

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01520

研究課題名(和文) 疲労き裂の進展性に基づく鋼橋の合理的維持管理手法の構築

研究課題名(英文) Development of maintenance method for steel bridges based on fatigue crack growth behavior

研究代表者

判治 剛 (Hanji, Takeshi)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80452209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：既設橋梁を合理的かつ戦略的に維持管理するためには、鋼部材に発生した疲労き裂に対して、その進展性を考慮した上で健全度を判定することが望ましい。本研究では、実橋梁の溶接継手部に発生した疲労き裂の進展性を評価するために、まず、き裂進展による残留応力の再配分挙動を実験および解析により検討した。その結果、引張残留応力場である溶接止端からき裂が進展すると、き裂の先端付近には引張の残留応力が常に作用するように残留応力が再配分されることを示した。その結果を踏まえ、多主桁橋のウェブガセットから生じる疲労き裂の進展をシミュレートし、き裂進展による荷重再配分挙動や、このき裂に対する疲労限界状態について検討を加えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

疲労き裂の進展やそれを起点としたぜい性破壊を評価する際には溶接残留応力の影響は無視できないが、本研究により得られたき裂進展に伴う残留応力の再配分挙動に関する知見は、構造物の疲労限界評価の精緻化につながるものである。

鋼橋に発生した疲労き裂に対して、その進展性に基づき部材や橋梁の健全性を評価する考え方は性能照査型のき裂管理といえ、橋梁管理者の人的・財政的資源が限られる中で、維持管理の合理化、持続可能な維持管理の実現に資するものであり、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In order to maintain and manage existing steel bridges rationally and strategically, it is desirable to evaluate fatigue cracks generated in welded joints from the viewpoint of its propagation behavior. In this study, for evaluating fatigue crack growth occurring from welded joints in actual steel bridges, first, the re-distribution behavior of welding residual stress due to crack growth was examined by experiments and analysis. As a result, it was revealed that when a crack initiate and propagate from a weld toe, which is usually in a tensile residual stress field, the residual stress is re-distributed so that the tensile residual stress always acts near the tip of the crack. Based on the results, the growth of a fatigue crack from a web-gusset welded joint in a typical multiple girder bridge was simulated, and the load redistribution behavior due to the crack growth and the fatigue limit state for this type of crack were investigated.

研究分野：鋼構造学

キーワード：疲労き裂 維持管理手法 鋼橋 き裂進展 残留応力再配分 橋梁システム 疲労限界状態

1. 研究開始当初の背景

国土交通省は平成25年を「社会資本メンテナンス元年」と称し、インフラの老朽化対策・長寿命化を積極的に推進していくことを明言している¹⁾。鋼橋の劣化要因の一つは疲労であり、それに対して適切に対処することにより、100年橋梁の実現が可能となる。

時を同じくして、平成26年に道路法施行規則が施行され、5年に1回の近接目視による定期点検と、その診断結果の健全度としての分類が義務化された。各所で点検マニュアルは整いつつあるが、発見された疲労き裂に対する診断技術は十分に整備されておらず、き裂の健全度(緊急度)の判定は専門家の知識・経験に頼らざるを得ないのが現状である。しかし、今後の疲労き裂の増加を考えると、そのような場当たりの対処では確実に破綻する。すでに、橋梁技術者の限られている自治体などでは、点検により発見されたき裂の対応に苦慮しており、深刻な問題となっている。では、どのようにすれば、限られた人的・財政的資源の中で、合理的なき裂の管理が可能になるのか。これが本研究の核となる問いである。

これまでは疲労き裂を発生させないというのが当然の考え方であったが、鋼橋の長寿命化が進むと、その概念だけでは難しく、発生したき裂といかに付き合うのかも重要となる。つまり、今そこにあるき裂がすぐにでも破壊につながるのか、もしそうでない場合でも、その後どのくらいの期間で対策を行うべきか、などのき裂の進展性に関する情報を基に、たとえき裂が発生したとしても、その進展により限界状態に至らないように管理する、という考え方もある。これによりき裂に応じた弾力的な維持管理が可能になるが、広く普及しているとはいえない。その原因の一つに、実橋部材のき裂進展に関する学術的知見が不足していることが挙げられる。そこで、この問題点を解決すべく、本研究では以下の目的を設定した。

2. 研究の目的

本研究では、実橋部材に生じる疲労き裂の進展性を明らかにし、それに基づく鋼橋のき裂管理手法を構築することを目的とする。部材の重要度や橋梁システムの冗長性にもよるが、この手法により、例えば、たとえき裂が進展しても、少なくとも次回点検までには限界状態に達しないことを要求性能として考えることが可能となり、合理的かつ戦略的に維持管理につながると考えられる。

3. 研究の方法

(1) 概要

鋼橋の疲労き裂のほとんどは溶接継手から生じることから、この手法の確立には、溶接による残留応力場を進展する疲労き裂を高精度に予測する技術が必要となる。通常なき裂進展予測では、断面内に高い引張残留応力が一様に分布する、もしくは初期残留応力分布を仮定し、それが進展中も保持されると考えて計算する。しかし実際は、き裂の進展に伴い残留応力は再配分され、き裂先端近傍の残留応力場は常に変化する。そのため、荷重条件によっては、き裂の進展が遅延したり、停留したりする。そこで本研究では、まず、溶接継手に生じた疲労き裂の進展による残留応力の再配分挙動を実験および解析により明らかにした。

また、溶接継手の疲労寿命は、疲労き裂が主板厚を貫通するまでに要した繰返し回数として整理されるのが一般的である。一方で、鋼橋はさまざまな部材の組合せにより構成されており、継手単体の疲労寿命と橋梁システム全体の疲労限界状態が一致するとは限らない。そこで、鋼橋の疲労き裂の例として、多主桁橋のウェブガセット継手から生じる疲労き裂に着目し、その進展を再現した解析により、荷重再配分挙動や疲労限界状態に関する検討を行った。

(2) き裂進展に伴う溶接残留応力の再配分挙動の解明

① 板厚方向のき裂進展に着目した検討

試験体の形状および寸法を図1に示す。試験体は、板厚40mmの主板に対して板厚12mmの付加板を溶接したT継手である。ここでは、主板側止端から発生する疲労き裂の板厚方向の進展に着目する。溶接には炭酸ガスアーク溶接を用い、付加板両側を同時に水平すみ肉で溶接した。幅800mmの継手ブロックを製作した後、幅50mmに切り出して試験体とした。なお、き裂発生点を限定するために、片側の溶接止端はグラインダーにより仕上げている。

疲労試験に先立ち、X線応力回折法により試

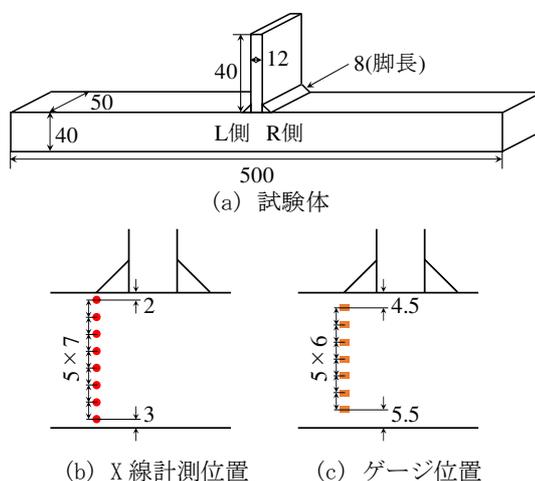


図1 試験体の形状および寸法 (単位: mm)

験体長手方向の残留応力分布を求めた。コリメータ径は 1.0 mm とし、単一入射法²⁾ ($\cos \alpha$ 法)により計測した。計測位置は、図 1 中に示すように、試験体側面において 5 mm 間隔で板厚方向に 8 箇所とした。

初期残留応力を測定した試験体に繰返し荷重を与え、き裂進展に伴う残留応力の変化を求めた。試験状況を図 2 に示す。試験は 4 点曲げで行い、溶接部側の応力比がほぼゼロとなるように载荷した。公称曲げ応力を算出するために、試験体には溶接止端から 15 mm、40 mm 位置の主板表裏面にゲージ長 5 mm のひずみゲージを貼付した。また図 1 中に示すように、き裂の発生、進展に伴う残留応力の解放量を求めるために、止端断面の主板側面にゲージ長 1 mm のひずみゲージを貼り付けた。疲労試験は公称応力範囲 120 N/mm^2 、载荷振動数 3 Hz で行った。試験中は、1 万回ごとに動的ひずみ計測を行うとともに、定期的に载荷を止め、き裂の状況を確認した。また、き裂形状を記録するためのビーチマークも適宜導入した。

② 半楕円表面き裂を対象とした検討

ここでは面外ガセット溶接継手³⁾を対象とした。主板と付加板には SBHS400 を、溶材には SF-1 を用い、炭酸ガス半自動アーク溶接により製作した。付加板と主板はまわし溶接部より 50 mm の区間を完全溶込み溶接にて接合しており、まわし溶接部の脚長は約 15 mm である。まわし溶接部周辺の残留応力を X 線応力回折法により計測した。T 継手と同様に、コリメータ径は 1.0 mm とし、計測には単一入射法 ($\cos \alpha$ 法)を用いた。

面外ガセット継手のまわし溶接部に生じる疲労き裂の進展性状を把握するため、板曲げ振動疲労試験機による疲労試験を実施した。公称応力範囲は 100 N/mm^2 、応力比は -1 とした。定期的にビーチマーク载荷を行い、き裂形状を記録した。得られたビーチマークを図 3 に、それより計測したき裂寸法を表 1 にまとめる。

疲労試験に加えて、ABAQUS Ver. 6.14 による熱弾塑性解析を行い、面外ガセット継手まわし溶接部近傍の残留応力を求めた。解析対象を図 4 に示す。境界条件として、モデルが剛体運動しないように端部の変位を拘束している。鋼材の材料特性には文献 4) を参考に温度依存性を設定した。試験体の溶接条件を基に、入熱効率を 0.7 とし計算した物体熱流束 12705 mJ/mm^3 を図 4 中に示す入熱領域に与えた。この入熱領域は完全溶込み溶接を仮定したものであり、解析モデルの溶接線全域に一樣に入熱した。入熱してから 5000 秒間自然冷却した後、き裂に相当する要素 (厚さ 0.1 mm) を削除することによりき裂進展を模擬した。き裂はまわし溶接止端から発生し、板厚および板幅方向に同一平面内を進展すると仮定した。き裂形状は図 3 に示すビーチマークを参考に 5 パターンとした。

(3) 実橋梁に生じた疲労き裂の進展に関する検討

① き裂進展に伴う荷重再配分挙動の解明

多主桁橋の外桁におけるウェブガセット継手を対象とし、そのまわし溶接止端から生じたき裂の進展を解析により再現した。解析モデルを図 5 に示す。都市内高速道路の標準図を参考に、単純支持された 7 本の主桁を有する鋼プレートガーダー橋とした。対象としたウェブガセット周辺はソリッド要素でモデル化し、それ以外の鋼部材はシェル要素とした。まわし溶接止端に表面長さ 50~250 mm の疲労き裂を想定し、F 荷重通行時の荷重再配分挙動を明らかにした。

② 疲労限界状態に関する検討

①の鋼プレートガーダー橋を用いて、交通流の確率分布を考慮したき裂進展解析を行った。ここでは、ウェブ (板厚 9 mm) に溶接されたウェブガセット継手のまわし溶接部からの疲労き裂

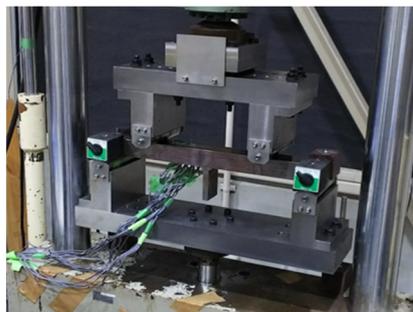


図 2 4 点曲げ疲労試験状況

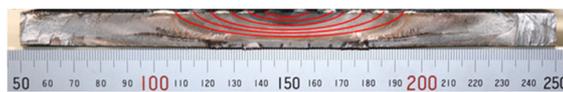


図 3 面外ガセット継手の疲労破面

表 1 ビーチマーク試験結果

き裂寸法	①	②	③	④	⑤
深さ (mm)	4.2	6.1	7.8	8.6	9.5
長さ (mm)	22	42	62	74	88

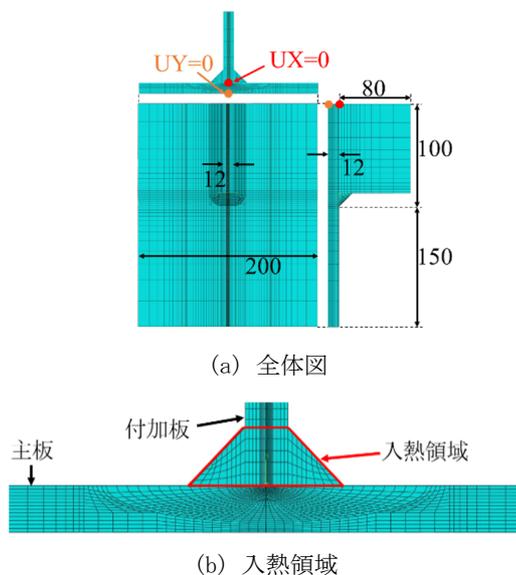
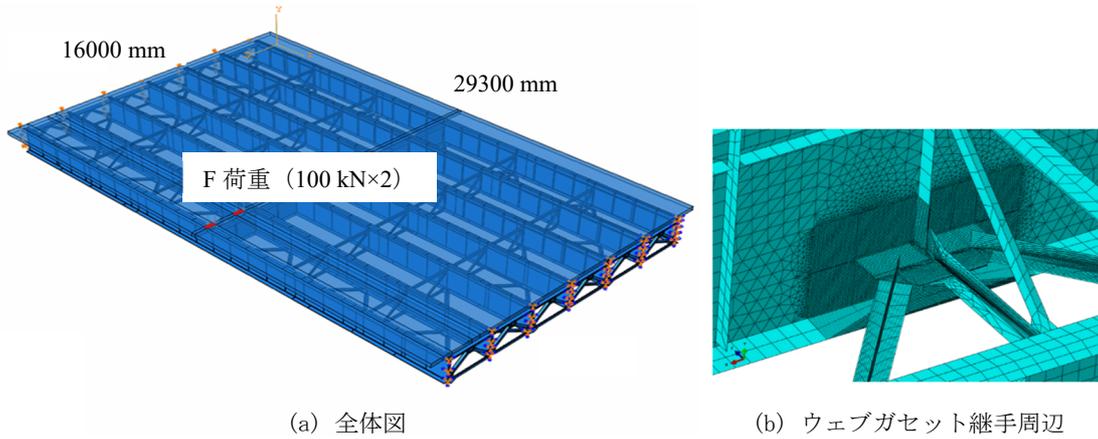
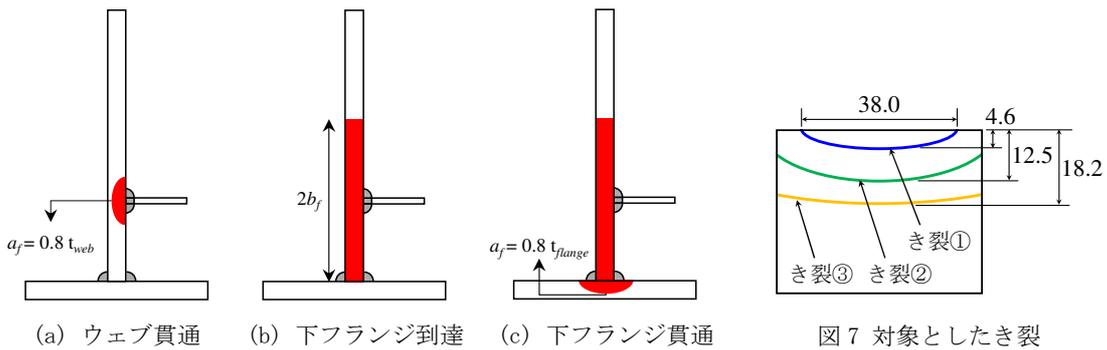


図 4 解析モデルおよび境界条件 (単位: mm)



(a) 全体図 (b) ウェブガセット継手周辺

図5 対象とした多主桁橋の解析モデル



(a) ウェブ貫通 (b) 下フランジ到達 (c) 下フランジ貫通

図7 対象としたき裂 (単位: mm)

図6 想定した疲労き裂の進展状態

を想定し、それが下フランジをほぼ貫通した(フランジ厚の80%)段階を橋梁システムとしての疲労限界状態と考えた。き裂進展は破壊力学的アプローチに基づき計算し、き裂進展則には下限界応力拡大係数を考慮したパリス則を採用した。解析では、大型車の重量や交通量、走行位置を変化させて実交通流を模擬するとともに、溶接止端形状(止端半径、止端角)やき裂進展則の材料特性(c, m, ΔKth)の分布を考慮した。なお、初期き裂深さは0.1 mm、き裂長さは0.5 mmとした。橋梁システムの疲労限界状態に達するまでの繰返し回数(疲労寿命)に対し、図6に示す各状態に至るまでの繰返し回数が占める割合を明らかにした。

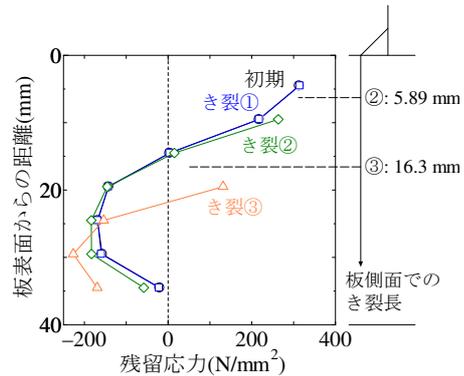


図8 き裂進展に伴う残留応力の変化

4. 研究成果

(1) き裂進展に伴う溶接残留応力の再配分挙動の解明

① 板厚方向のき裂進展に着目した検討

き裂の進展に伴い残留応力が解放され、試験中に計測したひずみ変動の下限値は、その時点での残留応力の解放分に相当するひずみ分だけ変化すると考えられる。そこで、その変化量を基にき裂進展による残留応力分布の変化を求めた。ここで、初期残留応力にはX線による測定値を用いた。ただし、X線測定位置とゲージ貼付位置には若干のずれがあるため、X線測定値をゲージ位置に内挿して初期残留応力分布とした。

ビーチマーク試験により得られたき裂の模式図を図7に示す。また、各き裂時の主板側面における板厚方向の残留応力分布を図8に示す。図中には各段階における板側面のき裂を模した図を併記している。初期の残留応力分布をみると、溶接止端近傍では引張残留応力が生じており、それにあわせて板厚中央付近では圧縮の残留応力が生じている。これは過去の研究⁵⁾において求められた一般的な分布傾向と同様である。また板厚方向の分布では、き裂が進展すると、き裂先端近傍の残留応力の絶対値は少しずつ小さくなるものの、き裂先端付近には引張の残留応力が作用するように再配分されていることがわかる。これは、過去に帯板試験片やCT試験片に対して得られた知見^{6), 7)}と同様であるといえる。

② 半楕円表面き裂を対象とした検討

解析により得られたき裂が進展する断面における残留応力 σ_x のコンターを各き裂時に分けて

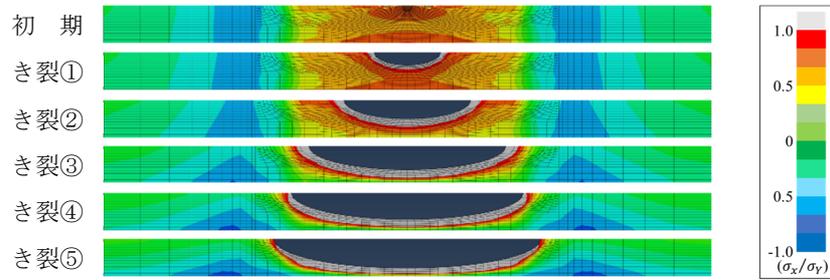


図9 表面き裂の進展に伴う残留応力分布の変化

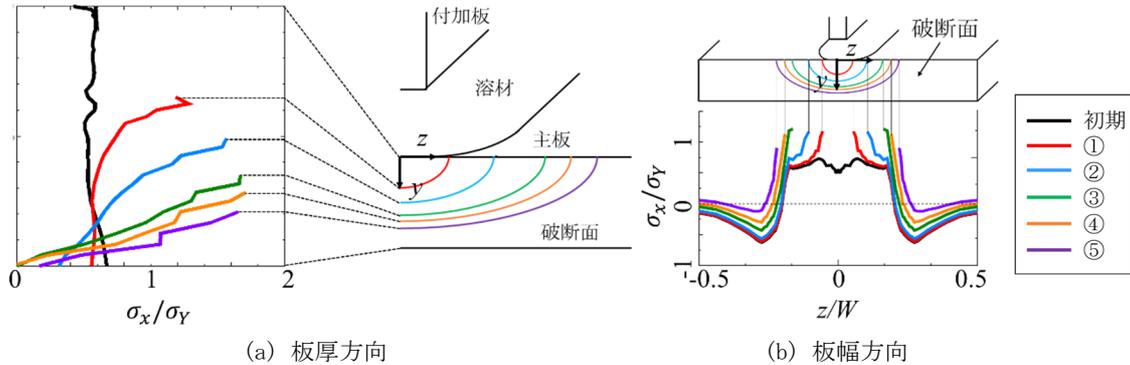


図10 残留応力の再配分の様子

図9に示す。また、幅中央の止端位置を原点にとり、き裂進展に伴う板厚方向（y方向）および板幅方向（z方向）の残留応力分布の変化を図10に示す。残留応力はき裂先端に位置する節点応力である。図中には初期の分布と、各き裂時の分布を示している。板厚方向、板幅方向ともに、き裂が進展しても、き裂先端で高い引張の残留応力が維持されるように残留応力が再配分されていることがわかる。また板幅方向の分布より、初期の圧縮残留応力場にき裂先端が達した場合でも、残留応力の再配分により、き裂先端には引張の残留応力が生じていることがわかる。なお、紙面の制約のため示していないが、き裂が板厚を貫通した後も先端付近には引張残留応力が生じながらき裂が進展することを確認している。

(2) 実橋梁に生じた疲労き裂の進展に関する検討

① き裂進展に伴う荷重再配分挙動の解明

100mmを超えるようなき裂をウェブガセット溶接止端に導入しても、き裂が下フランジを貫通していない場合には、橋梁システム全体としての挙動の変化は小さく、主桁の荷重分担割合はき裂の有無によらずほぼ同程度であった。このことは、多主桁橋においてウェブガセット溶接部から生じたき裂の進展性を評価する場合、き裂を有する主桁1本のみを切り出して解析すればよいこと意味する。

② 疲労限界状態に関する検討

疲労き裂がウェブ（板厚9mm）を貫通するまでの繰返し回数は、交通量によりばらつくが、おおむね疲労寿命の25～50%程度であった。実験室における継手レベルの疲労試験結果と対比させ、通常、この板厚貫通を疲労破壊とみなすことが多いが、この時点を超えて過度に安全側の寿命評価となる可能性があるといえる。また、き裂が下フランジに到達するまでの繰返し回数は疲労寿命の約90%程度であった。

ここでは、鋼材の破壊じん性値が高い場合を想定し、き裂が安定的に成長すると仮定している。今後は、独自開発した破壊じん性試験システムを用いながら既設橋の破壊じん性値のばらつきを把握し、健全度判定のための限界き裂長の提示を行う。

<引用文献>

- 1) 国土交通省広報誌：国土交通，No.122，2013.
- 2) パルステック工業：μ-X360s，リーフレット.
- 3) 判治ら：構造工学論文集A，Vol.63，pp.646-658，2017.
- 4) 上田ら：溶接学会論文集，Vol.2，pp.97-104，1984.
- 5) 館石ら：土木学会論文集A1，Vol.67，No.2，pp.386-395，2011.
- 6) 向井ら：溶接学会論文集，Vol.5，No.2，pp.280-284，1987.
- 7) 三木ら：土木学会論文集A，Vol.66，No.4，pp.836-849，2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 荒川純, 判治剛, 舘石和雄, 清水優
2. 発表標題 低サイクル疲労き裂を起点とするぜい性破壊の発生可能性に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 益田裕太, 判治剛, 舘石和雄, 清水優
2. 発表標題 疲労き裂の進展に伴う面外ガセット溶接継手の残留応力再配分に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 益田裕太, 判治剛, 舘石和雄, 清水優
2. 発表標題 疲労き裂の進展に伴う溶接継手の残留応力再配分に関する実験的研究
3. 学会等名 土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室HP
<https://skyarch2.wixsite.com/nagoya-u>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------