

レールボンド接合部の超音波探傷法の検討

鉄道総合技術研究所 正会員 ○堀 克則
 鉄道総合技術研究所 設楽 英樹

1. はじめに

現在 JR で主に使用されているレールボンドは、すず（Sn）- 亜鉛（Zn）系の低温ろう材によるろう付によってレールに接合されている。このレールボンドはろう付部から脱落する場合があります、列車運行を乱す信号システム保守上の問題となっている。これまでレールボンドの脱落は施工不良が主因と考えられてきたが、接合品質の評価法が存在しないために実態が不明となっている。そこで、低温ろう付法によるレールボンド接合部の品質を向上させるために、レール等の鋼材の探傷に広く使用されているパルス反射式超音波探傷法のレールボンド接合部への適用について検討した。

2. 超音波探傷法適用の基礎的な検討

パルス反射式超音波探傷で用いられる超音波は、異材接合界面で音響特性の変化による反射波を生じる。そのため、レール鋼とろう材の健全な接合面における音圧反射率（入射超音波の音圧に対する反射超音波の音圧の比率）を次式により求めた。

$$R_{AB} = P_r / P_i$$

$$= (Z_B - Z_A) / (Z_B + Z_A) \quad (1)$$

$$Z_A = \rho_A \times u_A \quad (2)$$

$$Z_B = \rho_B \times u_B \quad (3)$$

ここで R_{AB} は物質 A から物質 B に超音波が入射するときの音圧反射率、 P_i 、 P_r はそれぞれ入射波および反射波の音圧、 Z_A 、 Z_B は各物質の音響インピーダンス、 ρ_A 、 ρ_B は密度、 u_A 、 u_B は音速を示す。

レール鋼およびろう材の密度および音速等を表 1 に示す。健全なレール鋼 - ろう材接合面からの音圧反射率は理論的には 27% となる。また、レール鋼と空気の界面からの音圧反射率は 100% となることから、全面未接合の場合の音圧反射率はほぼ 100% になると考えられる。すなわち、接合品質が未知のレール鋼 - ろう材接合面に対して垂直に超音波を入射させた場合、その面からの音圧反射率は接合面の品質に依存して 27 ~ 100% の間で変化すると推定される。このことから、垂直探傷法で得られる接合面からの反射エコー高さで接合面の品質を評価することができると考えられる。

3. 探傷方法と試作探触子の仕様

図 1 にレールボンド接合部に対する超音波探傷の方法を模式的に示す。また、表 2 に試作探触子の主な仕様を示す。振動子は 20×20 mm のものを 3 つ並列に配し、レールに取付けられる最も線径の太いボンド（断面積 110 mm^2 ）の接合面に相当する 20×60 mm の範囲を 1 回の探傷で検査できる構造とした。

4. 試作探触子による欠陥面積評価試験

試作探触子の特性について調べるために、良好な接合面と欠陥（未接合面）が混在する試験片を用いて、パルス反射式超音波探傷による反射エコー高さと接合面の欠陥面積の関係を調べた。図 2 に測定に用いた試

表 1 音響インピーダンスと音圧反射率

	密度 ρ (kg/m^3)	音速 v (m/s)	音響インピーダンス Z ($\times 10^7 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$)
レール鋼	7.697	5.940	4.57
ろう材	7.454	3.517	2.62
音圧反射率 R	27%		

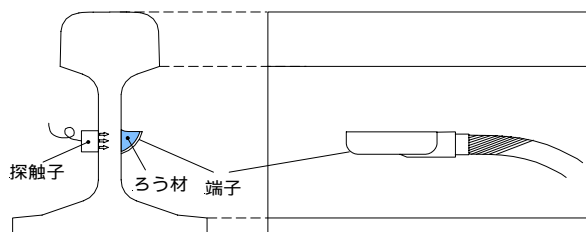


図 1 レールボンド接合部の超音波探傷方法
 表 2 試作探触子の仕様

項目	内容
探触子種別	B3C20×20mm
振動子寸法	20 mm × 20 mm (3 個配列)
振動子の材質	セラミックス系
周波数	3MHz

キーワード レールボンド、低温ろう付け法、超音波探傷

連絡先 〒185-0014 東京都国分寺市光町 2-8-38 (財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 TEL042-573-7272

試験片の形状を、図 3 には試作探触子で測定した接合面からの反射エコー高さと対応する試験片の欠陥面積率（全接合面積に対する未接合面積の割合）の関係を示す。なお、図中には接合面からの反射エコー高さが欠陥面積率と比例関係となる場合を仮定し、接合界面に欠陥がない場合と全面未接合の場合の理論値に基づいた補助線を結んだ。この図から試作探触子による反射エコー高さは欠陥面積にほぼ比例することがわかった。

5．試作探触子によるボンド接合部評価試験

レールの腹部に取付けたボンド接合部を試作探触子で探傷した後、せん断試験に供し、探傷結果と静的せん断強度（破壊するまでの最大せん断荷重）の関係について試験した。図 4 に試作探触子によるボンド接合部の探傷結果と最大せん断荷重の関係を示す。せん断荷重 78～95 kN のボンド接合部は図 5 の破面例に示すように接合界面に未接合面がほとんど認められず、健全な接合部が形成されている。この健全な接合部からの反射エコー高さは 37～44%と低い。一方、せん断荷重が 30～39 kN と健全なボンド接合部の 50%以下となったものは、図 6 に示すように顕著な未接合面が介在し、反射エコー高さが 63～95 %と高くなった。これらから、ボンド接合面からの反射エコー高さが高い場合にボンドの静的せん断強度が顕著に低下する傾向が認められ、エコー高さが約 60%以上では静的せん断強度は良好な接合状態の半分以下に低下すると推定される。ろう付部の強度は一般的にろう材の接合面積に依存することが知られており、ボンド接合面からの反射エコー高さが高い場合にボンドの静的せん断強度が顕著に低下する傾向を示したことは、定性的に前節の欠陥面積評価試験の結果と整合性のある結果と言える。

今回試みた垂直探傷法によるレールボンド接合部の探傷は、ボンド接合部の低温ろう材とレール鋼の接合界面の良否を接合面積の比率と相関のある反射エコー高さで評価する方法である。探傷精度についてまだ改善の余地があるが、試作探触子による探傷によって施工不良により強度が著しく低いボンド接合部を検出できることがわかった。

6．まとめ

- (1) 接合品質が未知の低温ろう付部からの音圧反射率は接合面の品質に応じて 27～100%の間で変化する。
- (2) 試作探触子による反射エコー高さは、低温ろう付部における接合界面の欠陥面積にほぼ比例する。
- (3) 検討した超音波探傷法は探傷精度の点でまだ課題があるが、施工不良によって強度が著しく低いボンド接合部を検出できることがわかった。

TPNo.	欠陥種別	欠陥の位置・形状	欠陥の大きさ
O	欠陥なし	欠陥なし	-
A-1	欠陥A (縦長先端)		20mm × 30mm
A-2			20mm × 20mm
A-3			20mm × 10mm
B-1	欠陥B (縦長中央)		20mm × 30mm
B-2			20mm × 20mm
B-3			20mm × 10mm
C-1	欠陥C (横長下端)		10mm × 60mm
C-2			3.3mm × 60mm
C-3			1.7mm × 60mm
D-1	欠陥D (横長中央)		10mm × 60mm
D-2			3.3mm × 60mm
D-3			1.7mm × 60mm

図 2 反射エコー高さとせん断荷重

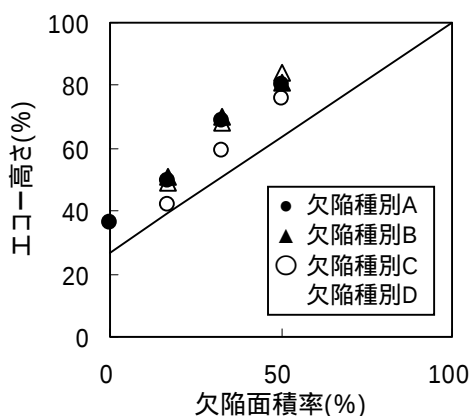


図 3 欠陥面積率と反射エコー高さ

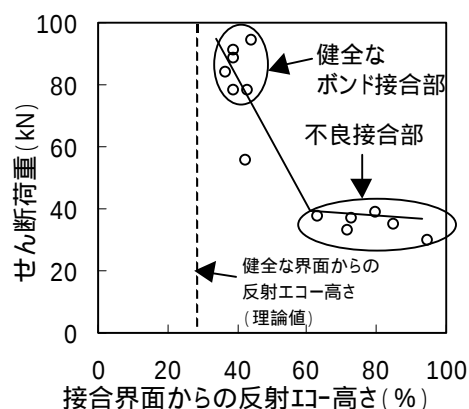


図 4 反射エコー高さとせん断荷重



図 5 健全な接合部の破面例

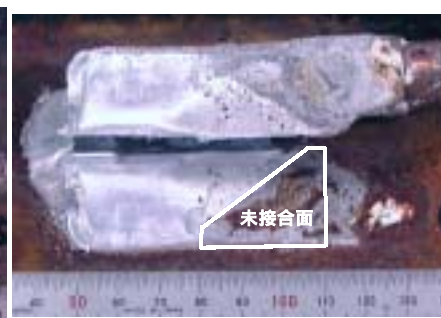


図 6 不良接合部の破面例

（エコー高さ 39%、せん断荷重 88.3kN）（エコー高さ 72%、せん断荷重 33 kN）