

(16) 鋼床版Uリブ内への樹脂モルタル充填施工 における品質検査法に関する研究

渡邊 健也¹・大垣 賀津雄²・赤江 信哉³
石田 学⁴・鈴木 永之⁵・高鍋 雅則⁶

¹正会員 日本工営株式会社札幌支店 (研究当時: ものづくり大学大学院)
(〒060-0005 北海道札幌市中央区北5条西6丁目2番地) E-mail: g02121007@iot.ac.jp

²正会員 ものづくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

³正会員 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 (〒285-0802 千葉県佐倉市大作2-4-2)
E-mail: shinya-akae@taiheiyo-m.co.jp

⁴正会員 太平洋マテリアル株式会社 営業本部 (〒114-0014 東京都北区田端6-1-1)
E-mail: manabu-ishida@taiheiyo-m.co.jp

⁵正会員 株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング (研究当時: 東日本高速道路(株) 関東支社)
(〒116-0014 東京都荒川区東日暮里5-7-18) E-mail: n.suzuki.tf@e-nexco.co.jp

⁶正会員 株式会社アミック (〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央4-36-1)
E-mail: takanabe@amic-pro.co.jp

鋼床版の疲労損傷の中で、Uリブ溶接部を起点とする疲労き裂の進展が発生している。このような疲労損傷の対策として、SFRC舗装の施工が標準的な工法として行われているが、これらの工法は車線規制が必要となり渋滞発生の原因となる。したがって、重交通区間を想定した鋼床版下面からの補強工法として、Uリブ間に設置するCFRP成形材と、Uリブ内に充填する軽量樹脂モルタルを用いた補強工法を検討している。本研究は、Uリブ内部に軽量樹脂モルタルを充填する工法に関して、施工品質確認方法を検討するため、軽量樹脂モルタルを充填した3つの鋼床版供試体に対して、超音波探傷試験および電磁パルス法を実施し、充填度合い検査方法の検討を行なった。

Key Words : Resin Mortar, Steel Deck, Ultrasonic Flaw Detection Testing, Non-destructive Testing, Electromagnetic pulse method

1. はじめに

近年、都市内高速道路の鋼床版橋梁において、デッキプレート等に疲労き裂が多数発生している¹⁾。鋼床版の疲労き裂を放置すると、疲労耐久性が低下し道路機能の安全性が著しく損なわれる²⁾。こうした疲労き裂の対策として、鋼床版上面からSFRC舗装の施工が標準的な工法として行われているが、これらの工法は車線規制が必要となり渋滞発生の原因となる。

そこで、疲労き裂補強対策として、軽量樹脂モルタルおよびCFRP成形材による鋼床版下面からのUリブ溶接部の局部応力低減工法を検討している(図-1参照)。本補強対策工法に関して、筆者らは補強効果の有効性を既往の研究において検証している³⁾。

しかし、本研究対象としているUリブ内部に軽量樹脂モルタルを充填する工法は、鋼床版下面からデッキプレートUリブ内部に軽量樹脂モルタルの充填および2次注入を行う⁴⁾ことで、溶接部の応力を低減する工法であり、デッキ下面に空隙ができてしまうと補強効果が著しく低下してしまう。したがって、補強後の施工精度確認方法

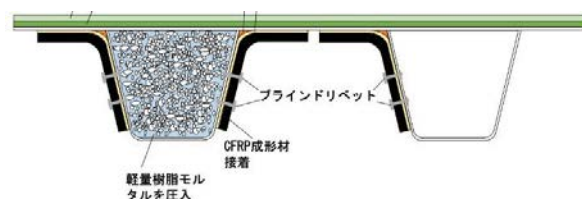
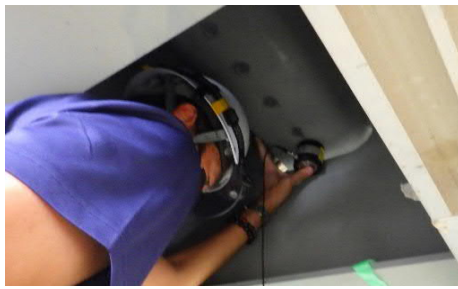
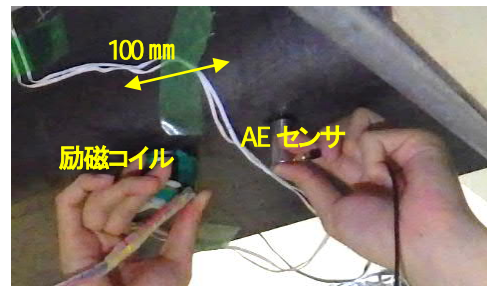


図-1 鋼床版下面からの補強工法



(a) 超音波探傷試験



(b) 電磁パルス法

図-6 非破壊検査計測状況

2.2 非破壊検査計測方法

(1) 超音波探傷試験

図-6(a)に超音波探傷試験状況を示す。計測機器は超音波探傷器 (UI-27LF 菱電湘南エレクトロニクス社製) , および超音波探触子 (250kHz/1.5in.(38mm)Panametrics 社製) を用いた。計測は U リブ下面から行い、測定位置に超音波探触子を接触させ超音波ビームを入力して、反射による超音波エコー画像を取得する一探触子反射法を用いた。測定点毎に取得した超音波エコー画像より反射エコーの繰り返し周波数を算出する。

(2) 電磁パルス法

図-6(b)に電磁パルス法試験状況を示す。電磁パルス法はコイルにパルス電流を印加することにより発生する磁場を利用し、導体自身に弾性波を発生させ、その弾性波の受信信号を解析し診断する手法である。計測機器は、電磁パルス電源、コイルユニット、リングコイル、AD変換装置、AEセンサ、プリアンプ、およびプリアンプ電源の7つの機器を用いて計測を行っている。本試験では、測定位置にリングコイルを設置し、供試体のUリブ本体より弾性波を発生させ、その近傍に配置したAEセンサにより弾性波の波形データを取得する。リングコイルとAEセンサ間の距離は100mmとする。

い空気層の境界面を透過する超音波が存在し、同図の欠陥部に示すように画像内に多重反射エコーが現れて、反射エコーが明確でなくなる。本試験においては、このような多重反射の影響を用いて評価している。

(2) 電磁パルス法

図-8に電磁パルス法で採取した波形を示す。同図上部の波形は装置内部の電流波形変化であり、すなわちコイルに印加しているパルス電流波形を意味する。その周波数はおよそ10kHzである。したがって、励磁コイルが鋼板に打撃を加えている周波数は10kHzと考え、以下の評価指標の算出基準としている。

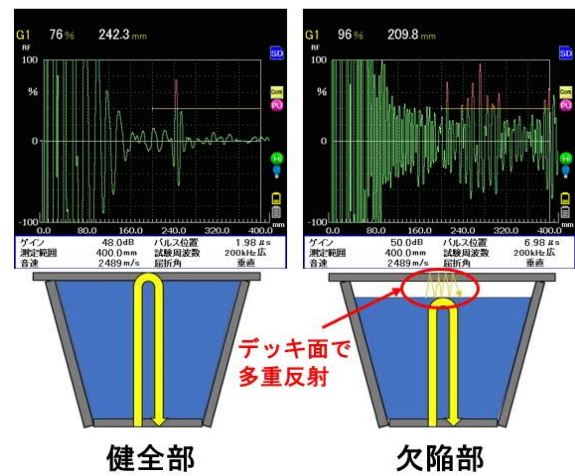


図-7 超音波探傷試験評価原理

3. 評価原理と評価方法

3.1 評価原理

(1) 超音波探傷試験

図-7に超音波探傷試験の評価原理を示す。超音波探傷試験ではUリブ内部の樹脂充填時の空隙が上部鋼板近傍に存在する場合、超音波を適用した際、樹脂が充填されているとデッキ上面と空気層の境界面を透過する超音波はわずかで、大部分が反射する。このため、同図の健全部に示すような単純な反射エコー画像が得られる。

一方、樹脂が充填されていない場合、デッキ下面と薄

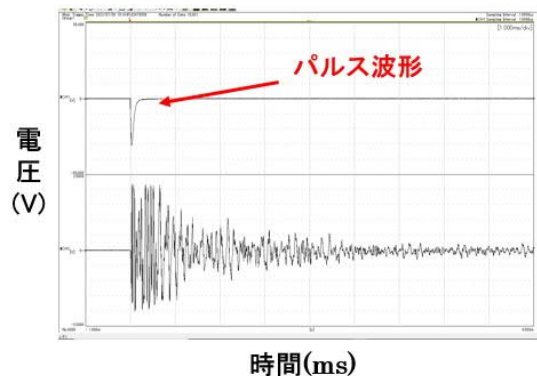


図-8 電磁パルス法取得波

3.2 評価方法

(1) 超音波探傷試験

a) 周波数評価

図-9に超音波探傷試験における周波数の算出方法を示す。周波数の算出範囲は横軸200~400mmの範囲とする。これは、探触子よりビームが発生する直後の音圧は極大極小を繰り返す、最後に極大をとった後で単調に減衰する性質を持っており、最後に極大をとった距離を近距離音場限界距離という。このため、音場の乱れた近距離音場領域を外し、多重反射による減衰が生じない横軸200~400mmの範囲を繰り返す周波数の計算範囲としている。

繰り返す周波数の算出は、同図に示すように取得した反射エコーの横軸200~400mm (16.70×10⁻⁵~32.14×10⁻⁵s)間の波数をカウントし、1波あたりの周期の逆数で求めている。また周波数は、1つの測点に関して3回計測を行い3回の平均を求めている。

b) 画像による評価

超音波探傷試験によるエコーは、図-10に示す最大のエコーが、デッキ上面の境界からの反射波と推定され、図-10(a)のその他のエコーが高いものが多重反射によるものと推定される。

評価は、JISZ3060：6dBドロップ法を参考として、最大エコーの1/2の高さに評価ラインを設け、評価ラインより高いエコーを空隙によるものと判断し、その個数から多重反射の傾向を判断する。また評価範囲は200mm~400mmとしている。

(2) 電磁パルス法

電磁パルス法により測定位置毎に時間軸波形が得られ、それをFFT処理することで周波数スペクトルが得られる。測定位置の内部状態に応じて波形の形状は異なるため、その違いにより分類を行う。取得した時間軸波形とその周波数スペクトルの波形形状の違いを定量化するために、次に示すスペクトルのピーク数を算出し結果を測定点毎に整理して評価を行う。

スペクトルのピーク数 (SP) は、図-11に示すように周波数スペクトルの0~50(kHz)におけるピーク数を意味している。ピーク数は最大振幅の10%以上のものをカウントしている。

評価原理は、物体が振動する際、単一周波数の振動をするのではなく、複数の周波数が混ざり合って形成されている。またこれは、振動の発生源が増えるほど周波数成分は増加する。樹脂モルタルが適切に充填されていると、たわみ振動が発生しないため周波数スペクトルのピーク数は減少すると考えられる。

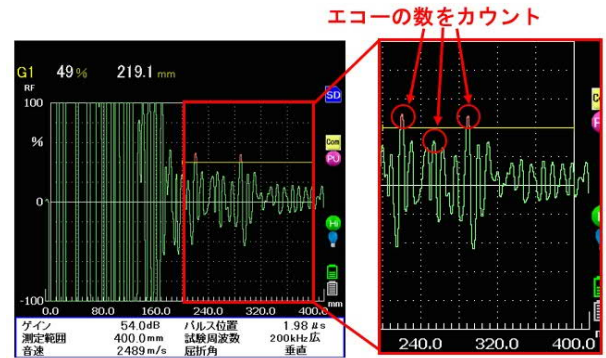
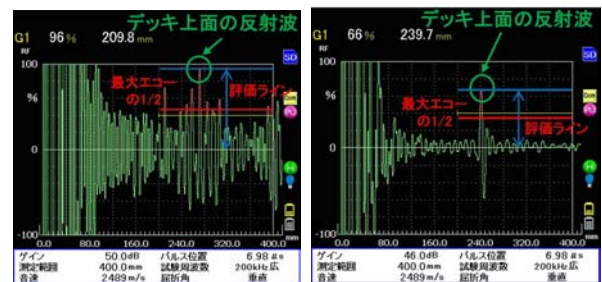


図-9 周波数の算出方法



(a) 充填不十分

(b) 十分に充填

図-10 超音波探傷試験の評価方法

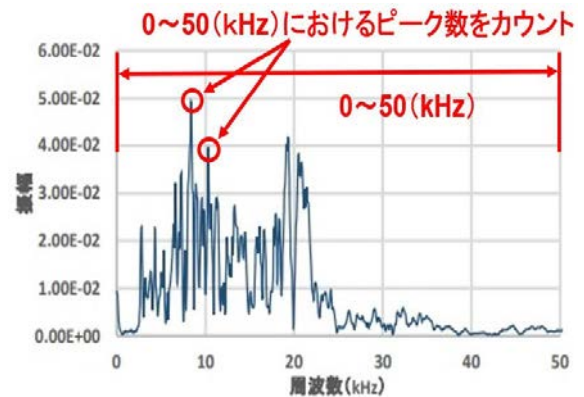


図-11 電磁パルス法の評価方法

4. 実験結果

4.1 静的載荷結果

静的載荷実験によるひずみ比較を図-12に示す。本補強工法を実施した3種類の供試体において、1次充填後では十分にUリブ内部に軽量樹脂モルタルを充填できていないため、無補強時ひずみの40%~90%であり十分な補強効果を発揮していない。2次注入後では、2次注入でエポキシ樹脂をデッキ下面の空隙に注入することで、Uリブ内部が十分に充填され、無補強時ひずみの20%以下までひずみが減少しており、十分な補強効果を発揮していることがわかる⁶⁷⁾。

4.2 超音波探傷試験結果

(1) 周波数評価結果

図-13~15に各供試体の超音波探傷試験による周波数法の実験結果を示す。同図より3本Uリブ供試体、小型供試体、実寸大供試体の1次充填後の周波数分布は、それぞれ131kHz~195kHz、116kHz~155kHz、171kHz~250kHzであり、2次注入後は96kHz~145kHz、96kHz~121kHz、96kHz~145kHzであり、各供試体で1次充填後と2次注入後で周波数の分布が異なることがわかる。これは、デッキ下面に空隙があると多重反射が起こり、検出エコーの周波数が上昇していると考えられる。一方で、各供試体で周波数の分布が異なっているため、現場での適用については検討が必要である。

(2) 画像評価結果

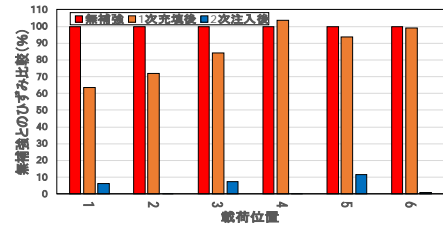
図-16に画像評価における3種類の供試体の結果をまとめて示す。同図より1次充填後における評価ラインより高いエコーの数は3個以上であり、多重反射の傾向を示している。一方で、2次注入後は十分に充填されているため、エコー数は1~2個となり多重反射の影響は見られない。したがって、評価ライン以上のエコー数が2個以下の場合には2次注入後のケースであり、静的載荷実験の結果から十分に補強効果があることが確認されており、軽量樹脂モルタルの充填度検査精度が高いと考えられる。

4.3 電磁パルス法試験結果

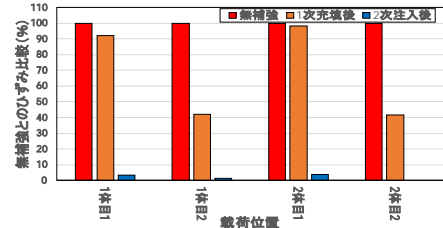
図-17に3種類の供試体の電磁パルス法結果をまとめたスペクトルのピーク数における結果の分布を示す。図-17より、1次充填後では136~155に分布していたスペクトルのピーク数が、2次注入後以降は81~115に分布していることがわかる。また同図より、電磁パルス法の評価指標であるスペクトルのピーク数は供試体の形状にかかわらず2次注入後にピーク数が減少しており、Uリブ長さの異なる鋼床版においても空隙の有無を確認することができると考えられる。

5. まとめ

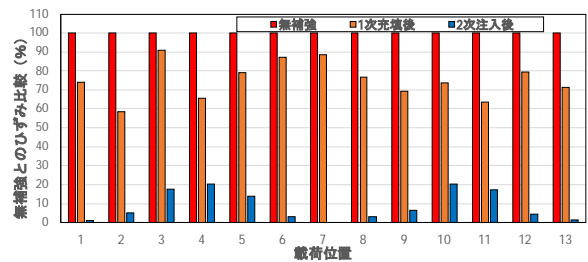
本研究はUリブ内部に軽量樹脂モルタルを充填する工法に関して、施工品質確認方法を検討するため、軽量樹脂モルタルを充填した3種類の異なったタイプの鋼床版供試体に対して、超音波探傷試験および電磁パルス法を実施し、充填度合い検査方法の検討を行なった。本研究で得られた知見は以下の通りである。



(a) 3本Uリブ供試体



(b) 小型供試体



(c) 実寸大供試体

図-12 静的載荷によるひずみ比較 (ゲージ A)

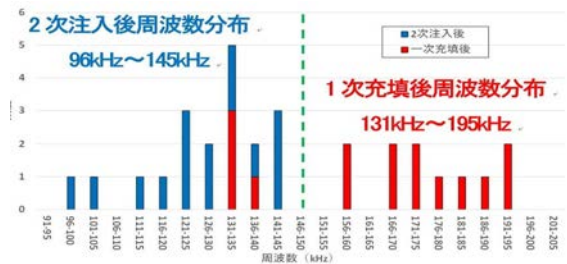


図-13 3本Uリブ供試体の結果分布 (周波数評価)

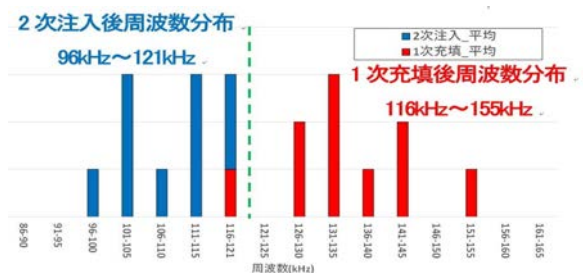


図-14 小型供試体の結果分布 (周波数評価)

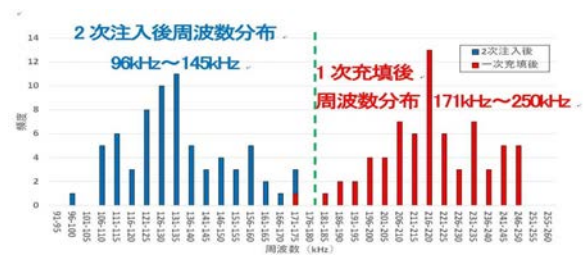


図-15 実寸大供試体の結果分布 (周波数評価)

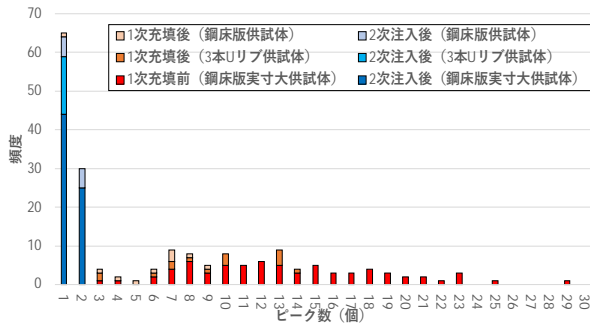


図-16 3種類の供試体の結果分布 (画像評価)

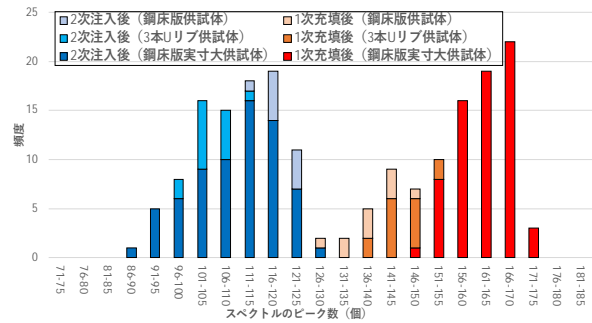


図-17 3種類の供試体の電磁パルス法による結果分布

- (1) 超音波探傷試験による検出エコーの周波数が多重反射の影響により高くなるが、供試体の形状により周波数の分布が異なることがわかった。
- (2) 多重反射の傾向を評価するため、最大エコーの1/2の高さに評価ラインを設け、エコーの数をカウントする画像評価方法により、樹脂モルタル充填に関して空隙の有無を評価できることがわかった。
- (3) 電磁パルス法による検出波形をFFT処理し、周波数スペクトルの0~50(kHz)におけるピーク数に関して評価を行うことで、樹脂モルタル充填に関して空隙の有無を評価できることがわかった。

以上のことを踏まえて、今後の課題としては、ほぼ実寸大に近い移動輪荷重走行試験用供試体を用いて、ここで述べた樹脂モルタル充填度の品質検査法を適用する。その際に、計測データを増やし、検査精度を向上させること、電磁パルス法に関してスペクトルピーク法の評価基準を検討する。

謝辞：本研究の実施に際して、ものづくり大学橋梁・構造研究室の協力いただいた皆様に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労〔2010年改訂版〕，鋼構造シリーズ19，2010.
- 2) 日名誠太，平野秀一：首都高速道路における鋼床版の疲労損傷と対策，橋梁と基礎，2020.
- 3) 渡邊健也，大垣賀津雄，Pham Ngoc Vinh，秀熊佑哉，石田学，紫桃孝一郎：鋼床版橋下面からのCFRP成形材および軽量樹脂モルタルによる補強効果に関する

- る研究，第12回道路橋床版シンポジウム，2022.
- 4) 赤江信哉，石田学，大垣賀津雄，PHAM NGOC VINH，藤田直博，紫桃孝一郎：鋼床版橋Uリブにおける軽量樹脂モルタル充填施工と補強効果に関する研究，土木学会第12回道路橋床版シンポジウム論文集，2022.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017.
- 6) 安田翼，大垣賀津雄，秀熊祐哉，石田学，鈴木永之，VINH PHAM NGOC：リブ部の定点載荷実験，土木学会第15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2023.
- 7) 石田学，大垣賀津雄，赤江信哉，鈴木永之，PHAM NGOC VINH：軽量樹脂モルタルを充填した鋼床版Uリブ部の定点載荷実験，土木学会第15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2023.
- 8) 赤江信哉，大垣賀津雄，石田学，鈴木永之，PHAM NGOC VINH：供用交通状態を想定した軽量樹脂モルタルの鋼床版Uリブへの充填施工試験，土木学会第15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2023.
- 9) 平山繁幸，村野益巳，村越潤，窪田光作，高橋晃浩，入江健夫：既設鋼床版橋梁におけるデッキ貫通型き裂の進展に関する検討，構造工学論文集 Vol.64A，2018.
- 10) 櫻井俊太，大垣賀津雄，PHAM NGOC VINH，秀熊佑哉，紫桃孝一郎：鋼床版橋下面からのCFRP成形材による補強に関する施工試験と解析の比較，土木学会第12回道路橋床版シンポジウム論文集，2022.

(Received August 25, 2023)

STUDY ON QUALITY INSPECTION METHOD OF FILLING CONSTRUCTION OF RESIN MORTAR INTO U-RIB OF STEEL DECK BRIDGE

Tatsuya WATANABE, Kazuo OHGAKI, Shinya AKAE
Manabu ISHIDA, Noriyuki SUZUKI and Masanori TAKANABE

Among the fatigue damage of the steel deck, crack propagation originating from the U-rib weld occurs. Various measures such as the SFRC pavement method have been taken to deal with such fatigue damage. Under these circumstances, as a reinforcement method from the underside of the steel deck slab bridge, assuming a heavy traffic section, the reinforcing effect of filling the U-ribs with lightweight resin mortar.

In this study, ultrasonic testing and electromagnetic pulse testing were conducted on three steel deck specimens filled with lightweight resin mortar in order to examine the construction accuracy confirmation method for the method of filling lightweight resin mortar inside the U-ribs. We are trying to establish a filling degree inspection method.