

超音波による鋼板接着部の剥離評価に関する研究

STUDY ON DELAMINATION EVALUATION OF THE STEEL, RESIN AND CONCRETE
LAMINATED STRUCTURE BY THE ULTRASONIC WAVE三上修一*、大島俊之**、南邦明***、山崎智之****、岡部雄二*****、ラーマン ムハマド*****
Shuichi MIKAMI、Toshiyuki OSHIMA、Kuniaki MINAMI、Tomoyuki YAMAZAKI、
Yuji OKABE、Muhammad S. RAHMAN

*博(工) 北見工業大学助教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)

**工博 北見工業大学教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)

***(株)サクラダ 技術部生産技術課 (〒261-8511 千葉市美浜区中瀬1丁目3)

****北見工業大学助手 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)

*****北見工業大学大学院土木開発工学専攻 博士前期課程 (〒090-8507 北見市公園町165)

*****修(工)北見工業大学大学院システム工学専攻 博士後期課程 (〒090-8507 北見市公園町165)

Bond delamination of steel from concrete, which is caused by repetition of load, is a problem to solve. The aim of this research is to develop the diagnostic technique depending upon the delamination portion of a structure by the ultrasonic inspection and bond delamination modeling between steel and concrete. Reflective wave from a delamination portion was measured by normal inspection type of 5MHz 2MHz and 0.5MHz probes of longitudinal wave probe. Waveform analysis of the reflection wave for diagnosing a bond delamination is dealt with in this paper.

Key Words: bonding of steel plate, bond delamination, ultrasonic inspection, reflection wave

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、耐久性、維持管理性に優れているため、これまで永久構造物としてメンテナンス・フリーと考えられてきた。しかし、長期間その性能を維持するには、ある時点で適当な補修を行うことが必要である。鉄筋コンクリート構造物の補修・補強工法のひとつとして鋼板をアンカーボルトで固定しその隙間に樹脂接着剤を充填して接着する工法が広く用いられている。しかし、コンクリート床版のように繰り返し荷重を受ける部分では鋼板とコンクリートが剥離することが懸念される¹⁾。また、阪神大震災によって、耐震基準の見直しが行われ、大量の鉄筋コンクリート構造物の補強が行われている。この中で劣化した補強箇所を検査し剥離状況の定量的評価手法の開発や、補修・補強された接着部を検査し充填不良などの欠陥部分の定量的な診断手法の開発が行われている^{2), 3), 4), 5)}。欠陥の検査手法としては打音法が

一般的な検査手法として用いられているが定量的検査手法としては実用化されてはいない。またサーモグラフィ法による欠陥検出方法は表面温度分布を測定する方法であり、一度に広範囲の処理が可能であることから有望視されているが精確に欠陥を評価する手法としては確立していない^{6), 7)}。これら非破壊検査法の一つである超音波探傷法による診断手法はX線検査と比べて管理の容易さ、可搬性、記録性等からその利用範囲が広い。鋼板接着部の診断においても剥離評価手法の一つとして超音波探傷法による検査手法の開発が

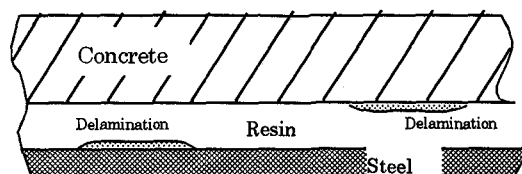


図1 鋼板剥離の発生パターン

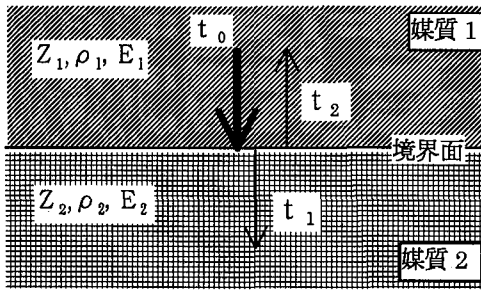


図2 超音波伝播特性

必要と考えられる。鋼板とコンクリートを樹脂で接着する場合に剥離が発生する位置として図1のような剥離損傷パターンを考えることにする。本論文では鋼板接着剥離を簡略化したモデルで剥離部分の診断手法の検討を行っている。また、測定手法を含めた波形解析方法について検討を行ったので報告する。

2. 超音波伝播特性

鋼板とコンクリートを樹脂によって接着した構造の超音波診断をする場合、図2に示すような超音波伝播特性の異なる材料の境界で発生する反射・透過などの伝播特性を検討する必要がある。ここでは媒質1から媒質2へ超音波が伝播するとき入射波 t_0 が境界面で反射・通過する場合について検討する。それぞれの材料の物性値は表1に示す通りで、超音波の伝播速度（縦波伝播速度 c_L 、横波伝播速度 c_S ）や密度 ρ がわかっている。また、音響インピーダンスは縦波の伝播速度と密度の積で表した定数で、超音波の伝播性能を表す物性値である。超音波インピーダンスより2種類の異なる材料の境界での反射率、通過率は次式のように定義される。ここで、 t_1 は媒質1から媒質2への通過率で、 t_2 は反射率を表す。また、 Z_1 、 Z_2 は各媒質のインピーダンスを表す。

$$(\text{通過率}) t_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{反射率}) t_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

剥離面からの反射波は鋼板、樹脂、コンクリート3種類の性質の異なる材料を伝播する。表1はそれぞれの材料伝播速度と音響インピーダンスを示す。これらをもとに供試体の各境界面での反射波の反射率と通過率を計算すると表2のようになる。鋼板と樹脂の境界面では反射率が約88%になるため、

表1 物性値

	c_L (m/sec)	ρ (g/cm ³)	$c_L \rho$ (C.G.S) $\times 10^6$
鋼	5930	7.8	4.63
樹脂	2480	1.13	0.298
コンクリート	4730	2.4	1.14

表2 通過率・反射率

	Z_1	Z_2	通過率	反射率
1	鋼	樹脂	0.12	0.88
2	樹脂	コンクリート	1.55	0.55
3	コンクリート	樹脂	0.45	0.55
4	樹脂	鋼	1.88	0.88

表3 反射波到達時間（垂直探傷）

反射面	伝播距離	反射波到達時間 (μ s)
鋼板底面	18mm	3.01
樹脂底面	10mm	4.03
コンクリート底面	60mm	12.68

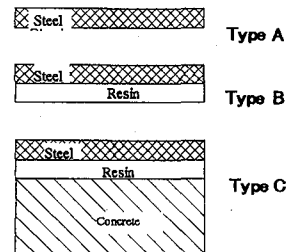
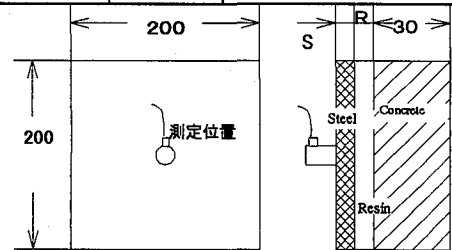


図3 供試体

鋼板底面からの反射波形の振幅が大きく、鋼板内を多重反射する波形が等間隔で現れる。また樹脂とコンクリートが密着している場合にはコンクリート中への透過率が大きいいため反射波は樹脂・コンクリート中の減衰が影響して小さくなる。表3は伝播速度が異なる3種類の材料を縦波が伝播した場合の伝播距離に対する反射波の到達時間を示している。

3. 実験概要

3. 1 供試体

前述したように、図1の様な鋼板をコンクリートに接着した場合に発生する欠陥は、鋼板と接着剤（エポキシ樹脂）との剥離と接着剤とコンクリートの剥離の2種類が考えられる。ここでは前者をA面剥離、後者をB面剥離と呼ぶことにする。本研究ではこれらの剥離を簡略化したモデル供試体を用いて剥離欠陥の検出

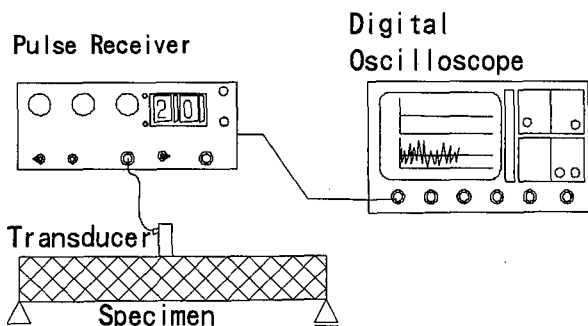


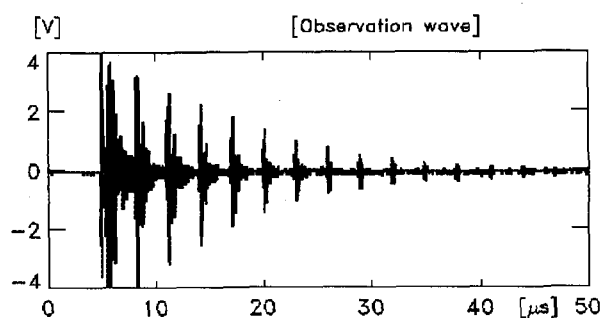
図4 測定方法

方法を検討する。モデルとして図3に示すような TypeA から TypeC までの供試体を作製した。TypeA は鋼板と樹脂が完全に剥離している供試体であり、TypeB はコンクリートと樹脂が完全に剥離した場合をモデル化した供試体である。そして、TypeC は健全な状態をモデル化した供試体である。実際の剥離欠陥の境界周辺は固定条件に近いことが考えられるので実際の境界条件と異なるが、実際の剥離欠陥の検討を行う前に簡略化した剥離欠陥によって超音波の伝播特性の検討を行うことにする。

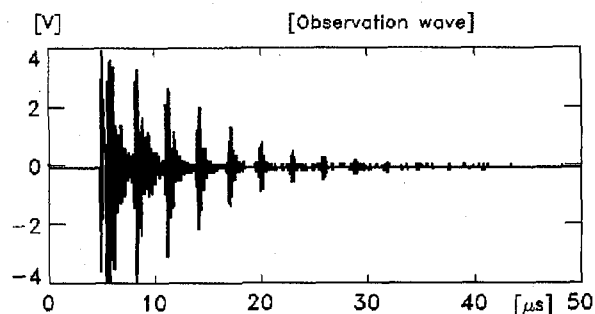
供試体は鋼板厚さ S と樹脂厚さ R の二つをパラメータにして作製を行う。一般的な補強・補修用の鋼板厚さは約 4 mm 程度である。また接着する際の樹脂厚は 5mm を確保するように規定されている。これらのことから鋼板厚さ S を 4.2mm (本論文ではこの鋼板厚を呼ぶとき 4mm と呼ぶことにする)、6mm、9mm の 3 種類とした。また、樹脂厚 R は 5mm、7mm、10mm の 3 種類を想定して供試体を作製した。本論文ではこれらの供試体を呼ぶとき、鋼板厚 9mm で樹脂厚 5mm の時は「S9R5」と表すことにする。さらにコンクリートを接着したモデルは「S9R5C」と最後に「C」をつけて呼ぶことにする。

3. 2 垂直探傷による測定方法

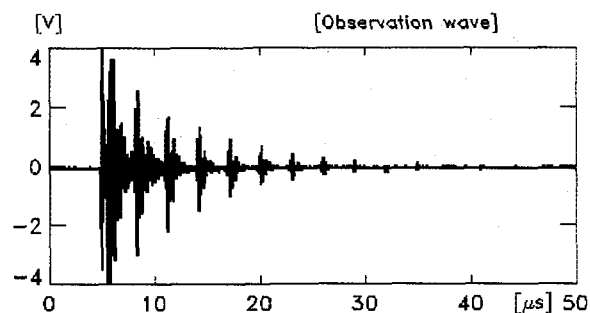
実験方法は図3に示すような供試体の鋼板表面中央に探触子を直接接触して探傷を行う直接探傷法で行う。測定システムは図4に示すような超音波の送受信を行う探触子、探触子に電圧を印加し受信波を増幅するパルスレシーバ(日本パナメトリック社製)、波形記録と解析を行うデジタルオシロスコープ(Lecroy 社製 モデル 9304A)から構成される。探傷方法は図4に示すように供試体の2辺を単純支持し1センサ方式で測定を行っている。使用した探触子は共振周波数



(a) TypeA 供試体の測定波形 (S9)



(b) TypeB 供試体の測定波形 (S9R5)



(c) TypeC 供試体の測定波形 (S9R5C)

図5 剥離モデルの違いによる波形の比較 (5 MHz 探触子)

5MHz、2MHz、0.5MHz の垂直縦波探触子(ジャパンプローブ社製)を使用した。

直接接触法による測定は、供試体と探触子の設置条件によって測定結果に影響を与えるので接触圧力を一定に保ち、探触子と供試体の間には機械油を鉢み様な接触条件を保つようにした⁸⁾。接触圧力については次章で検討するが、本論文では特に断りがない限り探触子に約 120gf/cm² の圧力がかかるように重りを載せて実験を行っている。

3. 3 剥離箇所からの反射波形の検討

図4の実験によって得られた測定波形を図5に示す。(a)はA面剥離、(b)はB面剥離、(c)は健全な供試体から測定された 5 MHz 探触子を用いた場合の波形である。

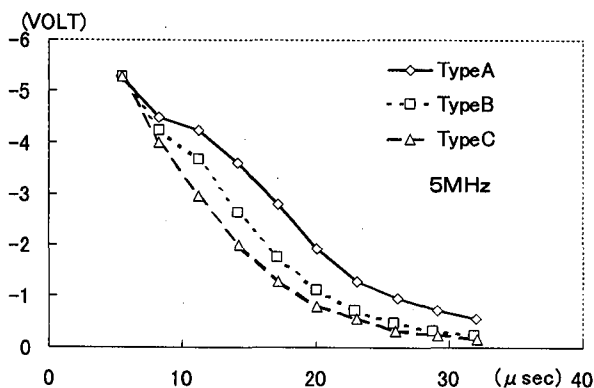


図6 鋼板厚9mmの減衰曲線
(5MHz 探触子、GAIN: 0dB)

供試体は鋼板厚 $S=9\text{mm}$ 、樹脂厚 $R=5\text{mm}$ である。測定された波形は最初の $5\mu\text{s}$ が測定時に設定した遅延時間で、次に入射波の大きな振幅が記録されている。その後は約 $3\mu\text{s}$ 毎に多重反射波のピークが減衰しているのが記録されている。この反射波は鋼板底面からの反射波が鋼板内を減衰しながら多重反射していく反射波形である。また、(b)、(c)の測定波には多重反射波の他に樹脂層の底面からの反射波が到達する。樹脂底面からの反射波が到達するのは、(b)のグラフの場合約 $13.04\mu\text{s}$ 付近であることが超音波の伝播速度から予想される。(b)と(a)の波形の $13\mu\text{s}$ 付近を比較するとほとんど違いがないことがわかる。このことは(c)の波形と比較した場合にも同様のことがわかる。つまり樹脂底面からの反射波は減衰しているため多重反射波より非常に小さいと考えられる。樹脂底面からの反射波によって剥離状態を評価することは非常に難しいことであることがこの結果よりわかる。しかし、この3種類の波形を比較すると多重反射波の減衰形状が剥離状況によって異なっている。(a)と(b)の比較では鋼板と樹脂がしっかり付着しているときには多重反射波の減衰は早くなり、さらに健全な(c)ではこの傾向がより明確に現れている。本論文ではこの多重反射波のピーク値を読みとり、この値を用いた減衰曲線を作成して鋼板剥離部分の評価方法について検討する。

4. 反射波形による剥離箇所の解析評価

図6は図5で比較を行った3種類の測定波形より求めた多重反射波のピーク値の減衰曲線を比較した図である。横軸は経過時間、縦軸は振幅を表しており、振

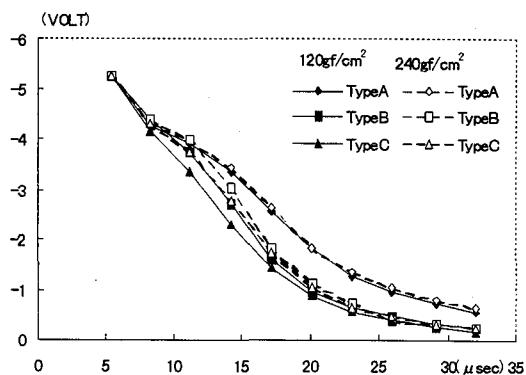
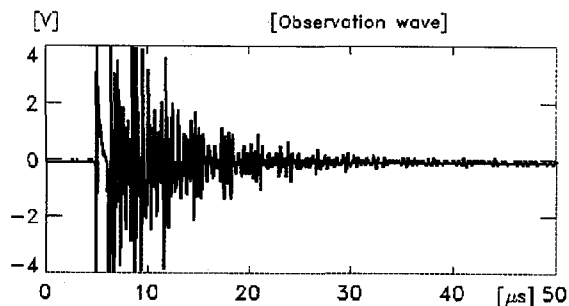
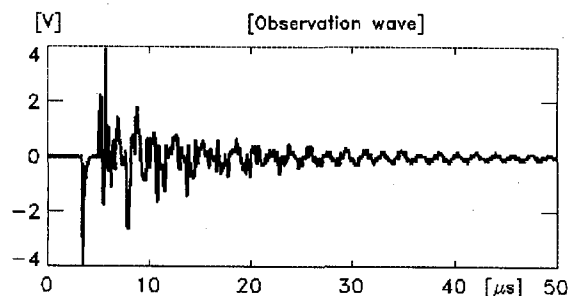


図7 押し付け圧力による減衰曲線の比較



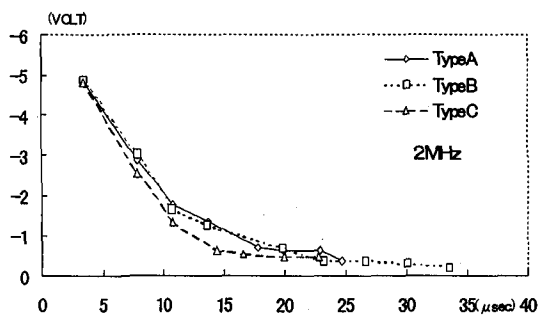
(a) 2MHz 探触子の測定波形 (S9、GAIN:7dB)



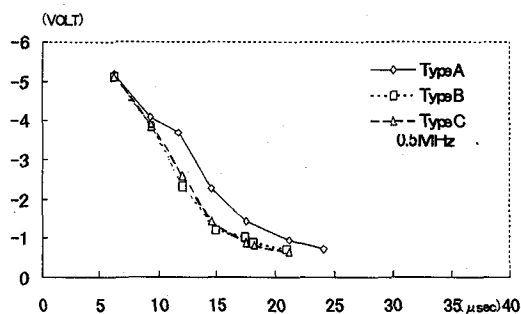
(b) 0.5MHz 探触子の測定波形 (S9、GAIN:25dB)

図8 共振周波数の異なる探触子の測定波形の比較

幅は負のピーク値が卓越しているので負のピーク値による減衰曲線とした。このときのパルサーレーサーの GAIN は 0 dB で測定している。また、測定結果のばらつきによる誤差を小さくするために一つの供試体から5、6回の波形を測定し、その平均値によって減衰曲線を作成している。減衰曲線は多重反射を繰り返す度により複雑なモードとなり多重反射波もこの影響を受けることになるので、ここでは3波目から5波目の減衰を目安に剥離状況を評価するのが妥当であると考えられる。この章では剥離状況の評価に影響を与える因子の内から探触子の押し付け圧力と、探触子の周波数特性による剥離評価精度について検討を行う。



(a) 2MHz 探触子の減衰曲線 (S9、GAIN:7dB)



(b) 0.5MHz 探触子の減衰曲線 (S9、GAIN:25dB)

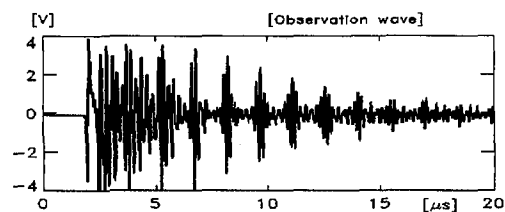
図9 探触子の周波数特性による減衰曲線の比較

4. 1 探触子押しつけ圧力による測定精度の検討

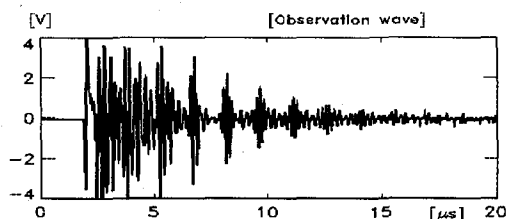
図7は、図6の減衰曲線を測定するときの条件を同一にして探触子の押しつけ圧力だけを変えた場合の減衰曲線の変化を比較した図である。押しつけ圧力を約 120gf/cm^2 と約 240gf/cm^2 の2種類に変えた場合について比較した図である。白抜きのマークが押しつけ圧力を大きくした場合の減衰曲線で、TypeA の減衰曲線は振幅に大きな変化が見られなかったが、TypeB、TypeC 共に $10\mu\text{s}$ から $18\mu\text{s}$ 付近の3波から5波目の多重反射波のピークが大きくなるのがわかる。押しつけ圧力がさらに大きくなるとこの傾向はより明確に現れる。つまり鋼板剥離状況による振幅の差が小さくなると欠陥検出が困難になるので、本論文では押しつけ圧力として 120gf/cm^2 を用いて測定する。

4. 2 探触子の周波数特性による測定精度の比較

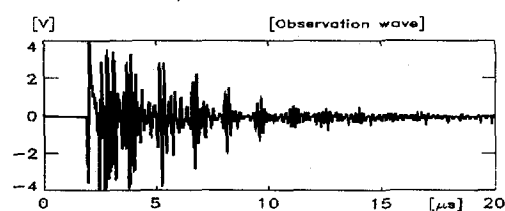
これまで図5のように 5MHz の探触子によって測定された波形を用いて鋼板剥離状況の評価手法について検討してきた。ここでは、5MHz 以外の周波数特性を持つ探触子を使って鋼板剥離の評価について検討を行う。測定方法はこれまでと全く同じ方法で行うとする。図8(a)は 2MHz 探触子を用いて TypeA の $S=9\text{mm}$



(a) TypeA、S4

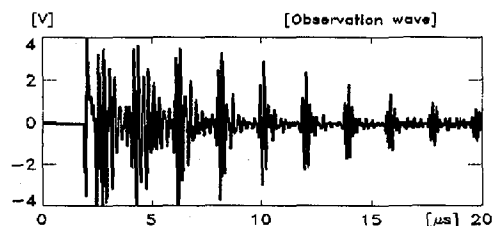


(b) TypeB、S4R5

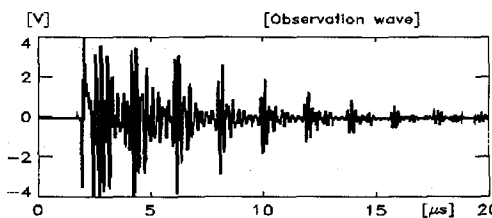


(c) TypeC S4R5C

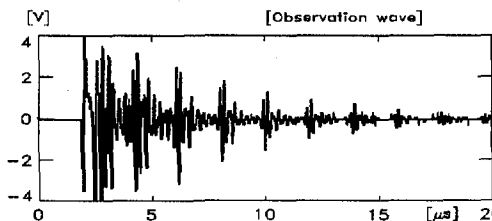
図10 鋼板厚4mm、樹脂厚5mmの測定波形



(a) TypeA S6



(b) TypeB S6R5



(c) TypeC S6R5C

図11 鋼板厚6mm、樹脂厚5mmの測定波形

の供試体を測定した図である。また、図 8 (b) は同じ供試体の 0.5MHz 探触子を用いて測定した波形である。(a) は鋼板内を伝播する多重反射波が測定されている。(b) の波形にも鋼板内の多重反射波が見られるが (a) ほど明確な形ではない。図 9 はこの波形から減衰曲線を作成した図である。剥離状況による減衰特性の違いは図 7 の場合に比べて明確ではないことがわかる。探触子の周波数が低くなると、全体に鋼板内を多重反射する反射波の振幅は小さくなる。さらに鋼板の厚さが 6 mm、4 mm と薄くなると多重反射波の間隔が、1.4 μ s まで狭くなり多重反射波のピークが接近する。これらの検討より本論文では 5MHz を共振周波数に持つ探触子を用いて鋼板剥離状況を評価することにする。

5. 減衰曲線による剥離評価

図 9 のような減衰曲線は鋼板厚が変わったり、樹脂厚が変化する場合にも鋼板剥離状況を十分評価できるか検討する必要がある。本章では鋼板厚さや樹脂厚さをパラメータとしたときの剥離評価精度について検討を行う。図 10 は鋼板厚さ $S=4$ mm の場合に TypeA、TypeB、TypeC の鋼板剥離状態の測定波形を、図 11 は鋼板厚さ $S=6$ mm の場合に鋼板剥離状態の違いによる測定波形である。いずれも樹脂層の厚さは $R=5$ mm である。図 10 の波形には約 1.4 μ s 間隔に多重反射波が現れている。図 11 の波形には約 2.0 μ s 間隔に多重反射波が現れている。図 12 は樹脂厚 R をパラメータとして、鋼板厚さ毎の減衰曲線を表している。縦軸は TypeB、TypeC の減衰曲線を TypeA の減衰曲線 (VA) で基準化して表した減衰曲線比 (V/VA) である。横軸は鋼板の厚さによって多重反射波のピーク間隔が異なるので、経過時間の代わりに反射波の数を横軸にとって表すことにする。図中■は TypeB を、▲は TypeC を表している。A 面剥離の判定はこの減衰曲線比が 1.0 より小さいことが必要である。また B 面剥離と健全の判定は■マークと▲マークの減衰曲線が離れている必要がある。

鋼板厚さは図 12(a)、(b)、(c) の順に厚くなり、どの図の波形も 4 波目以降の■マークと▲マークの差が小さくなっている。つまり 2 波目から 4 波目までのピークを判定の基準にするのが最も精確である事がわかる。鋼板厚が $S=9$ mm と厚くなると樹脂層が厚くなっても

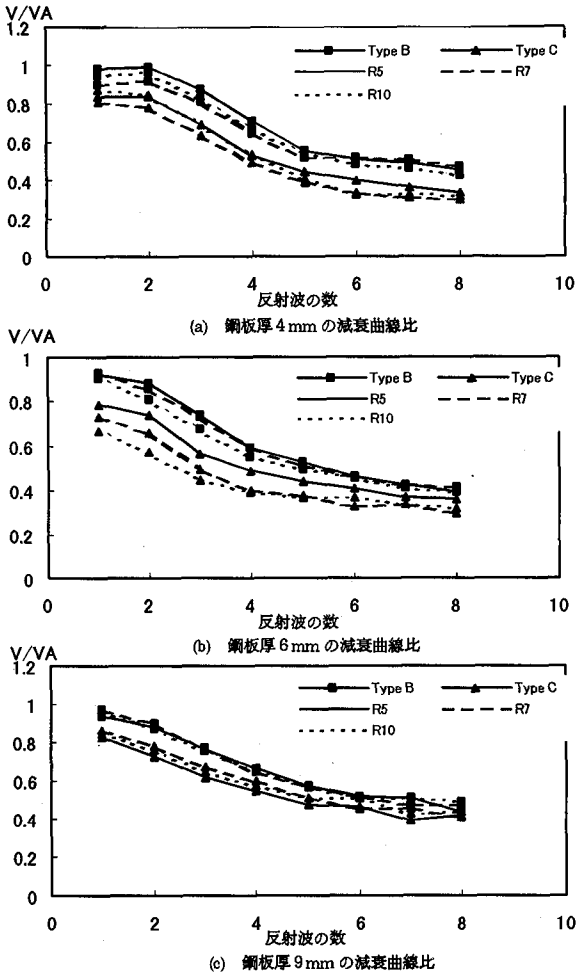


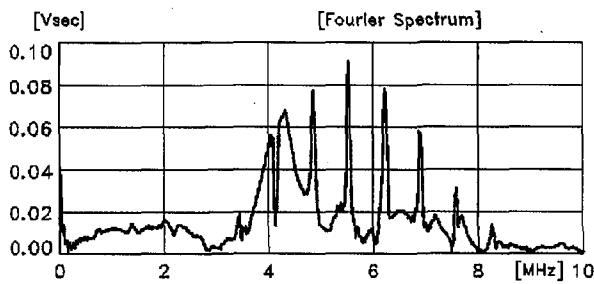
図 12 樹脂厚による減衰曲線比の比較

減衰曲線比の変化は小さく、鋼板剥離箇所の判定に影響を与えない。

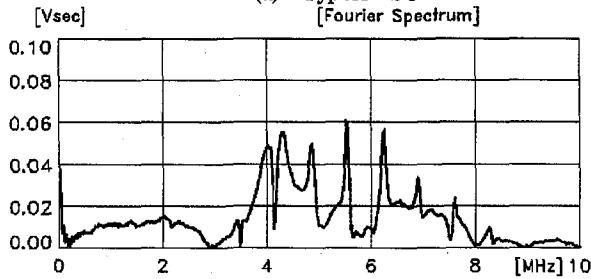
6. 周波数解析による剥離評価

これまでの検討は、鋼板内を伝播する多重反射波の減衰曲線に着目して鋼板剥離の判定方法について検討してきた。

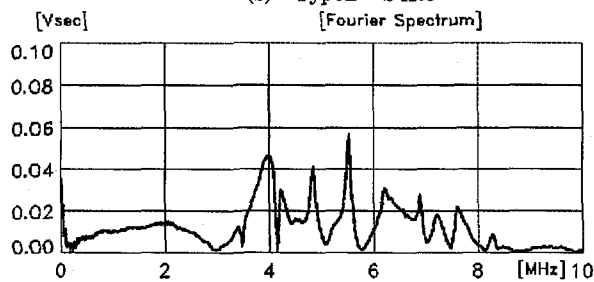
多重反射波の減衰は周波数特性にも大きな影響を与えるので本章では、測定波形のフーリエスペクトルを用いて鋼板剥離状況の評価方法について検討する。図 13 は図 10(a)、(b)、(c) の測定波形を高速フーリエ変換処理して得られたフーリエスペクトル波形である。探触子の共振周波数が 5MHz であるからこの周波数を中心に 4MHz から 8MHz の間に鋼板内を伝播する多重反射波の共振によるピークが見られる。スペクトルのピークは多重反射波の減衰が大きいとスペクトルのピークは小さくなる。つまり図 5(a)、(b)、(c) の順に多重反射波



(a) TypeA S4
[Fourier Spectrum]



(b) TypeB S4R5
[Fourier Spectrum]

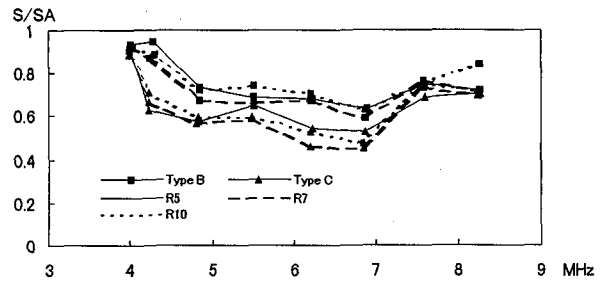


(c) TypeC S4R5C

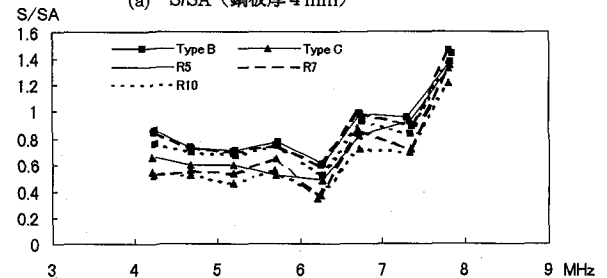
図 13 鋼板厚 4mm 供試体のフーリエスペクトル (5MHz 探触子)

の減衰が大きくなると図 13(a)、(b)、(c)の順にスペクトルのピークが小さくなっている。ここではこの関係を利用して鋼板剥離の評価をする。

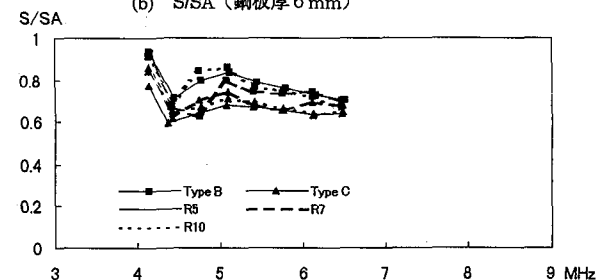
この関係を用いて鋼板剥離状況の評価したのが図 14(a)、(b)、(c)である。図 14 は鋼板厚毎に樹脂厚をパラメータとした比較である。各供試体の測定波形のスペクトルに対して 4MHz のピークから 8 点のピーク値 (S) を選びこの点を結ぶ包絡線を求め、この包絡線を TypeA の包絡線 (SA) で基準化して表示する。つまり縦軸はスペクトルピーク高さ比 (S/SA) で、横軸は周波数 (MHz) である。鋼板の剥離に対してはほとんどのピークが TypeA、TypeB、TypeC の順番に小さくなっており、TypeA の剥離と TypeB の剥離はこの差から判定することができる。TypeB と TypeC の判定は■マークと▲マークのピーク差が大きくなる点に着目して判定すると探触子の共振周波数 5MHz 近くになる。共振周波数近くのピークによって鋼板剥離の TypeB と



(a) S/SA (鋼板厚 4 mm)



(b) S/SA (鋼板厚 6 mm)



(c) S/SA (鋼板厚 9 mm)

図 14 周波数解析による鋼板剥離箇所の評価

TypeC の判定ができる。ただし、鋼板厚が 9mm の場合にはピークの大小が入れ替わるところが見られ、鋼板剥離箇所の検出精度が悪くなる傾向にある。図 14 に示す実線、破線、点線はこの順に樹脂厚が厚くなり、樹脂層が厚くなるとスペクトルのピークが小さくなる傾向が見られるが、明確な相関は見られなかった。また、樹脂厚による鋼板剥離箇所の検出精度に与える影響は小さいと考えられる。図 14 にプロットされたスペクトルのピークは鋼板厚が大きくなるとスペクトルのピーク間隔は小さくなっている。このことからスペクトルのピーク間隔と鋼板厚さには逆比例の関係にあることがわかる。

7. 結 論

本論文では超音波による鋼板接着剥離箇所の評価を行う際に必要となる測定方法と評価方法について検討した結果を以下にまとめることにする。

1. センサーの押しつけ圧力は大きくなるほど欠

陥評価が困難となる傾向がみられ、今回実験した範囲では $120\text{gf}/\text{cm}^2$ 程度が最適である。

2. 測定に用いるセンサーの周波数特性は、0.5 MHz、2 MHz、5 MHz の3種類の共振周波数を持つ探触子を用いて欠陥評価の実験を行った結果、周波数が低くなるほど欠陥評価が難しくなる事がわかった。この結果より、共振周波数 5 MHz の探触子を用いて実験を行うこととした。

鋼板厚さや樹脂層の厚さをパラメータとしてA面剥離、B面剥離、健全の3種類の鋼板剥離状況を検出する場合の鋼板剥離評価方法の検討を行った。

1. 測定された波形を用いて鋼板剥離を評価するには、鋼板内を多重反射して伝播する波形の減衰に着目した減衰曲線比 (V/VA) を用いることによって鋼板剥離を評価することが出来る。
2. 測定波形の周波数解析によって得られる S/SA 曲線によって鋼板剥離箇所を評価することが出来る。

本論文で得られた以上の結論は鋼板剥離を簡略なモデル化した場合の実験結果であり、今後実規模の鋼板剥離を想定した実験を行って今回の結果を確かめる必要がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たりに鈴木康弘氏 (株サクラダ)、安岡富夫氏 (株サクラダエンジニアリング)、田中秀秋氏 (株日本製鋼所) らには貴重なご意見やご指導をいただきましたお礼申し上げます。また、本論文の一部は平成10年度文部省科学研究補助金 (代表三上修一) を受けて行ったものです。

参考文献

- 1) 園田、沖野、林、喜田：道路橋 RC 床版に対する鋼板接着補強工法の信頼性に関する研究、土木学会論文集、第398号/I-10、pp.245-254、1998.10

- 2) 堀江、飯束、菅野、丸茂：鋼板接着補強された道路橋コンクリート床版の剥離検出法の研究、非破壊検査協会秋季大会講演概要集、pp.349-354、平成7年10.
- 3) 山口、丸茂、山口：コンクリートの剥離と型枠裏の充填不具合の超音波試験、非破壊検査協会秋季大会講演概要集、pp.355-362、平成7年10.
- 4) 戸田、吉川、垣下、横山、呉：超音波モード変換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、構造工学論文集 Vol.43A、pp.1059-1064、1997.3.
- 5) 鈴木、松本、富士：橋脚耐震補強工事における充填材の接着面の評価、超音波による非破壊評価シンポジウム、pp.109-114、1997.1.
- 6) 黒坂、長滝、鎌田、矢崎：サーモグラフィー法による外殻鋼管コンクリートにおける鋼・コンクリート間の剥離評価、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集5、pp.1202-1203、1996.
- 7) 川瀬、鎌田、岩波、六郷：サーモグラフィーによる鋼・コンクリート間の空隙評価に関する基礎的研究、構造物の診断に関するシンポジウム論文集、pp.285-288、1998
- 8) T.Oshima, S.Mikami, S.G.Nomachi: Analysis of Stress wave propagation in composite rectangular beam in the case of ultrasonic pulse method, Proc. Of JSCE, No.416/I-13, pp.89-99, 1990.4.
- 9) 三上、大島、安岡、鈴木、田中：鋼板接着剥離の超音波による診断、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 I(A)、pp.456-457、1997.9.
- 10) N.Sugawara, T.Oshima, S.Mikami, S.Sugiura: On the accuracy improvement in ultrasonic inspection by using computer graphics and waveform analysis, Proc. of JSCE, No.459/I-22, pp.49-58, 1993.1.

(1998年9月18日受付)