

令和元年6月14日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06595

研究課題名(和文) 溶接欠陥に起因する脆性破壊に決定づけられる終局耐力の予測 - 接合部の品質管理基準

研究課題名(英文) Prediction of Ultimate Strength Determined by Brittle Fracture Initiating from Weld Defects - Quality Control Criterion of the Connections

研究代表者

東 康二 (AZUMA, Koji)

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：80320414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、鋼構造建物の溶接接合部における脆性破壊を防止するための欠陥の評価基準の策定である。欠陥形状・寸法と延性亀裂進展量の関係を調べるために、柱梁接合部をモデル化し、溶接ルートに沿って機械切欠きを挿入した試験体を用いて、欠陥から進展した延性亀裂を起因とする脆性破壊を再現する繰返し載荷実験を行った。Weibull応力を用いてき裂先端の塑性拘束の影響を考慮し破壊予測を行ったところ、塑性拘束の度合いによらず、破壊モーメントの予測値は実験を概ね捉えることができた。更に、スカラー位置からの破壊が確認されたため、一般に推奨されているスカラー挿入し、破断耐力に及ぼす影響を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

造船や溶接の分野では古くから脆性破壊に関する研究が行われており、材料強度学として一つの体系をなしている。塑性変形能力に期待する耐震設計において、最も避けたい破壊形式であるが、近年、建築分野ではこの種の研究が減少している。兵庫県南部地震直後には、鋼構造建物の柱梁接合部における脆性破壊が注目され、数多くの防止策の検討がなされ、破壊評価手法が策定されたが、延性き裂の影響を考慮したものは未だに確立されていない。今後、予想される巨大地震が発生する前に、この点を解決した評価方法を確立することは、建物の安全性を担保する上で、大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：This paper concerns the applicability of the Weibull stress approach for prediction of brittle fracture initiated at the root of welds. Beam-to-diaphragm joint models, which were designed to represent a connection of beam-to-column joint with through diaphragms, were tested under cyclic loads. The load was applied to the end of the cantilever by a hydraulic ram cyclically. Specimens had those discontinuities at the roots of welds to the diaphragm. Through cracks were installed on both sides of weld terminations. The prediction of brittle fracture with a variety of defect sizes by using the FE analysis was conducted. The applicability of the Weibull stress approach, comparing it with the applicability of the TSM approach, in predicting brittle fracture from such defects was verified. Furthermore, the effect that the shape of weld access hole gives to ultimate strength of specimens was examined, because the brittle fracture occurred from the toes of weld access hole of some specimens.

研究分野：建築構造

キーワード：脆性破壊 延性き裂 溶接欠陥 破壊靱性 塑性拘束 破壊評価 終局耐力 スカラー挿入

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国では、甚大な被害をもたらした兵庫県南部地震、東北地方太平洋沖地震を含め、毎年、大規模地震が頻発している。兵庫県南部地震以外では鉄骨建物の脆性破壊という重大な被害は報告されていないが、断層に起因する直下型地震は大都市圏でも発生する可能性は高く、これまでにない被害が予想される。兵庫県南部地震以降、溶接欠陥そのものを回避するための数多くの研究が行われ、その成果は実用化されているが、全ての鉄骨構造物から溶接を排除することは非経済的であり、現実的ではない。超音波探傷検査による欠陥の許容規準は存在するが、脆性破壊の発生は欠陥寸法・部位・形状に大きく依存し、検査では許容される微小欠陥から進展した延性き裂を起点として脆性破壊が発生した事例も報告されている。耐震補強が急がれる現在、的確に破壊の危険性を評価する手法の確立が急務である。

実構造物の欠陥から発生する脆性破壊の予測手法については、1980年代から破壊評価線図(FAD)が実用化されてきた。その後、原子力容器等の設計指針(R6)の改良を通してFADを拡張し、1999年に規格BS7910:1999が発表された。

我が国では、兵庫県南部地震の直後からCTOD設計曲線に基づく手法を拡張する研究が進められ、WES-2805:1997として公表された。その後、地震時にみられる動的繰返し大変形を考慮し、信頼性工学に基づき塑性拘束の影響を考慮する補正係数を組み入れ、適用範囲の拡大と評価精度の向上が図られたWES-2808:2003が公表された。更に、弾塑性破壊力学、破壊靱性評価法、信頼性工学の進歩を踏まえ、WES-2805:2007として全面改正が行われ、2011年まで改訂が進められている。

鋼構造柱梁接合部で最も破壊の起点となりやすい溶接始末端部では、ルート部に欠陥が生じやすく、接合部詳細と施工方法を改善する必要がある。始末端からの脆性破壊を再現するため、柱梁接合部を単純化し、始末端部に人工欠陥(溶込み不良、機械切欠き、疲労き裂)を挿入した試験体を用いた正負交番繰返し载荷実験を行ってきた。この一連の実験および有限要素(FE)解析を用いて、上記の手法の適用性を検討し、「き裂先端における塑性拘束が破壊靱性に及ぼす影響」および「延性き裂の進展のモデル化」の2つの問題点を明らかにした。

また、WES-2808の公表と同時期に、き裂先端の破壊駆動力と高応力領域の主応力分布に基づく、AndersonらのToughness Scaling Model(TSM)を応用し、塑性拘束の影響を考慮した改良FADを提案し、その有効性を確認したところ、塑性拘束の高い貫通欠陥に対しては的確に脆性破壊の発生を予測できることが分かった。ただし、ここでは延性き裂の進展は考慮していないため、延性き裂が大きく進展した試験体では安全側過ぎる評価となった。

上記の実験では、溶接始末端部の塑性拘束が高くなることを意図した試験体形状および载荷方法であったので、実在接合部に即した状況を再現するために、通しダイアフラム形式接合部をモデル化した組立H形試験体を製作した。欠陥はルート側或いは開先面側に溶込み不良を発生させたものと機械切欠きによる溶接止端部の表面欠陥である。いずれもき裂先端の塑性拘束は小さく、延性き裂が大きく進展する場合を想定した。実験の結果、延性き裂進展量と塑性拘束の度合いとの間には一定の相関が確認でき、解析による破壊予測では、ほぼ正確に脆性破壊の発生を予測できたが、欠陥先端の形状によっては、延性き裂の進展量が大きく異なり、ばらつきが見られた。即ち、TSMの手法では、き裂先端形状を考慮できず、評価にばらつきが出る事が示唆された。そこで別の手法としてWeibull応力を用いて塑性拘束の影響を考慮した破壊評価を行い、その有効性を確認した。一連の実験およびFE解析の結果、TSM同様、鋭敏な欠陥からの破壊は的確に予測できた。ただし、先端が鈍化した欠陥に対しては、破壊靱性の特定が難しく、その精度にばらつきを生じ、この手法の導入に課題が残った。

2. 研究の目的

本申請の目的は、これまでの研究成果を踏まえて脆性破壊の発生を的確に予測し、より正確に接合部の終局耐力を求める手法を確立することである。SENB試験による検討ではWeibull応力を用いて塑性拘束を考慮すれば、欠陥先端の形状によらず高い評価精度をもつことが示されている。これを踏まえ、1)破壊靱性試験とFE解析によって、破壊駆動力とき裂進展量の関係を明確にした。更に、2)先端が鈍化した様々な寸法・位置のき裂について実験・解析を進め、延性き裂進展量との相関を明確にした。これらを踏まえ、延性き裂進展後の塑性拘束を考慮した評価手法を提案し、き裂進展後の破壊パラメータと荷重の関係から終局耐力の推定した。

3. 研究の方法

(1)実験的研究

柱梁接合部において表面欠陥から進展した延性き裂を起因とする脆性破壊について、欠陥形状・寸法と延性き裂進展量の関係を調べるために、柱梁接合部をモデル化した試験体を用いて実験を行う。

試験体は通しダイアフラム形式柱梁接合部を単純化し、板厚32mmのダイアフラムに板厚25mmの梁フランジ端部を突合せ溶接した後、梁のウェブに相当する位置にリブプレートを溶接した組立H形の形状とした(図1参照)。なお、柱は溶接しないが、リブプレートの曲げモーメント負担を低減するためにスカルップを設けた。このような試験体を反力ブロックに固定し、梁ウェブ端部に繰返し载荷を行った(図2参照)。試験体のパラメータは、図3に示す予き裂位置、予き裂形状、予き裂深さとした。ワイヤーカットにより、き裂先端が鋭敏ではない

切欠き（き裂先端半径 0.15mm）を挿入した試験体を 4 体作成し，前年度の実験結果と比較、破壊性状を検証した。

また，兵庫県南部地震で露呈したスカラップ底からの脆性破壊について，建築工事標準仕様書（JASS6）で推奨されている接合部詳細，および，近年，日本の研究グループによって開発された改良型の詳細（フィレット残しと呼ぶ）を用いて試験体を 6 体製作し，繰返し載荷を行った。

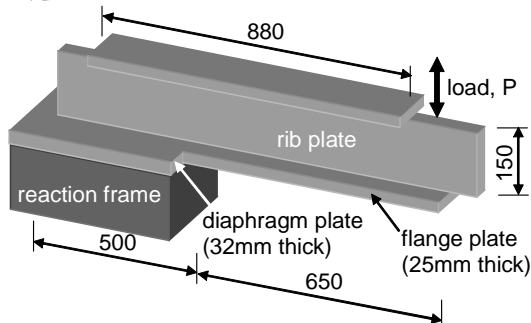


図 1 試験体

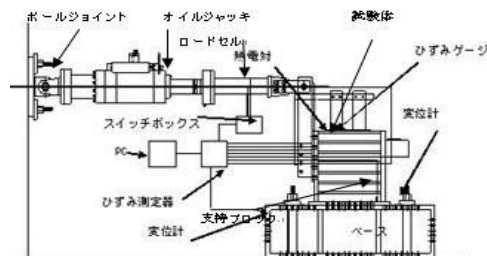


図 2 載荷装置

表 1 試験体概要

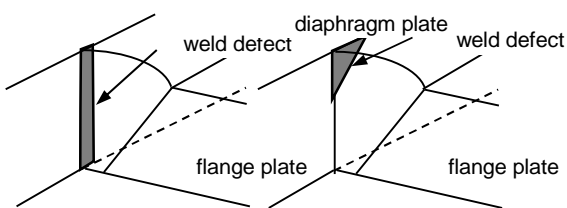


図 3 欠陥形状

試験体名	予き裂位置	予き裂タイプ	予き裂寸法	先端形状
DTC8W	D 側	貫通	8	W
DTC12W		貫通	12	
R35r10CF0	F 側	なし	-	-
R35r10CF6		なし	-	-

(2) 解析的研究

汎用プログラム ABAQUS(Ver. 6.14)を用いて本試験体及び SENB 試験片の非線形有限要素解析を行い，脆性破壊発生時の挙動を再現した．要素には von Mises の降伏条件に従う 8 節点低減積分要素を用い，ポアソン比は 0.3，硬化則は等方硬化則とした．き裂先端周囲の要素を円環状に配置し，最小要素寸法を 0.05mm とした．材料定義は引張試験結果を真応力-対数ひずみに置き換え，多直線近似して用いた．このモデルを用いて，き裂先端における破壊駆動力のパラメータ J 積分と塑性拘束の度合いを表す応力三軸度を求め，き裂進展量との相関を検討した．また，上記の塑性拘束を考慮する手法（TSM 及び Weibull 応力）を用いてき裂先端の破壊靱性を算出し，それらを元に終局耐力の予測を行った．

4. 研究成果

(1) 実験および解析結果

モデル化試験体では，材料の遷移温度から -45 にて実験を実施した．2 つの試験体とも引張側で切欠きを起因とする脆性破壊が発生し，破断に到った．

<DTC12W> 前年度の DTC4W の実験では脆性破壊は確認されなかったが，欠陥の深さが 4mm から 12mm になったことで欠陥先端にひずみが集中し脆性破壊に到った．

<DTC8W> 破壊評価では破断しないとされていたが破断に到った．DTC12W と比較すると欠陥の深さが浅く，ひずみ集中は小さく J 積分の伸びも小さいため脆性破壊の発生確率は低いとされていた．ただし，この試験体の方が変形能力が高い結果となった．

<R35r10CF0> 3 サイクルを超え 4 サイクル目で破断した．スカラップ底に幅約 5mm、深さ約 3mm の延性亀裂が見られ，脆性的に破断した．SAW の高入熱により低靱性領域となったポンド部にスカラップ底から発生した延性亀裂が重なり脆性破壊を誘発したと考えられる．

<R35r10CF6> 上記の試験体に比べ 1 サイクル増加し，5 サイクル目で破断した．幅約 35mm、深さ 5mm の延性亀裂が見られ，フランジの完全溶け込み溶接の端部から破断していた．低靱性の SAW の溶着金属がフランジ端部の完全溶け込み溶接により，再加熱を受け，材料靱性が改善されたため，上記の試験体以上の塑性変形能力を得られたと考えられる．

図 4 に実験の履歴曲線を例示すると共に，表 2 に代表的な実験結果をまとめる．

有限要素解析によりスカラップ底に内包される様々な欠陥をモデル化し，この手法の適用性を検証した．接合部試験体の終局耐力の予測では，精度よく予測が可能であることを示した．またこの手法を応用し，スカラップ形状の改良により，破壊時期を遅らせることが可能であることを解析的に示し，実験にてその改良が変形性能を飛躍的に向上させることを確認した．応力三軸度 T_3 -回転角 θ 関係では，フィレット残しあり(b)の場合は T_3 のピーク値から徐々に減少しているが，フィレット残しなし(c)の場合はほぼ真横に推移している．J- θ 関係でも J の最終

値が(c)の方が低く、(b)の6割ほどしかない。図7に示す最大主応力分布図では(b)の切り欠き先端にかかる応力が(c)に比べても高く、高応力領域が大きく広がっていることから、(c)は(b)よりき裂先端にかかる応力集中を軽減していることが分かる。



写真1 R35r10CF0の破断面

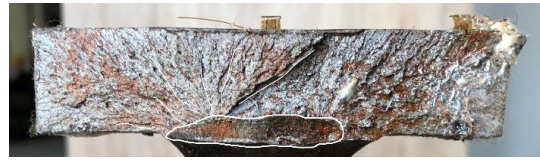
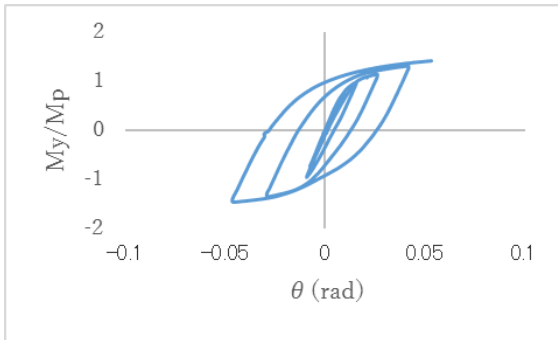
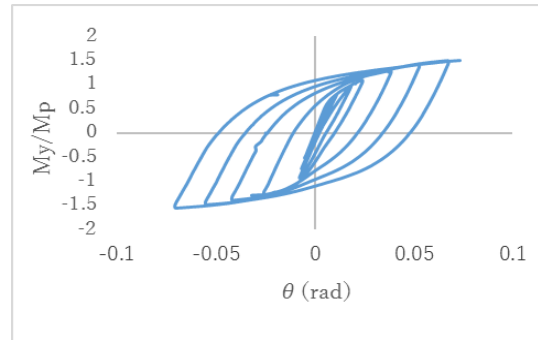


写真2 R35r10CF6の破断面



R35r10CF0



R35r10CF6

図4 履歴曲線例

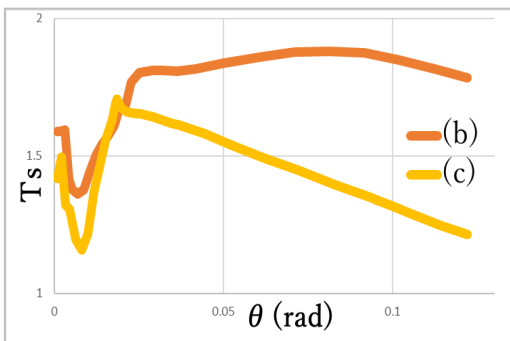


図5 Ts- 曲線(フィレット残しの有無)

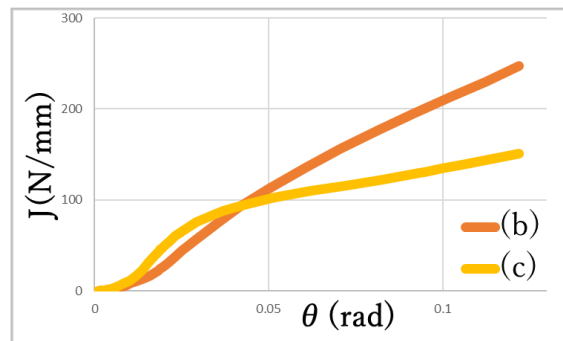


図6 J- 曲線(フィレット残しの有無)

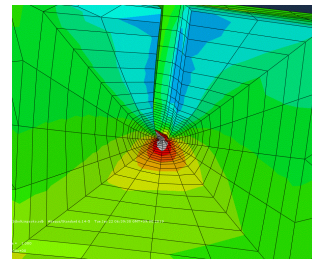
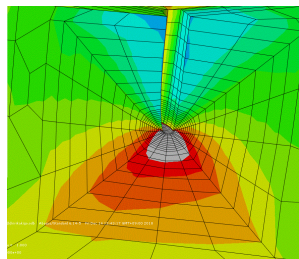


図7 最大主応力分布図(左側(b), 右側(c))

表2 実験結果例

Specimen	M_{max} (kNm)	θ_{max} (10^{-2} rad.)	M_{max}/M_p	η_+	d_{am} (mm)	d (mm)
DTC-8W	305.2	9.22	1.67	49.0	8.0	7.5
DTC-12W	291.4	10.1	1.60	46.8	12.0	9.4
R35r10CF0	250.8	6.33	1.42	11.8	0	3.9
R35r10CF6	265.9	7.32	1.49	30.4	0	5.0

(2) Toughness Scaling Model による破壊予測

異なる深さのき裂を持つ試験片では、き裂先端の高応力領域の広がりが等価となった場合に脆性破壊の発生確率が等しくなることが示されている。本研究では、最大主応力が降伏応力の3倍を超える領域を高応力領域とした SENB 試験片の J 値が J_c に達する際の高応力領域を求

め、高応力領域が同じ大きさになるまで試験体の変形を増加させる。このときの J 値を試験体の見かけ上の破壊靱性値 $appJ_c$ とした。破壊予測の結果を表 3 に示す。

塑性拘束の度合いに応じて破壊靱性値を割り増しすることで、異なる塑性拘束状態の試験体の破壊を予測できた。延性き裂が大きく進展した試験体に対しても高い精度の予測となったが、スカラップ底の仮想き裂 5mm に関しては安全側過ぎる結果を示した。

(3) Weibull による破壊予測

ワイブル応力 σ_w は次式に示すように、破壊に寄与する応力を脆性破壊のプロセスゾーンで積分することで定義される。

$$\sigma_w^m = \frac{1}{V_0} \int_{V_p} \sigma_{eff}^m dV \quad (1)$$

ここで V_0 は破壊基本体積、 V_p は破壊のプロセスゾーン、 σ_{eff} は有効応力、 m はワイブル形状係数を示す。ワイブル応力を用いるとき裂材の破壊確率 P_f は

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u} \right)^m \right] \quad (2)$$

で表される。 σ_u は材料定数であり、破壊確率が 63.2% となる際のワイブル応力である。本研究では V_0 に単位体積、 σ_{eff} に最大主応力を用い SENB 試験結果が(2)式に従うよう m 値を定め、 J 値が J_c となるとき σ_w を限界ワイブル応力 $\sigma_{w,cr}$ とした。 m 値は $m=18$ と推定した。破壊予測の結果を TSM の結果と併せて表 3 に示す。

いずれも TSM によるものよりもわずかに安全側の評価を与えている。これは、ワイブル応力算出のプロセスゾーンがき裂の存在する全断面であるのに対し、TSM による手法はき裂の中央部分のみを想定しているためと考えられる。しかし、スカラップ底のき裂については安全側過ぎる評価結果となり、更にフィレット残しありの試験体については TSM の場合と同様、破壊しない評価となった。

表 3 破壊予測結果

Specimen	Test	Weibull approach			TSM approach		
	M_{max} (kNm)	$\sigma_{w,cr}$ (N/mm)	M_{pre} (kNm)	M_{max}/M_{pre}	$appJ_c$ (N/mm)	M_{pre} (kNm)	M_{max}/M_{pre}
DTC-8W	305.2	1366	319.3	0.96	710.3	286.6	1.06
DTC-12W	291.4		307.2	1.00	712.2	284.7	1.01
R35r10CF0	250.8	1346	192.6	1.58	256.1	180.0	1.23
R35r10CF6	265.9		-	-	-	-	-

(4) まとめ

様々な予き裂に対し、TSM および限界ワイブル応力の脆性破壊予測に対する適用範囲を検証した。その結果、溶接止終端部に発生しやすい貫通欠陥を模した予き裂に対し、両手法ともばらつくことなく、精度の高い脆性破壊の予測値を与えた。予測の適用外となるものに関して、全て安全側の結果が出ている。塑性拘束の違いを考慮する方法として、実構造物で特に問題となる欠陥に対し、TSM および限界ワイブル応力は有効といえる。但し、スカラップ底の破壊評価については、安全側過ぎる評価結果となり今後の検証が必要である。以下に知見をまとめる。

- ・延性き裂の進展量と塑性変形能力に強い相関が見られた。
- ・TSM とワイブル応力は破壊予測の精度に同様の傾向を示し、2 つの予測手法に矛盾はない。
- ・フィレット残しは脆性破壊の防止に一定の効果が認められる。
- ・フィレット残しを使用することにより、塑性拘束が大きく緩和される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

Wang, J., Azuma, K., Iwashita, T., Itatani, T., Prediction of brittle fracture of at the Toes of Weld Access Hole of the welded I-section Beam End, Proceedings of The 29th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., ISOPE, Vol.4, 2019, 査読有

Jimbo, S., Azuma, K., Itatani, T., Nikaido, M., Prediction of Brittle Fracture at the Crack tips of Improved Weld Access Hole of Full-scale Beam-to-Column Assembly, Proceedings of The 29th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., ISOPE, Vol.4, 2019, 査読有

岩下 勉, 松田郁哉, 東 康二, 切欠きから延性き裂を伴って発生する脆性破壊の損傷度, 鋼構 造年次論文報告集, 2018, 査読有

Azuma, K., Akahoshi, T., Iwashita, T.: Itatani, T., Prediction of Brittle Fracture from Notches at the Toes of Butt Weld and Weld Access Hole of the Beam End, IIW Doc. XV-1571-18, pp.1-13, 2018, 査読有

伊山 潤, 松尾真太郎, 吉敷祥一, 石田孝徳, 東 康二, 城戸將江, 岩下 勉, 澤田樹一郎, 山田哲, 清家 剛:熊本地震で被災した鉄骨造文教施設の被害調査の概要,日本建築学会技術報告集, 24 巻, 56 号, pp.183-188, 2018, 査読有

Iwashita, T., Tateno, A., Azuma, K.: Cumulative damage of notched specimens with brittlefracture under cyclic loading, Proc. of The 16th ISTS, pp.373-379, 2017, 査読有

Iwashita, T., Azuma, K.: Effects of cyclic loading on brittle fracture in steel notched specimens with different fracture toughness, 14th ICF, 2017, 査読有

Iwashita, T., Azuma, K.: Effects of notch sharpness and depth on brittle fractures in single edge notched bend specimens, Engineering Fracture Mechanics, Vol.164, pp.60-73, 2016, 査読有

Azuma, K., Akahoshi, T., Iwashita, T., Prediction of brittle fracture from defects at groove face of complete joint penetration welded joints, Welding in the World, Vol.60, Issue 4, pp.757-766, 2016, 査読有

Iwashita, T., Azuma, K.: Effects of cyclic loading on occurrence of brittle fracture in notched specimens and comparison with Weibull stress approach, Proc. of The 11th PSSC, pp.1109-1115, 2016, 査読有

[学会発表](計 8 件)

松田郁哉, 岩下 勉, 東 康二, 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 -, 日本建築学会九州支部研究報告 第 58 号, pp.309-312, 2019

岩下 勉, 東 康二, 繰返し載荷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 5 ワイブル応力を用いた変形能力推定方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.925-926, 2018

小宮慎二, 岩下 勉, 東 康二, 繰返し載荷を受ける切り欠きを有する鋼試験片の脆性破壊予測に関する研究 - 異なる振幅を受ける試験片のワイブル応力および損傷度の検討 -, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 57 号, pp.325-328, 2018

島田恵豊, 岩下 勉, 東 康二, 切欠きを有する 3 点曲げ試験片における延性き裂進展のシミュレーションに関する研究 - ワイブル応力算出の検討 -, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 57 号, pp.329-332, 2018

岩下 勉, 小宮慎二, 立野 文, 東 康二, 繰返し載荷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 3 損傷度と延性き裂進展の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.821-822, 2017

小宮慎二, 岩下 勉, 東 康二, 繰返し載荷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 4 ワイブル応力による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017

立野文, 岩下 勉, 東 康二, 繰返し載荷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 1 実験方法および実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) 構造, pp.603-604, 2016

岩下 勉, 立野 文, 東 康二, 繰返し載荷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 2 塑性率振幅 破断サイクル関係と損傷度の考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) 構造, pp.605-606, 2016

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 岩下 勉

ローマ字氏名: IWASHITA Tsutomu

所属研究機関名: 有明工業高等専門学校

部局名: 創造工学科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 10332090

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、研究者個人に帰属されます。