

35度開先面に融合不良を有する接合部の繰返し载荷実験  
- その4 端部表層欠陥の有限要素解析 -

開先面 融合不良 溶接欠陥 正会員 ○ 服部 和徳 \*<sup>1</sup> 同 宗川 陽祐 \*<sup>2</sup>  
欠陥率 破壊限界応力 有限要素解析 同 見波 進 \*<sup>3</sup> 同 中野 達也 \*<sup>4</sup>

1. 序

鉄骨造建築物の完全溶込み溶接部において、溶接欠陥は継手の強度および伸び能力を低下させる要因となる。

溶接欠陥の一種である開先面の融合不良は検出が困難であり、文献1)では当該欠陥の検出方法を検討しており、本研究ではこれまで開先面の融合不良を想定した形状欠陥に対して繰返し曲げ実験<sup>2),3)</sup>を実施している。

本報では、繰返し曲げ実験に対し、端部かつ表層に欠陥が位置する実験結果を対象とする有限要素解析を行い、応力・ひずみ状態を確認するとともに、応力・ひずみ状態に基づき判定される破壊条件と実験結果の対応を検討する。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

表1に解析モデルリスト、図1に解析モデル形状および要素分割状況を示す。本解析ではフルモデルで全体挙動を再現し、フルモデルから得られる変形挙動をサブモデルの境界条件として与えるいわゆるサブモデリング手法を導入する。フルモデルは加力ビーム部および試験体部、サブモデルは欠陥近傍のみをモデル化する。試験体部はBH-125×100×12×25(SN490B)であり、エンドプレートを介して加力ビームに接続される。加力ビーム端部をローラー支持、試験体部両端の加力ビーム側エンドプレート2点に強制変位を与えることで4点曲げ試験を再現する。

サブモデルの応力・ひずみ状態を確認する評価点は欠陥高さ方向の欠陥先端近傍要素とし、最小要素寸法は評価点近傍で0.05×0.05×0.05mm<sup>3</sup>に統一している。

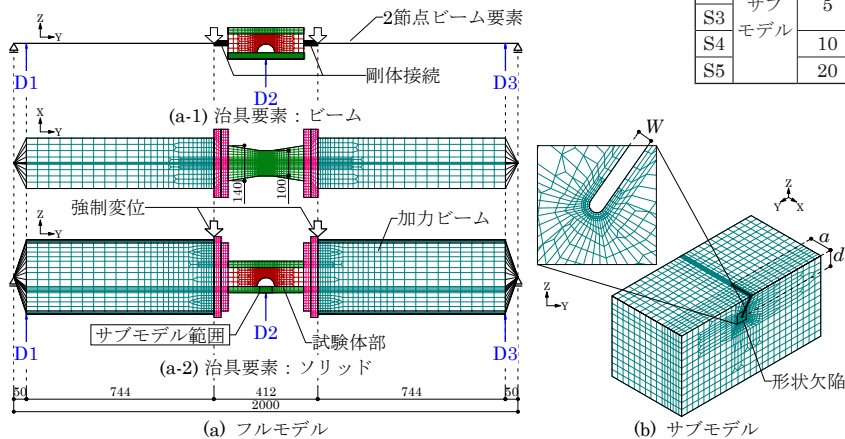


図1 解析モデル形状および要素分割状況

2.2 解析仮定

解析は、汎用弾塑性有限要素解析ソフト「ADINA ver.9.1」による三次元立体要素を用いる弾塑性解析である。ヤング係数 205000N/mm<sup>2</sup>、von Mises の降伏条件、塑性域における構成則は等方硬化則、ポアソン比を 0.3 とする。材料特性として、真応力<sub>i</sub>σ - 真ひずみ<sub>i</sub>ε 関係を図2に示す。<sub>i</sub>σ - <sub>i</sub>ε 関係は素材引張試験結果を多直線近似したものである。

2.3 脆性破壊条件

脆性破壊条件として破壊限界応力 $\sigma_c$ <sup>(例えば4)</sup>を用いる。表2に切欠き付き丸棒引張試験より得られた破断荷重 $P_c$ 、有限要素解析により算出した $P_c$ に対応する $\sigma_c$ を示す。試験片は円周に曲率半径 0.25mm の切欠きを有する丸棒引張試験片であり、最小断面は切欠き底部でφ6mmである。試験は-196℃で実施しており、解析は同温度で別途実施した素材試験結果より得られた<sub>i</sub>σ - <sub>i</sub>ε 関係を使用する。最小要素寸法とその他の解析仮定は前述と同様である。

本解析では最大主応力 $\sigma_1$ が試験結果8本に対して算出した $\sigma_c$ の平均値 $ave.\sigma_c=1688N/mm^2$ に到達する時に脆性破壊発生条件に達するものとする。

表1 解析モデルリスト

No.	モデル種別	欠陥寸法 (mm)			欠陥率 $\alpha$ (%)	治具要素	材料特性	実験時の終局状況 <sup>2),3)</sup>	
		高さ d	長さ a	幅 W					
F1	フルモデル	—			0	ビーム	降伏棚なし	—	
F2		—							降伏棚あり
F3		—							
S1	サブモデル	2.5	14	0.4	ソリッド	降伏棚なし	押切り破断		
S2		5	7					1.4	
S3		14	2.8	脆性破断					
S4		10	11.5				4.6		
S5		20	19				15.2	延性破断	

表2 破断荷重と破壊限界応力

No.	$P_c$ (kN)	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	S	$ave.\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$i\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	27.1	1615	62.96	1688	1625	1751
2	30.6	1678				
3	40.6	1772				
4	37.5	1756				
5	35.7	1741				
6	26.5	1608				
7	29.1	1651				
8	30.5	1680				

$P_c$ : 破断荷重,  $\sigma_c$ : 破壊限界応力, S: 標準偏差,  $ave.\sigma_c$ :  $\sigma_c$  の平均値,  $i\sigma_c$ :  $\sigma_c$  に S を加減した値

Cyclic loading test of joints with lack-of-fusion defect at 35 degrees groove face

- Part 4 Finite element analysis on surface layer edge defect -

HATTORI Kazunori, SOKAWA Yosuke, NAKANO Tatsuya, MINAMI Susumu

### 3. 解析結果

#### 3.1 モデル化の比較

フルモデルについてモデル化の影響を比較する。図3に荷重変形関係を示す。Pは加力点から得られる反力の和、 $\delta$ は全体変形であり次式で算出される。

$$\delta = D2 - \text{ave.}(D1, D3) \quad (1)$$

図3より、弾性剛性については実験結果と同程度のF2、F3と比較してF1は高い。これは、加力ビームのせん断変形が考慮されていないためである。また、F2、F3の耐力を比較すると降伏棚の有無に起因してF2よりF3の方が若干高い。以上より、本解析では加力ビームをソリッド要素でモデル化し、実験結果により近い耐力を示したF3の全体挙動をサブモデルに与えることとする。

#### 3.2 破壊性状の検討に関する実験結果との対応

図4に延性き裂発生駆動力  $D - \delta$  の関係、図5に  $\sigma_1 - \delta$  の関係を示し、図6に図4、図5より得られる  $\delta_{dc}$ 、 $\delta_{bf}$  と実験における最大変位  $\delta_{max}$  の関係を示す。図4、5の凡例は共通である。図6中には  $\sigma_c$  に  $S$  を加減した値の範囲でとり得る  $\delta_{bf}$  を白抜きプロットで併記している。 $\delta_{dc}$  は  $D=1$ 、 $\delta_{bf}$  は  $\sigma_1$  が  $\sigma_c$  に到達する時の  $\delta$  であり、 $D$  は文献5)の延性き裂発生条件式より次式で与えられる。

$$D = \epsilon_{eq} \tau^2 / t \epsilon_u \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon_u$  は供試材の真一様伸び、 $\tau$  は応力三軸度である。

図5より欠陥率が最も大きいNo.5のみ同一  $\delta$  時の  $\sigma_1$  は小さく、解析終了時の  $\delta$  (=110mm) まで  $\sigma_1$  は  $\sigma_c$  に到達しておらず、他のモデルと比較して  $\delta_{dc}$  と  $\delta_{max}$  の対応が良い。実験でNo.5は他の試験体と比較して早期に延性き裂が発生・進展し、これに伴う耐力低下により脆性破壊に転化せず終局状態を迎えていることから、破壊性状の差については傾向を捉えている。他のモデルについては、図6より  $\delta_{max}$  との対応については  $\delta_{dc}$  より  $\delta_{bf}$  の方が良いが、実験では延性き裂進展後に脆性破壊しているのに対して、

解析ではこれを考慮していないことが実験結果との対応を阻害する一要因となっていることを留意する必要がある。また、欠陥率が大きいほど変形性能が低下する傾向がみられた実験結果に対し、図4、5より解析ではこのような傾向はみられない。この要因を応力分布から考察する。

図7に欠陥近傍の  $\delta=60\text{mm}$  時におけるミーゼス応力  $\sigma_e$ 、コンター図を示す。図7より本解析で想定していた欠陥高さ方向の先端（以下、底部）のほか、幅方向への欠陥の開口に起因して欠陥幅方向の先端（以下、側部）にも応力集中が生じている。本解析では側部を底部のように詳細にモデル化しておらず、破壊起点を判断できないため、今後は欠陥先端の全域を同条件でモデル化して応力・ひずみ状態を再検討する必要がある。

### 4. 結

本報では有限要素解析を行い、応力・ひずみ状態および破壊性状を検討した。今後はモデル化に関する改善点を踏まえたうえで、欠陥に関する形状因子と応力・ひずみ状態の関係をパラメトリックに検討することが課題である。

#### 参考文献

- 1) 服部和徳, 笠原基弘, 中込忠男: 35度開先面に発生する融合不良に対する超音波探傷試験方法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.991-992, 2014.9.
- 2) アルムニフサミル, 服部和徳, 見波進, 笠原基弘: 35度開先面に融合不良を有する接合部の繰返し載荷実験 (その1-2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1043-1046, 2015.9.
- 3) アルムニフサミル, 見波進, 服部和徳: 35度開先面に融合不良を有する接合部の繰返し載荷実験 (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1201-1202, 2016.8.
- 4) BEREMIN, F.M.: A Local Criterion for Cleavage Fracture of a Nuclear Pressure Vessel Steel, Metallurgical Transactions, Volume 14A, pp.2277-2287, 1983.11.
- 5) 桑村仁, 山本恵市: 三軸応力状態における構造用鋼材の延性き裂発生条件, 日本建築学会構造系論文集, 第477号, pp.129-135, 1995.11

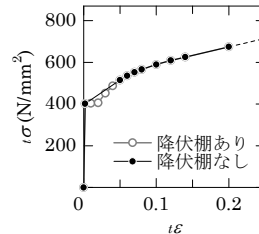


図2 材料特性

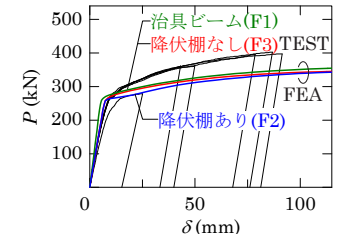


図3 荷重変形関係

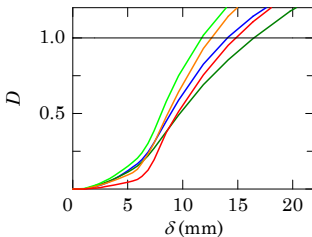


図4  $D - \delta$  関係

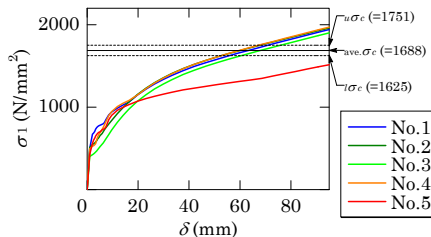


図5  $\sigma_1 - \delta$  関係

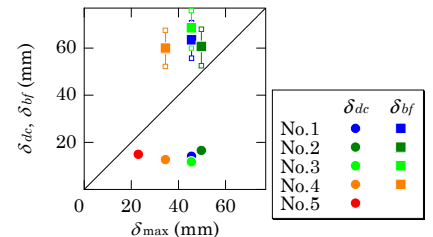


図6 破壊時期の比較

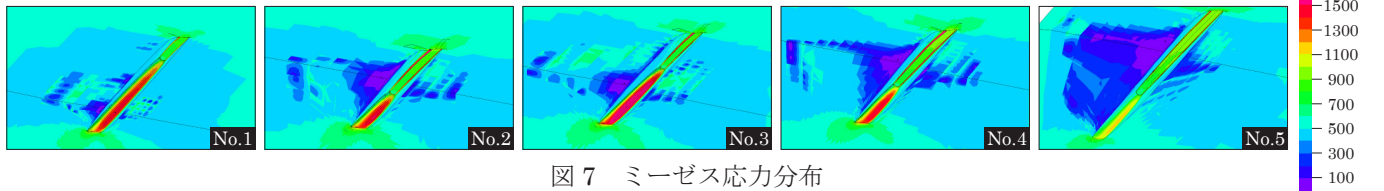


図7 ミーゼス応力分布

\* 1 一般財団法人ベターリビングつくば建築試験研究センター 博士 (工学), \* 2 宇都宮大学大学院工学研究科 大学院生・修士 (工学), \* 3 東京電機大学理工学部 教授・博士 (工学), \* 4 宇都宮大学地域デザイン科学部 准教授・博士 (工学)

\* 1 Tsukuba Building Test Laboratory of Center for Better Living, Dr. Eng., \* 2 Graduate student, Graduate school of Eng., Utsunomiya Univ., M. Eng. \* 3 Prof., School of Science and Eng., Tokyo Denki Univ., Dr. Eng., \* 4 Assoc. Prof., Faculty of regional design, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.,