

# 論文 鋼板接着されたコンクリート床版の剝離非破壊検査法の研究

丸茂文夫\*<sup>1</sup> ・ 神谷 誠\*<sup>2</sup> ・ 飯東義夫\*<sup>3</sup> ・ 菅野 匡\*<sup>4</sup>

**要旨：**鋼板接着されたコンクリート床版の鋼板の剝離検査のため2通りの超音波非破壊検査法を提案し供試体で実験を行い考察を加えた。1つは曲げ振動に着目した超音波共振法で剝離部分に振動を与え、共振によって得られた固有振動数が理論的に算出した振動数で近似されることが明らかとなった。1つは超音波反射法による剝離検査法で、剝離がコンクリート-樹脂-鋼板のどの境界で起っているかを特定する目的で実験を行い剝離境界が精度良く測定できた。

**キーワード：**床版, 鋼板接着補強, 非破壊検査, 超音波, 曲げ振動, 共振法, 反射法

## 1. はじめに

昭和40年代に橋梁コンクリート床版の損傷の問題が顕在化して以来、床版の補強のためにいくつかの対策が施されてきている。その中に床版下面に鋼板を樹脂で接着する工法があり高速道路の橋梁で用いられてきた。

鋼板接着補強した床版に関しては、これまで多くの研究がなされてきており、疲労試験の際の破壊進行状況が目視で観察されている[1,2]。それによれば、荷重の繰り返しとともに鋼板の剝離が広がり、相当程度剝離が広がった後、床版が押し抜きせん断破壊する。この知見を点検にあてはめれば、鋼板の剝離状況を管理することで、損傷をモニターすることができることとなる。

現在、鋼板剝離は定期点検の際に検査路から打音法によって点検されている。これで欠陥が見つければ、詳細点検を行う。通常、定期点検を行う橋梁の数は多数におよび、点検者が書く報告書は膨大なページ数となる。測定結果の判定から報告書の作成までをコンピュータ処理することにより、作業の飛躍的向上が期待できる。

本研究は、点検作業のコンピュータ化のために、鋼板剝離点検への2つの超音波非破壊検査法の適用可能性を論じたものである。1つは、剝離部分の曲げ振動に着目した低周波超音波非破壊検査法であり、1つは、超音波反射法による剝離部の検知法である。低周波超音波により曲げ固有振動数を測定する方法は、剝離部のどの位置に探触子をあてても同一の固有振動数が得られ、固有振動数から逆に剝離部の大きさが推定できるという利点を持つ。このため、点検において探触子をあてる間隔を疎とすることができ、定期点検への応用が考えられる。また、反射法による方法は、剝離がコンクリート-樹脂-鋼板のどの境界で起っているかまで検出可能であり、詳細点検への応用が考えられる。

剝離をモデル化した供試体を作成し、曲げ固有振動数に着目した方法では固有振動数の理論値との比較を行い、超音波反射法では、剝離境界までをもとらえられることを確認した。

\* 1 (株)東横エルメス 営業部特機課 課長 (正会員)

\* 2 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 室長 (正会員)  
(現 日本道路公団 広島管理局 技術部 保全第一課 課長)

\* 3 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 主任 工修 (正会員)

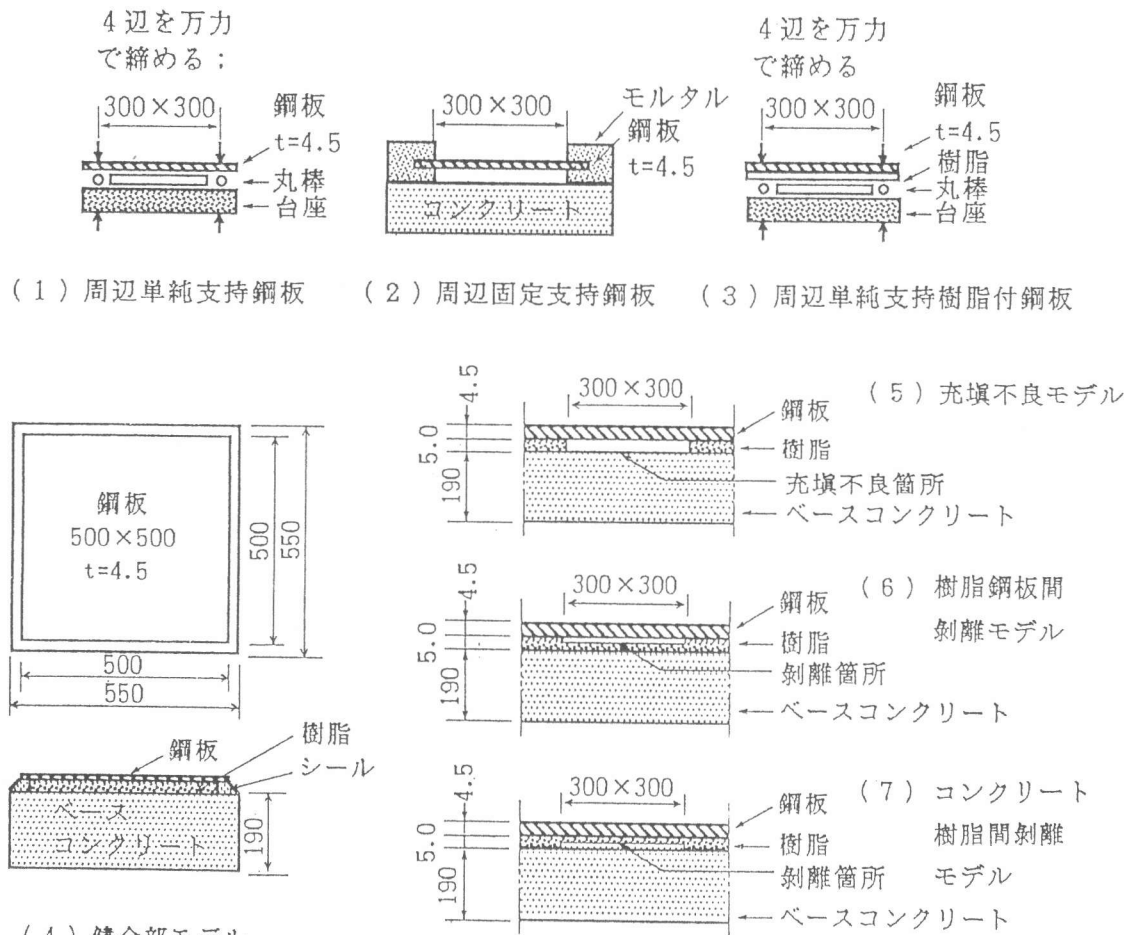
\* 4 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 工修 (正会員)

## 2. 供試体

作成した供試体は図-1のとおりで(1) 周辺単純支持鋼板、(2) 周辺固定支持鋼板、(3) 周辺単純支持樹脂付き鋼板、(4) 健全全部モデル、(5) 充填不良モデル、(6) 樹脂鋼板間剝離モデル、(7) コンクリート樹脂間剝離モデルの7種類である。(6),(7) は薄いビニールを介在させて剝離を再現したものである。

(1),(2) は固有振動数を解析によって解いて解析法の妥当性を確認したモデル、(3)は樹脂が接着していることの影響が実験の誤差の範囲内であることを実験によって立証したモデルである。

(4)は曲げ振動応答が無いことを確認した。(5),(6),(7) は固有振動数が(1)と(2)の間にはいることを確認した。また、(6),(7) は反射法により剝離箇所の特定の可否を確認した。



供試体(5)~(7)の鋼板およびベースコンクリートの外形は(4)と同じ

単位：mm

図-1 供試体

## 3. 曲げ振動の共振による方法

### 3.1 測定原理

送振側の探触子から剝離部分の曲げ基本振動数以下の振動数を与えて、基本振動数の近似値を得たうえで振幅をモニターしながら周波数を変化させて、振幅が最大となる固有振動数の正確な

値を得るものである。共振が発生することによって剝離が起こっているか否かが判り、また固有振動数の値によって剝離部分の大きさが判る。試験法および測定法を図-2に示す。周波数が可変な発信器で超音波探触子を振動させ鋼板に曲げ振動を与える。鋼板の振動を超音波受信探触子で受信しFFTアナライザでフーリエ解析し固有振動数を得る。

探触子には公称周波数1~500kHzの広帯域のものを用い、78 $\mu$ secのインターバルでデータ数256個以上をサンプリングし、FFTアナライザでは16回のアンサンプル平均処理を施している。固有振動数は1次から3kHzまでのものを測定した。

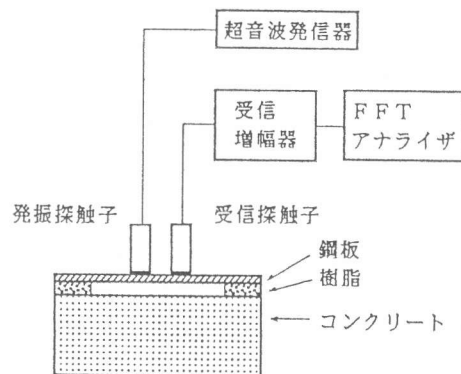


図-2 曲げ振動の共振による測定方法

### 3.2 測定結果および考察

表-1および表-2に測定された固有振動数と理論値を示す。理論解は古典的境界条件におけるKirchhoff-Loveの仮定に基づく平板の曲げ振動の固有値解析の結果である。この研究では多くの研究者が先駆的研究を行っているが、Gormanらの方法[3,4,5]はモード解析法に属し、理論も平易であり、実験との誤差も5%程度と精度も良い[5]。表にはGormanの固有値解析結果[3]から計算した値を掲げた。

理論解との比較では周辺単純支持、周辺固定支持ともおおむね10%程度の実験誤差で測定値と一致している。(3)から(7)の供試体は鋼板の下面に厚さ5mmの樹脂が接着してある。事前の試験によりこの樹脂の質量、ヤング係数、ポアソン比がそれぞれ1.2 g/cm<sup>3</sup>、2.5 $\times$ 10<sup>4</sup> kgf/cm<sup>2</sup>、0.38と得られている。樹脂のヤング係数、ポアソン比は養生条件と材齢により変化するが、この試験は材齢2週間で行ったものであり、この後の変化量は小さい。

樹脂付きの鋼板の曲げ固有振動数を議論する場合、厳密には積層板として取り扱わなければならないが、一般には樹脂付き鋼板の剛性が変位形状に依存するが、今回の問題では樹脂の質量、剛性が鋼板のそれに比して非常に小さく、樹脂の影響は実験の誤差の範囲内である。周辺単純支持の固有振動数を解析によって求めると、鋼板のみの場合に対して4%増加する。これは供試体(3)の低次モードにおける測定結果と符号する。また、供試体(3)の高次モードでは、近接した固有振動数が得られているが、これは樹脂が接着されていることで水平軸に垂直な2つの面の等価な曲げこわさが若干異なるために起るものである。供試体(5)では樹脂の影響があるものの測定結果は供試体(2)の周辺固定支持鋼板に近い結果を得ている。

供試体(6),(7)ともほぼ同様の結果を示している。基本振動数は測定されなかったものの高次のモードでは供試体(5)の結果と良く似ている。これは測定時の鋼板の中央での振幅が20 $\mu$ m以下と小さいために剝離モデルが充填不良モデルと同じ振動現象となったためである。当初、部分的に接触、非接触を繰り返す非線形の振動となることも予想していたが、この結果により線形振動となっていることを確認した。従って、適当な境界条件を設定することによって、供試体(5)から(7)までの固有振動数は、モード解析法によって計算可能である。

なお、いずれの場合にも減衰定数は小さく、振動数への影響は測定誤差の範囲内であった。

表一 理論値 (1), (2) と供試体 (1), (3), (2) の測定値の比較  
(単位: kHz)

周辺単純支持長方形板			周辺固定支持長方形板	
理論値	測定値		理論値	測定値 供試体 (2)
	供試体 (1)	供試体 (3)		
0.24	0.25	0.26	0.44	0.32
0.61	0.56	0.65	0.91	0.76
0.97	0.98	1.00	1.33	1.16
1.22	1.20	1.26	1.63	1.50
1.58	1.62	1.57	2.03	2.00
2.07	2.10	2.10	2.60	2.55
2.19	2.20	2.16	2.99	2.95
2.43	2.50	2.49		

表二 供試体 (5), (6), (7) の測定値  
(単位: kHz)

測定値		
供試体 (5)	供試体 (6)	供試体 (7)
0.35	測定不能	測定不能
0.79	0.75	0.78
測定不能	1.06	1.18
1.45	1.27	1.33
1.71	1.71	1.66
2.10	1.88	2.11
2.24	2.50	2.38
2.66	2.85	2.64

#### 4. 超音波反射法

##### 4.1 測定原理

超音波反射法で剝離箇所を測定する。図一3に測定法を示す。発振探触子と受信探触子をアクリル棒を介して測定面に当て、超音波パルスの発振周波数を変えながら繰り返し送り、剝離箇所からの反射波の周期と重ね合わせる。このときの受信波のスペクトルをFFTアナライザで観測し、スペクトルが極大値になる周波数 (f) を求める。剝離箇所までの距離を d、音速を c、周波数を f、とし周知の式  $2d/c = 1/f$  の関係から、剝離が鋼板-樹脂境界、樹脂-コンクリート境界のどこで発生しているかを判断できる。

鋼板に直接探触子を当てて反射波を得る場合の周波数は、鋼板の音速を 5500m/sec とすると約 611kHz と高く、現有する FFT アナライザでは測定出来ないため、鋼板と探触子の間にアクリル棒を挟み距離を長くして反射波の周波数を低くした。複数の音速の異なった固体を透過する反射波の周波数 (f) を求める式を式 (1) に示す。

$$f = \frac{1/2}{\sum_{i=1}^n d_i / c_i} \quad \text{----- (1)}$$

ここに  $c_i$  は固体  $i$  の音速、 $d_i$  は固体  $i$  の長さ。

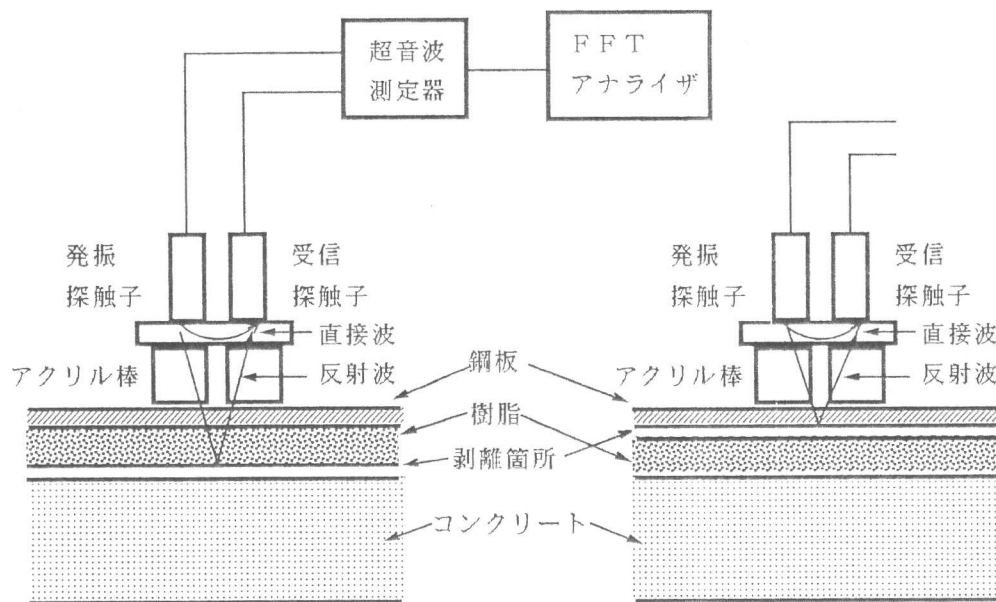


図-3 超音波反射法

#### 4.2 測定結果

測定に使用したアクリル棒の音速は 2650 m/sec 長さは 58 mm、鋼板の音速は 5500 m/sec 厚さは 4.5 mm である、この値から式 (1) で樹脂鋼板間の剥離供試体(6) の反射波の周波数をもとめると 22.0 kHz になる。また、コンクリート樹脂間の剥離供試体(7) では予め測定した樹脂の音速 2850 m/sec と充填厚さ 5 mm を与えて式 (1) から 20.4 kHz が得られた。

接着時に発生するコンクリート底面からの反射波は得られておらず、剥離面で完全に反射している。この測定結果から剥離の有無を検出できた。

供試体(6) の測定結果は図-4 のとおり 22.0 kHz、供試体(7) の測定結果は図-5 のとおり 20.5 kHz と計算値にほぼ一致し剥離位置を特定できた。

音響インピーダンスから計算される反射率、透過率から考えて、実用的にはコンクリート底面からの反射波が無ければ剥離が存在し、樹脂-コンクリート境界からの反射波が大きければここで剥離しており、そうでなければ鋼板-樹脂境界で剥離していると判断する。

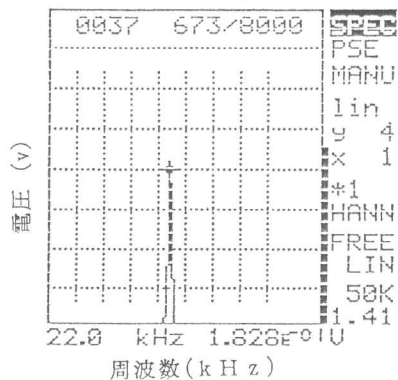


図-4 樹脂鋼板間剥離供試体(6) 測定結果

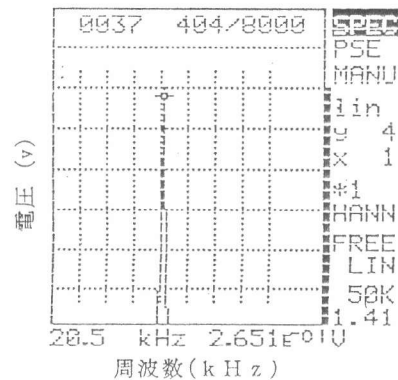


図-5 コンクリート樹脂間剥離供試体(7) 測定結果

## 5. 結論

鋼板の剝離を再現した供試体をはじめとして全7種類の供試体を作成し、共振法と反射法の2つの方法を試みた。

(1) 共振法では、剝離を再現したモデルのいずれもが、周辺を単純支持した鋼板の固有振動数と周辺を固定支持した鋼板のそれの間の固有振動数を持つことを明らかとした。この結果から、今回の実験で得られた固有振動数が得られる適当な剝離部分の境界条件を決定することにより、任意の大きさの剝離部分の固有振動数が解析的に算出可能である。すなわち、逆問題として固有振動数から剝離部分の大きさを推定することが可能である。この方法は、剝離部分のおおよその寸法が得られれば足り、効率的作業が求められる定期点検への適用が考えられる。

(2) 反射法では、剝離境界を精度よく特定できた。実橋において鋼板剝離が発生した場合、適用する予定である。

今後、さらにいくつかの供試体で結果を確認し、実橋において予想されるノイズの問題を解決した後、逆解析により剝離部分の大きさを推定するプログラムを開発する予定である。

## 謝辞

本研究は、日本道路公団が企画・計画し(株)東横エルメスが計測したものである。関係各位に、感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 園田恵一郎, 沖野真, 林秀侃, 喜田浩: 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, 1988.
- 2) 山本忠守, 飯東義夫, 木曾茂: 鋼板接着補強した鋼橋床版の耐久性評価に関する試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.993-998, 1992.
- 3) Gorman, D.J.: Free Vibration Analysis of Rectangular Plates, Elsevier North Holland Inc., 1982.
- 4) Gorman, D.J.: A Comprehensive Study of The Free Vibration Rectangular Plates Resting on Symmetrically-Distributed Uniform Elastic Edge Supports, Trans. of the ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.56, Dec., pp.893-899, 1989.
- 5) Singal, R.K., Gorman, D.J. and Forgues, S.A.: A comprehensive Analytical Solution for Free Vibration of Rectangular Plates with Classical Edge Conditions: Experimental Verification, Experimental Mechanics, Vol.32, No.1, pp.21-23, 1992.
- 6) 山口哲夫, 丸茂文夫, 範錚亮: 波形解析の超音波法によるコンクリートの厚さ測定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.703-706, 1992