

2 種類の疲労試験方法による超高サイクル領域下でのレール疲労特性の評価

(公財) 鉄道総合技術研究所	正会員	○水谷	淳
(公財) 鉄道総合技術研究所	正会員	細田	充
(公財) 鉄道総合技術研究所	正会員	山本	隆一
富山大学	非会員	加藤	勇希
富山大学	非会員	田中	勇輝
富山大学	非会員	小熊	規泰

1. 緒言

レールは、鉄道の軌道を構成する材料の中でも重要な部材であり、列車の走行安全を確保するために保守管理を適切に行う必要がある。日本の鉄道事業者の多くは、累積通過トン数（車軸軸重×車軸通過回数）によるレール交換周期を定めてレール交換を行っているが、多大なコストを要しており、交換周期の延伸が求められている。一方、近年、一部の高強度鋼において、超高サイクル領域（载荷回数 $10^7 \sim 10^8$ 程度以上）で材料内部の介在物や微小な欠陥からき裂が発生することが指摘されている¹⁾。現在既に、レール交換周期を累積通過トン数 10 億トン程度に設定している鉄道事業者もあり、これは軸重を 10～15 トンとすると载荷回数 $7 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ 回に相当するが、レール内部を起点とする破壊は生じていない。そのため、レール母材や溶接部の更なる超高サイクル領域下での疲労特性を明らかにすることで、より一層の交換周期の延伸や累積通過トン数による交換基準の撤廃の可否を判断できると考えられる。そこで、レール母材および溶接部の底部から切り出した試験片を用いて、軸荷重疲労試験方式による超音波疲労試験（応力比 $R = -1$ 、以下、「超音波疲労試験」という）と回転曲げ疲労試験（応力比 $R = -1$ ）にて、超高サイクル領域下での疲労試験を実施した結果について報告する。

2. 疲労試験方法

(a) 超音波疲労試験

超音波疲労試験は、図 1 に示すように、試験片に超音波振動を与えて共振状態とすることで、試験片に繰り返し荷重を与える方法である。最大繰返し負荷速度は 20kHz であり、本試験では、試験片の発熱を抑制する目的で、間欠運転を行うとともに、試験片に約 0°C の冷風を吹きかけ強制空冷を行った。試験打ち切り回数は、応力振幅 300MPa 以上の場合で 1×10^8 回、300MPa 以下の場合で 1×10^9 回とした。

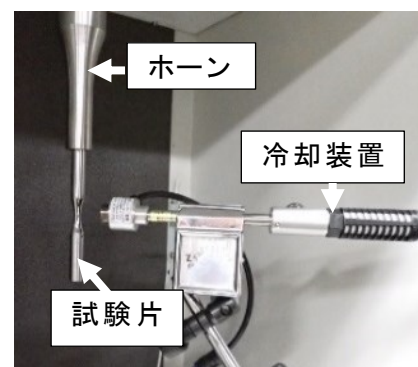


図 1 超音波疲労試験

(b) 回転曲げ疲労試験

試験に用いた 4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機は、図 2 に示すように、中央のモーターに平ベルトを介し主軸を回転させる構造で、主軸の両端に試験片を装着し、試験片の先端部に重錘を吊り下げて負荷を与える片持ち型試験機である。繰返し負荷速度 70Hz、室温・大気中の実験室で試験を行った。試験打ち切り回数は 5×10^8 回とした。

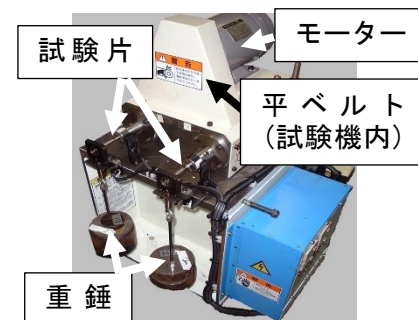


図 2 回転曲げ疲労試験

(c) 試験片

試験片は新品レールの母材およびテルミット溶接部（以下、「溶接部」という）の底部からレール長手方向と試験片長手方向が一致するように切り

キーワード レール交換周期、超音波疲労試験、回転曲げ疲労試験、応力勾配、危険体積

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

(公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部レールメンテナンス TEL042-573-7272

出した．なお，溶接部の試験片は，溶接中心が試験片中心と一致するように切り出した．試験片の形状はいずれも砂時計型とし，超音波疲労試験片の最小断面直径は5mm，切欠き半径は $R = 31\text{mm}$ とし，回転曲げ疲労試験片の最小断面直径は4mm，切欠き半径は $R = 7\text{mm}$ とした．超音波疲労試験では，試験片を試験機に取り付けた状態で測定した系全体の共振周波数が20kHzになるように，予備試験で試験片長さを決定した．なお，表面仕上げはどちらも鏡面とした．

3. 疲労試験結果

各疲労試験によって得られたS-N特性を併せて図3に

示す．図中の矢印は打ち切り回数に達したことを示している（ただし，回転曲げの溶接部の試験片は，継続して試験中であることを示している）．繰返し数が 1×10^7 回を超えた試験片は回転曲げ疲労試験における一例を除いて破断しなかった．なお，この 1×10^7 回を超えて破断した試験片においても，破面を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察したところ，破壊起点は表面であった．このことから，レール鋼においては，一部の高強度鋼で指摘されている超高サイクル領域での内部起点型破壊は認められず，超高サイクル領域下でも疲労に関して十分な信頼性を有していると推定される．また，今回の試験結果から推定される 10^8 回疲労限度は，超音波疲労試験において，母材が300～350MPa程度，溶接部が200～250MPa程度であり，一方，回転曲げ疲労試験では，母材が475～500MPa程度，溶接部が250～300MPa程度であった．母材と溶接部の疲労限度に顕著な差が生じた理由として，試験片における残留応力の違いや溶接欠陥の有無が挙げられる．また，回転曲げ疲労試験にて推定した疲労限度レベルが超音波疲労試験での推定レベルに対して，2～5割程度高くなった．これには，荷重負荷形式の違いや試験片寸法の違いが影響していると考えられる．超音波疲労試験と回転曲げ疲労試験との試験結果の比較を行う際には，①応力勾配の影響，および②危険体積（試験片において最大応力の90%以上が作用する部分の体積）の影響に留意する必要がある²⁾．①応力勾配の影響については，低強度の材料で顕著となり，鉄鋼材料の場合，引張強度で800MPa付近を境として，それを下回る材料では，回転曲げ疲労試験の結果が超音波疲労試験の結果より高くなる傾向がある²⁾が，レール鋼の引張強度はJIS60kg，JIS50kgNレールいずれも800MPa以上となっており³⁾，疲労試験の結果に対する応力勾配の影響は小さいと考えられる．また，②危険体積の影響については，回転曲げ疲労試験片，超音波疲労試験片それぞれの危険体積は， 2.53mm^3 ， 120mm^3 と算出されることから，危険体積の違いが疲労限度の違いに現れたものと考えられる．

4. 結言

レール母材および溶接部の超高サイクル領域の疲労特性の評価を目的として，レール底部から切り出したレール試験片を用いて，超音波疲労試験および回転曲げ疲労試験にて超高サイクル領域下での疲労試験を実施した．その結果，レール鋼においては超高サイクル領域での内部起点型破壊は認められず，超高サイクル領域下でも疲労に関して十分な信頼性を有していると推定された．今後，破断した試験片のより詳細な破面観察を実施し，さらに，試験片の残留応力を考慮した考察を行うことで，超音波疲労試験および回転曲げ疲労試験の結果から実レールの超高サイクル領域下での疲労限度を明らかにしていく．

参考文献

- 1) 越知保雄，酒井達雄：疲労の基礎と最近の話題 3.金属材料の超長寿命領域における疲労特性，材料，Vol.52，No.4，pp.433-439，2003年
- 2) 一般社団法人日本溶接協会：金属材料の超音波疲労試験方法，WES1112，p.30，2022年
- 3) 新版軌道材料編集委員会：新版軌道材料，鉄道現業社，p.34，2011年

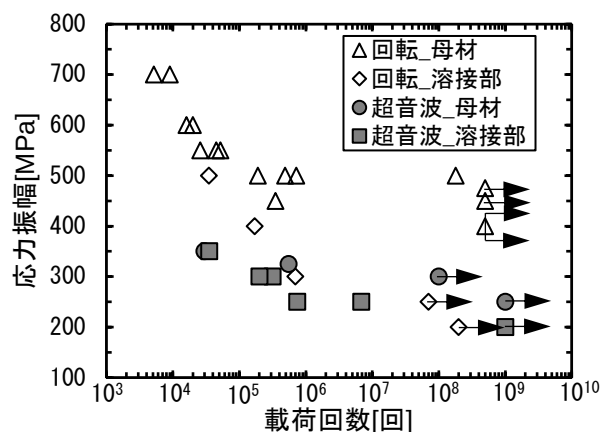


図3 試験結果（S-N特性）