

論文 非破壊手法による SFRC 増厚補強された供用中 RC 床版の 付着推定

原敏彦^{*1}・菅野匡^{*2}・竹市雅人^{*3}・原創太^{*4}

要旨：高速道路橋の上面増厚補強の実施とともにその点検方法の完成が求められている。打ち換えにより既設橋梁から切除された RC 床版に、超音波パルス反射法と赤外線サーモグラフィ法のそれぞれを適用し、増厚境界面の付着状況を推定した。さらに、これらの検査法を車線規制下の高速道路橋にも試用し、その適用性を検証した。超音波パルス反射法は、良好な結果をもたらし、赤外線サーモグラフィ法は、可能性を示唆した。

キーワード：道路橋、床版、剥離、供用中検査、赤外線サーモグラフィ、パルス反射法

1. はじめに

平成5年の道路橋示方書改訂に伴い、日本道路公団では、それ以前に供用された RC 床版に対して、上面増厚補強工を全国的な規模で実施してきている。しかし、いくつかの橋梁において、増厚層と既設床版との境界層に剥離損傷が現れている。このような床版では、内部応力が剥離のない床版に比して増加することが知られている。

供用中の橋梁床版において、剥離損傷の有無を検査することが必要になることがある。このとき、舗装の切削を必要としない検査方法を採用し、橋梁の管理業務をコストダウンすることが重要である。

一方、コンクリート RC 床版の非破壊検査法の研究が、最近急速に進展し、土木構造物への適用事例も増加している^{1),2),3)}。RC 床版内部の剥離検出を取り扱った論文には、Sansalone ら^{4),5)}、石井ら⁶⁾がある。Sansalone らの方法は、衝撃弾性波法を用いたものであり、ここ数年間で適用例も増えてきてはいるが、入力衝撃波の再現性が問題となり、精度の高い診断を行えるにはいたっていない。石井らは、点接触型セン

サを用いた連続波超音波共振法を提案しているが、受信探触子の周波数特性、送信周波数の点で、適用性に問題を残している。また、超音波パルス反射法によるコンクリート内部空洞の非破壊検査法が、実験室レベルでは、すでに技術的成熟の域に達してはいるが、道路構造物への適用例はあまり見受けられない。

本稿では、既設橋梁から切除した床版を用い、舗装上面からの超音波パルス反射法と赤外線サーモグラフィ法による、増厚床版の付着状況の推定実験を実施した。さらに、これらの手法を車線規制下にある供用中の橋梁床版に対しても試みた。本稿は、上面増厚補強された RC 床版への非破壊剥離検査法の適用性を議論したものである。

2. 切除床版における診断実験

2.1 切除床版

既設橋梁への適用の前に、プレートガーダー橋の RC 床版打ち換えの際に 2m×3m×25cm の形状で切除された2枚の RC 床版を用意し、非破壊検査法の詳細について考察した。

*1 名古屋道路エンジニア(株)構造技術部構造技術課 課長 正会員

*2 日本道路公団試験研究所道路研究部橋梁研究室 主任 工修 正会員

*3 名古屋道路エンジニア(株)構造技術部構造技術課 課長代理

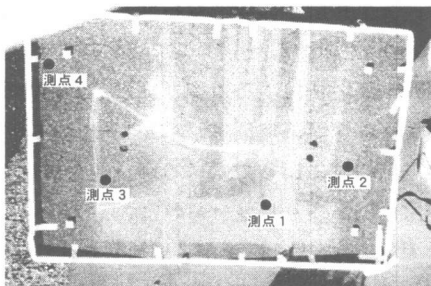
*4 名古屋道路エンジニア(株)構造技術部構造技術課

なお本稿では、2枚の床版供試体を切除床版 No.1, No.2 の記号で表した。これらの供試体を図-1に示す。

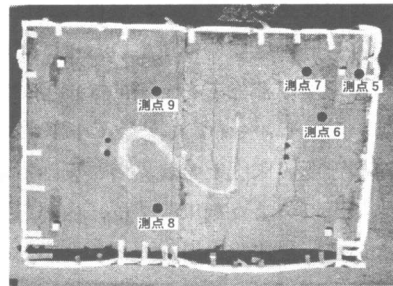
切除床版 No.1 には、厚さ 16cm の RC 床版上に厚さ 8cm の舗装が敷設されていた。また、切除床版 No.2 には、厚さ 16cm の RC 床版上に厚さ 6cm の増厚コンクリートが部分的に施工されていた。増厚層の一部分は SFRC で施工されていた。舗装は増厚層が有る部分では厚さ 2.5cm, 無い部分では厚さ 8cm で敷設していた。切除床版は、度重なる補修と補強の後、夭折したことを明示している。

測定結果と切除床版の内部の状況とを照合するために、切除床版に9つの測点を設け、その測点での非破壊検査終了後に、すべての測点でコアを切り取った。コアの目視試験結果を表-1, 表-2に示す。

切除床版 No.1 では、採取した4本のコアのうち測点3のみに剥離が生じていた。また切除床版 No.2 では、すべての測点で舗装層、あるいは増厚 RC 層境界面での剥離が認められた。さらに、切除床版 No.2 の測点 8, 9 においては、既設 RC 層の厚さ方向中央水平面に、クラックが発生していた。



(a) 切除床版 #1



(b) 切除床版 #2

図-1 切除床版

表-1 コア目視試験結果 (切除床版 #1)

測点記号	1		2		3		4	
	層厚	剥離	層厚	剥離	層厚	剥離	層厚	剥離
舗装層	8.0cm	無し	8.5cm	無し	7.5cm	有り	7.5cm	無し
RC層	17.0cm		16.5cm		17.5cm		17.5cm	

表-2 コア目視試験結果 (切除床版 #2)

測点記号	5		6		7		8		9	
	層厚	剥離	層厚	剥離	層厚	剥離	層厚	剥離	層厚	剥離
舗装層					2.5cm					
舗装層	8cm		2.5cm		5cm	有り	1cm		1.5cm	
パaving層		有り					1.5cm	無し	1cm	無し
SFC層			5.5cm	有り		有り	5.5cm	無し	5cm	無し
RC層	17cm		8.5cm	有り	17.5cm		8cm	有り	7.5cm	有り
RC層			8.5cm				9cm		10cm	

2.2 超音波パルス反射法による剥離診断方法

すべての測点において超音波パルス反射法による剥離検出実験を実施した。

受信送信ともに優れたダンピングを持つ中心

周波数 500kHz の広帯域探触子を使用し、発信器からアンプを介し送信探触子へ、パルス振幅 +150V, パルス幅 1μs の方形パルス波を印加した。受信波信号は、40dB のプリアンプで増

幅した。ブロックダイアグラムを図-2に描く。

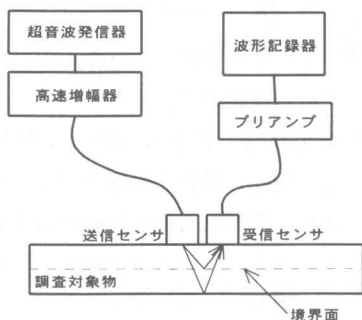


図-2 パルス反射法のブロックダイアグラム

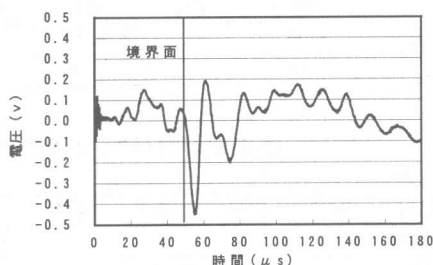
2.3 超音波パルス反射法の結果と考察

パルスエコーの一例を図-3 に示す。なお切除床版 No.1, 2 の伝播速度は、それぞれ 3380m/s, 3450m/s であった。2 探触子を近接して配置したために、舗装層が 8 cm である測点 No.1,5 におけるエコーは、P 波、SV 波、Rayleigh 波^{5),7)}の到達を良く捕えている。

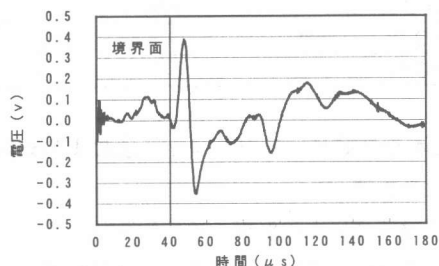
舗装とコンクリートの境界に剥離が存在しないとき、舗装中を伝播した超音波は、コンクリート表面で反射する。アスファルトはコンクリートより低い音響インピーダンスを有するため、反射波は入射したものと同位相になる⁷⁾。すなわち、圧電直接効果⁸⁾によって立ち上がりの位相が電氣的に負となる。一方、舗装とコンクリートとに剥離が生じている場合には、超音波は空気層で反射する。アスファルトは空気より高い音響インピーダンスを有するため、反射波の位相は入射したものとから 180° ずれ、電氣的に正となる。

測点 1 のエコーを見ると、10 μ s 付近に骨材による反射や回折波がみられるが、50 μ s 付近に、舗装層と RC 層との境界面からの大きなパルスエコーが現れた。表-1の目視試験で確認されたように、舗装層と RC 層とが付着していたため、立ち上がりが負になっている。一方、測点 5 のエコーでは、舗装層と既設 RC 層とが剥離していたため、正になっている。複数の剥離が存在する測点 6 のエコーでは、まず、20 μ s

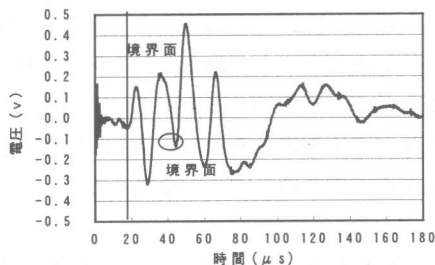
付近で舗装層と SFC 層との剥離による正のエコーが現れ、45 μ s 付近では負側に電圧が減少している最中に、正側に増加し、しかも、ひとつ前のエコーより大きな電圧が記録されている。これは舗装層と SFC 層との境界面からの反射波が、剥離を有する SFC 層と RC 層との境界面からの反射波と合成された結果得られたものである。なお、用いた送信探触子と床版表面との相互作用によってエコーが鋭くない。このように検査対象である増厚境界面への伝播経路に剥離がある場合、明瞭なエコーが認識できなくなるが、注意深く観察することによって、剥離部分を推定することが可能である。



(a)測点 1



(b)測点 5



(c)測点 6

図-3 パルスエコーの一例

各測点の境界位置及び付着状況について、超音波パルス反射法の結果と切り取ったコアの状況とを対比し、診断法の可否を検証した。この結果を表-3、表-4に示す。表中で不可とあるのは、診断不可能であったことを意味する。

切除床版 No.1 では舗装層と RC 層との境界位置、境界面の付着状況が切り取ったコアと一致していた。切除床版 No.2 では 2.5cm~15cm の深さで良好な結果が得られた。ただし測点 8, 9 ではレベリング層と増厚 RC 層との境界を検出することができなかった。これは両者の音響

特性が酷似しているのに加えて、境界面が完全に付着していたためと考えられる。すべての境界面に関して、診断可能であったものは、切り取ったコアの目視試験の結果とすべて一致した。

上述の結果から、超音波パルス反射法は、2.5cm~15cm 程度の深さまで境界面の付着状況を推定できた。それ以上深い位置にある剥離を検査するときでも、表面波が反射波の検出に影響を与えない範囲で、送信周波数を下げれば、検査可能である⁹⁾。

表-3 超音波パルス反射法による診断法の可否 (切除床版 #1)

測点記号	1		2		3		4	
	層厚	診断	層厚	診断	層厚	診断	層厚	診断
舗装層	8cm	可	8.5cm	可	7.5cm	可	7.5cm	可
RC層	17cm		16.5cm		17.5cm		17.5cm	

表-4 超音波パルス反射法による診断法の可否 (切除床版 #2)

測点記号	5		6		7		8		9	
	層厚	診断	層厚	診断	層厚	診断	層厚	診断	層厚	診断
舗装層					2.5cm					
舗装層	8cm		2.5cm		5cm	可	1cm		1.5cm	
レベリング層		可		可			1.5cm	不可	1cm	不可
SFC層			5.5cm			可	5.5cm	不可	5cm	不可
RC層	17cm		8.5cm		17.5cm		8cm	可	7.5cm	可
RC層			8.5cm	不可			9cm	不可	10cm	可

2.4 赤外線サーモグラフィー法による剥離診断方法

絶対零度以上の温度を持つ物体は、その表面から赤外線を放出しており、その放出量は物体の表面温度の関数である。また外的な熱変化を与えた場合、内部に空気層をもつ物体とそうでない物体とでは、表面温度の変化量にそれぞれ差が生じる。赤外線サーモグラフィー法は、物体表面温度を測定することにより、物体内部の空気層の有無を推定するものである。

2.5 赤外線サーモグラフィー法の結果と考察

赤外線サーモグラフィーを用い、切除床版の表面温度を 0.1K の分析能力で計測した。計測地は、静岡県富士市に在り、計測頻度は、1998

年 10 月 28 日午前 11 時から翌日の午前 11 時までの 1 時間間隔 25 回である。天候は晴れ、気温日較差は 15.8K であった。表面温度変化の一例を図-4 に示す。また切除床版 No.1, 2 における表面温度の最大温度差を表-5、表-6 に示す。なお床版端部に設定した測点 4, 5 は、境界からの熱影響を受けたため、評価の対象から除外した。

切除床版 No.1 の最大表面温度差に着目すると、剥離のある測点 3 では、他の測点に比べ 1.0K 程度高い結果となった。したがって RC 床版内部に剥離がある場合、健全部に比べ最大温度が高くなることによって表面温度差が大きくなる。

切除床版 No.2 では、各測点間の表面温度差に違いが認められるものの、これらのデータに

共通する一様な傾向は認められなかった。これは切除床版の内部が複雑な構成であったため、熱伝導過程が測点毎で異なったことによると考えられる。また、切除床版 No.1, 2 では、まず舗装の色が異なるため、両者を直ちに比較することは困難である。

以上の結果から、剥離の有無によって床版表面の温度変化に差が生じる。しかしこの手法は舗装の色、床版内部の構成などに大きな影響を受けるため、評価においては十分注意を払う必要がある。

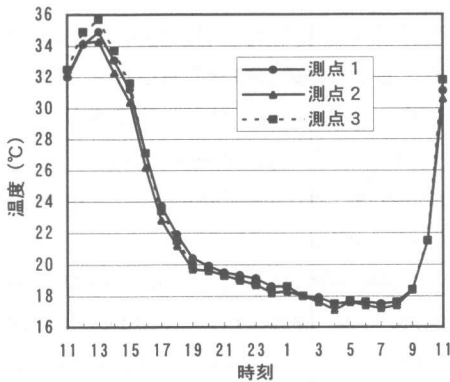


図-4 表面温度変化の一例 (切除床版 #1)

表-5 表面温度日較差 (切除床版 #1)

測点記号	1	2	3
最大温度差	17.4	17.2	18.3

単位：K

表-6 表面温度日較差 (切除床版 #2)

測点記号	6	7	8	9
最大温度差	16.8	17.7	16.3	17.0

単位：K

3. 供用中橋梁における診断の試行

3.1 評価対象橋梁の概要

前節までに述べた測定を供用中橋梁で実施し、本手法の適用性について考察した。当該橋梁の床版は、舗装層、増厚 SFC 層、既設 RC 層で構成され、層厚は、それぞれ 5cm, 6cm, 16cm である。調査は、片側 3 車線のうち第 2 走行車

線を半日規制して行った。調査車線の両隣が供用中で、しかも、時間的制約もあったため、床版下面の損傷状況を調査し、表面にクラックのある部分に調査を限定した。

3.2 パルス反射法による剥離診断

パルス反射法の結果を図-5 に示す。なお床版の超音波伝播速度は、3500m/s であった。

本調査では、パルス反射法を採用したにもかかわらず、共振型送信探触子を使用したため、Rayleigh 表面波と反射波とが混在したものになった。通過車両がもたらすノイズの影響を事前に知ることはできなかったが、車両通過の瞬間にノイズレベルが高くなるものの、測定データに影響を及ぼす程度ではなかった。

図-5 を見ると、30, 60 μ s 付近のプラス側に変位する部分に空気層があると推定できる。これらの位置は、それぞれ舗装層と増厚 SFC 層、増厚 SFC 層と既設 RC 層との境界面にあたる。したがって、この床版では舗装、増厚床版ともに剥離している可能性は高い。このデータは、Rayleigh 表面波と反射波が混在しているために、若干不明瞭である。しかし、切除床版を用いての実験で良好な結果が得られたように、探触子、パルス幅、印加電圧を適切に選択するのみで、より明瞭なデータが検出できると考えられる。

供用中橋梁に対して超音波パルス反射法を実施することで、ノイズ等の影響を受けずに床版の剥離位置を推定することが可能であった。

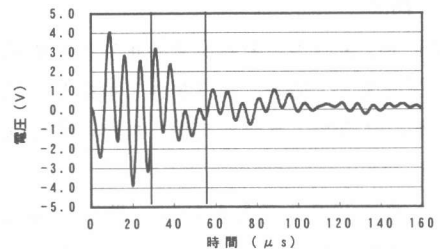


図-5 供用中橋梁におけるパルスエコー

3.3 赤外線サーモグラフィ法による剥離診断

表面温度測定は、2.0m×2.5m の範囲に対し

て1998年11月26日午後1時から1時間間隔で3回行った。測定当日の天候は曇り、午後1時の気温は288.5Kであった。

図-6に床版の時間表面温度差分布を示す。

本研究では、赤外線カメラの撮影範囲に対し橋軸方向、橋軸直角方向ともに5等分のメッシュを切り、交点の測定時間内での最大温度差をグラフ化した。この結果から車線中心から両脇に75cm離れた部分で相対的に大きな温度差が認められた。この位置は、車両走行位置と一致し、劣化事例から考えて剥離部分である可能性は高いが、計測開始直前まで、車両が走行していた事実を考えれば、タイヤから供給されて高くなっていた表面温度が、車線規制によって熱供給が止まり、次第に冷却していった結果であるとも考えられる。この評価は、測定範囲内の相対的な評価であるが、熱伝導解析で検証することによりその精度を高めることは可能である。

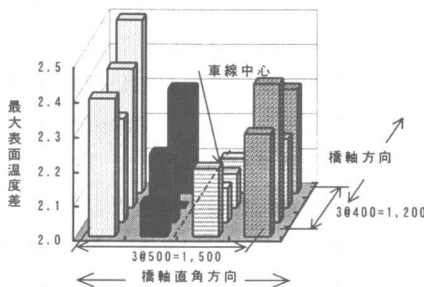


図-6 時間表面温度差分布

4. 結論

増厚 RC 床版の付着状況を推定する非破壊手法の適用性を、切除床版供試体で考察し、供用中橋梁に試みた。本研究で得られた結論は次のとおりである。

- (1) 超音波パルス反射法は、供用中の橋梁においても、探触子、送信パルス幅、送信パルス振幅を適切に設定することで剥離面の位置、付着状況を精度良く検出することが可能である。
- (2) 赤外線サーモグラフィー法では、床版

表面温度の経時的変化を測定することにより剥離の有無を評価できるが、舗装の色や床版内部の構成などの影響を大きく受ける。例えば、熱伝導解析を併用して評価を行う必要がある。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の非破壊検査法，養賢堂，1994.
- 2) コンクリートの非破壊試験法研究委員会：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1992.
- 3) 菅野匡・飯束義夫・堀江啓夫：特集産業界における非破壊検査の適用状況 解説6. 道路，非破壊検査，日本非破壊検査協会，Vol.45, No.7, pp.493-496, 1996.7.
- 4) Sansalone, M. and Carino, N.J.: Detecting Delaminations in Reinforced Concrete Slabs with and without Asphalt Concrete Overlays Using the Impact-Echo Method, *Maerial Journal of the American Concrete Institute*, Mar./April, pp.175-184, 1989.3.
- 5) Sansalone, M.J. and Streett, W.B.: Impact-Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, *Bullbrier*, pp.29-46 and 159-166, 1997.
- 6) 石井孝男・香山幸夫・上東泰・佐藤登：複合法による鋼橋 RC 床版の劣化調査に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.739-744, 1992.
- 7) Graff, K.F.: *Wave Motion in Elastic Solids*, Dover, pp.311-391, 1991.
- 8) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会：超音波探傷法，日刊工業新聞社，p.108, 1974.
- 9) 吉荒俊克・松井重樹・吉村剛・末次純・今中拓一，超音波によるコンクリート材料の非破壊評価，平成 8 年度秋季大会講演概要集，日本非破壊検査協会，pp.297-300, 1996.10.