

I - 58

超音波による鋼板接着部材の剥離損傷箇所の評価

北見工業大学	正 員	三上修一
北見工業大学	F 会員	大島俊之
(株)サクラダ	F 会員	鈴木康弘
(株)サクラダエンジニアリング	会 員	安岡富夫
(株)日本製鋼所	会 員	田中秀秋

1. はじめに

土木構造物はその性能を長く維持することが要求される。特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⁾。また接着部の充填不良を定量的に診断する手法の開発が必要となる^{2),3)}。欠陥の検査手法としては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の開発が必要となっている。著者らは鋼板接着剥離をモデル化し、剥離部分の診断手法の開発することを目的とし、測定手法を含めた波形解析方法について検討を行ってきた⁴⁾。本研究では、直接接触法による超音波探傷を行い、剥離位置の検出精度に影響を与える鋼板厚さやエポキシ樹脂層の厚さの影響について検討する。

2. 実験概要

2. 1 直接探傷法による測定

実験方法は図1に示すような供試体の鋼板表面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、波形記録と解析を行うデジタルオシロスコープから構成される。探傷方法は図2に示すように1センサ方式で測定を行っている。使用した探触子は中心周波数 5MHz の垂直縦波センサ(ジャパンプローブ社製、ここでは 5M センサと呼ぶ)を使用した。5M センサによる測定は図2にあるように剥離領域を中心に 10mm 間隔に設けた左右合わせて10箇所の測点a～jで反射波形の測定を行った。

2. 2 鋼板接着供試体

本研究ではエポキシ樹脂(ショーボンド社製 EPX-3 夏用)によって鋼板(SS400)とコンクリートを接着したモデルを考えことにする。図1の様に鋼板とコンクリートの間に構造物の老朽化によって鋼板とエポキシの間またはコンクリートとエポキシの間に剥離がある場合の検討を行った。鋼板の厚さは 5mm とし、エポキシ樹脂層の厚さは鋼板とコンクリート面の隙間を施工基準より 5mm とした。コンクリート層の厚さは 60mm とした。樹脂層中の空隙や剥離は樹脂硬化後電動ドリルによって樹脂を削って所定のサイズに作製した。欠陥サイズは 50mm×50mm で、剥離層の厚さは約 2mm とした。本研究では、鋼板とエポキシの接着面をA面、コンクリートとエポキシの接着面をB

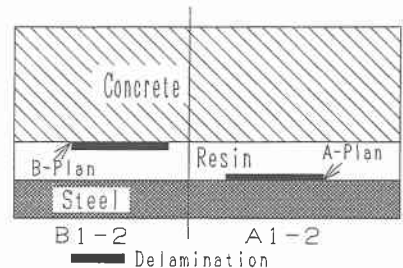


図1 鋼板接着供試体

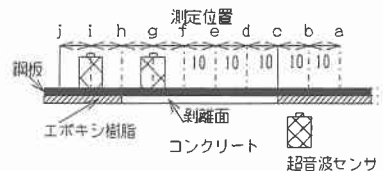


図2 垂直探傷による測定方法

Evaluation of bond delamination portion between steel and concrete by ultrasonic wave

By Shuichi Mikami, Toshiyuki Oshima, Yasuhiro Suzuki, Tomio Yasuoka and Hideaki Tanaka

面と呼び、A面側の剥離を A1-2、B面側の剥離を B1-2 と呼ぶことにする。

2.3 鋼板樹脂供試体

鋼板中に入射した超音波は鋼板とエポキシの境界では鋼板底面での反射率は約88%になり鋼板中で多重反射波する。多重反射波形は鋼板厚が薄くなると繰り返し周期も短くなるため剥離位置からの反射波形を検出し判定するのが難しくなる。このため鋼板とエポキシ樹脂の厚さによる反射波形の影響を比較することにする。供試体は図3、表1に示すように鋼材の厚さT4mm と 9mm の2種類とし、50×100mm の大きさの鋼板に厚さの異なるエポキシ樹脂層を作製した。樹脂層のB面側には深さb (=3mm) の溝を設けて剥離をモデル化した。剥離位置でのエポキシ層の厚さeを 2、5、7、9mm と変えて表1に示すような8種類の供試体を作製した。波形の測定位置は剥離位置の中央とした。

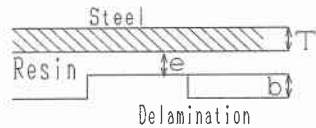


図3 鋼板樹脂供試体(b=3mm)

表1 鋼板樹脂供試体の名称

供試体名		エポキシ層の厚さ (e: mm)			
		2	5	7	9
鋼板厚	4	T4E2	T4E5	T4E7	T4E9
(T: mm)	9	T9E2	T9E5	T9E7	T9E9

表2 物性値

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

3. 超音波伝播特性

超音波伝播特性の異なる鋼板とコンクリートを樹脂によって接着する場合超音波は二つ以上の境界を考慮した伝播特性を考えなければならない。それぞれの材料は固有の物性値を持ち、超音波の伝播特性は表2に示すような伝播速度(縦波伝播速度 C_L) や密度 ρ 、音響インピーダンス($C_L \cdot \rho$)によって異なる。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。鋼板接着供試体の場合の各反射境界からの反射波の到達時間を表3に示す。このとき鋼板とエポキシの間の反射率は約88%で、エポキシとコンクリートが密着している場合にはコンクリートからの反射率は約55%となる。このように物性値の異なる材料の境界で生じる反射・透過によって表面に到達する反射波は減衰して小さくなる。

表3 鋼板接着供試体の反射波到達時間

反射面	伝播距離	反射波到達時間 (μ s)
鋼板底面	10mm	1.68
エポキシ底面	20mm	5.75
コンクリート底面	80mm	56.27

4. 反射波形による剥離箇所の解析評価

1 センサの直接探傷法による測定波形には鋼板内での多重反射に加えて、入射波が測定時間の初期に記録されるため初期の波形はそのままでは鋼板内部の反射波形を評価することはできない。そこで本研究では、測定波形から基準波形を引くことによって入射波の影響を取り除くことにした。基準波形には入射波の影響と多重反射の影響を取り除くために健全状態の供試体にセンサを接触させて測定した波形を基準波形とした。図4、図5は5MHz センサによる剥離位置の違いによる測定波形の比較とFFTによる周波数解析の結果を比較した図である。図4は A1-2 供試体、図5は B1-2 供試体の解析結果である。解析に用いた基準波形はパルスレーバの GAIN を 3dB で設定して健全部にセンサを接触させて得られた波形を用いている。測定波形はパルスレーバの GAIN を 9dB に設定して測定しているので、測定波形は基準波形の GAIN に比べて 6dB 増幅された波形を受信する。これら受信波形は入射波を含めてオーバーフロー状態で波形を記録するので、GAIN が変わっても基準波形と測定波形の形状はほとんど同じであり、測定波形の後半の剥離部分からの振幅の小さい反射波形が強調されることになる。図4と図5の波形を比較すると剥離がある場合とない場合の波形には振幅の違いと減衰時間などで違

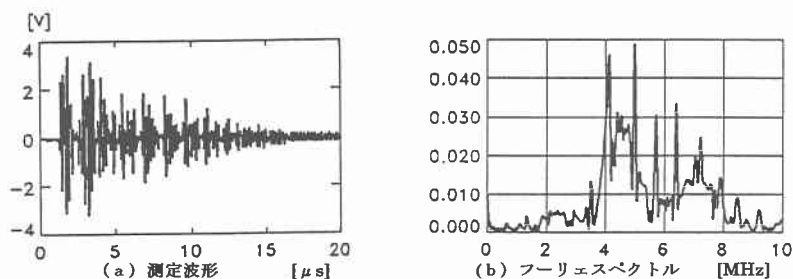


図4 5MHz センサーのA面剥離の波形 (A1-2)

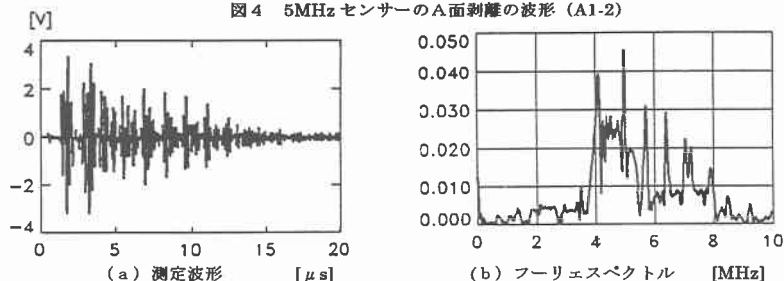


図5 5MHz センサーのB面剥離の波形 (B1-2)

いが見られる。この違いはA面剥離とB面剥離の特徴であると考えられる。また周波数解析の結果から4MHz 付近の卓越周波数に剥離の影響と見られる違いが現れている。A面剥離については多重反射波の振幅の違いで判定が可能である。しかし、B面剥離の存在をすぐに判断することは難しい。

5. 鋼板樹脂供試体によるB面剥離の検討

5.1 鋼板厚さの影響

図6は供試体 T9E2 の測定波形である。測定条件は9mm 厚の鋼板に直接センサを接触させたときにパルサーレーザの GAIN を4dBに設定して測定した波形を基準波形とした場合である。測定波形は GAIN を14dBと増幅して測定し基準波形との差を測定したものである。図7はこの供試体の鋼板とエポキシの間で4種類 (I、II、III、IV) の伝播経路を想定した模式図である。図6で最初の波形(約1.89μs)から約3μs 間隔の鋼板内を多重反射する波形が測定されている。最初のピークは図7においてIの伝播経路であり鋼板底面からの最初の反射波である。次に鋼板内を多重反射波(図7のIIIの伝播経路)する波が測定されている。この反射波の間に約4.6μs からエポキシ底面の反射波が到達(図7のIIの伝播経路)している。このピーク以後は鋼板内を多重反射して幾つかの小さなピーク(図7のIVの伝播経路)が測定されている。図6の波形では剥離部分のエポキシ層の厚さが2mm で薄くなっているためエポキシ底面波が鋼板の多重反射波の間にはっきり現れている。図8は鋼板厚さが4mm になった供試体 T4E2 の測定波形で、測定条件は図6の場合と同じ条件で基準波との差を測定している。図6と同様に1.4μs 間隔の鋼板内の多重反射が見られる。しかし、この多重反射波形の中にエポキシ層からの反射波が測定されていたとしても判断が難しい。さらにこの供試体の場合には、エポキシ底面からの反射波形が到達する時間と多重反射波の位置がほぼ一致しているため更に判定が難しくなっている。

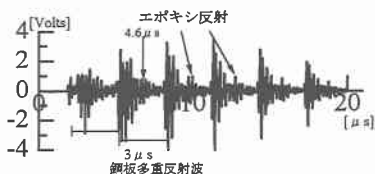


図6 鋼板多重反射波とエポキシ反射波(T9E2)

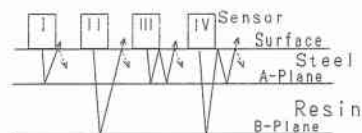


図7 反射波形の伝播経路

5.2 エポキシ底面波の測定条件

先に示したとおりエポキシ底面波は鋼板からエポキシ層に透過した超音波が鋼板層に再度反射して、この反射波が鋼板内で多重反射する。エポキシ層の厚さが増えた場合にはこの反射波の到達時間が遅くなり、振幅が減衰によって小さくなる。そこで、測定条件から基準波形の GAIN と測定波形の GAIN をパラメータとしてより良い測定条件を検討する。エポキシからの反射波形がより判定しやすい条件は鋼板内の多重反射波形と別のピークを持つことである。図6からわかるようにエポキシ底面波は測定波形から3波程度のピークは確認できる。エポキシ層の厚さが変化したときエポキシ底面からのピークと

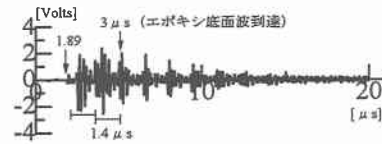


図8 鋼板多重反射波とエポキシ反射波(T4E2)

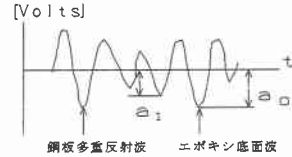


図9 エポキシ底面波の判定

鋼板の多重反射波の測定時間が近接する場合には、両者の判定が難しくなる。ここでは、図9に示すようにエポキシ底面波のピーク値 a_0 と一つ前のピーク a_1 に着目してピークの比 ($A=a_1/a_0$) を求めた。A が小さければそのピークは判断しやすい波形であり、A が1より大きいとそのピークはエポキシ底面波のピークとして判定することが難しいことを示す。表4のBGは基準波形のGAINを表し、MGは測定波形のGAINを基準波形から何dB増やしたかを示している。表中の「—」はピークが不明確でピーク比を算定していない条件である。この結果からGAINはBGが11dBでMGが16dBのとき最もピーク比Aが小さくなっている。また、エポキシ底面波は3波目のピークで測定するのが一番判定しやすいことが分かる。エポキシ層が厚くなるとエポキシ底面波の到達時間は遅くなり振幅が小さくなる傾向があり、7mm以上の場合にはほとんど反射波形を確認することはできなかった。

表4 鋼板接触基準波による増幅率の関係 (T9E2 供試体)

Wave group number	BG	GAIN11		GAIN8		GAIN4		Ave.
	MG	21	16	18	13	14	9	
1	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	0.67	0.67	0.75	0.40	0.75	—	0.65
3	—	0.31	0.29	0.50	0.50	0.50	0.67	0.46
4	—	0.40	0.40	0.57	0.50	0.61	0.50	0.51
Average	—	0.46	0.45	0.61	0.47	0.64	0.58	—

表4のBGは基準波形のGAINを表し、MGは測定波形のGAINを基準波形から何dB増やしたかを示している。表中の「—」はピークが不明確でピーク比を算定していない条件である。この結果からGAINはBGが11dBでMGが16dBのとき最もピーク比Aが小さくなっている。また、エポキシ底面波は3波目のピークで測定するのが一番判定しやすいことが分かる。エポキシ層が厚くなるとエポキシ底面波の到達時間は遅くなり振幅が小さくなる傾向があり、7mm以上の場合にはほとんど反射波形を確認することはできなかった。

6. 結 論

直接接触法による鋼板接着コンクリートの接着部に生ずる剥離の探傷によって剥離箇所を定量的に測定する事を目的に次のような検討を行った。

1. A面剥離面からの波形、周波数特性の検討
2. 鋼板厚さやエポキシ層の厚さによる影響
3. B面剥離検出のための適切な増幅率

A面剥離に関しては、鋼板底面での反射波形の振幅に着目するか、波形が減衰するまでの形状によって判断することが可能である。B面剥離に関しては鋼板内で多重反射する超音波の中からエポキシ樹脂底面の反射波形を区別するのは鋼板厚が薄くなるほど、またエポキシ樹脂層が厚くなる程難しくなることが分かった。また測定精度を良くする為の最適な増幅率を示した。この研究をまとめるにあたり実験やデータ解析に協力頂いた南邦明氏（㈱サクラダ）、下元竜太郎君、岡部雄二君（北見工業大学学生）にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

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、第398号/I-10、pp.245-254、1998.10
2. 堀江、飯東、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、H7.10.
3. 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.
4. 三上、大島他：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.