

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02297

研究課題名（和文）鋼構造建築物の溶接接合部における合理的な欠陥評価法の構築

研究課題名（英文）Evaluation of weld defects in steel buildings

研究代表者

田中 剛（TANAKA, Tsuyoshi）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：90243328

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：鋼構造建築物の溶接接合部にとって、溶接欠陥は避けて通れない課題である。そのため、どの程度の欠陥ならば部材の構造性能を損なわずに許容できるかという規定値が必要となってくる。特に梁端フランジの完全溶込み溶接部の欠陥は、骨組の耐震性能に直結する。本研究では、欠陥寸法（高さ、長さ）、開先形状（外開先、内開先）およびH形梁の断面寸法（中型、大型）を実験因子とした合計30体の試験体の載荷実験を行うとともに、有限要素数値解析より得られた亀裂開口変位に基づく合理的な欠陥の合否判定基準を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、日本では溶接欠陥の合否判定に「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準（日本建築学会）」が用いられている。しかし、この規準は1973年に制定されたものであり、当時の建築基準法は、許容応力度設計に基づくものであったため、合理性を欠く面を有する。また、本研究で提示した合否判定基準は、構造実験および数値解析より得られた亀裂開口変位を基に、欠陥寸法および欠陥位置と溶接欠陥に起因する延性亀裂の進展を直接関連付けたものであり、鋼構造骨組の安全性の向上に役立つものである。

研究成果の概要（英文）：Weld defects are an unavoidable issue for welded joints in steel structural buildings. Therefore, a standard value is required for the degree of defects that can be tolerated without impairing the structural performance of the member. In particular, defects in full penetration welds of beam end flanges are directly related to the seismic performance of the frame. In this study, loading experiments were performed on a total of 30 specimens with experimental factors including defect size (height, length), groove shape (outer groove, inner groove), and cross-sectional size of H-beam (medium, large), and a rational defect acceptance criterion was proposed based on the crack opening displacement obtained by finite element numerical analyses.

研究分野：建築鋼構造

キーワード：溶接欠陥 梁端溶接接合部 欠陥寸法 塑性変形能力 亀裂進展 構造実験 有限要素数値解析 亀裂開口変位

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。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼構造建築物の梁端接合部は、大地震時に塑性化し、塑性ヒンジを形成することにより地震エネルギーを吸収することを期待する耐震設計が行われている。鋼構造建築物では、大地震時に苛酷な状態に置かれる接合部に溶接接合が必要となってくる。1995年兵庫県南部地震や2016年熊本地震では、溶接接合部の破断が生じている。すなわち、溶接接合部には、梁部材が十分塑性化するまで、破断してはいけないという高い施工品質が要求される。

一方、溶接欠陥は溶接接合にとって避けて通れない課題である。欠陥の無い溶接施工を目指すのは当然のことであるが、細心の注意を払っていても、欠陥を根絶することは不可能である。そのため、どの程度の欠陥ならば部材の構造性能を損なわずに許容できるかという規定値が必要となってくる。これには、「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準（日本建築学会）」（以下 UT 規準と表記）が国内に普及している。しかし、UT 規準が制定された 1973 年当時は、それ以前のリベット接合から現在の溶接接合および高力ボルト接合への技術革新が急激に起こっていた時代であり、UT 規準制定の主眼は、鉄骨製作工場における溶接施工レベルを確保することにあった。従って、UT 規準は、品質管理基準を判定とする基準（Quality Control Level -QC 判定基準）に留まっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、合理的なルールに基づいた検査規準を構築することである。欠陥の測定については、最近、建築構造の分野でも導入されつつあるフェーズドアレイ探傷の適用を試みる。フェーズドアレイ探傷では、従来の UT 探傷では困難であった欠陥高さの測定が精度良く測定できる可能性がある。合否判定の対象となる溶接欠陥が直接的に構造物の損傷につながるか否かを判定できる基準（Engineering Critical Assessment Level -ECA 判定基準）の構築を目指す。

合否判定基準を現行の UT 規準の QC 判定基準から ECA 判定基準に進化させることにより、多大な労力を要する溶接部の補修作業を合理的な判断に基づいて行うことができるようになる。さらに、既存建築物の耐震診断時のように、具体的な欠陥位置や当該溶接部に要求される構造性能が既知の場合に、補修の必要性の有無を判断できるようになる。

3. 研究の方法

(1) 構造実験

試験体は角形鋼管柱に通しダイアフラム形式により H 形断面梁を溶接接合した T 字形試験体である（図 1 参照）。実験因子は、欠陥寸法（長さ、高さ）、開先形状（外開先、内開先）および断面寸法（中型断面、大型断面）である。なお、外開先試験体は工場溶接形式を、内開先試験体は現場溶接形式の下フランジ溶接部を対象としている。また、断面寸法は、スケールエフェクトを確認することを目的としており、大型断面と中型断面の寸法比は約 1.6 である。

中型断面試験体では、柱に冷間ロール成形角形鋼管（□-350x350x16 (BCR295)）、梁に H 形鋼（RH-500x200x10x16 (SN490B)）および通しダイアフラムに PL-22 (SN490C) を用いた。大型断面試験体では、柱に冷間プレス成形角形鋼管（□-550x550x25 (BCP325)）、梁に H 形鋼（RH-800x300x16x28 (SN490B)）および通しダイアフラムに PL-36 (SN490C) を用いた。

梁フランジとダイアフラムの完全溶込み溶接は半自動 CO₂ ガスシールドアーク溶接 (YGW11) により行った。溶接始末端部の処理には L 形固形エンドタブを用いた。図 2 に示すように、梁フランジ開先内端部に鋼片（5mm 厚）を設置した上で溶接を行い、溶接初層位置に人工的な溶込み不良を設けた。開先形状は両フランジで同一とし、1 試験体あたり両フランジ溶接部の始末端 4 か所に人工欠陥を設けた。

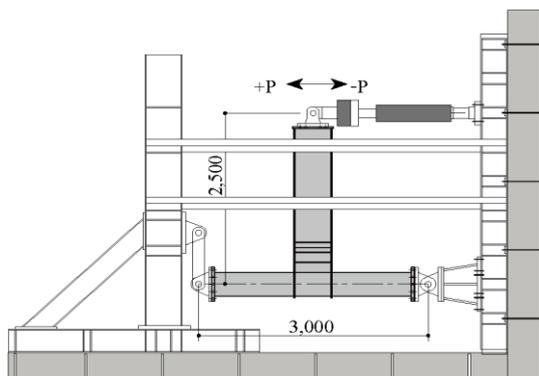


図 1 試験体および荷重装置（中型断面）

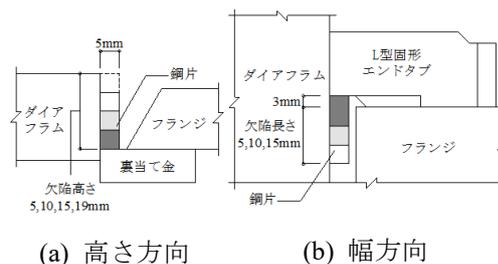


図 2 溶接欠陥（中型断面）

載荷実験に先立って、UT 法および PAUT 法による検査を行い、挿入した欠陥寸法を測定した。PAUT 法の探触子には、5MHz・16 素子のものを用いた。測定値と載荷実験後の破面の観察より得られた欠陥高さの実測値との関係を図 5 に示す。

載荷は、図 1 に示すように柱の一端をピン治具に、他端をローラ治具に接合し、梁先端に取り付けた油圧ジャッキにより行う。一定振幅の正負交番繰返し載荷とし、変位振幅は梁の全塑性モーメント M_p に対する弾性相対回転角 θ_p を基準に $\pm 3\theta_p$ で破断が生じるまで継続した。実験中において、サイクル毎に目視で亀裂の発生および進展状況を確認し、定規で亀裂長さを計測した。

(2) 有限要素数値解析

溶接欠陥が、亀裂の進展状況に与える影響を把握する目的で、有限要素数値解析を行った。実験に供した試験体に基づき作成した有限要素モデルを図 3 に示す。解析モデルは、図 3(a) に示すように柱梁接合部近傍にはソリッド要素を用い、その他の柱部材および梁部材には線材要素を用いた 1/2 モデルである。図 3(b) に溶接部の詳細図を示す。溶接始末端部のメッシュサイズは、1.0mm×1.0mm×1.0mm 程度とした。

端部欠陥を対象として、開先形状と欠陥位置の関係が欠陥の亀裂開口変位 COD に及ぼす影響を検討するために、図 3(c) に示すように溶込み不良をスリットにより表現したモデルを作成した。スリットの幅は 0.1mm とし、試験体に対応させた解析モデルを作成した。なお、欠陥の高さおよび長さについては、破断の起因となった部分の欠陥寸法の実測値を二捨三入して 0.5mm 刻みでモデル化している。ただし、破面から実測値を計測できなかった試験体については、PAUT 法の計測結果から同様に 0.5mm 刻みで欠陥寸法を定めている。

解析には汎用非線形構造解析プログラム ABAQUS(Version 2019)および Midas FEANX(v340)を使用しており、両者の解析結果が一致していることを確認している。載荷は一方向単調載荷とし、塑性域における構成方程式は、von Mises の降伏条件、連合流れ則および等方硬化則に従うものとした。材料特性には、引張試験より得られている公称応力-公称歪関係を真応力-真歪関係に換算した後、多直線近似したのものを用いた。

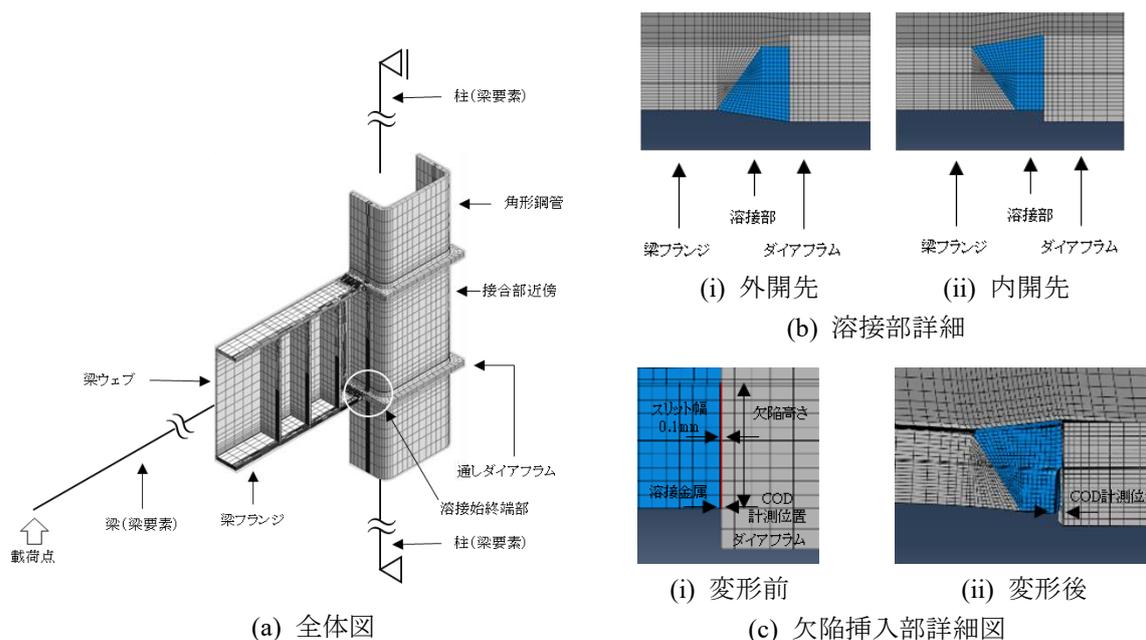


図 3 解析モデル

4. 研究成果

(1) 実験結果

図 4 に荷重-変形関係の例を、図 5 に実験経過の例を示す。図 6 に全試験体の初亀裂発生時、亀裂の板厚貫通時および破断時の累積塑性変形倍率 η を示す。各時点の累積塑性変形倍率は、欠陥高さの増加に伴い、小さくなる傾向がある。亀裂の板厚貫通時に着目すると、開先形状および梁の断面寸法に関係なく、欠陥高さがフランジ板厚の 50%を超えると、板厚貫通時の累積塑性変形倍率は、無欠陥試験体の半分以下となっている。また、亀裂の板厚貫通時から最終破断までの累積塑性変形倍率は、大型断面の値が中型断面の値よりも小さく、寸法効果の影響が伺える。

(2) 数値解析結果

数値解析より得られた荷重変形関係と実験より得られた+1 サイクル目の荷重変形関係を比較して図 7 に示す。解析結果は、実験結果を概ね評価できている。亀裂開口変位 COD と梁変形との関係を図 8 に示す。

欠陥高さが高くなるほど COD は大きくなる。また、欠陥寸法が同程度の場合には、外開先に比べて内開先の方が COD は大きくなる。

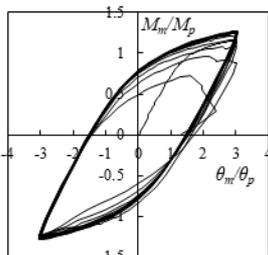


図4 荷重変形関係の例



(i) 亀裂貫通



(ii) 破断

図5 実験経過の例

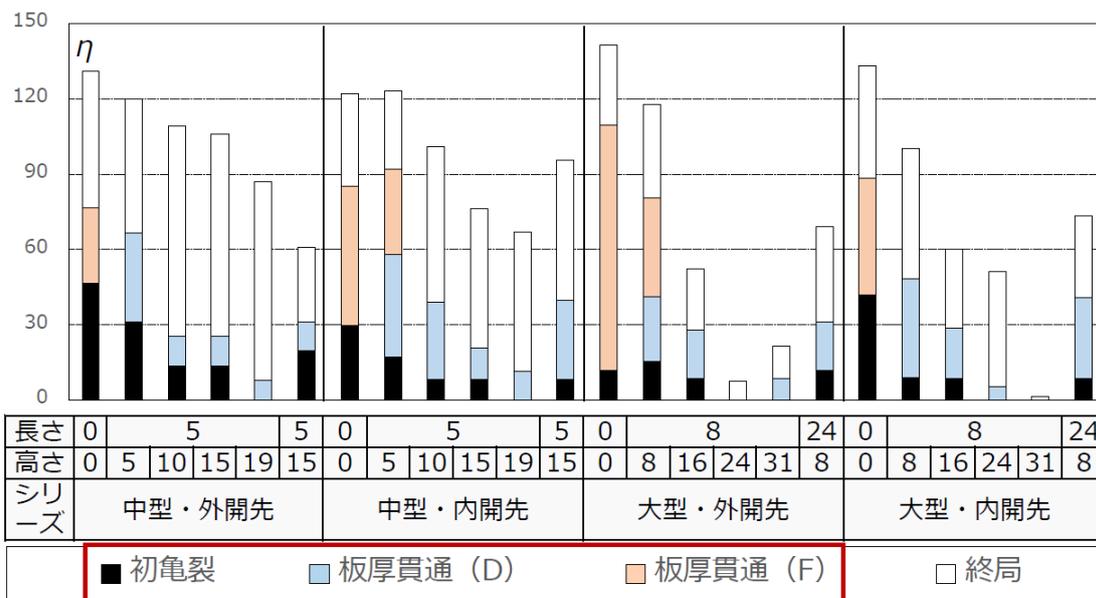


図6 累積塑性変形倍率

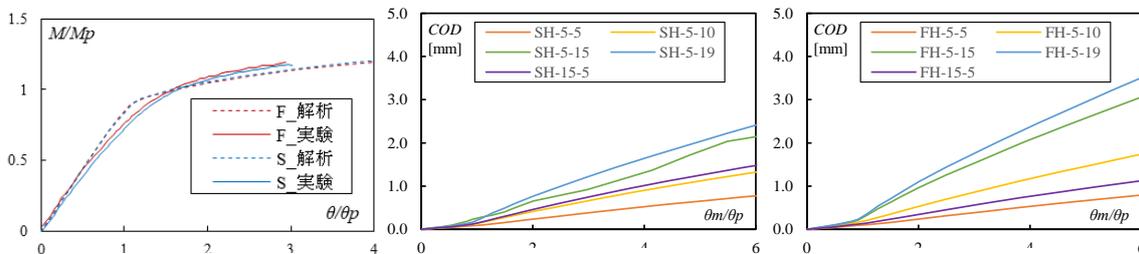


図7 荷重変形関係

(i) 中型断面・外開先

(ii) 中型断面・内開先

図8 COD—梁変形関係

(3) 合否判定基準

実験時の最大変形角 $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD を抽出し、板厚貫通時の η (実験値) と変形角 $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD (解析値) の関係を図9に示す。

合否判定基準を設定するにあたって、部材の塑性変形能力の限界値を定義する必要がある。文献①において、長周期地震動による多数回繰返し塑性変形を梁端接合部が受けた場合の延性破断に関する耐震安全性を評価するために、梁端接合部を対象とする塑性域での一定振幅多数回繰返し加力実験のデータが収集され、破断までの繰返し数 N_f と梁の塑性率 μ の関係が分析されている。本実験では、塑性率 $\mu=3$ の载荷であるため、破断までの繰返し回数 N_f は 5.83 回となり、 η を算定すると $\eta \approx 35$ となる。図9に $\eta=35$ の破線を示す。 η と COD 関係を近似曲線にて評価した場合、 $\eta=35$ と近似曲線の交点は $COD=0.63\text{mm}$ となる。図中の破断寿命 $\eta=35$ を下回るサイクル数で亀裂の板厚貫通が生じた場合、すなわち $COD > 0.63\text{mm}$ の範囲では、材料の靱性が低いと脆性破断する可能性がある。

亀裂が板厚を貫通するサイクル数が、破断寿命 $\eta=35$ を十分上回る評価ができる基準値とし

て、0.63mm に対して、余裕を持って、COD の値 0.5mm (以下、限界 COD) を提案する。

外開先 (SH) および内開先 (FH) の限界 COD 時の欠陥長さ と欠陥高さの関係を図 10 に示す。欠陥長さ と欠陥高さによりプロットした点が各曲線の原点側に位置するときは、溶接欠陥に伴う早期破断は生じないと考えられる。外開先 (SH) と内開先 (FH) の曲線を比較すると、内開先 (FH) の方が溶接欠陥の影響が大きいため、内開先 (FH) の方が欠陥寸法の境界値が小さい。外開先 (SH) において、欠陥長さ 5mm の境界値は欠陥高さ 8mm、欠陥高さ 5mm の境界値は欠陥長さ 17mm であり、欠陥高さによる影響が大きいことは実験結果とも一致する。内開先 (FH) でも同様の傾向となる。

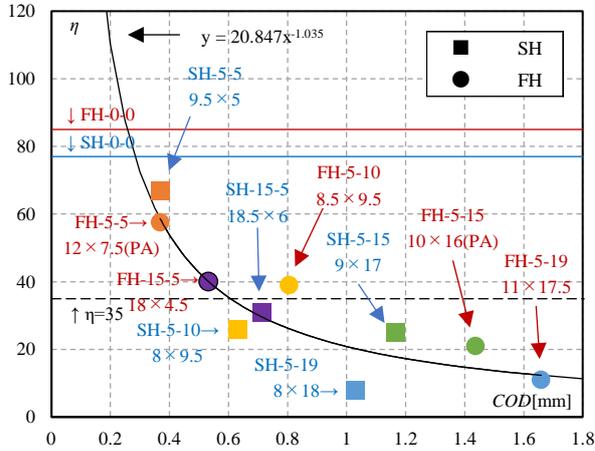


図 9 η (板厚貫通時) - COD 関係

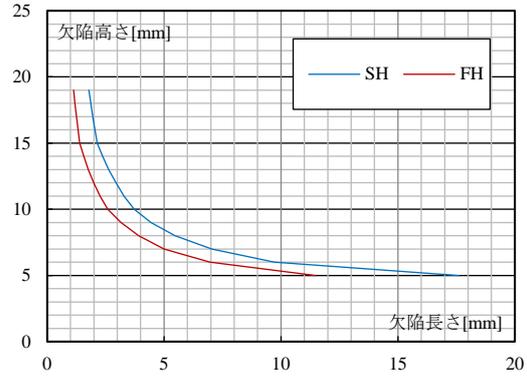


図 10 限界 COD 時の欠陥寸法

<引用文献>

- ① 日本鋼構造協会：長周期地震動に対する鉄骨造梁端接合部の安全性検証方法，2016

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 上田 遼, 田中 剛, 山本 涼, 畔上 進, 塚大 空哉	4. 巻 第89巻第823号
2. 論文標題 溶接欠陥を有するH形断面梁の塑性変形能力 その1 - 開先形状が変形能力および亀裂進展に及ぼす影響 -	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系 論文集	6. 最初と最後の頁 発表確定
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 田中 剛	4. 巻 第71巻第2号
2. 論文標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 - 工場溶接形式の場合 -	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 溶接技術	6. 最初と最後の頁 73-77
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 無
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14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田原 侑季, 高塚 康平, 田中 剛, 上田 遼, 西澤 淳, 塚大 空哉
2. 発表標題 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 - その4 大型断面・現場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験 -
3. 学会等名 令和6年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松本 優大, 田中 剛, 上田 遼, 山本 涼, 西澤 淳, 塚大 空哉
2. 発表標題 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 - その5 中型断面を対象とした有限要素数値解析 -
3. 学会等名 令和6年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 上田 遼, 高塚 康平, 田原 侑季, 田中 剛, 西澤 淳, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その7: 大型断面梁; 開先の向きを因子とした載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田原 侑季, 高塚 康平, 田中 剛, 上田 遼, 西澤 淳, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その8: 大型断面梁; 開先の向きを因子とした場合の亀裂進展状況および変形能力
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松本 優大, 田中 剛, 上田 遼, 西澤 淳, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その9: 中型断面梁; 欠陥高さを因子とした有限要素数値解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山本 涼, 田中 剛, 上田 遼, 畔上 進, 的場 耕, 塚大 空哉
2. 発表標題 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 - その2 現場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験 -
3. 学会等名 令和5年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田原 侑季, 高塚 康平, 田中 剛, 上田 遼, 畔上 進, 塚大 空哉
2. 発表標題 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 - その3 大型断面・工場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験 -
3. 学会等名 令和5年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上田 遼, 田中 剛, 山本 涼, 畔上 進, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その3: 現場 溶接形式; 欠陥高さを因子とした載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本 涼, 田中 剛, 上田 遼, 畔上 進, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その4: 現場溶接形式; 亀裂進展状況および塑性変形能力
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高塚 康平, 田原 侑季, 田中 剛, 上田 遼, 畔上 進, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その5: 梁断面寸法を因子とした載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田原 侑季, 高塚 康平, 田中 剛, 上田 遼, 畔上 進, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その6: 梁断面寸法を因子とした場合の亀裂進展状況および変形能力
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田 涼太, 田中 剛, 上田 遼, 山本 涼, 畔上 進, 的場 耕, 塚大 空哉
2. 発表標題 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 - その1 工場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験 -
3. 学会等名 令和4年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本 涼, 田中 剛, 上田 遼, 前田 涼太, 畔上 進, 的場 耕, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 - その1: 工場溶接形式; 欠陥高さを因子とした載荷実験 -
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田 涼太, 田中 剛, 上田 遼, 山本 涼, 畔上 進, 的場 耕, 塚大 空哉
2. 発表標題 H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 - その2: 工場溶接形式; 亀裂進展 状況および塑性変形能力 -
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)
4. 発表年 2022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	浅田 勇人 (Asada Hayato) (70620798)	芝浦工業大学・建築学部・准教授 (32619)	
研究分担者	高塚 康平 (Takatsuka Kouhei) (90758351)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	多賀 謙蔵 (Taga Kenzo) (40578259)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	2022年3月 神戸大学退職

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