダンスが大きくなるほど、その振幅が小さくなる(図4参照)。

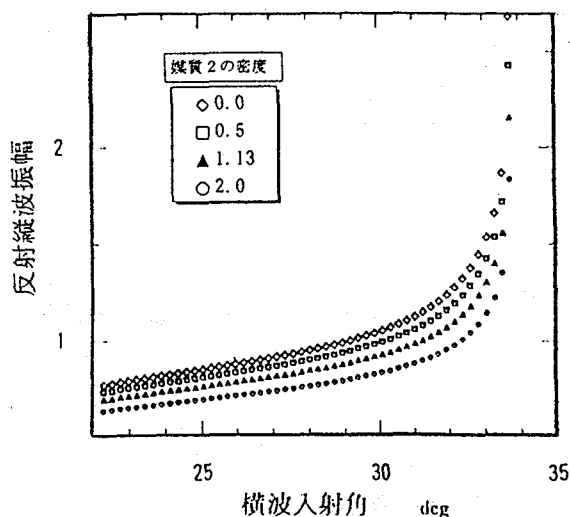


(a) 反射縦波

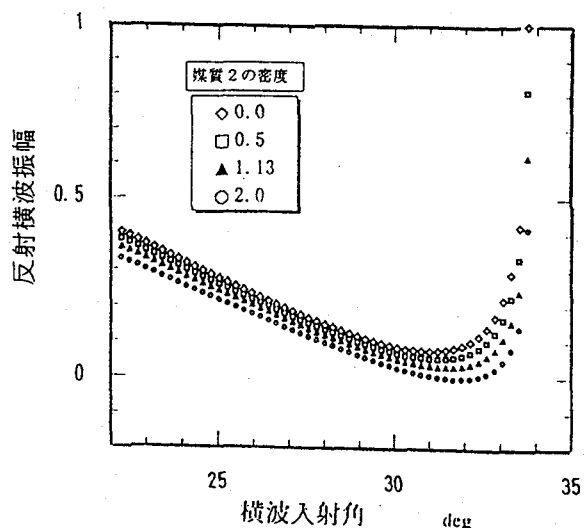


(b) 反射横波

図3 縦波入射の場合の入射角と振幅との関係



(a) 反射縦波



(b) 反射横波

図4 横波入射の場合の入射角と振幅との関係

(2) 遅れエコーの振幅

本研究の対象である大きい板材で板の端面が露出していない場合には、クリーピング波と呼ばれる板の表面から屈折角 90° 付近で透過する縦波を利用すれば、板の端面から縦波を入射角 90° で入射させた場合とほぼ同様に遅れエコー群が派生する。⁴⁾

すなわち、板に沿う方向に縦波を入射すると、ビームの広がりにより縦波は入射角が 90° から数度の小さい範囲で接着境界面に入射し、反射縦波とモード変換した反射横波が生じる。さらに、反射縦波が自由表面（空気に接する表面）で反射する際に反射縦波と反射横波が生じる。また、1回目の反射で派生した横波は臨界角とそれより数度小さい角度の範囲で板の自由表面側に伝ばし、自由表面で反射して反射横波と再びモード変換した反射縦波を生じる。

このように入射超音波は反射する度に横波と縦波に分れるが、板の厚さが伝ば距離（送受信子間距離に相当する）に比べて十分に薄い場合、反射波の派生場所に関わらず、ほとんど位相が重なり合って伝ばする。しかし、横波として伝ばした回数だけ伝ば時間が長くなるため、この回数毎に別れた遅れエコー群として、整然と並んで伝ばする。

図5に遅れエコー群の模式図を示す。最初に到達する小さい波Lは一度だけ接着面でV字形に反射した縦波であり、 $S_1, S_2 \dots$ は1回、2回 $\dots$ と横波で板を横切った遅れエコー群である。

図3、図4に示したように、媒質2の音響インピーダンスが媒質1のそれに近づくほど、モード変換波の振幅が小さくなっており、したがってこのとき遅れエコー群の振幅が小さくなることはいえる。

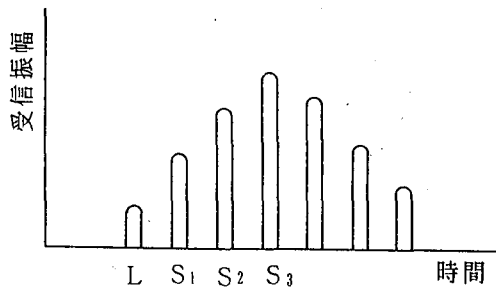


図5 遅れエコー群模式図

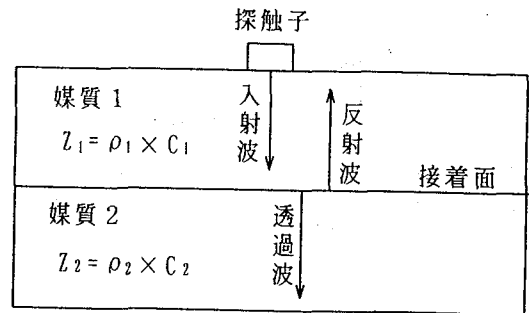


図6 接着面に垂直入射する超音波の反射と透過

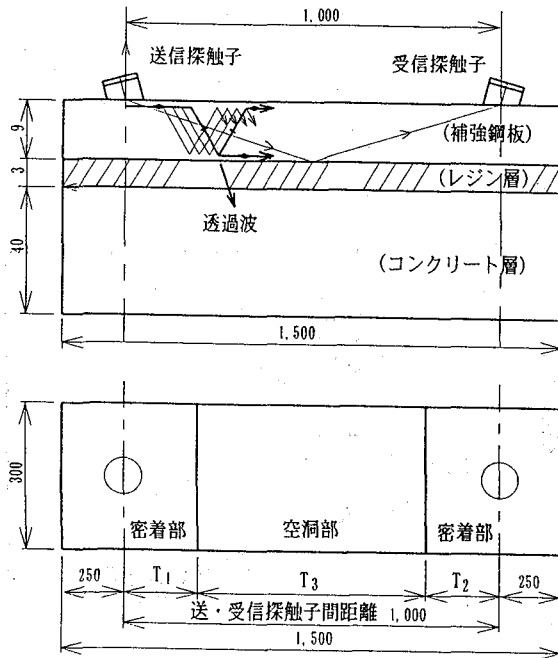


図7 モード変換波法の試験片形状と実験方法

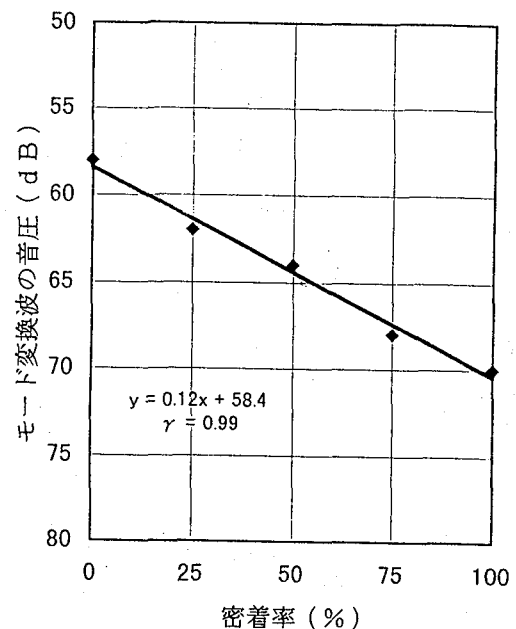


図8 密着率と音圧との関係

また、入射超音波は媒質2の接着面の伝ば方向の全面にわたって空間的に連続してモード変換波を生じる。したがって遅れエコー群の振幅は全面で派生したモード変換波を積分した大きさとなるため、超音波の伝ば領域にわたる媒質2の密着率に依存して変化することになる。

2.2 超音波垂直法

図6に示すように2つの媒質の接着面に超音波が垂直に入射すると接着面で反射と透過が起こる。そのとき反射率 R は媒質の密度 ρ と音速 C の積で与えられる音響インピーダンス Z で決まり、式(1)で与えられる。

$$R = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right| \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Z_1 と Z_2 はそれぞれ媒質1と媒質2の音響インピーダンスである。

媒質1と媒質2が完全に接着していれば反射率は式(1)で与えられ、完全にはく離していれば100%反射して反射率は1となる。

モード変換波法で密着不良部が見つかったとき、この超音波垂直法を併用することにより密着不良箇所を細かく特定することができる。

3. モデル試験片での実験

3.1 モード変換波法

(1) 使用探触子およびモデル試験片形状

図7に示す形状のモデル試験片で、送・受信探触子間距離に対するレジン密着部の総距離の割合で定義する密着率 $(= (T_1 + T_2) / (T_1 + T_2 + T_3))$ が100%、75%、50%、25%、0%の5種類の試験片を用意し、これらに共振周波数2.25MHz、直径25.4mmの縦波用探触子を用いてモード変換波の振幅を測定した。なお、振幅はオシロ画面上で高さが80%になるようにアッテネータで調整し、そのときのアンプの減衰量をデシベル表示して得たものである。試験温度は30℃であった。

なお、2.25MHzの探触子を用いたのは、超音波の伝ば距離を1mに設定したとき、超音波の減衰や個々のモード変換波の分離識別に適しているからである。

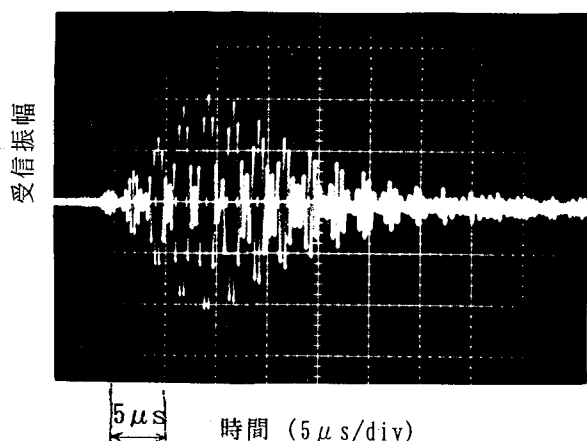
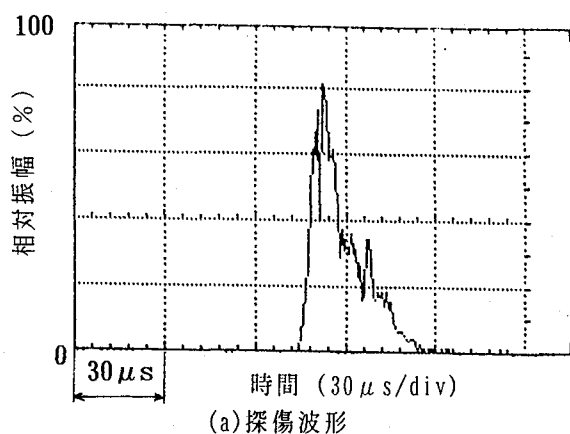


図9 モード変換波法の受信波形
(密着率50% の場合の例)

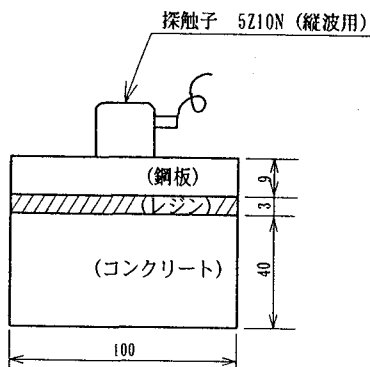


図10 超音波垂直法の試験片形状と実験方法

(2) 実験結果

実験結果を図8に示す。モード変換波の受信波形を図9に示す。

図9(a)は探傷器で得られるAスコープ波形であり、受信波形を整流し包絡線で表示したものである。(b)はオシロスコープで観察される受信波形であり、(a)より時間軸を拡大表示している。

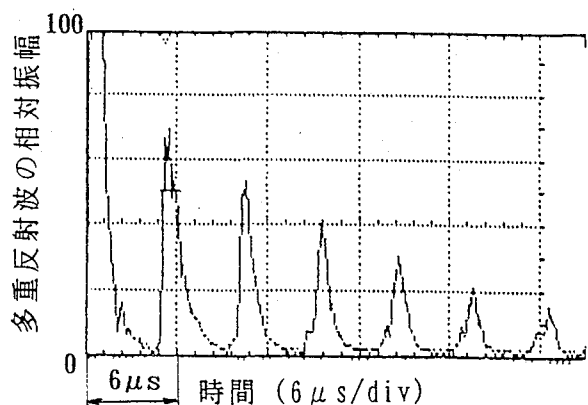
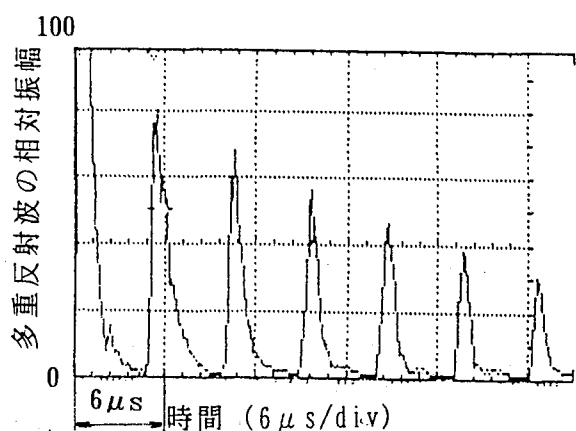


図11 超音波垂直法の多重反射波形

図8の直線は最小二乗法で求めた近似直線で、相関係数は $\gamma = 0.99$ となっており、モード変換波の振幅と密着率には直線性がある。密着率が100%と0%では12dBの差があり、密着率の定量評価の可能性が充分あることが明らかとなった。

3.2 超音波垂直法

超音波垂直法に用いた試験片形状と実験方法を図10に示す。試験片はレジンが完全はく離した試験片Aとレジンが完全密着した試験片Bの2種類を用意した。

試験片A、Bに対して、実験で得た多重反射波形をそれぞれ図11(a)、(b)に示す。

両図は同一感度の下で得たものである。これらの図から反射振幅が反射回数に関する指数関数で減衰するとして減衰率 α を求めると、試験片A、Bでそれぞれ0.770、0.885となった。この減衰率の値には、接着面での反射率のみならず、超音波ビームの広がりによる減衰も含まれている。このビームの広がりによる減衰は両試験片で同じであるため、両試験片の減衰率の比をとると、レジン接着面での反射率が正しく求められる。この反射率の値は $0.87 (= 0.770 / 0.885)$ となり、式(1)で与えられる理論的な反射率0.89とほぼ一致した。

4. まとめ

鋼板巻き立て工法では、コンクリートと鋼板との間にレジン注入することで両者を一体化させて、耐荷性の向上を図っており、注入したレジンと鋼板とは密着していることが要求される。

この密着状態を簡便でかつ定量的に評価するための方法として、超音波モード変換波法を提案し、その有効性を確認するための実験を行った。

この実験により得られた結果を以下に示す。

(1) 2.25MHzの水浸型の縦波探触子を用いて、送・受信探触子間隔を1mにして、補強鋼板の表面より、屈折角90°近くの縦波を鋼板中に伝ばさせるモード変換波法を用いるとレジンの密着率とモード変換波の振幅との間に良好な相関関係があることが明らかとなった。

(2) モード変換波法によりレジンの密着不良が検出された場合、超音波垂直法を併用すると密着不良箇所をさらに細かく特定できる。

以上の結果、このモード変換波法は、現在施工されているコンクリート橋脚柱の補強工事に対して、注入充填剤の密着率を定量的に評価する有効な検査方法の一つとして適用できるものと思われる。

なお、鋼材の温度によってモード変換波の振幅がわずかに変化することも考えられるので、実施にあたってはこのことについての検討が必要である。

参考文献

- 1) H. Kolsky: Stress Waves in Solids, pp.31~36, 1963 Dover
- 2) J. D. Achenbach: Wave propagation in elastic solids: pp.185~187, 1976, North - Holland / America Elsevier
- 3) 日本非破壊検査協会: 新非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, pp.235~241, 1992
- 4) 戸田裕己, 他, 音弾性法によるレール軸応力の評価、音弾性材料評価研究会, pp.9~12, 平成6年

(1997年1月23日)