

<b>学 位 論 文 要 旨</b> (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	<b>Dynamic effect of a high-speed train on superstructure of railway system; reliability and fracture characteristics of continuous welded rails</b> (鉄道システムの上部構造に対する高速列車の動的効果; 連続溶接レールの信頼性と破壊特性)
氏 名 (Name)	Yasin SARIKAVAK
<p>Dense population and needs for mobility of the people require optimization in transport mechanisms for an efficient transport. Therefore, railway systems become an important alternative according to this demand. Criteria such as capacity, speed and environment, where railway systems have advantages than any other transport mechanisms make the railway construction as a priority area. Increase in capacity resulted with increase in repetition of cyclic loads and phenomena of fatigue damage and failure that occur faster and frequent. Fatigue in railway systems occurs not only in railway vehicles but also in other components of the system such as railway rails, and thus, fatigue damage and failure are treated as the most serious problem in the superstructure and rails.</p> <p>This thesis covers the actual loading mechanisms in high speed train lines and its effect on continuous welded rails. Rail materials are one of the most important components of railway systems as it works under harsh environmental conditions. Railroad track is a very complex system that many interactions and potential locations where a crack may occur should be considered to prevent any system failure and accident. Under operational conditions, repeated wheel loads may cause fatigue failures to the railway rails. Especially, due to repeated loading between wheel and rail, rails and rail joints are prone to fatigue failures. Fatigue failure of metallic materials occurs in three phases including crack initiation, crack propagation and final fracture stages. Crack initiation and fracture mechanisms under different boundary conditions should be evaluated in detail to design safe and reliable railway systems. Also crack propagation and detection of discontinuities in the structure should be evaluated by using non-destructive techniques (i.e. magnetic particle inspection, ultrasonic inspection etc.) where visual inspection is not accurate enough to evaluate propagation of defects under operational conditions. For surface and near-surface defects magnetic particle</p>	

inspection and eddy current inspection are the applicable methods. For detection of internal defects ultrasonic inspection can be applied by using contact and non-contact techniques.

It is known that the deflection of a bolted joint in track system leads high dynamic impact which is a source of rapid track deterioration and high noise levels. Thus, on high speed train lines CWRs are constructed which eliminates the impact force via discontinuity. CWR systems, eliminates large number of rail joints, decreases noise and vibration that leads longer service life with lower maintenance costs for both track and rolling stock, provides steady train operations with less environmental impact. However, along the whole railway system, these welded regions are still the weakest points which have big possibility to fail under operational conditions. Some researchers also emphasized that the rail welds used both for continuous weld and repair weld may act as weak points in the track system from a mechanical point of view. In CWR system failure may initiate at various positions such as at the upper head to web, or lower web to foot or at foot regions. Thus, mechanical properties, crack initiation, fatigue, and strength reliability analysis of continuous welded rails (CWRs) on high speed train lines are quite important research tasks that should be solved immediately. Against such background, experimental and theoretical investigations were conducted as explained in the following chapters.

It is important to understand failure and fracture mechanisms on welded joints of rails for reliable and sustainable operations especially for high speed train lines. For better understanding the dynamic loads on welded joints it is necessary to determine actual loading when trains are under operation. Thus, in Chapter 2 actual loading parameters evaluated in detail when the rolling stock operates for speeds over 200 km/h. Field data collected on a ballasted track of a high speed line to evaluate the dynamic loading conditions of a rolling stock. Both rosette gauge and load cell applications used for evaluation of wheel/rail interaction. According to the results the static and dynamic loading conditions compared in detail for actual operations for speeds over 200 km/h. In Chapter 3, experimental study is conducted on the fatigue characteristics, tensile properties, and micrographs of CWRs to evaluate the system reliability in detail. The welded joints are subjected to static and dynamic loads under various boundary conditions. S-N (Stress-life) diagram established, and fracture surfaces of the failed specimens investigated to specify the crack initiation points. According to microstructural examination many spherical cementite are observed especially in

様式7号 (第12条, 第31条関係)

(様式7号) (Format No.7) 日本語版

the web section of the joint which affects the fatigue life. In Chapter 4, fracture surfaces of the failed specimens after tensile and fatigue tests are evaluated by using field emission scanning electron microscope for rail sections centring the weld collar. In rail foot, majority of the fatigue failure stems from stress concentration due to shear slip deformation. In rail head, both slip deformation and C-rich inclusions were observed in the specimen surface. In the web section, lower fatigue lives were observed at the specified loading conditions. The premature fatigue crack occurs in rail web according to the stress concentration caused by C-rich inclusions near the specimen surface around the welding line. It is concluded that the difference between the fatigue lives is attributed to the difference between crack occurrence mechanisms.

The obtained results in this study are important guide for maintenance management, reliable and sustainable operation of railway systems especially for higher speeds and higher axle loads.

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Dynamic effect of a high-speed train on superstructure of railway system; reliability and fracture characteristics of continuous welded rails (鉄道システムの上部構造に対する高速列車の動的効果; 連続溶接レールの信頼性と破壊特性)
氏名 (Name)	Yasin SARIKAVAK
<p>密集した人口と人々の移動の必要性により、効率的な輸送のために輸送メカニズムを最適化する必要があります。したがって、鉄道システムは、この需要に応じて重要な代替手段になります。容量、速度、環境などの基準により、鉄道システムが他の輸送メカニズムよりも優れているため、鉄道建設は優先分野となります。容量の増加は、繰返し荷重の増加と、疲労損傷および破損の現象がより速く頻繁に発生することをもたらしました。鉄道システムの疲労は、鉄道車両だけでなく、鉄道レールなどシステムを構成する他のコンポーネントでも発生するため、上部構造およびレールの疲労損傷および破損は最も深刻な問題として扱われます。</p> <p>この論文では、高速鉄道路線における実際の負荷メカニズムと、連続溶接レールへの影響について説明します。レール材料は、過酷な環境条件下で機能するため、鉄道システムの最も重要なコンポーネントの 1 つです。鉄道線路は非常に複雑なシステムであり、システムの障害や事故を防ぐために、亀裂が発生する可能性のある多くの相互作用と潜在的な場所を考慮する必要があります。運用条件下では、輪荷重が繰り返されると、鉄道レールに疲労障害が発生する可能性があります。特に、車輪とレールの間に繰り返し荷重がかかるため、レールとレールの継ぎ目は疲労破壊を起こしやすいです。金属材料の疲労破壊は、亀裂の開始、亀裂の伝播、最終破壊段階の 3 つの段階で発生します。安全で信頼性の高い鉄道システムを設計するには、さまざまな境界条件での亀裂の発生と破壊のメカニズムを詳細に評価する必要があります。また、動作条件下での欠陥の伝播を評価するのに目視検査が十分に正確でない場合、構造内の亀裂の伝播と不連続性の検出は、非破壊技術（磁粉検査、超音波検査など）を使用して評価する必要があります。表面および表面近傍の欠陥用磁性粒子検査と渦電流検査が適用可能な方法です。内部欠陥の検出には、接触および非接触技術を使用した超音波検査を適用できます。</p> <p>軌道システムのボルト接合部のたわみは、急速な軌道劣化と高い騒音レベルの原因となる大きな動的衝撃を引き起こすことが知られています。したがって、高速列車の線路では、不連続性によって衝撃力を排除する CWR が構築されます。CWR システムは、多数のレー</p>	

ル ジョイントを排除し、騒音と振動を低減して軌道と車両の両方のメンテナンス コストを削減し、長寿命を実現し、環境への影響を抑えて安定した列車運行を実現します。ただし、鉄道システム全体に沿って、これらの溶接領域は依然として運用条件下で故障する可能性が高い最も弱い点です。一部の研究者はまた、連続溶接と補修溶接の両方に使用されるレール溶接が、機械的な観点から軌道システムの弱点として機能する可能性があることを強調しました。CWR システムでは、上部の頭からウェブ、下部のウェブから足、または足の領域など、さまざまな位置で故障が発生する可能性があります。したがって、高速鉄道線路の連続溶接レール (CWR) の機械的特性、亀裂発生、疲労、および強度信頼性解析は、すぐに解決すべき非常に重要な研究課題です。このような背景に対して、次の章で説明するように、実験的および理論的な調査が行われました。

特に高速鉄道の信頼性が高く持続可能な運用のためには、レールの溶接接合部の故障と破壊のメカニズムを理解することが重要です。溶接継手の動的荷重をよりよく理解するには、列車が運行されているときの実際の荷重を決定する必要があります。したがって、第 2 章では、車両が 200 km/h を超える速度で動作する場合の実際の負荷パラメータを詳細に評価しました。鉄道車両の動的負荷条件を評価するために、高速線路のバラスト軌道で収集された現場データ。ホイール/レールの相互作用の評価に使用されるロゼット ゲージとロード セル アプリケーションの両方。その結果によると、時速 200 km を超える速度での実際の動作について、静的および動的負荷条件を詳細に比較しました。第 3 章では、システムの信頼性を詳細に評価するために、CWR の疲労特性、引張特性、顕微鏡写真について実験的研究を行います。溶接継手は、さまざまな境界条件下で静的および動的荷重を受けます。S-N (応力-寿命) ダイアグラムが確立され、壊れた試験片の破面が調査され、亀裂の開始点が特定されました。微細構造の調査によると、多くの球状のセメントタイトが特に 疲労寿命に影響を与えるジョイントのウェブ セクション。第 4 章では、溶接カラーを中心としたレール セクションについて、引張および疲労試験後の破損した試験片の破面を、電界放射型走査型電子顕微鏡を使用して評価します。レール足部では、せん断すべり変形による応力集中が疲労破壊の大部分を占めています。レール頭部では、試験片表面にすべり変形と C リッチな介在物が観察されました。ウェブ セクションでは、特定の荷重条件で低い疲労寿命が観察されました。溶接線近傍の試験片表面付近にある C リッチ介在物による応力集中により、レールウェブに早期疲労き裂が発生します。疲労寿命の違いは、亀裂発生メカニズムの違いによるものと結論づけられました。

この研究で得られた結果は、保守管理、特に高速で高軸重の鉄道システムの信頼性が高く持続可能な運用のための重要なガイドです。

(様式 14 号)

## 学位論文審査の結果及び試験，試問の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	Yasin Sarikavak
審査委員	主 査： 合田 公一
	副 査： 陳 猷
	副 査： 大木 順司
	副 査： 古賀 毅
	副 査： Macadre Arnaud
論文題目	Dynamic effect of a high-speed train on superstructure of railway system; reliability and fracture characteristics of continuous welded rails 鉄道システムの上部構造に対する高速列車の動的効果; 連続溶接レールの信頼性と破壊特性
<p>【論文審査の結果及び試験，試問の結果】</p> <p>鉄道システムにおける疲労現象は，鉄道車両だけでなく，鉄道レールのような他の構成要素にも発生するため，レールの上部構造における疲労損傷・破壊は深刻な問題として扱われている。このような観点から，本論文では，高速鉄道路線における実際の荷重変動メカニズムと，その高速鉄道用連続溶接レール（continuous welded rails, CWR と略記）への影響を取り上げている。</p> <p>まず，第1章において，本研究に関わる背景と問題点について言及するとともに，各章の内容を概説している。第2章では，時速 200 km 以上で走行する鉄道車両の実際の荷重パラメータを詳細に評価している。高速鉄道のバラスト軌道で収集した実データをもとに，鉄道車両の動的荷重条件を評価している。以上の結果に基づき，時速 200 km 以上での実運用において，静的荷重条件と動的荷重条件を詳細に比較検討している。第3章では，レールシステムの信頼性を詳細に評価するために，CWR から切り出した溶接部を中央に含む Head, Web, Foot の各部位の疲労特性，引張特性，顕微鏡組織に関する実験的研究を実施している。S-N（応力-寿命）線図を作成するとともに破損した試験片の破断面を調査し，き裂の発生箇所を特定している。その結果，低疲労寿命を示した Web 部において，球状のセメントイトが多数観察されることを明らかにしている。第4章では，レールの溶接継手部における欠陥と力学的挙動の関係を明らかにするために，疲労試験後の破壊面を走査電子顕微鏡で評価している。まず，レール Foot 部では，疲労破壊の大部分はせん断すべり変形による応力集中に起因することを明らかにしている。レール Head 部では，すべり変形と C-rich 介在物の両方が試験片表面に観察できることを見出している。また，レール Web 部では，設定された荷重条件下で低疲労寿命が見られることを示している。つまり，溶接線上の試験片表面近傍に存在する C-rich 介在物による応力集中により，早期疲労き裂が発生すると予測している。以上のことから，疲労寿命の差は，き裂発生メカニズムの差に起因すると結論付けている。</p>	

(様式 14 号)

第 5 章では第 2 章、第 3 章および第 4 章で得られた結果を総括している。

本研究で得られた CWR 溶接部近傍の顕微鏡組織と疲労寿命の関係解明は、CWR の製造技術に一石を投ずるものであり、今後の鉄道レール生産技術の発展に寄与するものであることから、本成果の意義は極めて大きい。

公聴会における主な質問内容は、溶接部における顕微鏡組織のちがいを、レールの疲労損傷近傍における応力分布の FEM 等による解明、さらにはトルコ高速鉄道技術の将来展望等について質問があり、的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士 (学術) の論文に十分値するものと判断した。

試験および試問として、4 名の副査から以下の内容の課題が課された。

1. CWR の製造方法
2. 使用されている材料の顕微鏡組織と機械的性質の関係
3. CWR 溶接部近傍の残留応力分布および疲労損傷の主要因等
4. 日本における鉄道レールに関する学術論文について

これらの試問に対し、パワーポイントおよび動画によって解答がなされ、また口頭試問に対しても満足のいく回答がなされた。さらに、語学については著者単名の英文論文が発表されており、その内容から判断して、十分な英語能力を有するものと判断された。論文内容および審査会、公聴会での試問応答など総合的に判断して、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 3 編、参考論文 計 5 編)

#### 1. 関連論文の印刷公表の方法及び時期

##### (a) 査読のある雑誌等

1) Yasin Sarikavak, Takaki Takeuchi, Toshitaka Horiuchi, Koichi Goda, Experimental study of the fatigue characteristics and reliability of continuous welded rails, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (FFEMS)*, Vol.43, pp.1743-1754, 2020.

2) Yasin Sarikavak, Koichi Goda, Dynamic wheel/rail interactions for high-speed trains on a ballasted track, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.36, pp.689-698, 2022.

##### (b) 査読のある国際会議の会議録等

1) Yasin Sarikavak, Takaki Takeuchi, Toshitaka Horiuchi, Koichi Goda, An Experimental Investigation on Fatigue Mechanism of Continuous Welded Rails in Railways, Abstract Proceeding, The 2019 International Conference on Metals and Alloys (Beijing, China), 2019.

#### 2. 参考論文

##### (a) 査読のある雑誌等

1) Yasin Sarikavak, Can Cogun, Single discharge thermo-electrical modeling of micromachining mechanism in electric discharge machining, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.26, pp.1591-1597, 2012.

2) Ilker Kara, Yasin Sarikavak, Sefer Bora Lisesivdin, Mehmet Kasap, Evaluation of morphological and chemical differences of gunshot residues in different ammunitions using SEM/EDS

(様式 14 号)

technique, Environmental Forensics, Vol.17, pp.68-79, 2016.

3) Yasin Sarikavak, Alistair Boxall, The Impacts of Pollution for New High-Speed Railways: the Case of Noise in Turkey, Acoustics Australia, Vol.47, pp.141-151, 2019.

4) Yasin Sarikavak, Osman Selim Turkbaz, Can Cogun, Influence of welding on microstructure and strength of rail steel, Construction and Building Materials, Vol.243, 118229, 2020.

5) Yasin Sarikavak, An advanced modelling to improve the prediction of thermal distribution in friction stir welding (FSW) for difficult to weld materials, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol.43, Article number: 4, 2020.