

冷間成形角形鋼管柱端接合部における延性き裂進展シミュレーション

冷間成形角形鋼管 有限要素解析 溶接 正会員 ○ 宗川 陽祐 *¹ 正会員 中野 達也 *²
破壊 延性き裂 平面ひずみ 同 見波 進 *³ 同 服部 和徳 *⁴

1. 序

溶接接合部における脆性破壊条件は、進展する延性き裂先端の材料靱性に大きく依存するため、延性き裂の進展経路を明らかにすることは接合部の構造性能を把握する上で重要となる。特に、実大スケールの載荷実験が困難な場合、破壊現象を解析により再現できれば、実験に費やすコストを削減できるほか、理論的な検討が可能となる。

角形鋼管柱端接合部を対象とする既往の有限要素解析¹⁾によれば、角部材側溶接止端部における応力・ひずみ状態は実大実験²⁾を再現する3Dソリッド要素モデル(以下、3Dモデル)と平面ひずみ状態を仮定した2Dソリッド要素モデル(以下、2Dモデル)で良好な対応を示しており、簡略化したモデルによる検討の可能性が期待できる。

本研究では延性き裂の発生・進展について有限要素解析で再現することを目標としており、先述した背景から、本報では既往の実大実験²⁾を対象とし次章で後述する手法を取り入れた有限要素解析を行い、延性き裂の進展経路に関する解析的な検討を試みる。

2. 有限要素解析の概要

2.1 解析対象

解析対象は文献2)の実験である。コラムサイズ□550×550×32(BCP325, 試験体 No.2), せん断スパン2000mmであり、溶接部は試験体を再現している。材料特性には図1に示す素材引張試験結果を使用している。

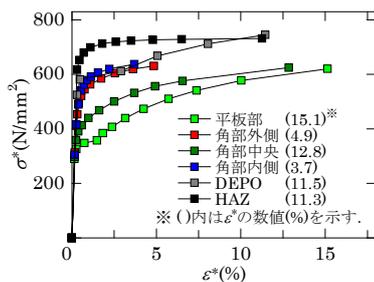


図1 材料特性

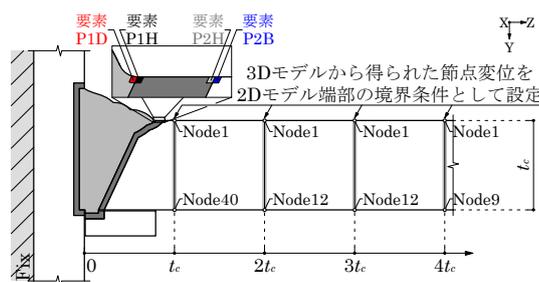


図2 2Dモデルの概要

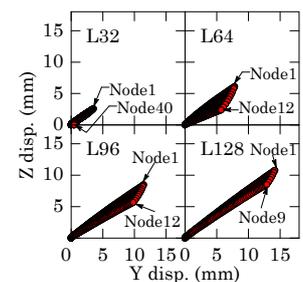


図3 節点変位オービット

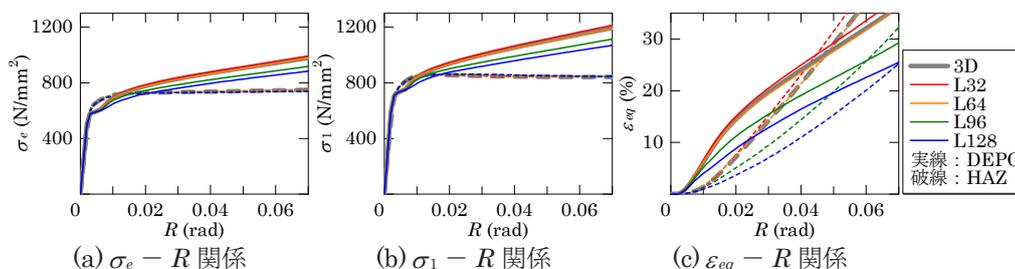


図4 モデル化の範囲の影響

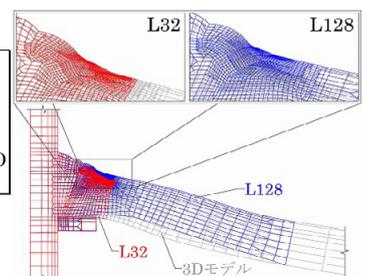


図5 変形状況の比較

2.2 延性き裂の進展条件

解析は、汎用弾塑性有限要素解析ソフト「ADINA ver.9.1」による弾塑性解析である。当該ソフトは条件に到達した要素を消滅させることが可能であり、本解析では次式を要素消滅条件とし、延性き裂の進展を再現する。

$$D \geq 1 \tag{1}$$

ここで、 D は延性き裂発生駆動力であり、既往の延性き裂発生条件式³⁾を変形することで次式により算定される。

$$D = \epsilon_{eq} \tau^2 / \epsilon_u^* \tag{2}$$

ここで、 ϵ_{eq} は相当塑性ひずみ、 τ は応力三軸度、 ϵ_u^* は素材の真一様伸びである。その他の解析条件については文献1)と同様である。

3. モデル化の範囲の検討

接合部近傍ではポアソン効果による面外曲げが作用することが知られており⁴⁾、このような状況を踏まえ、2Dモデルの範囲を検討する。解析モデルは図2に示すようにダイアフラム面からの距離をコラム板厚 $t_c \sim 4t_c$ とする4体(L32~L128モデル)用意している。3D・2Dモデル共に要素分割は文献1)と同様で、4節点要素を基本とし、最小要素寸法は0.3mmである。2Dモデルの境界条件は文献1)と同様に、事前に解析した3Dモデル端部から抽出される節点変位オービット(図3参照)を端部に設定する。

図4にモデル化の範囲の影響を示す。評価点は要素P1D、P1Hである。図4より、同一部材角 R 時のミーゼ

ス応力 σ_e , 最大主応力 σ_1 , ε_{eq} は範囲が広域なモデルほどに小さい. 図 5 に $R=1/20\text{rad}$ 時の L32, 128 モデルの変形状況を示す. 図 5 より, L128 モデルは 3D モデルに見られる面外曲げはほとんど生じていない. 図 6 に 3D モデルのダイアフラムから反曲点までの距離 L' の推移を示す. 反曲点は板厚の外側・内側のひずみから求めている. 図 6 中には材端モーメント M を併記している. L' はコラムの塑性化以降 50mm 程度を推移している. これらの結果より, 反曲点に最も近い L64 モデルが, 3D モデルの応力・ひずみ状態に近い結果となったと考えられる.

4. 2D モデルと 3D モデルの対応

L64 モデルについて, 3D モデルとの対応を確認する. 図 7 に ε_{eq} , τ , D の比較を示す. 図 7 より, 2D モデルと 3D モデルで要素 P1D, P1H は同様な挙動を示す一方で, 要素 P2H, P2B は異なる挙動を示す. 図 8 に直交方向応力度 σ_x 分布を示す. 図 8 より, 溶着金属部では同様である一方, 母材部では 2D モデルの方が 3D モデルより広域で高い分布を示している. これらの要因として, 3D モデルでは存在する溶着金属から母材部にかけて生じる直交方向の変形拘束の差異を, 2D モデルでは再現していないことが考えられる.

5. 延性き裂の進展解析

図 9 に L64 モデルの延性き裂の進展解析結果, 写真 1 に断面マクロ²⁾を示す. Mesh1 は要素分割をこれまで同様, Mesh2 は最小要素寸法を 0.1mm とするもの, Mesh3 は最小要素寸法を 0.1mm とした上で 3 節点要素を増やし, 不規則に配置するものである. Mesh1, 2 は 4 節点要素が規則的に配置していることに起因して, 要素の消滅がその

配列に沿うように進展している. Mesh3 は Mesh1, 2 と比較して多数の 3 節点要素が存在することで隣接する要素の配列が不規則となることに起因して, 実験²⁾で確認されたように延性き裂が母材方向へ進展する様子を再現できている. ただし, 延性き裂の発生点は DEPO と HAZ の境界で確認された実験に対し, 解析では要素 P2B から発生している. この要因として, 平面ひずみ要素と仮定していること, HAZ と母材間で材料特性が急変していることが考えられ, これらに対する検討は今後の課題である.

6. 結

本報では既往の実験²⁾を対象として有限要素解析を行い, 延性き裂の進展経路に関する解析的な検討を試みた. 得られた結果を以下に示す.

- [1] 2D モデルの範囲は, 接合部近傍の反曲点に近い L64 モデルが最も 3D モデルと対応の良い結果となった.
- [2] 要素分割は, 三角形要素を多用した Mesh3 が実験と同様に母材方向に延性き裂が進展する傾向となった.
- [3] [2] の結果が得られた一方, 延性き裂の発生個所は, DEPO-HAZ 境界となった実験と異なり, 母材 (要素 P2B) となった.

参考文献

- 1) 宗川陽祐, 中野達也, 見波進, 服部和徳, 増田浩志: 25 度狭開先ロボット溶接を適用した柱端接合部の性能評価—その 10 有限要素解析 (その 2)—, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 材料施工, pp.993-994, 2017.9
- 2) 宗川陽祐, 中野達也, 見波進, 服部和徳, 増田浩志: NBFW 法による 25 度狭開先ロボット溶接を適用した冷間成形角形鋼管—通しダイアフラム接合部の実大曲げ実験, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.64B, 2018.3
- 3) 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
- 4) 日本建築センター: 2008 年度版 冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル, 2008.12

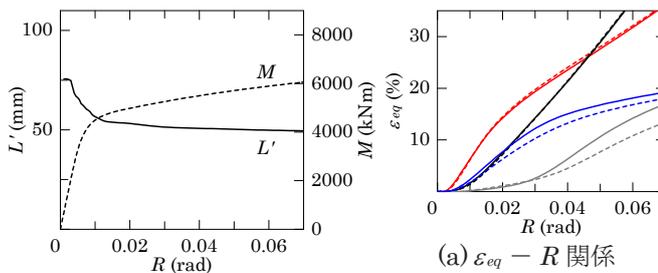


図 6 $L' - R$ 関係

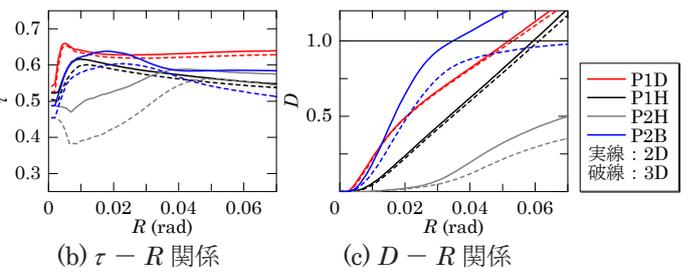


図 7 2D モデルと 3D モデルの比較

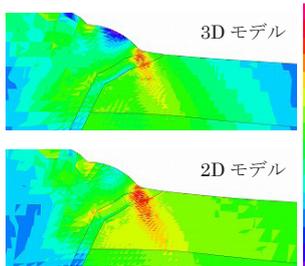


図 8 σ_x 分布

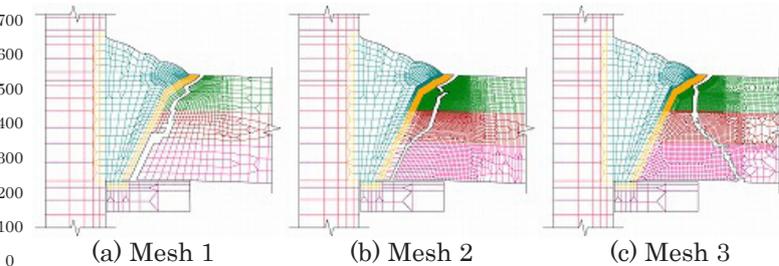


図 9 延性き裂の進展解析結果

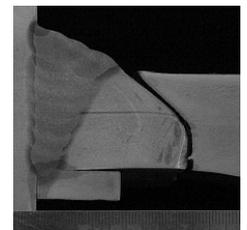


写真 1 破断面マクロ

* 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 (元 宇都宮大学大学院生)
 * 2 宇都宮大学地域デザイン科学部
 * 3 東京電機大学理工学部
 * 4 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

* 1 Tsukuba Building Test Laboratory of Center for Better Living (Former Graduate Student, Utsunomiya Univ.)
 * 2 Faculty of regional design, Utsunomiya Univ.
 * 3 School of Science and Eng., Tokyo Denki Univ.
 * 4 Tsukuba Building Test Laboratory of Center for Better Living