

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560673

研究課題名(和文) 鋼構造接合部の破壊に影響を与える多様な溶接欠陥の定量的評価方法の確立

研究課題名(英文) Influence of Various Weld Defects of Weld Connections on Plastic Deformation Capacity of Steel Flexural Members

研究代表者

田中 剛 (TANAKA, TSUYOSHI)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90243328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：鉄骨造建物の溶接接合部を対象として、溶接欠陥が部材の塑性変形能力に与える影響を、欠陥位置、欠陥長さ、欠陥高さ、開先形状および溶接部強度を因子とした載荷実験および有限要素数値解析により検討した。

H形断面梁のフランジの完全溶込み溶接について、外開先初層の端部欠陥が梁の塑性変形能力に与える影響は小さいが、内開先初層の端部欠陥は、梁の塑性変形能力を大きく低下させることを明らかにした。また、角形鋼管柱の完全溶込み溶接のコーナー部の溶接欠陥について、表層欠陥は初層欠陥に比べて破壊に対して敏感に作用することを明らかにした。また、数値解析より、欠陥の影響は亀裂開口変位と密接な関係があることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study discusses the influence of various weld defects of weld connections on plastic deformation capacity of steel members used for moment frames.

In application of ceramic end tabs for beam flange weld in beam-to-column welded connection, the defect of penetration is often observed at the start and the end points of the weld first pass. Tests on sub-assemblies were carried out to clarify the influence of the location of defect, the length of defect, welding type (shop welding or field welding) and the strength of weld metal. When square hollow section columns are welded to through diaphragms, the defect of penetration is often observed at column corner. Tests were carried out to clarify the influence of the location of defect, the height of defect and the loading direction (0 degree or 45 degree). For the purpose of examining the strain concentration at the beam end or column end, the numerical analyses were carried out by using the general finite element program.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鋼構造 溶接欠陥 実大実験 梁端接合部 柱端接合部 塑性変形能力 有限要素数値解析 亀裂開口変位

1. 研究開始当初の背景

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）が国内に普及しており、可否の判定には、「エコー高さ」と「欠陥評価長さ」が用いられている。例えば、板厚 25mm の完全溶込み溶接部を斜角一掃触子法により超音波探傷試験した場合、「エコー高さ」が領域Ⅲで「欠陥評価長さ」が 25mm 未満ならば合格となり、25mm 以上ならば不合格になるという具合である。この UT 規準が国内の鋼構造建築の溶接接合部の品質管理に果たしてきた役割は非常に大きく、鋼構造建築の安全性を陰で支えてきたと言っても過言ではない。

一方、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。また、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、溶接部に作用する応力の種類を「引張応力が作用する溶接部」、「引張応力が作用しない溶接部」および「疲労を考慮する溶接部」の 3 つに区分しただけで、接合部の重要度を考慮したものにはなっておらず、ほぼ全ての溶接部が一律に「引張応力が作用する溶接部」として扱われているのが現状である。従って、現行建築基準法の 2 次設計において保有耐力接合が要求される接合部、すなわち大地震時において降伏ヒンジを形成する梁端溶接部でも、弾性域に留まる柱継手の溶接部でも、溶接欠陥に関しては同じ規定値が用いられるという合理性を欠いた状態のまま現在に至っている。

溶接欠陥の新たな可否判定基準として、現行の溶接部の品質管理に主眼を置く基準に加えて、接合部の重要度、欠陥位置および欠陥形状に応じた力学的合理性を備えた欠陥評価方法を確立することが、健全な鋼構造建築の発展にとって必要不可欠である。

2. 研究の目的

鋼構造建築の溶接部に生じる溶接欠陥の合理的な欠陥評価方法を確立するためには、実験資料の蓄積が不可欠となる。対象とする接合部は、梁端溶接接合部、柱端溶接接合部である。また、得られた実験結果を普遍化するためには、有限要素数値解析を用いた破壊力学的な検討および接合部に要求される構造性能の把握が必要となる。そのために、以下の課題を設定してこれらを明らかにする研究を遂行する。

- 1) 溶接欠陥が接合部の構造性能に与える影響を把握するための実大構造実験
- 2) 溶接欠陥と接合部の破壊との関係を定量化するための有限要素数値解析

3. 研究の方法

(1) 実大実験

① 梁端溶接接合部

近年多用されている固形エンドタブ工法では、初層の溶接始末端に溶込み不良が発生しやすいことが指摘されている。特に、現場溶接形式では、下フランジの開先形状が内開先となるため、溶接初層の欠陥が最も不利な梁フランジ外面に位置することになる。

平成 23 年度では、現場溶接形式の梁端溶接接合部を対象として、欠陥長さおよび溶接部強度が溶接部の破壊に与える影響を 4 体の実大 T 字形実験に基づき検討した。

試験体の形状および寸法を図 1 に示す。試験体は、通しダイアフラム形式により角形鋼管柱と H 形断面梁を溶接接合した T 字形部分架構である。柱は冷間ロール成形角形鋼管（□-350×350×16(BCR295)）、梁は H 形鋼（RH-500x200x10x16(SN490B)）である。

開先形状は図 2 に示す内開先であり、図 3 に示すように溶接初層にダイアフラムおよび L 形固形エンドタブ（異幅 3mm）に接して欠陥ピース（鋼片：5mm×5mm）を設置した上で溶接することにより、人工的な溶込み不良を挿入した。溶接欠陥の長さは、両端部に 5mm、10mm および 15mm の長さの溶接欠陥を挿入した。比較のため、無欠陥の試験体も用意した。

荷重は、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。荷重は正負漸増交番繰返し荷重とし、変位振幅は

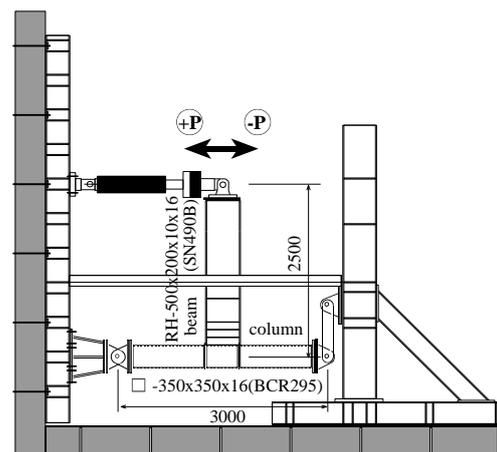


図 1 試験体および荷重装置

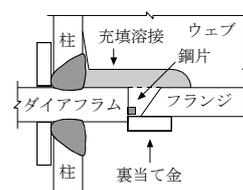


図 2 開先形状

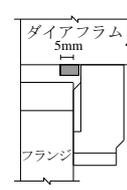


図 3 欠陥の挿入

梁の全塑性モーメント M_p に対応する弾性相対回転角 θ_p を基準に $20p$ および $40p$ の各変位振幅で各 2 回ずつ行い、その後、 $60p$ の変位振幅で破壊が生じるまで繰り返す。

② 柱端溶接接合部

鋼構造骨組の柱端溶接接合部は、破断した場合に建物の倒壊に直結するため、非常に重要な接合部である。一方、角形鋼管柱や円形鋼管柱の溶接部の初層に欠陥が検出された場合、補修に多大な労力を費やすことになる。

平成 24 年度および 25 年度では、柱端溶接接合部を対象とした 10 体の実大片持ち柱実験を行い、荷重方向、欠陥位置および欠陥高さが溶接部の破壊に与える影響について検討した。

試験体形状を図 4 に示す。試験体は通しダイアフラムと角形鋼管柱の完全溶込み溶接部を対象とした片持ち柱である。柱は冷間プレス成形角形鋼管 (\square -300x300x19 (BCP325)) または冷間ロール成形角形鋼管 (\square -300x300x19 (BCR295))、通しダイアフラムは PL-19 (SN490B) を用いた。

実験因子は、荷重方向、欠陥位置および欠陥高さである。欠陥挿入の例を表 1 に示す。荷重方向は、0 度方向および 45 度方向であり、欠陥位置は、溶接部の内面側 (初層) または外面側 (表層) である。欠陥高さは、5mm、10mm および 15mm である。欠陥挿入位置は、0 度方向では、コーナー R 部 4 ヶ所とし、45 度方向では、コーナー R 部 2 ヶ所とした。

角形鋼管柱とダイアフラムの完全溶込み溶接は、ロボット溶接 (YGW11) により行った。なお、鋼管側溶接止端位置における歪集中を緩和させる目的で、グラインダ処理を施し止端形状を滑らかにした。

冷間プレス成形角形鋼管のシャルピー衝撃試験より得られた 0°C でのシャルピー吸収エネルギー vE_0 は、鋼管平板部で $vE_0=183(\text{J})$ 、鋼管コーナー R 部で $vE_0=144(\text{J})$ 、溶接部で $vE_0=117(\text{J})$ であった。冷間ロール成形角形鋼管のシャルピー衝撃試験より得られた 0°C でのシャルピー吸収エネルギー vE_0 は、鋼管平板部で $vE_0=266(\text{J})$ 、溶接部で $vE_0=147(\text{J})$ であった。

荷重は、図 4 に示すように柱の下端を治具に緊結し、上端に取り付けた油圧ジャッキにより行う。荷重は正負漸増交番繰返し荷重とし、変位振幅は柱の全塑性モーメント M_p に対応する弾性相対回転角 θ_p を基準に $20p$ 、 $40p$ および $60p$ の各変位振幅で各 2 回ずつ行い、その後、 $80p$ の変位振幅で破壊が生じるか、または、最大荷重の 90% に荷重が低下するまで繰り返す。

(2) 有限要素数値解析

溶接部の歪性状を検討するために、試験体に基づき図 5 に示す解析モデルを作成した。解析には汎用非線形構造解析プログラム ABAQUS (Version 6.4) を使用した。荷重は一方向単調荷重とし、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た公称応力-公称歪関係を真応力-真歪関係に換算した後、多直線近似したものを用いた。

4. 研究成果

(1) 実大実験

① 梁端溶接接合部

梁端モーメント M と梁の相対回転角 θ との関係を図 6 示す。実験経過を以下に示す。

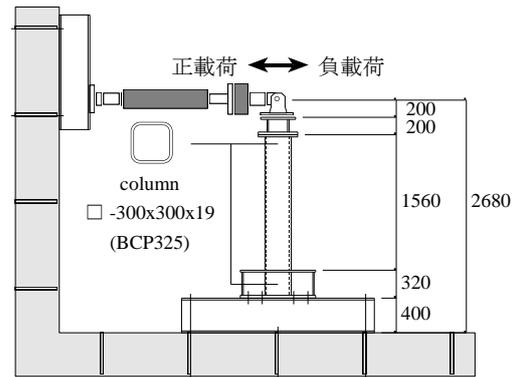
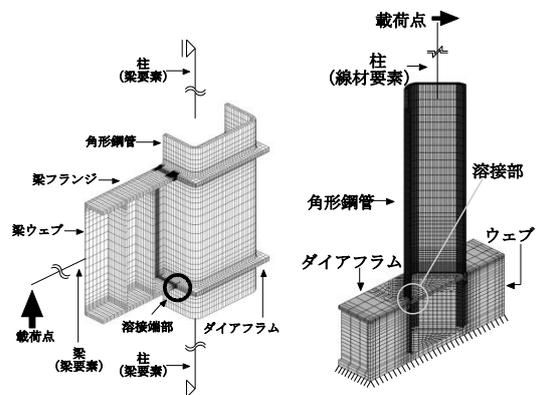


図 4 試験体および荷重装置

表 1 試験体および荷重装置

試験体	平面図	コーナー拡大図	断面図
C0-IN			
C0-OUT			
C45-IN			
C45-OUT			



(a) 梁端接合部 (b) 柱端接合部

図 5 解析モデル

1) 無欠陥試験体 (F-N/S)

60p (+1) サイクル時に、ダイアフラム側溶接止端およびルート部に亀裂が発生し、60p (+3) サイクル時に亀裂がダイアフラム内に進展し、間もなくダイアフラム側で破壊した。

2) 欠陥試験体 (F-E-5/S, F-E-10/S, F-E-15/S)

欠陥の挿入された全ての試験体において40p (-1) サイクル時までには欠陥先端から亀裂が発生し、60p (-1) サイクル時までにはダイアフラム側で破壊した。

各試験体の累積塑性変形倍率 η を図7に示す。既報の溶接部強度の低い YGW11 シリーズおよび本実験の溶接部強度の高い YGW18 シリーズの双方において、欠陥先端の亀裂発生時期およびその後の亀裂進展に差は無く、端部欠陥を設けた試験体の塑性変形能力は小さい。溶接部強度の高い YGW18 では、無欠陥の試験体 F-N/S の溶接端部に溶込み不良があったため、 η は F-N の 44% となった。同じ欠陥長さの試験体で、溶接部強度の異なる試験体同士を比較すると、いずれの試験体においても溶接部強度を上げたことに伴う η の上昇は見られない。したがって、端部欠陥が存在する場合、溶接部強度を上げて梁の塑性変形能力を向上させることはできないことが分かる。

各試験体について、縦軸に η をとり横軸に欠陥断面率 $s\alpha$ をとって図8に示す。欠陥断面率は、破壊の起点となった側の欠陥断面積(欠陥の実測高さ×実測長さ)を片側フランジ断面積で除した値である。同図には、既報の結果も併せて示す。現場溶接形式では、溶接部強度によらず、欠陥断面率が2%程度であっても η が大きく低下する。

② 柱端溶接接合部

柱端モーメント M と梁の相対回転角 θ との関係の例を図9示す。実験経過の例を以下に示す。

1) C0-N (0度方向, 無欠陥)

80p の正載荷 2 回目 (以下 80p (+2) で表す) で圧縮側フランジの局部座屈が観察され、以降サイクルを経る毎に局部座屈が進行した。80p (+4) でコーナーR部の柱側溶接止端に延性亀裂が発生した。80p (-10) で荷重が最大荷重の90%を下回ったので実験を終了した。

2) C0-IN (0度方向, 内面側欠陥)

80p (+1) で圧縮側フランジの局部座屈が観察され、以降サイクルを経る毎に局部座屈が進行した。80p (+7) でコーナーR部の柱側溶接止端に延性亀裂が発生した。80p (-10) で荷重が最大荷重の90%を下回ったので実験を終了した。

3) C0-OUT (0度方向, 外面側欠陥)

40p (+1) でコーナーR部の欠陥挿入位置であるダイアフラム側溶接止端に亀裂が発生し、以降、この亀裂がサイクルを経る毎に進展した。80p (+8) にはコーナーR部全域に亀裂が進展し、破断直前の亀裂開口変位 (以

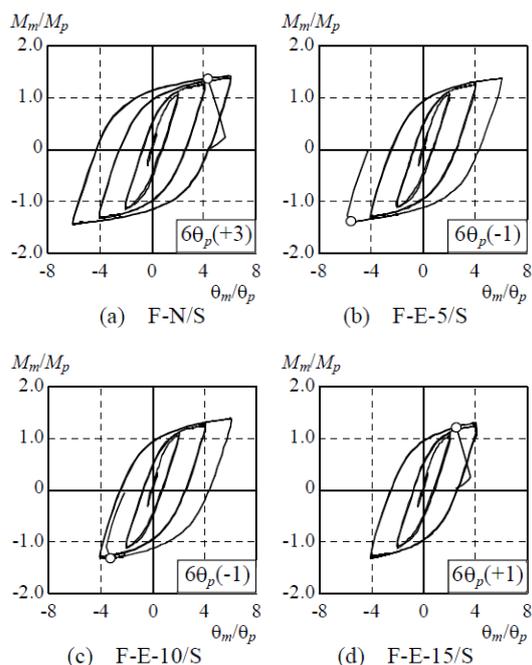


図6 荷重-変形関係

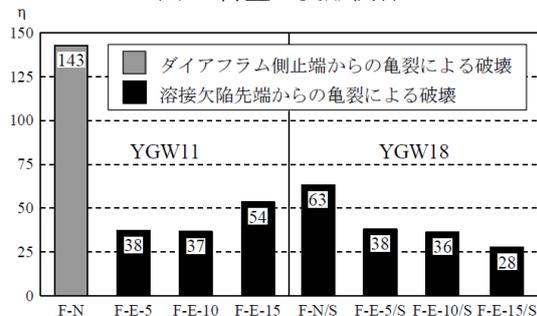


図7 累積塑性変形倍率

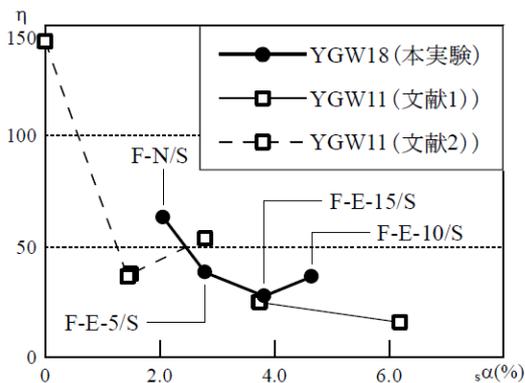


図8 累積塑性変形倍率-欠陥率関係

下 COD) は 11mm である。80p (+9) で延性亀裂の先端を起点に脆性破断した。

4) C45-N (45度方向, 無欠陥)

80p (+2) でコーナーR部の柱側溶接止端に延性亀裂が発生した。80p (-6) ではコーナーR部全域に亀裂が進展し、破断直前の COD は 3.0mm である。80p (-7) でこの延性亀裂を起点として脆性破断した。

5) C45-IN (45度方向, 内面側欠陥)

80p (-2) でコーナーR部の柱側溶接止端に延性亀裂が発生した。80p (+4) でコーナ

ーR 部の半分程度まで亀裂が進展し、破断直前の COD は 1.7mm である。80p (+5) でこの延性亀裂を起点に脆性破断した。

6) C45-OUT (45 度方向, 外面側欠陥)

20p (+2) でコーナーR 部の欠陥挿入部であるダイアフラム側溶接止端に亀裂が発生した。40p (+2) ではコーナーR 部の半分程度まで亀裂が進展し、60p (+2) ではコーナーR 部の 4 分の 3 程度まで亀裂が進展した。破断直前の COD は 2.5mm である。80p (+1) で延性亀裂の先端を起点に脆性破断した。

各試験体が破断または最大荷重の 90% に荷重が低下するまでの累積塑性変形倍率 η を図 10 に示す。C0 シリーズでは、内面側に欠陥を挿入した C0-IN の終局状態は局部座屈により決定しており、欠陥の影響は見られず C0-N と C0-IN の η は等しい。なお、C0-N および C0-IN の η は 300 程度であり非常に大きい。これは、溶接止端にグラインダ処理を施したことおよび、コーナーR 部のシャープ吸収エネルギーが高いことによると考えられる。外面側に欠陥を挿入した C0-OUT では、欠陥を起因とする破壊が生じており、C0-OUT の η は C0-N の η の 86% に減少している。C45 シリーズでは、内面側に欠陥を挿入した C45-IN では、柱側溶接止端から破断しており、破壊モードは、無欠陥の C45-N と同じである。ただし、C45-IN の η は、C45-N の η の 72% に減少している。これは、欠陥挿入に伴う溶接部の断面積の減少が柱側溶接止端の応力を上昇させ、亀裂の進展を早めた結果と考えられる。C45-OUT の η は C45-N の η の 29% であり、欠陥挿入による影響が著しい。

(2) 有限要素数値解析

① 梁端溶接接合部

解析より得られた欠陥スリット部の変形より、亀裂開口変位 (CTOD) を算出した。解析モデルの欠陥長さ中央位置における CTOD と変形との関係を図 11 に示す。欠陥長さが同じである F-E-15 (現場溶接形式, 欠陥長さ 15mm) と S-E-15 (工場溶接形式, 欠陥長さ 15mm) を比較すると、内開先の CTOD は外開先の CTOD に比べて大きい。 $\theta_m / \theta_p = 8$ の時点では、F-E-15 の CTOD は、S-E-15 の CTOD の 1.14 倍である。また、CTOD=0.6mm に到達する時の変形は、S-E-15 では $\theta_m / \theta_p = 5.6$ であるのに対して、F-E-15 では $\theta_m / \theta_p = 4.7$ と早くなる。欠陥長さが短くなるに従い同一変形時の CTOD は小さくなる。 $\theta_m / \theta_p = 8$ の時点では、F-E-5 の CTOD は、F-E-15 の CTOD の 71% である。また、F-E-10 の CTOD と S-E-15 の CTOD は概ね同じ値となっている。

② 柱端溶接接合部

解析より得られた溶接部の相当塑性歪の分布を検討した。図 12 に $\theta_m / \theta_p = 4$ 時の溶接部における溶接線方向の相当塑性歪の分布を示す。図中の A が溶接部の内面側を表し、B が溶接部の外面側を表している。いずれの荷重方向においてもコーナーR 部の外面側に

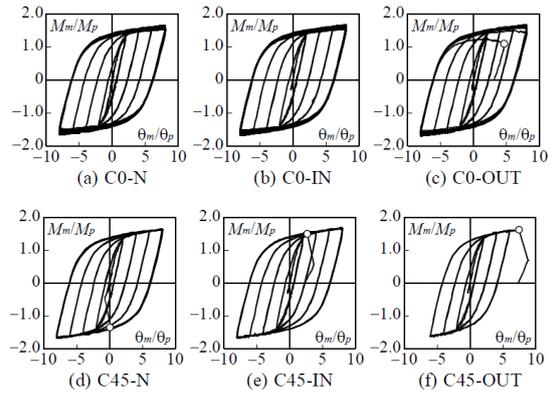


図 9 荷重-変形関係

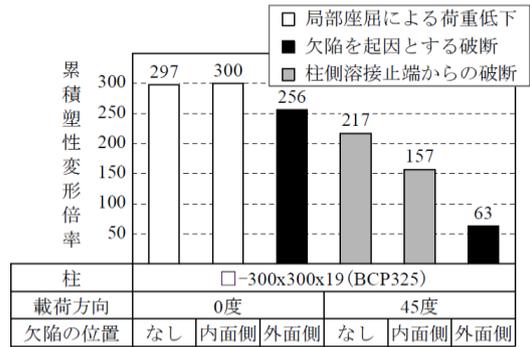


図 10 累積塑性変形倍率

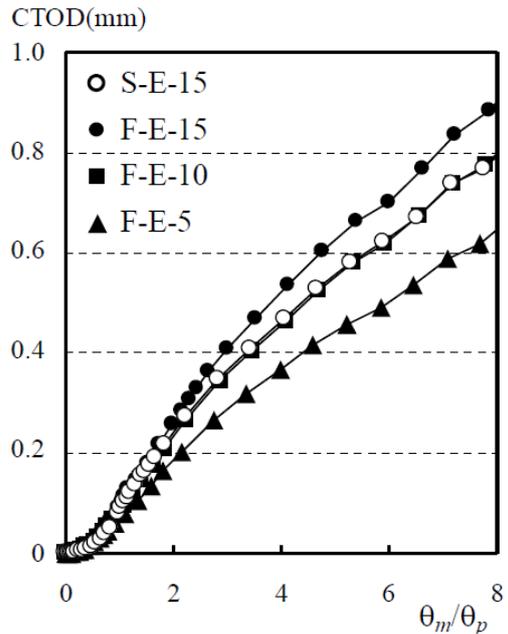


図 11 CTOD と梁変形の関係

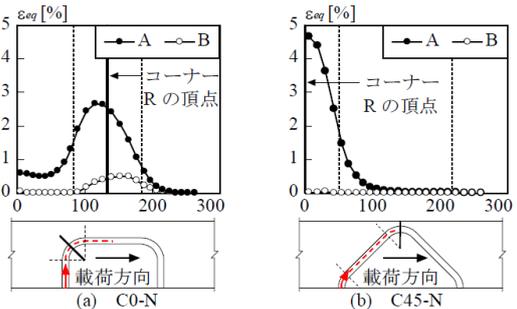


図 12 溶接部の相当塑性歪の分布

歪集中が見られ、特に 45 度方向載荷では、外面側の歪集中が著しい。両載荷方向とも内面側の歪集中は小さく、実験において、内面側の欠陥が破壊モードに影響を与えなかったことと対応している。コーナーR 部外面側の欠陥は、歪集中の大きい部分に入るため、特に 45 度方向載荷では η の減少に与える影響が大きくなる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1) 高倉正幸, 田中剛, 上田遼, 中澤好道, 鎌倉和彦: 柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, 査読有り, 投稿中, 2014. 11

[学会発表] (計 6 件)

(1) 上田遼, 田中剛, 佐藤勇介, 中澤好道, 鎌倉和彦, 佐々木靖文: 角形鋼管柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響—その 3 欠陥高さを因子とした載荷実験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, 投稿済, 2014. 9. 12, 神戸

(2) 鎌倉和彦, 田中剛, 上田遼, 佐藤勇介, 中澤好道, 佐々木靖文: 角形鋼管柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響—その 1 欠陥位置および載荷方向を因子とした載荷実験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1183-1184, 2013. 8. 30, 札幌

(3) 上田遼, 田中剛, 佐藤勇介, 中澤好道, 鎌倉和彦, 佐々木靖文: 角形鋼管柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響—その 2 破壊状況および塑性変形能力—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1185-1186, 2013. 8. 30, 札幌

(4) 上田遼, 田中剛, 佐藤勇介, 中澤好道, 鎌倉和彦, 佐々木靖文: 柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響—その 1 冷間プレス成形角形鋼管柱の載荷実験—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 53 号・構造系, pp. 377-380, 2013. 6. 15, 大阪

(5) 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 佐藤勇介, 山根正寛, 中澤好道: 梁の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響—その 3 溶接部強度を因子とした載荷実験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 81-82, 2012. 9. 12, 名古屋

(6) 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 佐藤勇介, 山根正寛, 中澤好道: 梁の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響—その 2 現場溶接形式の溶接部強度を因子とした載荷実験—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 52 号・構造系, pp. 437-440, 2012. 6. 17, 大阪

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~a1/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 剛 (TANAKA TSUYOSHI)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90243328