

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：57102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04721

研究課題名（和文）繰返し負荷による破壊靱性低下の影響を考慮した溶接接合部の脆性破壊評価

研究課題名（英文）Brittle Fracture Assessment of Welded Connections Considering Deterioration of Fracture Toughness due to Cyclic Loading

研究代表者

岩下 勉（Iwashita, Tsutomu）

有明工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：10332090

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数の材料靱性において切欠き付鋼試験片の繰返し負荷による破壊実験および有限要素解析によって得た脆性破壊の予測指標の一つであるワイブル応力と破断サイクル数の関係を定量化した。その上で、溶接接合部から発生する脆性破壊によって決する累積塑性変形能力推定手法を提案し、その手法を欠陥を有する試験体に適用した。その結果、一部で予測結果と実験結果にばらつきがみられたものの、本手法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の脆性破壊予測手法では、繰返し負荷が脆性破壊に及ぼす影響を考慮する方法についてあまり触れられていない、あるいは、予みずみとしての取扱いになっており、実構造物に内在する欠陥に生じうる繰返し負荷の影響についてはほとんど論じられていなかった。本研究では、その点に着目し、脆性破壊の予測手法を示しており、脆性破壊予測を大きく前進させるものとなる。また、この種の脆性破壊の課題に真正面から向き合った研究は、近年特に少なく、南海トラフ巨大地震の可能性等が指摘されている状況において、本研究課題は社会的意義を持っていると考える。

研究成果の概要（英文）：This study quantifies the relationship between the Weibull stress (one of the predictive indices of brittle fracture) and the number of fracture cycles obtained from fracture experiments and finite element analysis of notched steel specimens under cyclic loading at several material toughnesses. A method for estimating the cumulative plastic deformation capacity determined by brittle fracture from welded joints was proposed, and the method was applied to specimens with defects. The results showed the validity of the method, although some discrepancies were observed between the predicted and experimental results.

研究分野：鋼構造

キーワード：脆性破壊 破壊靱性 繰返し負荷 ワイブル応力 破断サイクル数 累積疲労損傷度 欠陥

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

脆性破壊の予測・防止は耐震性確保のため重要な課題であり、兵庫県南部地震以降多くの研究により、脆性破壊防止の観点からは溶接条件の制限、溶接ディテールの改良、破壊靱性値確保など研究成果が挙げられている。その一方で、本研究の対象となる脆性破壊発生予測という点では、建築分野は先端を行っているとは言えず、造船や機械、金属材料といった分野で早くからこの課題に取り組みされており、破壊力学の手法を用いて脆性破壊の発生を評価する方法が開発されている。世界に目を向けると、脆性破壊の評価に関して、この30年の研究でワイブル応力やCTOD(き裂先端開口変位)設計曲線といった評価手法が提案され、IST methodologyやFITNETなど、国内ではWES 2808(日本溶接協会 2003)で反映されている。しかしながら、地震動による繰返し負荷の影響、特に、切欠きを内在した状況において繰返し負荷が作用した場合の脆性破壊の予測に関しては、適切に考慮されていないのが実状である。

2. 研究の目的

地震動を受ける鋼構造物において、溶接欠陥等の切欠きがある場合、その先端では圧縮・引張の繰返し負荷が生じることで破壊靱性が低下し、脆性破壊が生じやすくなる。しかし、既往の研究や脆性破壊評価手法では、繰返し負荷の影響を考慮しているものの、それらは予ひずみによる手法であり、実際の地震動により切欠きが内在した状況で加わる繰返し負荷とは異なっており、実際の切欠きを受ける破壊靱性の低下は考慮されていない。そこで本研究では、繰返し負荷が破壊靱性の低下に及ぼす影響を異なる破壊靱性レベルにおいて包括的に明らかにし、溶接接合部から発生する脆性破壊によって決する累積塑性変形能力の推定方法の確立を目的とした。

そのために本研究では、包括的な材料靱性レベルによる切欠き付鋼試験片の実験の実施、および、有限要素解析によって得られるワイブル応力を算出し、ワイブル応力と破断サイクル数の関係を定量化することで、繰返し負荷による破壊靱性の低下量を明らかにするとともに、溶接接合部から発生する脆性破壊予測手法の有効性を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、包括的靱性レベルでの切欠きを有する鋼試験片の繰返し破壊実験を行った。材料靱性を示すシャルピー衝撃試験結果を図1、および、図2に示す(H材:高靱性、M材:中靱性、L材:低靱性)。これら3つの異なる破壊靱性を用いて、さらに、それら材料を異なる温度で実験を行うことで、様々な破壊靱性レベルでの脆性破壊を再現することができる。

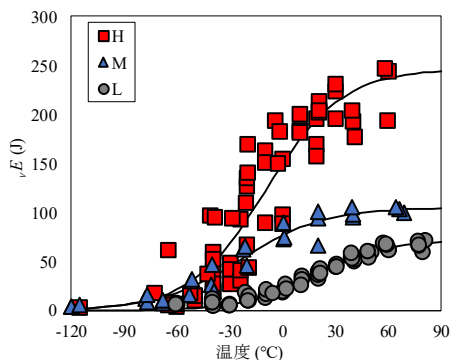


図1 シャルピー吸収エネルギー、 E -温度関係

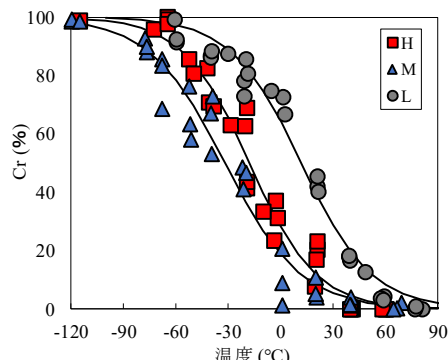


図2 脆性破面率 C_r -温度関係

切欠きを有する鋼試験片の繰返し破壊実験の試験片を図3、実験セットアップ状況を図4に示す。実験は脆性破壊予測のためのワイブル応力と破断サイクル数の関係を導くため、単調載荷、および、一定振幅繰返し載荷を行った。後者については、実際の欠陥や切欠きに作用する応力の大きさを検討できるように振幅の大きさを5種類程度設定し、脆性破壊のばらつきを考慮するため、1つの振幅に対して3~5体程度の実験を行った。また、得られたワイブル応力と破断サイクル数の関係から脆性破壊を予測する上で、その有効性を検討するた

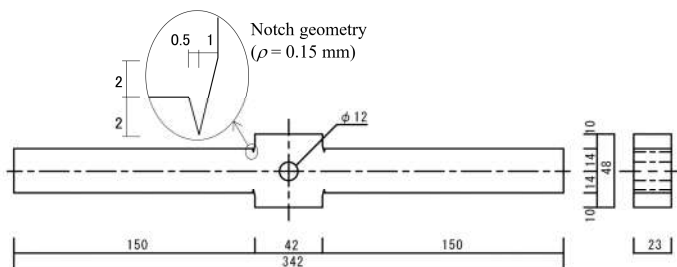


図3 切欠きを有する鋼試験片 Unit: mm

め、漸増振幅繰返し载荷による実験も行った。

脆性破壊を予測する上で、脆性破壊発生のクライテリアの 1 つであるワイブル応力を利用するが、これを算出するために、有限要素解析を行った。有限要素解析を用いることで切欠き周辺の応力状態を把握するとともに、実験結果を活用して脆性破壊が発生する限界ワイブル応力を得た。合わせて、試験片の各振幅時の作用ワイブル応力も有限要素解析により算出した。

以上の実験、および、有限要素解析から得られたデータを用いて、ワイブル応力と破断サイクル数の関係を定量化し、さらにマイナー則を活用して脆性破壊発生時の累積塑性変形能力推定手法を構築する。これにより、漸増振幅繰返し载荷のような複数の振幅を受けて脆性破壊が発生する試験体の累積塑性変形能力を推定することが可能になる。

さらに本研究では、この累積塑性変形能力推定手法の有効性を検証するため、過去に実施した欠陥を有する実大溶接継手モデル実験で発生した脆性破壊の結果 (Azuma, Iwashita et al., *Welding in the World* 2016, 岩下・東, 日本建築学会構造系論文集 2012, 他) に対して、本推定方法を適用することで、本手法の有効性を明らかにする。これらの継手モデルの試験体は図 5 に示す柱梁溶接接合部を対象としており、そこからダイアフラムと梁フランジのみを抜き出した部分継手試験体を製作した。試験体にはダイアフラムと梁フランジ溶接始末端部に欠陥を挿入し、欠陥から発生する脆性破壊を再現している。想定する欠陥の一例として、図 6 に表面欠陥を示す。その他、貫通欠陥や内部欠陥、欠陥ではないがスリットにより応力集中を生じるスチールタブを対象に試験体を製作し実験を行った。図 7、および、図 8 に 2 タイプの継手モデル試験体を示す。

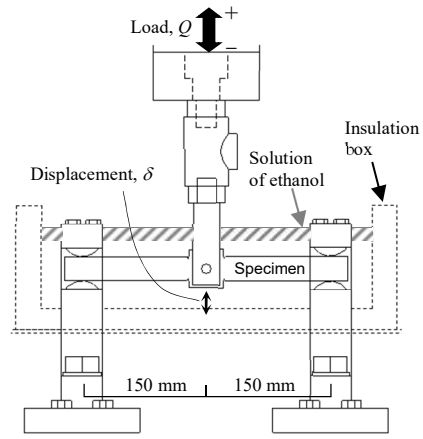


図 4 試験片セットアップ状況

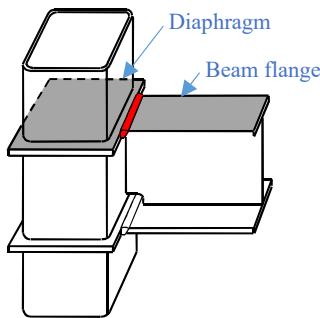


図 5 柱梁溶接接合部

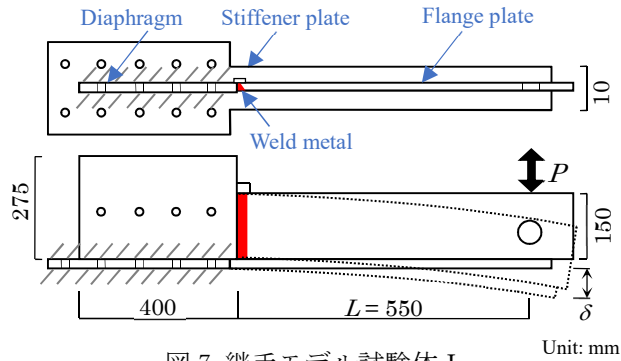


図 7 継手モデル試験体 I

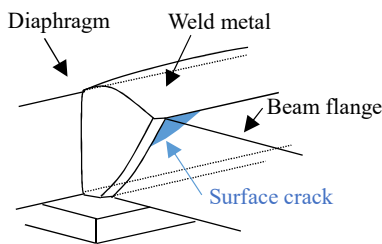


図 6 溶接欠陥の一例 (表面欠陥)

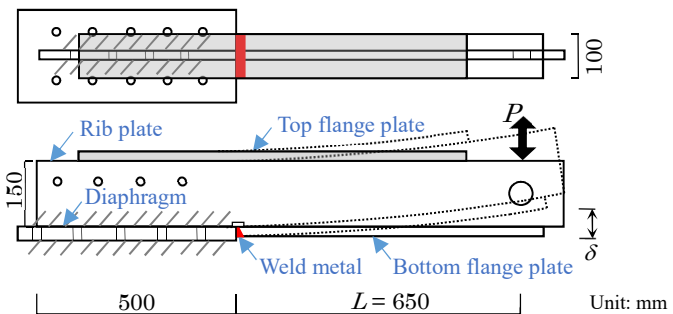


図 8 継手モデル試験体 II

4. 研究成果

図 9 に包括的靱性レベルにおいて、漸増振幅繰返し载荷を行った切欠きを有する鋼試験片の実験結果を示す。グラフ内の塗りつぶしのプロット点は脆性破壊発生した試験片を、白抜きのプロット点は延性破壊発生した試験片を示している。このことから、破壊靱性の指標となるシャルピー吸収エネルギー e と累積塑性変形能力 η には非常に強い相関が確認でき、破壊靱性から累積塑性変形能力を推定できる可能性が読み取れる。また、図 10 には材料靱性の指標にもなる脆性破面率と累積塑性変形能力の関係を示す。図より延性破壊と脆性破壊の境界 (脆性破面率 = 約 20 %) を把握することができた。

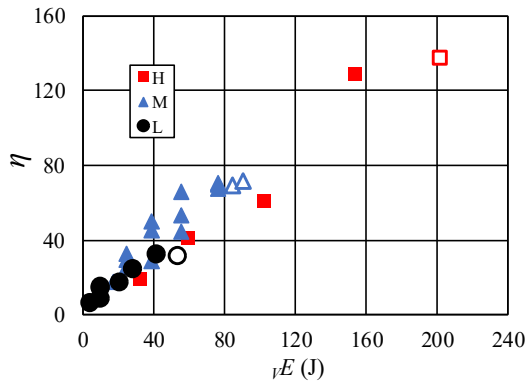


図9 η-VE 関係

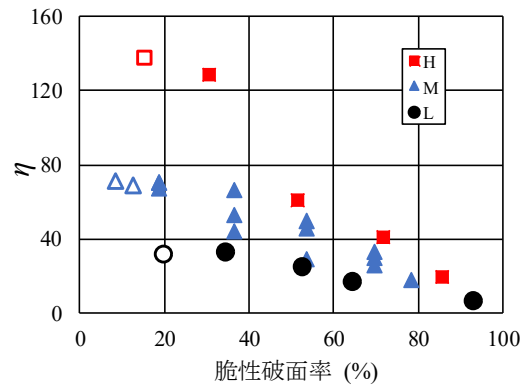


図10 η-脆性破面率関係

図11にはワイブル応力 σ_w と修正破断サイクル数 N_f の関係を示す。グラフから分かる通り σ_w と N_f の関係を定量化できたと考えられる。なお、縦軸は限界ワイブル応力 σ_{wC} で無次元化しており、得られた近似式を用いて、破壊靱性が異なる材料の N_f を算出できるため、複数の振幅を受ける試験体の累積塑性変形能力を推定することが可能となる。図12に漸増振幅繰返し载荷を行ったM材とL材の繰返し試験片の累積塑性変形能力推定結果を示す。 η_{ex} と η_{cal} の相関係数は、M材:0.949, L材:0.908 と両者とも高い値を示した。誤差についてみると、 η_{cal} / η_{ex} における最大値は、M材:1.41, L材:1.24, 最小値は、M材:0.864, L材:0.701であった。また、誤差の平均値はM材:1.02, L材:1.12であった。これらの結果から、ばらつきを伴うものの、脆性破壊した試験片の累積塑性変形能力を比較的精度よく予測できているといえる。

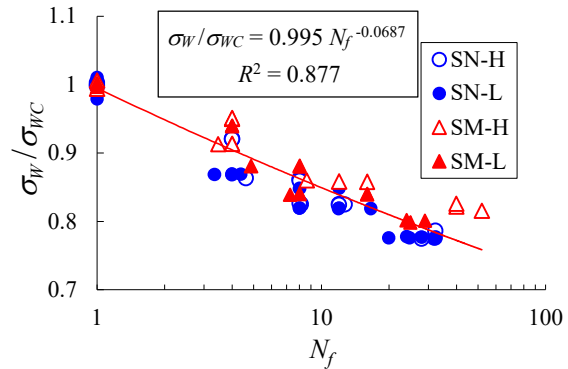


図11 ワイブル応力 σ_w -修正破断サイクル数 N_f 関係

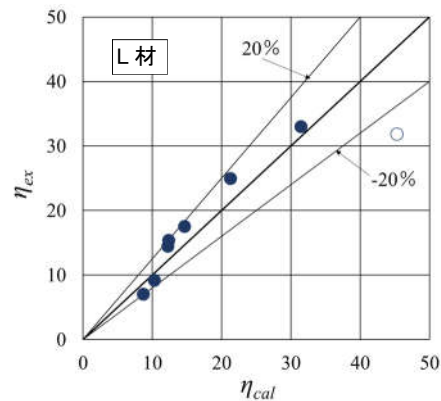
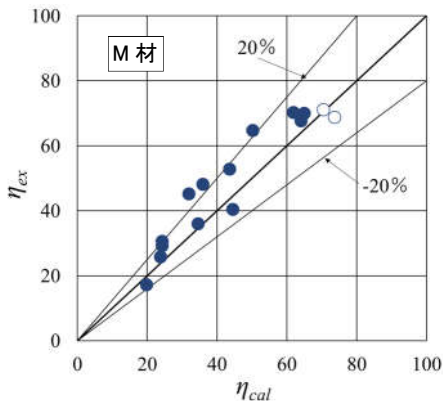


図12 累積塑性変形能力推定値結果 (η_{ex} : 実験値と η_{cal} : 推定値の関係)

提案する累積塑性変形能力推定手法を、欠陥を有する継手モデル試験体に適用した結果を図13に示す。これらは実際の溶接始末端部に存在する欠陥であり前述の通り、欠陥タイプも表面欠陥、貫通欠陥、内部欠陥、スチールタブ等を用意しており、試験体によって塑性拘束のレベルも異なっている。一部の推定結果にばらつきはみられるものの、一般に非常に大きなばらつきを有する脆性破壊において、推定値は実験値を比較的よく捉えており、本研究で提案した累積塑性変形能力推定手法の有効性がうかがえる。以上、本研究から得られた成果は、地震動により鋼構造溶接接合部に生じ得る欠陥や切欠き等から発生する脆性破壊の予測・防止につながると考えている。

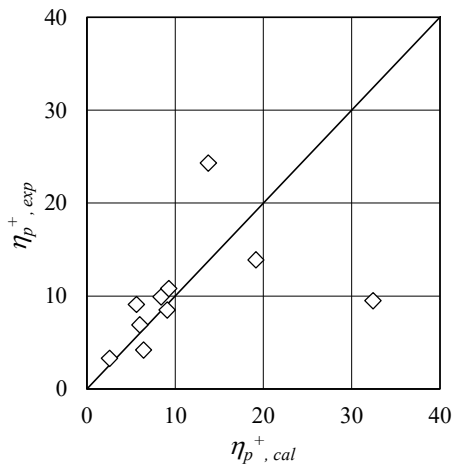


図13 継手モデル試験体の累積塑性変形能力推定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Iwashita, T., Hamasaki, M., Akahoshi, T., Azuma, K.	4. 巻 Vol.189
2. 論文標題 Brittle fracture estimation at ends of groove welded joints under cyclic loading	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Constructional Steel Research	6. 最初と最後の頁 Article 107055
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcsr.2021.107055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akahoshi, T., Azuma, K., Iwashita, T., Itatani, T.	4. 巻 Vol.2
2. 論文標題 Study on Establish a Brittle Fracture Prediction Considering Different Crack Opening Modes Using Mixed-Mode Ratio	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Mechanics	6. 最初と最後の頁 849-862
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/applmech2040049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 田島やよい, 岩下 勉, 江島 尚, 東 康二	4. 巻 第29巻
2. 論文標題 破壊靱性が異なる鋼試験片の脆性破壊発生時の累積塑性変形推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 240-247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 濱崎瑞生, 岩下 勉, 東 康二	4. 巻 第29巻
2. 論文標題 梁フランジ溶接止端における脆性破壊発生時の累積塑性変形推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 638-645
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩下 勉, 東 康二	4. 巻 第28巻
2. 論文標題 破壊靱性の異なる鋼試験片の切欠きから発生する脆性破壊予測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 974-981
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 瀨崎瑞生, 岩下 勉, 東 康二	4. 巻 第28巻
2. 論文標題 溶接欠陥から発生する脆性破壊のワイブル応力による予測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 460-468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Akahoshi T, Azuma, K., Iwashita, T., Ibe Y
2. 発表標題 Weibull stress approach considering a mixed-mode problem for prediction of brittle fracture from notches at the butt weld of the beam end
3. 学会等名 International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江島 尚, 岩下 勉, 赤星拓哉, 東 康二
2. 発表標題 シャルピー吸収エネルギーと3点曲げ試験における破壊靱性Jcの関係およびワイブル応力に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田島やよい, 岩下 勉, 東 康二
2. 発表標題 繰返し負荷を受ける切欠きを有する鋼試験片のJ積分値を用いた脆性破壊予測手法に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤星拓哉, 東 康二, 岩下 勉, 板谷俊臣
2. 発表標題 溶接始端部のき裂開口モードの違いが脆性破壊発生に及ぼす影響を捉えるための基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩下 勉, 濱崎瑞生, 赤星拓哉, 東 康二
2. 発表標題 溶接継手梁フランジ開先面の融合不良から発生する脆性破壊の予測に関する研究 その1 累積塑性変形能力推定方法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱崎瑞生, 岩下 勉, 赤星拓哉, 東 康二
2. 発表標題 フランジ開先面の融合不良から発生する脆性破壊の予測に関する研究 その2 繰返し載荷を受ける試験体の累積塑性変形能力推定方法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀨崎瑞生, 岩下 勉, 東 康二
2. 発表標題 溶接始末端部の欠陥から発生する脆性破壊の予測に関する研究 繰返し荷重を受ける試験体の塑性変形能力推定
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田島やよい, 岩下 勉, 東 康二
2. 発表標題 繰返し荷重を受ける切欠きを有する鋼試験片の脆性破壊に関する研究 温度変化による破壊靱性の違いが脆性破壊に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩下 勉, 東 康二
2. 発表標題 繰返し荷重を受ける切欠きを有する鋼試験片の塑性変形能力に関する研究 その6 破壊靱性および試験温度の違いによる検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀨崎瑞生, 岩下 勉, 東 康二
2. 発表標題 溶接始末端部の貫通欠陥から発生する脆性破壊の予測に関する研究 - ワイブル応力による検討 -
3. 学会等名 日本建築学会九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田郁哉, 岩下 勉, 東 康二
2. 発表標題 繰返し負荷を受ける切欠きを有する鋼試験片の脆性破壊発生に関する研究 - 破壊靱性の違いによる考察 -
3. 学会等名 日本建築学会九州支部
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	東 康二 (Azuma Koji) (80320414)	崇城大学・工学部・教授 (37401)	

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
---------	---------