

曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の耐力評価

—その1 実験—

隅肉溶接 マクロ試験 最大耐力
せん断スパン比 载荷実験

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

1. はじめに

隅肉溶接は柱梁接合部における梁ウェブ溶接部やブレース接合部のガセットプレート端溶接部等、鋼構造建築に多用されている溶接継目である。これらの溶接継目には、一般に曲げモーメント、せん断力および軸力が作用する。許容応力度設計の範囲では、のど断面に作用するせん断応力度を許容せん断応力度以下に納める設計がなされる¹⁾。また、溶接継目の最大耐力を求める場合には、降伏点に代えて引張強さを用いた算定方法が適用される²⁾。しかし、後述する実験で見られるように、曲げとせん断が作用する隅肉溶接継目では、前面隅肉溶接の場合と同様に、破断は隅肉溶接のルート部から止端を結ぶ断面に生じる³⁾。

組合せ応力が生じる隅肉溶接継目の最大耐力に関する理論的研究は少なく、耐力評価法が確立しているとは言い難い。本報では、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目を対象とし、実験を行うことにより溶接部の弾塑性挙動に関する基礎資料を得る。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体一覧を表1に示す。図1に試験体形状を示す。本実験の対象とする隅肉溶接継目は薄型で示している部分である。曲げモーメントとせん断力を受ける試験体FMSシリーズをせん断スパン比 L/d を変動因子として4体 ($L/d=0.25, 0.50, 1.00, 2.00$) および単純引張試験体FTを1体の計5体用意した。試験体は母材にSN490B、溶接ワイヤにYGW11 (ワイヤ径 $\phi=1.2$) を使用し、板厚22mmのT継手を設計サイズ12mmの隅肉溶接で接合した。試験体FMSおよび試験体FTの溶接長さは、それぞれ、200mmおよび70mmである。等脚隅肉溶接になるように、試験体を水平面に対し45°傾けて設置し、2パスで溶接を行った。溶接施工時の電圧は36V、電流は330~370Aである。入熱量は全ての試験体で1パス目が13~15kJ/cm、2パス目が31~35kJ/cmであった。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、T継手の母材間に隙間2mmを設けている。材料の機械的性質を表2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。マクロ試験を行い、溶込み状況を調べた。写真1に示すマクロ試験結果から測定した図2に示す隅肉溶接の寸法 (MR: 先行溶接側, ML: 後行溶接側) を表3に示す。

2.2 载荷方法・計測方法

[試験体FMS]

図1(a)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、隅肉溶接に曲げモー

表1 試験体一覧

試験体名	せん断スパン比 L/d	溶接長さ d [mm]	設計サイズ S [mm]
FMS-0.25	0.25	200	12
FMS-0.50	0.50		
FMS-1.00	1.00		
FMS-2.00	2.00		
FT	-	70	

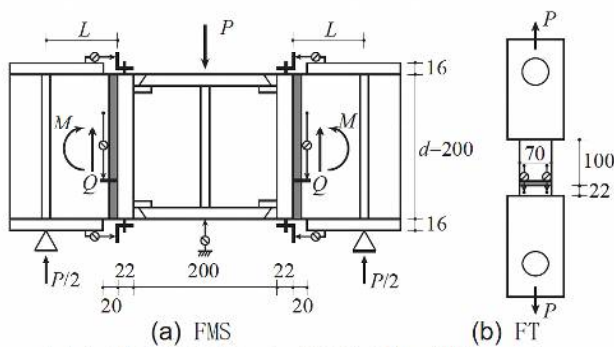


図1 試験体形状および载荷方法 (単位: mm)

表2 材料の機械的性質

部位	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	YR [%]	EL [%]
母材	403	535	75.2	46.8
溶接金属	491	597	82.3	25.4

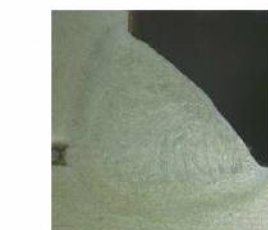


写真1 マクロ試験の例

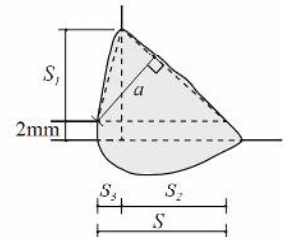


図2 各部寸法の定義

表3 マクロ試験結果

	S_1 [mm]	S_2 [mm]	S_3 [mm]	S [mm]	a [mm]
MR	10.83	11.00	3.05	14.05	9.87
ML	10.28	10.89	3.83	14.72	10.11
平均	10.56	10.95	3.44	14.39	9.99

ント M とせん断力 Q を作用させる。図 1 (a) 中の長さ L を変化させることにより、 M/Q を変化させている。加力は溶接継目が破断するまで単調载荷する。図 1 (a) に示すように変位計をセットし、全体変形 δ 、溶接継目のせん断変形 v および相対回転角 θ を計測する。

〔試験体 FT〕

図 1 (b) に示す試験体を 1000kN 万能試験機にセットし、引張力を作用させることにより、前面隅肉溶接継目の実験を行う。加力は溶接継目が破断するまで単調载荷する。図 1 (b) に示すように変位計をセットし、溶接線直行方向の変形 u を計測するとともに、標点間距離を 200mm とした全体変形 δ を計測する。

2.3 実験結果

実験結果の一覧を表 4 に示す。試験体 FMS の荷重-変形関係 ($P-\delta, P-v, P-\theta$) を図 3 に、試験体 FT の荷重-変形関係 ($P-\delta, P-u$) を図 4 に示す。図中の○印は降伏耐力 P_y 、●印は最大耐力 P_u 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。なお、試験体 FMS-0.50 については、試験機の容量内で最大耐力が得られなかったため、一旦除荷した後、4000kN 万能試験機を用いて再試験を行った。試験体 FMS-0.25 については、当初から 4000kN 万能試験機を用いて実験を行ったが、载荷治具の損傷のため最大耐力を得られなかった。ただし、溶接継目の顕著な塑性化が観察されている。

隅肉溶接に破断が生じた試験体では、FMS および FT ともに写真 2 に示すように、亀裂はルート部と止端を結ぶ線上に発生した。FMS シリーズでは、 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、0.5 ~ 0.7 の範囲である。

3. おわりに

曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目を対象として载荷実験を行った。本実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) 隅肉溶接継目の破壊は、ルート部と溶接止端を結ぶ線

表 4 実験結果一覧

試験体	P_y (kN)			P_u (kN)	
	δP_y	$v P_y$	θP_y		
FMS	FMS-0.25	1680	1599	1530	>3322
	FMS-0.50	1261	1217	1250	2456
	FMS-1.00	894	815	742	1241
	FMS-2.00	443	453	414	633

δP_y : 全体変形を用いて求めた降伏耐力

$v P_y$: 隅肉溶接のせん断変形を用いて求めた降伏耐力

θP_y : 相対回転角を用いて求めた降伏耐力

試験体	P_y (kN)		P_u (kN)
	δP_y	$u P_y$	
FT	555	530	803

$u P_y$: 荷重作用方向変形を用いて求めた降伏耐力

上で生じた。

- 2) FMS シリーズでは、 L/d が小さくなるほど剛性および耐力が増加する。

【謝辞】

本実験のうち、4000kN 万能試験機による载荷実験については、大和ハウス工業(株)総合技術研究所の協力を得た。ここに、深謝いたします。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鋼構造設計規準—許容応力度設計法—，2005.9
- 2) 建築行政情報センター・日本建築防災協会：2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書，2016.6
- 3) 白髪誠一・田淵基嗣・田中剛：前面 T 形すみ肉溶接継目の強度：すみ肉溶接による柱・梁仕口に関する研究（その 1），日本建築学会構造系論文集，第 507 号，pp.147-154，1998.5

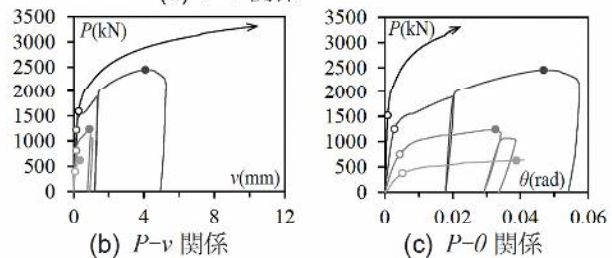
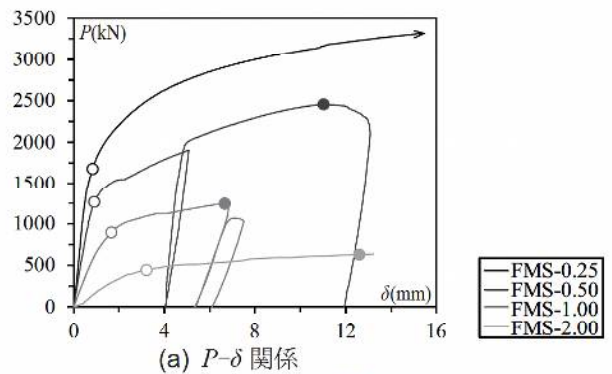


図 3 実験結果 (FMS)

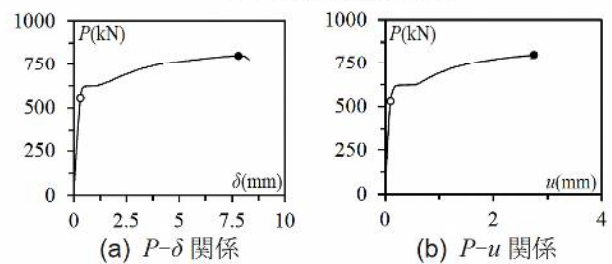


図 4 実験結果 (FT)

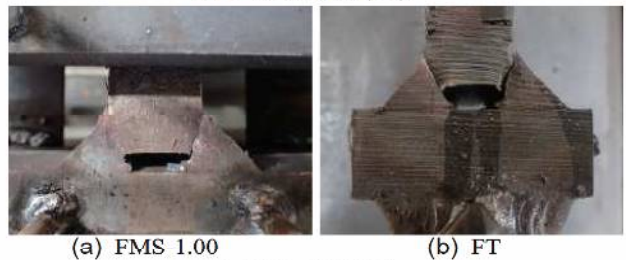


写真 2 破壊状況

*1 (株) 角藤

*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・修士課程

*4 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・助教・博士(工学)

KAKUTO Corp.

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Kobe Univ.

Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.

曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の耐力評価

—その2 最大耐力の評価—

隅肉溶接 FEA せん断応力分布
最大耐力評価 せん断スパン比

正会員 ○森はる奈^{*1} 同 田中 剛^{*2} 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)により、隅肉溶接継目の破壊は、ルート部と溶接止端を結ぶ線上に生じることを指摘し、溶接部の弾塑性挙動に関する基礎資料を得た。

組合せ応力が生じる隅肉溶接継目の最大耐力に関する理論的研究は少なく、耐力評価法が確立しているとは言い難い。本報では、曲げとせん断を受ける隅肉溶接を対象とし、破断面における応力状態に基づく耐力評価法を提案する。

2. 有限要素数値解析

2.1 解析モデル

溶接継目の応力状態を検査するために、前報(その1)の試験体を対象として有限要素数値解析を行った。解析モデルを図1に示す。FMSシリーズの解析モデルは対称性を考慮した1/2モデルとし、解析モデルFTはフルモデルとした。解析は、以下に示す2種類を行った。

モデル①：前報(その1)における材料試験より得られた応力-歪関係とマクロ試験および寸法計測に基づき溶接部の溶込み状態を再現した解析(図2(a)参照)

モデル②：完全弾塑性型の応力-歪関係と設計サイズを用い、溶接部の溶込みを無視した解析(図2(b)参照)

①のモデル化は、本解析によって実験結果を追跡できるか否かの検証を目的とし、②のモデル化は、母材と溶接金属の界面における基本的な応力伝達状況を検査することを目的としている。

2.2 解析結果

荷重-全体変形関係について、解析結果と前報(その1)における実験結果との比較を図3に示す。試験体FMS-0.25を除き、モデル①による解析は、実験結果と良く対応

している。試験体FMS-0.25については、剛性は一致しているが、塑性化後の荷重を若干過小評価している。この明確な原因は不明であるが、純せん断状態に近いFMS-0.25では、解析で考慮していない余盛による影響が考えられる。

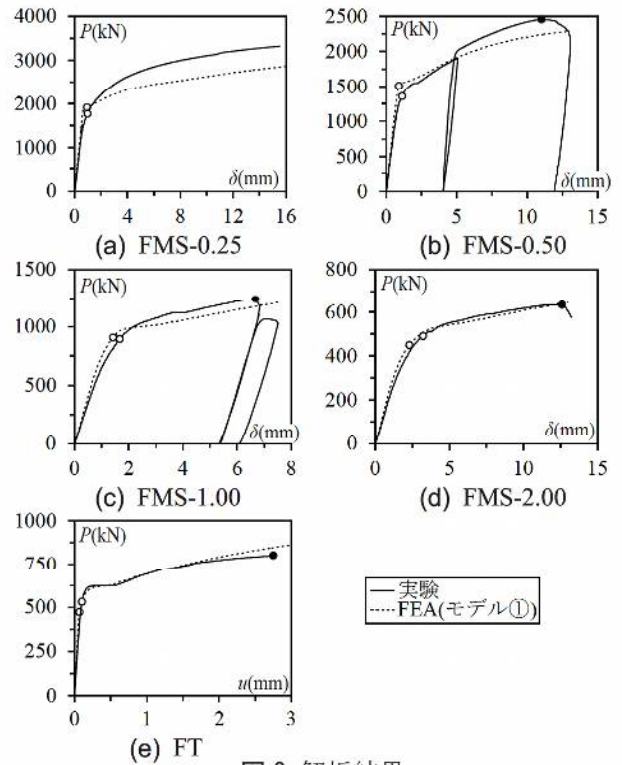


図3 解析結果

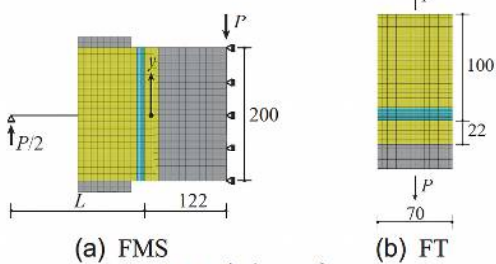


図1 解析モデル

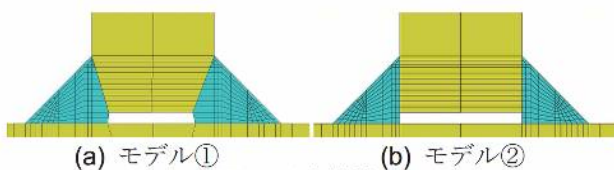


図2 隅肉溶接

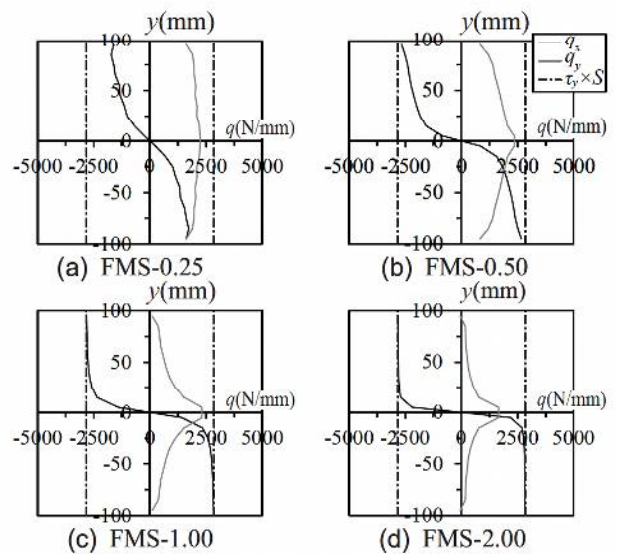


図4 q分布

Strength Evaluation of Fillet Weld Subjected to Bending Moment and Shear Force
Part2:Ultimate Strength Evaluation

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

2.3 溶接部における応力伝達

モデル②より得られた塑性化が進行した時点の解析結果より、母材と接する各要素のせん断応力度を取り出し、溶接線直交方向の単位長さ当りのせん断力 q_x および溶接線方向の単位長さ当りのせん断力 q_y を計算した。図4に q_x および q_y の分布を示す。図中には、降伏せん断応力度 τ_v に隅肉サイズ S を乗じた単位長さ当りの降伏せん断耐力を一点鎖線で示す。 q_y 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が大きくなるhat形の分布を示す。一方、 q_x は L/d が小さいほど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応力分布となる。

3. 耐力評価

3.1 応力伝達機構

2.3節に示した解析結果に基づき溶接金属と母材の界面の応力状態を図5に示すように仮定する。すなわち、 q_x 分布については、図5(a)に示すように最外縁から x の範囲が前面隅肉溶接の単位長さ当りの最大せん断耐力 q_u に到達し、中立軸近傍については線形分布すると仮定する。 q_y は、 q_x が線形分布する範囲において、図5(b)に示すように q_x と q_y のベクトル和が q_u になると仮定する。 q_y の分布は図5(c)に示すように、楕円形分布となる。

この2つの仮定より、 M_u および Q_u は、 x と q_u を用いて次式で与えられる。

$$M_u = \frac{1}{3} q_u (-2x^2 + 2dx + d^2) \quad (1)$$

$$Q_u = \pi q_u \left(\frac{d}{2} - x \right) \quad (2)$$

本研究では、 $M_u = P_u L/2$ および $Q_u = P_u/2$ の関係があるので、 q_u を用いて最大耐力 P_u は次式で与えられる。

$$P_u = \frac{3\pi^2}{2} q_u d \left[\sqrt{3 \left\{ \left(\frac{L}{d} \right)^2 + \frac{4}{3\pi^2} \right\}} - \frac{L}{d} \right] \quad (3)$$

3.2 実験値との比較

前報(その1)の試験体FTの実験結果より得られた前面隅肉溶接の単位長さ当りの最大せん断耐力を(3)式の

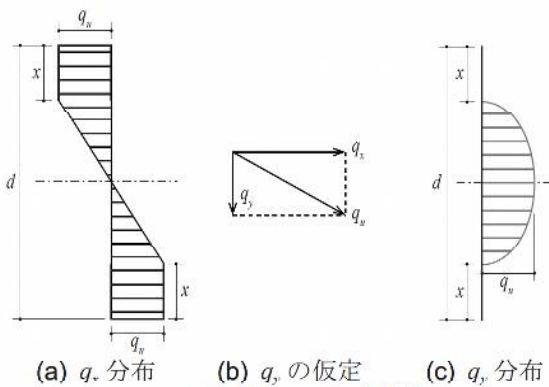


図5 界面の応力状態

q_u に代入し、FMSシリーズの最大耐力を推定する。計算値 P_{u1} と実験値の比較を横軸に L/d を取り図6に実線で示す。計算値は、 L/d の変化に伴う実験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、1.01~1.20となり、(3)式により最大耐力を評価することができる。すなわち、前面隅肉溶接継目の最大せん断耐力が分かれば、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の最大耐力を推定できることが分かる。

筆者等は、隅肉溶接の溶込み量を考慮した斜方隅肉溶接継目の耐力評価式を文献1)に提案した。前面隅肉溶接は斜方隅肉溶接の特別な場合であり、この耐力評価式による試験体FTの最大耐力の計算値 P_{u1} を前報(その1)の実験結果と比較し図7に示す。実験最大耐力 P_u と計算値 P_{u1} の比は、1.13になる。前面隅肉溶接の最大せん断耐力の計算値 $q_u^{(1)}$ を(3)式に代入して得られた計算値 P_{u2} を図6に破線で示す。実験値と計算値 P_{u2} の比は、1.14~1.36となり、計算値は実験値を安全側に評価している。

4. おわりに

曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目を対象として有限要素数値解析を行い、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) 溶接金属と母材の界面における応力状態を仮定した最大耐力の推定式を誘導した。
- 2) 前面隅肉溶接の最大せん断耐力を用いて、曲げとせん断を受ける隅肉溶接の最大耐力を推定することができる。

【参考文献】

- 1) 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

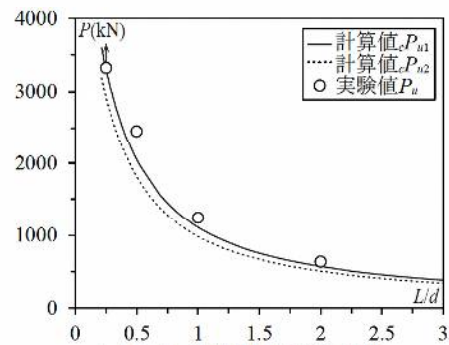


図6 P_u 計算値実験値比較

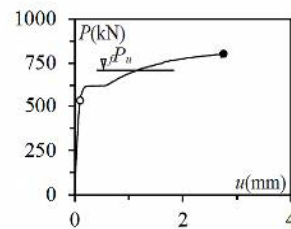


図7 前面隅肉溶接の最大耐力

*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.