



Title	Development of FSW and LFW Joints with High Ductile and Fatigue Strength for Weathering Steels
Author(s)	Wang, Yixun
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/89628">https://doi.org/10.18910/89628</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name ( WANG YIXUN )	
Title	Development of FSW and LFW Joints with High Ductile and Fatigue Strength for Weathering Steels (耐候性鋼に対する高い延性と疲労性能を達成するFSWおよびLFW継手の開発)
<p><b>Abstract of Thesis</b></p> <p>Corrosion is one of the most severe diseases in engineering, which brings about significant damage to the safety and durability especially for steel structures, and causes huge economic losses. Weathering steel has been developed and widely used to improve the anti-corrosion performance of steel structures in harsh environment, while the high wt.% P in weathering steels often results in solidification cracks if joined by conventional fusion welding technologies. The friction stir welding (FSW) and linear friction welding (LFW) can join steels at low temperature (as low as <math>A_1</math>), which are expected to inhibit the P segregation and solidification cracks. The main purpose of this study is to investigate the possibility of joining the high wt.% P weathering steels by FSW and LFW, and ensure high mechanical properties. This study is composed of six chapters as follows.</p> <p>In Chapter 1, the current status of weathering steels and friction welding was briefly reviewed. The challenges of weathering steels in engineering were outlined to highlight the advantages of FSW and LFW.</p> <p>In Chapter 2, the optimization of welding parameters and process of FSW and LFW was elaborated. The anti-corrosion properties of conventional and high-phosphorus weathering steels were compared and assessed by the corrosion resistance index. The experimental procedure was introduced, and accuracy of measuring methods was also explained.</p> <p>In Chapter 3, the conventional weathering steels SMA490AW and SPA-H were successfully joined by FSW below the <math>A_1</math> temperature. The weldment without heat affected zone (HAZ) softening and solidification cracks was confirmed. The weld section was basin-shaped with fine-grained ferrite and strengthening phase cementite. The FSW joints experienced two steps of yield under the monotonic loading due to the high microhardness of weldment. The joint efficiency of obtained FSW joints was as high as 100%. The fatigue tests were conducted on the FSW and base metal (BM) specimens under a stress ratio of 0.1. The BM and FSW specimens had almost identical fatigue strength due to the absence of HAZ softening and notches, indicating a favorable weldability. The fatigue strength of the FSW joints was much higher than the design curve IIW-FAT112.</p> <p>In Chapter 4, three types of weathering steels with higher wt.% P, i.e., stronger anti-corrosion performance than conventional weathering steels, were developed and successfully joined by FSW below the <math>A_1</math> temperature. The FSW joints with no solidification cracks and HAZ softening were obtained for all steels. Influence of wt.% P and other alloying elements on the microstructure characteristics and microhardness of FSW joints was discussed. The monotonic and fatigue tests showed that FSW could achieve a joint efficiency of 100% and high fatigue strength for three high-phosphorus weathering steels. LFW joints with weld defects due to the inadequate welding parameters were also tested. The weld defects resulted in the fatigue fracture at the weld nugget and decreased the fatigue life by as long as 14.7 times, but they barely had no influence on the tensile strength.</p> <p>In Chapter 5, the conventional weathering steels were successfully joined by LFW above the <math>A_3</math> temperature. Due to the higher welding temperature than FSW, the bainite with high microhardness was formed at the weld center zone of LFW joints. The tensile strength of polished and as-welded specimen was very close to that of BM, resulting in a joint efficiency of about 100%. The fatigue strength of the polished LFW specimens was close to that of the BM specimens and much higher than the design curve IIW-FAT112, while that of the as-welded LFW specimens was greatly decreased due to the local stress concentration. In addition, the possible unbonded flash at the edge caused the quick crack initiation and propagation at the weld interface, and it was suggested to remove the flash near the edge to ensure the high fatigue strength.</p> <p>In Chapter 6, this dissertation was concluded, and some suggestions for further works were also proposed.</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( W A N G Y I X U N )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	准教授	堤 成一郎
	副 査	教授	鎌田 敏郎
	副 査	教授	乾 徹

## 論文審査の結果の要旨

耐候性鋼は、少量の Cu, P, Cr, Ni などの元素を含有する低合金鋼であり、大気中での適度な乾湿の繰り返しにより鋼材表面に緻密な保護性の高い錆層を形成することにより、無塗装でも優れた耐腐食性を示すことから、その活用によりインフラ鋼構造物のライフサイクルコストの低減が期待されている。中でも P 元素は、比較的安価に耐候性および機械的特性を向上させることが明らかにされている。一方、P 元素の含有率が高い鋼材に対して、従来の溶融溶接を適用する場合、高温割れの一つである凝固割れを誘発しやすくなることが指摘されており、耐候性鋼の開発およびその活用にあたっては、この溶接性悪化への対策が大きな課題となっている。本論文は、この課題を解決すべく、従来の溶融溶接に代わって、構造体製作時の接合条件を精緻に制御可能な線形摩擦接合 (Linear Friction Welding : LFW) および摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW) 技術に注目するとともに、既存の耐候性鋼および P 元素の含有率をより高くした供試鋼材への両接合技術の適用性について、実験的および解析的アプローチから明らかにするものである。本論文は以下の 6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、耐候性鋼と LFW および FSW 技術の現状と課題について整理するとともに、本研究の目的および構成について述べている。

第 2 章では、評価対象とする耐候性鋼として、SMA490AW および SPA-H の材料組成を示すとともに、適切な継手を製作するための接合条件について分析している。また、P 含有率の高い供試鋼材の製作条件および基本的な材料特性を示すとともに、FSW による接合が可能な条件を提示している。

第 3 章では、耐候性鋼 SMA490AW および SPA-H を対象として、FSW 接合時の最高到達温度が炭素鋼の焼入れ臨界温度である  $A_1$  変態点未満となる状況において接合が可能な条件を明らかにしている。また、組織観察により、接合部は細粒フェライトと強化相セメンタイトからなり、熱影響部 (HAZ) の軟化および凝固亀裂のない健全な継手が得られることを確認している。また、バリを削除した FSW 継手の機械的特性の確認を目的とした引張試験により、溶接部の硬度上昇に伴って、延性破壊に至るまでの過程において 2 段階降伏挙動を示すとともに、継手効率が 100% になることを明らかにしている。加えて、同継手に対する疲労試験により、FSW 継手の疲労性能は母材の疲労性能と概ね一致し、国際溶接協会 (IIW) の FAT112 基準よりも、はるかに高い疲労性能を有することを明らかにしている。

第 4 章では、P 含有率の高い供試鋼材を対象として、FSW の条件を適切に制御することにより、 $A_1$  変態点未満でも正常に接合可能であることを明らかにしている。また、組織分析を行うとともに、凝固亀裂や HAZ 軟化のない FSW 接合部が得られたことを確認している。バリを削除した FSW 継手に対する引張試験と疲労試験により、何れの供試鋼に対する継手も 100% の継手効率が得られること、および母材並みの高い疲労性能を達成できることを明らかにしている。一方、接合条件の不備により発生した接合欠陥を有する場合の継手効率は、無欠陥の継手と大差ないものの、疲労特性に関しては、接合欠陥を起点とした破壊形態へと変化し、疲労寿命も大きく低下することを明らかにしている。

第 5 章では、耐候性鋼 SMA490AW および SPA-H を対象として、 $\gamma$  鉄組織を形成する  $A_3$  変態点を超える接合温度とする LFW 継手を製作し、LFW 継手中心部に高硬度のベイナイト組織が形成されることを確認するとともに、継手効率も概ね

100%であることを明らかにしている。バリを削除した LFW 試験片の疲労強度は、母材と同等であり、FAT112 よりもはるかに高くなることを明らかにしている。一方、接合まま LFW 継手試験片の疲労強度は、応力集中のために大幅に低下することを示すとともに、ステレオデジタル画像相関法 (DIC) により、局所ひずみ状態と亀裂発生および伝播挙動の相関を明らかにすることで、高い疲労強度を確保するためには、継手エッジ付近の余盛の除去が有効であることを指摘している。

第 6 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の検討課題を提示し、結論としている。

以上のように、本論文は、既存の耐候性鋼および P 元素の含有率をより高くした供試鋼材への LFW および FSW 接合技術の適用性に着目し、高い延性と疲労性能を達成する継手製作条件を実験的に明らかにしている。さらに、DIC を用いた詳細計測および解析的アプローチからそのメカニズムを考察するとともに、高い疲労強度を確保するための必要条件を提示するなど、耐候性鋼を用いた構造物の高機能化および性能設計手法の高度化に資するものであると評価できる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。