

曲げとせん断を受ける部分溶込み溶接継目の耐力評価

—その1 極限解析—

部分溶込み溶接 曲げ せん断
最大耐力 極限解析 FEA

正会員 ○野田透子^{*1} 同 田中 剛^{*2} 同 森はる奈^{*1}
同 浅田勇人^{*3} 同 畔上 進^{*4} 同 的場 耕^{*4}

1. はじめに

部分溶込み溶接は、接合する鋼板に部分的に開先を設けて溶接接合するものである。鋼構造接合部設計指針¹⁾では、部分溶込み溶接の溶接線単位長さ当たりの最大軸方向耐力 ${}_w p_u$ および最大せん断耐力 ${}_w q_u$ を次式で与えている。

$${}_w p_u = a \cdot F_u \tag{1}$$

$${}_w q_u = a \cdot F_u / \sqrt{3} \tag{2}$$

ここで、 a は有効のど厚、 F_u は引張強さの規格値を示す。ただし、実験値との比較によると、実験結果を過小評価する 경우가多く、また、バラツキも大きい¹⁾。また、部分溶込み溶接継目に関する理論的研究は少なく、曲げモーメントとせん断力が作用する溶接継目の耐力評価法が確立しているとは言い難い。

本報(その1)では、曲げとせん断を受ける部分溶込み溶接継目を対象として、極限解析および有限要素数値解析(FEA)を行うことにより、塑性耐力時の応力分布を検討する。

2. 単純引張および単純せん断

2.1 極限解析

当研究室は、図1に示す斜方角度 θ から荷重 P を受けるT字継手の部分溶込み溶接継目に対して、極限解析に基づく耐力評価式を提案した²⁾。

母材と溶接金属の降伏点 σ_y が等しい場合、単純引張($\theta=0^\circ$)の崩壊機構では、図2に示すように2つの降伏面ですべりが生じる。降伏面①の形成角度 β は、 $\tan \beta = 1/\sqrt{3}$ で与えられ、 $\beta=35^\circ$ となる。単純せん断($\theta=90^\circ$)の崩壊機構では、(2)式と同様に、図3の降伏面②(のど断面)

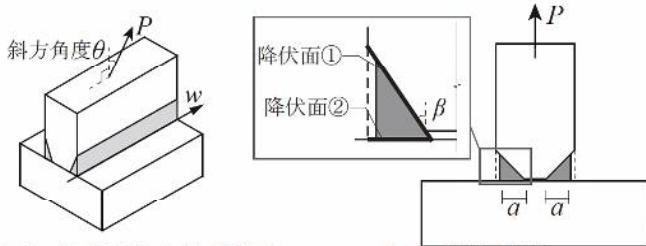


図1 部分溶込み溶接継目

図2 単純引張

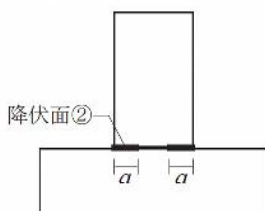


図3 単純せん断

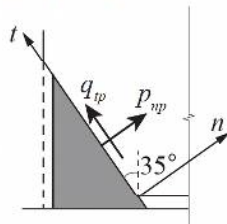


図4 降伏面(単純引張)

でせん断降伏し、溶接線方向にすべりが生じる。

単純引張および単純せん断における単位長さ当たりの崩壊荷重は、次式で与えられる。

$$p_p = 2\sqrt{2}a \cdot \sigma_y / \sqrt{3} = 1.63a \cdot \sigma_y \tag{3}$$

$$q_p = a \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \tag{4}$$

上式の降伏点を引張強さに置き換えると、単純せん断の(4)式は(2)式と一致するが、単純引張では、(3)式は(1)式の1.63倍となる。

単純引張の降伏面①について、図4に示す t 方向のせん断力 q_{np} および n 方向の垂直力 p_{np} は、次式で与えられる。

$$q_{np} = \sqrt{3}a \cdot \sigma_y / \sqrt{3} = a \cdot \sigma_y \tag{5}$$

$$p_{np} = \sqrt{2}a \cdot \sigma_y \tag{6}$$

2.2 FEA

理論解の妥当性を検証するため、FEAを行った。材料の応力-歪関係は、溶接部および母材ともに降伏点を 325N/mm^2 とした完全弾塑性型である。解析には、汎用有限要素数値解析 ABAQUS(version6.14)を用いた。

単純引張および単純せん断の解析モデルを図5(a)および(b)に示す。板厚は22mm、のど厚は3mm、溶接長さは70mmである。断面の要素分割を図5(c)に示す。解析より得られた荷重 P と荷重方向の変形 u との関係を図6に示す。図中の○印は、塑性耐力を表し、剛性が初期剛性の1/100となる荷重と定義した。理論解と塑性耐力は良く一致している。

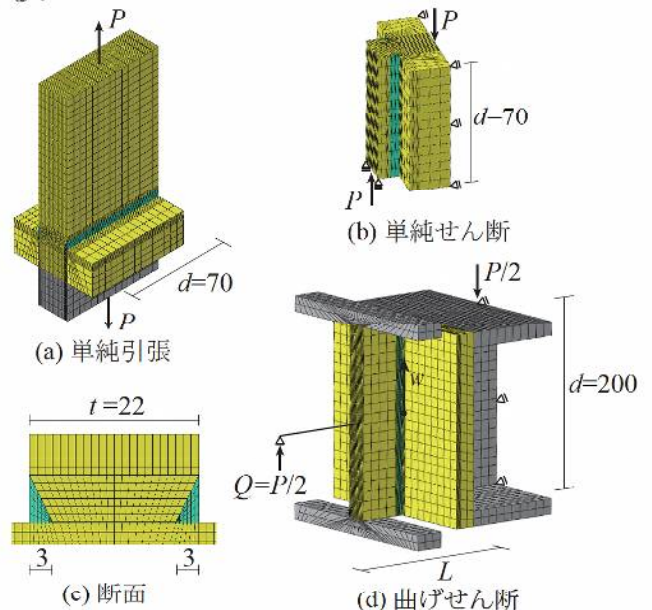


図5 解析モデル(単位:mm)

Strength Evaluation of Partial Penetration Weld Subjected to Bending Moment and Shear Force
Part 1: Limit Analysis

NODA Toko, TANAKA Tsuyoshi, MORI Haruna, ASADA Hayato, AZEGAMI Susumu and MATOBA Ko

単純引張の解析結果より、塑性耐力時の降伏面①に該当する各要素の応力成分を取り出し、 t 方向のせん断力 q_t および n 方向の垂直力 p_n を求めた。横軸に溶接線方向（原点を溶接線中央位置とする）をとり、 q_t および p_n の分布を図7に示す。理論解 q_p および p_m とFEAより得られた応力分布は良く一致している。

3. 曲げせん断

3.1 解析モデル

曲げモーメントとせん断力を受ける場合のFEAを行った。解析モデルは次報（その2）に述べる3点曲げ形式の荷重実験に用いた試験体をモデル化したものであり、解析モデルを図5(d)に示す。板厚は22mm、のど厚は3mm、溶接長さは200mmである。解析は、せん断スパン比が、 $L/d=0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 2.0$ の5ケースについて行った。材料の応力-歪関係は完全弾塑性型($\sigma_y=325\text{N/mm}^2$)である。

3.2 解析結果

解析より得られた荷重-変形関係を図8に示す。 L/d が減少すると剛性および耐力は増加する。

解析結果より降伏面①に該当する各要素の応力成分を取り出し、 t 方向のせん断力 q_t 、 n 方向の垂直力 p_n および溶接線方向(w 方向)のせん断力 q_w を求めた。横軸に溶接線方向をとり、 q_t 、 p_n および q_w の分布を図9(a)、(b)および(c)に示す。図9(a)および(b)には、 q_p および p_{np} の値を点線で示す。 q_t および p_n は、 L/d が小さい範囲では線形的な分布を示し、 L/d が大きくなるとストレスブロック状の分布を示す。 $L/d=2.0$ の場合では、ストレスブロックの応力の大きさは、 q_p および p_{np} に到達している。一方、 q_w は L/d が小さいほど一様分布に近くなり、 L/d が大きくなると中立軸近傍の値が大きくなるhat型の分布を示す。

L/d が小さい場合では、図3に示したのど断面におけるせん断降伏に支配される。降伏面②における w 方向のせん断力 q_w の分布を図9(d)に示す。図中には(4)式の q_p を点線で示す。降伏面②における q_w の分布は、降伏面①の分布と対応しており、 $L/d=0.25$ および 0.50 の場合では、概ね一様に q_p に到達している。

4. おわりに

曲げとせん断を受ける部分溶込み溶接継目を対象として極限解析および有限要素数値解析を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) T字継手の部分溶込み溶接継目の単純引張における塑性耐力は、(3)式で与えられる。
- 2) せん断スパン比 $L/d=2.0$ の場合では、溶接継目にストレスブロック状の応力分布が形成され、応力状態は単純引張時と等しい。
- 3) せん断スパン比 $L/d=0.50$ の場合では、のど厚における溶接線方向のせん断降伏により塑性耐力が決定する。

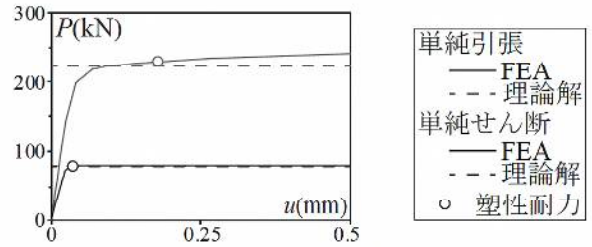


図6 荷重-変形関係(単純引張・単純せん断)

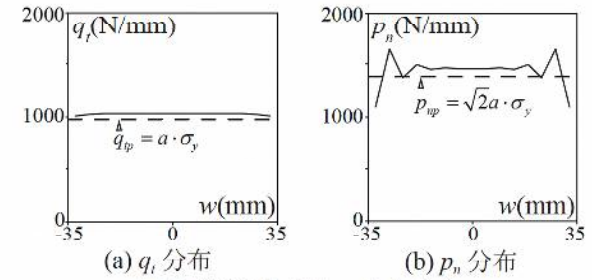


図7 塑性耐力時の応力分布

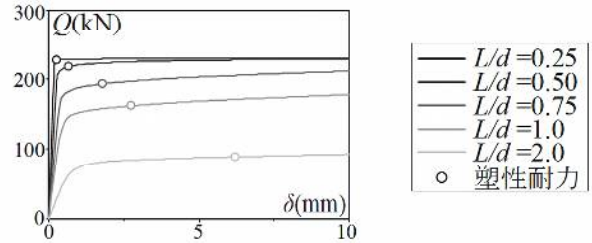


図8 荷重-変形関係(曲げせん断)

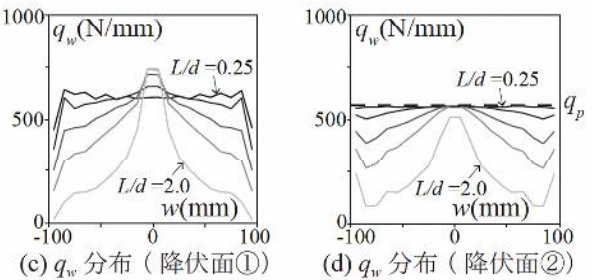
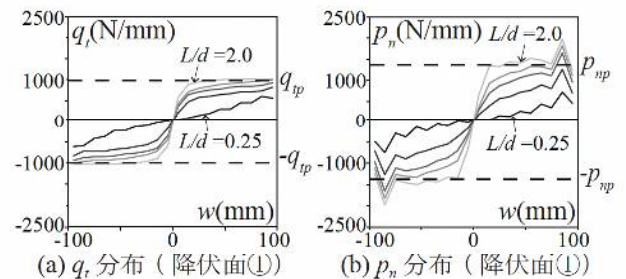


図9 応力分布(曲げせん断)

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012.3
- 2) 吉末理紗，田中剛，浅田勇人，田中未咲：斜方から載荷される各種溶接継目の耐力評価，鋼構造年次論文報告集，Vol.24，pp.747-754，2016.11

*1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・修士課程
 *2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・教授・博士(工学)
 *3 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・助教・博士(工学)
 *4 (株)角藤

Graduate Student, Dept. of Architecture, Kobe Univ.
 Assistant Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.
 Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.
 KAKUTO Corp.

曲げとせん断を受ける部分溶込み溶接継目の耐力評価

—その2 最大耐力の評価—

部分溶込み溶接 曲げ せん断
最大耐力評価 せん断スパン比 载荷実験

正会員 ○森はる奈^{*1} 同 田中 剛^{*2} 同 野田透子^{*1}
同 浅田勇人^{*3} 同 畔上 進^{*4} 同 的場 耕^{*4}

1. はじめに

前報(その1)では、曲げモーメントとせん断力を受ける部分溶込み溶接継目の応力分布を有限要素数値解析により確認し、単純せん断時および単純引張時の単位長さ当りの崩壊荷重と比較した。

本報(その2)では、曲げとせん断を受ける部分溶込み溶接継目を対象として、降伏面における応力状態に基づく最大耐力の評価方法を提案する。

2. 塑性耐力の推定

前報(その1)に示した解析結果に基づき、図1に示す降伏面①の応力状態を図2に示すように仮定する。すなわち、最外縁から x の範囲では、単位長さ当りの垂直力 p は前報(その1)の(3)式で与えられる単純引張時の p_p に到達し、中立軸近傍では線形分布する。 t 方向のせん断力 q_t および n 方向の垂直力 p_n についても、 x の範囲では、単純引張時の t 方向のせん断力 q_{tp} (その1, (5)式) および n 方向の垂直力 p_{np} (その1, (6)式) に到達し、中立軸近傍では線形分布すると仮定する。溶接線方向 (w 方向) のせん断力 q_w は、図2に示す p が線形分布する範囲で伝達され、降伏面①における q_t と q_w のベクトル和が、 q_{tp} になると仮定する。 q_w の分布は、図3(b)に示すように、楕円形の分布となる。得られた応力状態より、溶接部の曲げ耐力 ${}_wM_p$ およびせん断耐力 ${}_wQ_p$ は、 x を用いて次式で与えられる。

$${}_wM_p = \frac{1}{3} p_p (-2x^2 + 2dx + d^2) \tag{1}$$

$${}_wQ_p = \pi a \sigma_y \left(\frac{d}{2} - x \right) \tag{2}$$

ここで、 d は溶接線長さ、 a は有効のど厚、 σ_y は降伏点を示す。せん断スパンを L で表すと、 $M=QL$ の関係があるので、(1)式および(2)式より x を求めることができる。

$$x = \frac{1}{2} d - \frac{\sqrt{6\{9\pi^2 L^2 + 32d^2\} - 3\sqrt{6}\pi L}}{16} \tag{3}$$

以上より、塑性耐力をせん断力で表示すると次式が得られる。

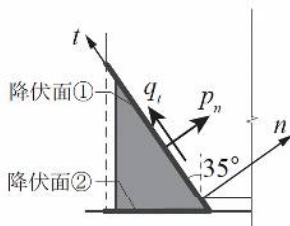


図1 降伏面(単純引張)

$${}_wQ_{p1} = \frac{\sqrt{6}}{16} \pi a \sigma_y d \left(\sqrt{9\pi^2 \left(\frac{L}{d} \right)^2 + 32} - 3\pi \frac{L}{d} \right) \tag{4}$$

一方、 L/d が小さい場合の塑性耐力は図1に示す降伏面②のせん断降伏で決定するので、 ${}_wQ_{p2}$ は次式で与えられる。

$${}_wQ_{p2} = 2d \cdot q_p = \frac{2\sigma_y \cdot a \cdot d}{\sqrt{3}} \tag{5}$$

${}_wQ_{p1}$ および ${}_wQ_{p2}$ の小さい方を塑性耐力 ${}_wQ_p$ とする。

推定値と前報(その1)で行ったFEAより得られた塑性耐力の比較を行う。 ${}_wQ_p$ と L/d の関係を図4(a)に示す。 $M-Q$ 相関関係を図4(b)に示す。推定値では、 $L/d < 0.58$ の範囲では、 ${}_wQ_{p2}$ により塑性耐力が決定するため、 ${}_wQ_p$ は一定値となり、FEAのモデルでは、 $L/d=0.25$ および 0.50 の場合が該当する。 $L/d > 0.58$ の範囲では、 ${}_wQ_p$ は L/d の増加に伴い減少し、 L/d の変化に伴う塑性耐力の変化の傾向を良く捉えている。

3. 実験

3.1 試験体

$L/d=1.0$ および $L/d=2.0$ となる試験体を製作した。図

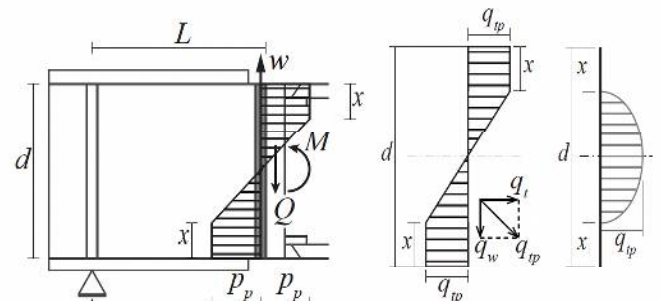
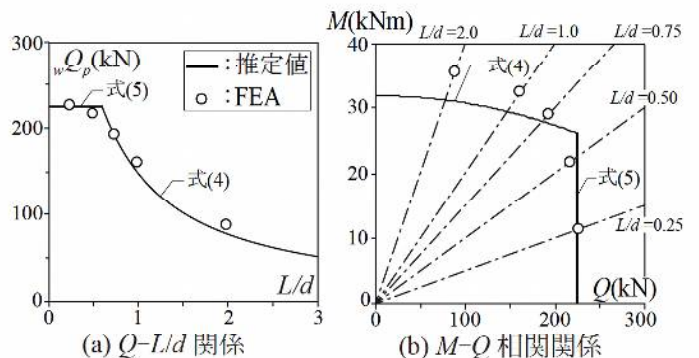


図2 溶接部の応力状態

図3 降伏面①のせん断力



(a) $Q-L/d$ 関係

(b) $M-Q$ 相関関係

Strength Evaluation of Partial Penetration Weld Subjected to Bending Moment and Shear Force
Part 2: Ultimate Strength Evaluation

MORI Haruna, TANAKA Tsuyoshi, NODA Toko, ASADA Hayato, AZEGAMI Susumu and MATOBA Ko

5に試験体形状を示す。本実験の対象とする部分溶込み溶接継目は薄墨で示している部分である。溶接長さは、 $d=200\text{mm}$ である。試験体には、母材にSN490B、溶接ワイヤにYGW11（ワイヤ径 $\phi=1.2\text{mm}$ ）を使用した。板厚22mmの鋼板の両側に開先深さ3mm、開先角度 60° の開先を設け、試験体を水平面に対して 60° 傾けて設置し、溶接ロボットを用いて1パスで溶接を行った。溶接施工時の電圧は34V、電流は315~325Aである。なお、本実験では圧縮力が作用した際に母材間で摩擦により力を伝達することを避けるために、T継手の母材間に約2mmの隙間を設けた。

溶接完了後、余盛部分を棒グラインダで削り取ることにより、できるだけ平坦な溶接部形状となるように仕上げた。マクロ試験より溶込み状態を確認したところ、実際のど厚は、5.5mmと7.1mmであった。

材料の機械的性質を表1に示す。降伏応力は降伏棚の有無に関わらず0.2% offset値を用いた。

3.2 荷重方法・計測方法

図5に示す試験体を2000kN圧縮試験機にセットし、単純梁形式で3点曲げ実験を行い、溶接部に曲げモーメント M とせん断力 Q を作用させた。加力は溶接継目が破断するまで単調荷重し、試験体中央の鉛直変位 δ を計測した。

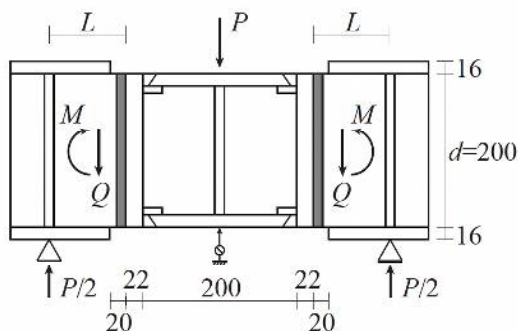


図5 試験体形状および荷重方法（単位：mm）

表1 材料の機械的性質

部位	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	YR [%]	EL [%]
母材	342	533	64.3	47.4
溶接金属	543	662	82.0	27.9

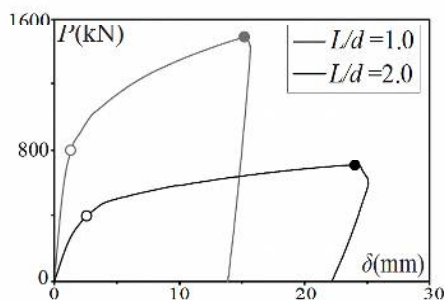


図6 荷重-変形関係

3.3 実験結果

実験より得られた荷重-変形関係を図6に示す。図中の○印は降伏耐力、●印は最大耐力を示す。降伏耐力は、接線剛性が初期剛性の1/3に低下した時点の荷重である。

両試験体ともに、写真1に示すようにルート部と溶接止端を結ぶように亀裂が発生し、溶接部が破断した。L/dが小さくなるほど剛性および耐力が増加する。降伏耐力と最大耐力の比は、0.55程度であった。

4. 耐力評価

(4)式および(5)式の降伏点 σ_y を材料試験より得られた溶接金属の引張強さ σ_u に置き換え、最大耐力を推定する。なお、計算に用いたのど厚は、両側の実際のど厚の平均値とした。

計算値 ${}_wQ_u$ と実験最大耐力の比較を図7に示す。計算値は、L/dの変化に伴う最大耐力の変化の傾向を良く捉えている。実験値と計算値の比は、L/d=2.0で1.05およびL/d=1.0で1.18となり、(4)式の降伏点に溶接金属の引張強さを代入することにより最大耐力を評価することができる。

5. おわりに

曲げとせん断を受ける部分溶込み溶接継目を対象として、前報（その1）で行った極限解析および有限要素数値解析をもとに最大耐力の評価方法を提案した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 降伏面における応力状態を仮定し、単純引張の場合の理論解を用いて塑性耐力の推定式を誘導した。
- 2) 耐力推定式は、材料を完全弾塑性型とした有限要素数値解析より得られた塑性耐力と一致した。
- 3) 耐力式に用いた降伏点を溶接金属の引張強さに置き換えることにより、実験より得られた最大耐力を評価できる。



(a) L/d=1.0 (b) L/d=2.0

写真1 破断状況

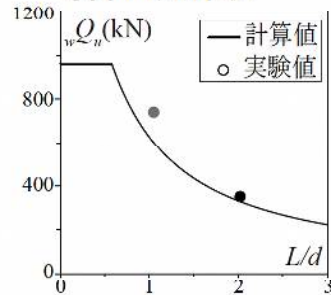


図7 実験値との比較

*1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・修士課程
 *2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・教授・博士（工学）
 *3 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・助教・博士（工学）
 *4 (株)角藤

Graduate Student, Dept. of Architecture, Kobe Univ.
 Assistant Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.
 Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.
 KAKUTO Corp.