

ルーフデッキ鋼板の材料特性と 焼抜き栓溶接部のせん断挙動

MATERIAL PROPERTY OF ROOF DECK STEEL PLATES AND SHEAR BEHAVIOR OF CONNECTIONS WITH PUDDLE WELDING

高木次郎 — * 1 庄子恭史 — * 2
 岡田忠義 — * 3 佐藤由悟 — * 4
 大津達郎 — * 5

Jiro TAKAGI — * 1 Yasufumi SHOJI — * 2
 Tadayoshi OKADA — * 3 Yugo SATO — * 4
 Tatsuro OTSU — * 5

キーワード：
 ルーフデッキ鋼板, 焼抜き栓溶接, 材料特性, 有限要素法

Keywords:
 Roof deck steel plate, Puddle welding, Material property, Finite element analysis

Corrugated fold roof deck plates are used for roofs in steel buildings and are cost effective without concrete slab. In addition to their strength and stiffness against loads in out-of-plane vertical directions, they have certain capability to resist loads in the in-plane horizontal directions providing the diaphragms of roofs. The roof deck plates are typically connected to the beams with puddle welding. They can rupture under excessive shear force experiencing large inelastic strain around the connections. The material properties of the plates are firstly investigated including their large strain region. Simplified material properties for FEM simulation is secondly proposed and are varied with the test data of the connections with puddle welding.

1. 序論

鋼構造建物のルーフデッキを用いた屋根(図1)には, コンクリートが打設されず, コスト軽減と工期短縮が可能である。一方で, コンクリートと鉄骨梁が一体化される合成梁構造と比較して面内剛性と耐力が低く, 水平ブレースが併用されることが多い。これに対して, ルーフデッキの面内剛性と耐力を積極的に評価して, 屋根面内のせん断力伝達要素として利用することを考える^{1,2)}。その場合, 支持材である鉄骨梁との接合部のせん断挙動評価が重要になる。接合には, 現場での焼抜き栓溶接が用いられることが多く, ルーフデッキを屋根面内のせん断力伝達要素として利用する場合, 溶接部周辺で局所的に大きな歪が発生することが想定される²⁻⁴⁾。そこで本研究では, 大きな歪領域を含む材料特性を評価すると共に, 接合部のせん断挙動を実験と解析により分析する。

2. ルーフデッキ鋼板の材料引張試験

ルーフデッキ鋼板のJIS Z 2241 (13B号) 引張試験を行った。250kN引張試験機を用い, 鋼材降伏までを4.0MPa/sec, 降伏から破断までを7.5mm/minの速度で3体試験した。マイクロメータで測定した試験片の厚さはいずれも1.00mmであり, 電磁膜厚計で測定しためっき厚さは0.033mmであった。3体の結果はよく一致した。そのうちの1体の応力-歪関係を図2に示す。同図は, 標点間の変形量を標点間距離(=50mm)で除した公称歪 ϵ_n と載荷荷重を試験体の載荷前断面積で除した公称応力 σ_n の関係である。鋼板の規格と得られた機械的性質を表1に示す。ここで, 同表中のヤング係数は, 引張強さの1/10と1/3の点の割線剛性である。

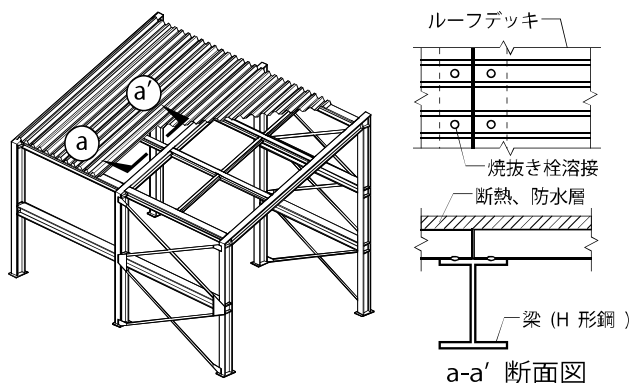


図1 ルーフデッキを用いた屋根の構成

表1 ルーフデッキ鋼板の機械的性質

鋼板規格	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SDP1TG	1.00	236	349	38	170

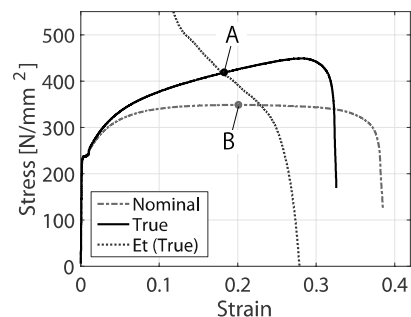


図2 ルーフデッキ鋼板の材料引張試験結果

¹⁾ 首都大学東京都市環境科学研究科 准教授・Ph.D. (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

²⁾ 首都大学東京都市環境科学研究科 大学院生

³⁾ 日鐵住金建材(株) 博士(工学)

⁴⁾ 日鐵住金建材(株) 修士(工学)

⁵⁾ (株)建築構造研究所 修士(工学)

¹⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan Univ., Ph.D.

²⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan Univ.

³⁾ Nippon Steel and Sumikin Metal Product Co., Ltd., Dr. Eng.

⁴⁾ Nippon Steel and Sumikin Metal Product Co., Ltd., M. Eng.

⁵⁾ Building Structure Institute, M. Eng.

図2の公称応力-公称歪関係を下式によって、真応力-真歪関係に換算した結果を同図中に併記した⁵⁾。

$$\sigma_t = \sigma_n(1 + \varepsilon_n) \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (2)$$

ここで、 σ_t と ε_t は真応力と真歪である。(1)、(2)式は体積一定の仮定に基づく換算式であり、試験における引張強さ以前の一様伸びの状態では正しいが、くびれが発生して局部伸びが進行した状態では、くびれ部の真応力と真歪を評価できない。後述の焼抜き栓溶接部のせん断実験の解析では、溶接部周辺で20%を超える歪が発生することから、大きな歪領域を含む材料特性の評価を試みる。

いま、公称応力-公称歪関係の引張強さ点(図2のB点)に対応する真応力-真歪関係上の点を図2のA点とする。すなわちB点の応力と歪の値を(1)、(2)式に代入することでA点を得る。一方、材料引張試験で、一様伸びから局部伸びへの移行点を一様伸び限界点と呼ぶことにすると、一様伸び限界点は、くびれの発生開始点であり、この点で以下の関係が成立する^{6,7)}。

$$E_t(\varepsilon) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (3)$$

ここで、 E_t は接線剛性である。真応力-真歪関係の $E_t(\varepsilon)$ 値を図2に示すと、A点で(3)式が成立する($E_t(\varepsilon_A) = \sigma_t$ となる)ことが確認できる。すなわち、A点と一様伸び限界点は一致し、材料引張試験では鋼板の発生応力が引張強さに到達すると同時にくびれが発生し始めることが分かる。

3. 一様伸び限界点より大きい歪領域の材料特性

真応力-真歪関係において、歪が一様伸び限界点(図2のA点)の歪(ε_A とする)より大きく、耐力喪失時歪(ε_V とする)より小さい範囲の材料特性について考察する。はじめに、一様伸び限界点の接線剛性をそのまま保持する場合と下式により剛性が歪の1次関数で変化する場合を考える。

$$\varepsilon_A \leq \varepsilon \leq \varepsilon_V \quad \text{のとき} \quad E_t(\varepsilon) = E_t(\varepsilon_A) + c(\varepsilon - \varepsilon_A) \quad (4)$$

$$\varepsilon_V < \varepsilon \quad \text{のとき} \quad \sigma = 0 \quad (5)$$

ここで、 c は定数であり、その値をパラメトリックに変化させる。このように設定した材料特性を「母材特性」と呼ぶことにする。図3に各母材特性を材料引張試験結果と共に示す。母材特性を用いて、材料引張試験の解析を行い公称応力-公称歪関係を得る。これを材料引張試験の結果と比較して、試験体破断までの挙動が概ね一致するよう ε_V 値のキャリブレーションを行う。すなわち、 c 値に応じて ε_V 値を特定する。

図4に材料引張試験片のFEM解析モデルを示す。メッシュ分割は図の通りである。モデルを構成する要素は4節点1積分点を有する長方形シェル要素を基本とし、メッシュサイズの移行部分で3節点1積分点を有する三角形シェル要素を用いる。要素の厚さ方向の積分点数は3とする。解析負荷低減のため、応力集中の有無に応じてメッシュサイズを調整した。

図4中の標点位置の加力方向の相対変位(=d2-d1)を標点間距離50mmで除した値が公称歪である。これは、材料引張試験の公称歪算出方法と同じである。解析で算出した公称応力は、モデル固定部の

全節点の加力方向反力の合計を試験片中央の断面積(=1.00mm×12.5mm)で除した値である。

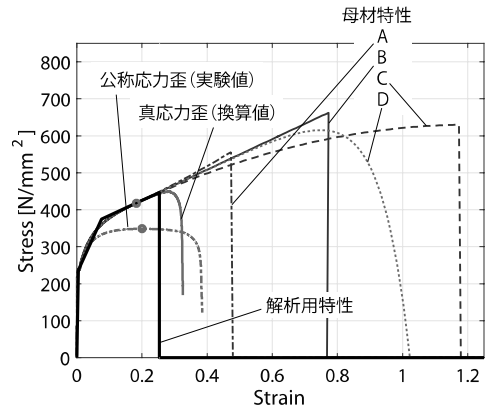


図3 材料特性の設定

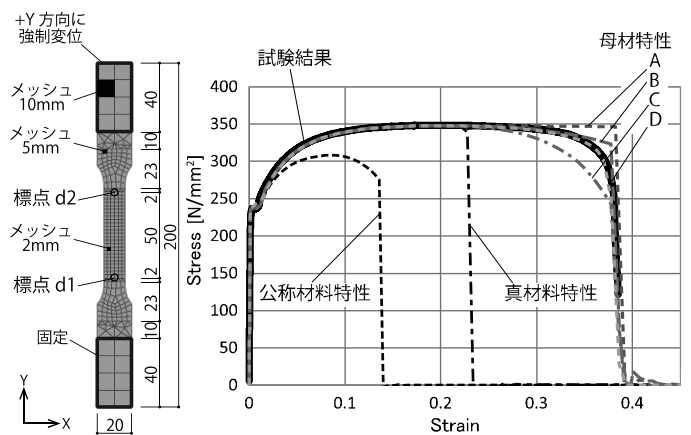


図4 材料引張試験片解析モデル

図5 材料引張試験と解析から得られた公称応力-公称歪関係

表2 母材特性の設定

母材特性	c (*1)	ε_V (*2)	$\varepsilon_A < \varepsilon$ の範囲の剛性の特徴
A	400	0.48	歪の1次関数で剛性増大
B	0	0.78	剛性変化無し
C	-400	1.18	歪の1次関数で剛性減少
D	-0.01, 11	1.01	歪の指数関数を導入

(*1): 母材特性Dについては、 c_1 値と c_2 値を示す。

(*2): 母材特性Dについては、 ε_{00} 値を示す。

試験片の解析モデルに図2の真応力-真歪関係を材料特性として用いた場合(真材料特性)と公称応力-公称歪を用いた場合(公称材料特性)の解析結果を実験結果と比較して図5に示す。材料引張試験の公称応力-公称歪関係と同様の方法で解析での公称応力-公称歪関係を算出した結果である。いずれの場合も試験結果よりも試験片破断時の歪値が小さい。また、表2のような c と ε_V の組み合わせの母材特性を用いた解析結果も併記した。一様伸び限界点の接線剛性をそのまま保持する場合(母材特性B)において、材料引張試験の破断近くまで最もよい精度で整合した。図3と表2に示すように、母材特性Bの耐力喪失時歪 ε_V は78%であるのに対し、一様伸び限界点からわずかに剛性が増大する母材特性Aの ε_V は48%である。両者の差が大きい理由は、母材特性Aの解析では、くびれがほとんど発生せず、一様伸びの状態に近いまま破断するのに対して、母材特性B-Cでは、一様伸びから局部伸びの状態に転じて、くびれが発生す

るためである。図6に母材特性AとBを用いた解析の公称歪34%時の変形と歪分布を示す。母材特性Aの場合は塑性域がほぼ一様に分布しているのに対して、母材特性Bの場合は、中央付近にくびれがあり、局部伸びの進展が確認できる。くびれ付近の歪は80%に近い。図7に材料引張試験終了後の試験片の状態を示す。母材特性Bの最大歪が ϵ_V を超えた時点でにくびれ部分の試験片幅は8.8mmであり、試験終了後の破断部の幅は8.3mmであった。

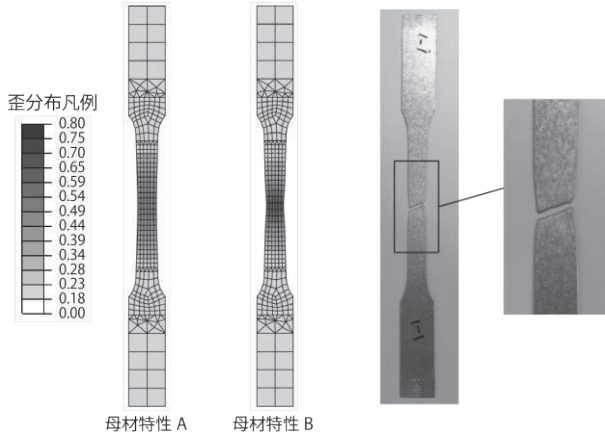


図6 母材特性を用いた解析の公称歪34%時の変形と歪分布 図7 材料引張試験終了後の試験片

図5の公称応力-公称歪関係において、試験結果とより一致する材料特性を考えてみる。母材特性B（一樣伸び限界点の接線剛性を維持）を用いた解析結果は、公称歪38%付近の破断直前まで良い精度で試験結果に一致する。破断直前で解析の耐力が過大になる原因は、母材特性Bの耐力喪失時歪 ϵ_V で急激に耐力を喪失する設定にあると考え、以下のような指数関数を導入する。

$$\epsilon_A \leq \epsilon \leq \epsilon_{VD} \quad \text{のとき} \quad \sigma(\epsilon) = C_1 \exp(C_2 \epsilon) + C_3 \epsilon + C_4 \quad (6)$$

$$\epsilon_{VD} < \epsilon \quad \text{のとき} \quad \sigma = 0 \quad (7)$$

ここで、 ϵ_{VD} は(6)式で左辺=0を満足する ϵ 値である。また C_1 - C_4 は定数である。一樣伸び限界点(図2のA点)で応力と剛性がそれぞれ $\sigma(\epsilon_A)$ と $E t(\epsilon_A)$ となる境界条件から、 C_3 と C_4 が求まり、 C_1 と C_2 の値をパラメトリックに変化させ、材料引張試験の公称応力-公称歪関係に整合する組合せを求めた。その一例として、 $C_1=0.01$ と $C_2=11$ とした場合の材料特性を母材特性Dとする(図3)。このときの ϵ_{VD} 値は1.01である。母材特性Dを用いた解析の公称応力-公称歪関係は材料引張試験結果とよく整合する(図5)。

4. 焼抜き栓溶接部のせん断実験

焼抜き栓溶接はルーフェッキを溶接熱で溶かしながら、鉄骨梁フランジと接合する方法であり、焼抜き栓溶接施工要領⁸⁾の定める溶接部の径は18mm以上である。図8にルーフェッキの鋼材と支持部材(梁等)との焼抜き栓溶接接合部のせん断実験試験体を示す。試験体鋼板の幅は125mm、板厚は1.0mm(実測1.01mm)である。同鋼板を支持材である梁のフランジを想定した鋼製治具(治具A)と鋼板端部から25mmの位置で実測径21.2mmの焼抜き栓溶接により接合した。鋼板と加力治具(治具B)とは図の範囲で隅肉溶接により一体化した。図8の上下方向に万能試験機により単調引張载荷した。治

具Bの表と裏に設置した接触変位計により、治具Aの上端から25mmの位置に設けた両ねじボルトで固定したL字アングルの変位を測定した(図8)。変位計の中心から鋼板までの距離(図8中の D_1 、 D_2)に応じて(8)式による重み平均 δ_A を焼抜き栓溶接部のせん断変位とした。同式中の δ_1 と δ_2 はそれぞれ試験体表側と裏側の計測変位である。焼抜き栓溶接の入熱によって、鋼板と支持材は面外に変形しており、载荷中の面外変形が無視できないことから表裏の変位計の単純平均ではなく、重み平均とした。図8の試験体表裏の歪測定箇所5箇所ずつでせん断力方向の歪を測定した。試験体のルーフェッキ鋼板は前章の材料引張試験に用いたものと同規格同一ロットである(表1)。

$$\delta_A = \frac{\delta_2 D_1 + \delta_1 D_2}{D_1 + D_2} \quad (8)$$

実験の荷重-変位関係を後述の解析結果と合わせて図9に示す。実験結果の初期剛性は71.5kN/mmであり、降伏荷重とその時の変位はそれぞれ16.2kNと0.25mmである。また、最大荷重は21.0kNである。なお、初期剛性は最大荷重の1/3と1/2の点の割線剛性と定義し、降伏荷重は接線剛性が初期剛性の1/3となる点の荷重と定義した。

最大荷重時せん断変位は約1mmであり、焼抜き栓溶接部のはしあき側で、鋼板が治具と反対側に面外変形した(めくれあがった)ことで、荷重が低下した。その後、接合部が鋼板にめり込みながら、接合部の加力側に亀裂が発生し、せん断変位2.5mm付近で荷重が大きく低下した。図10に図8の①-⑤で測定した歪(表裏の平均)とせん断変位の関係を示す。せん断変位2.5mm付近で歪が低下しており、亀裂発生による荷重低下の様子が確認できる。図11はせん断変位3.6mm時と5.9mm時の接合部周辺の亀裂の様子である。また、図12はせん断変位6.2mm時の接合部はしあき側の面外変形の様子である。

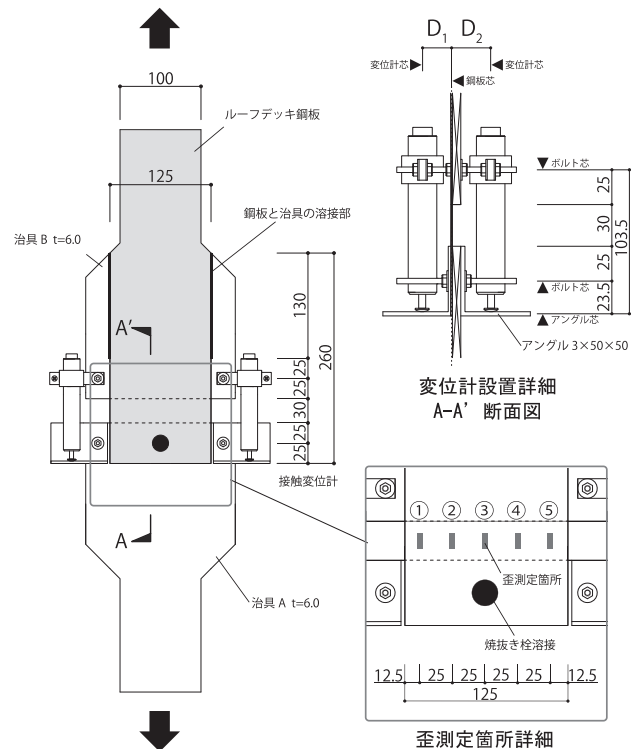


図8 焼抜き栓接合部せん断試験体

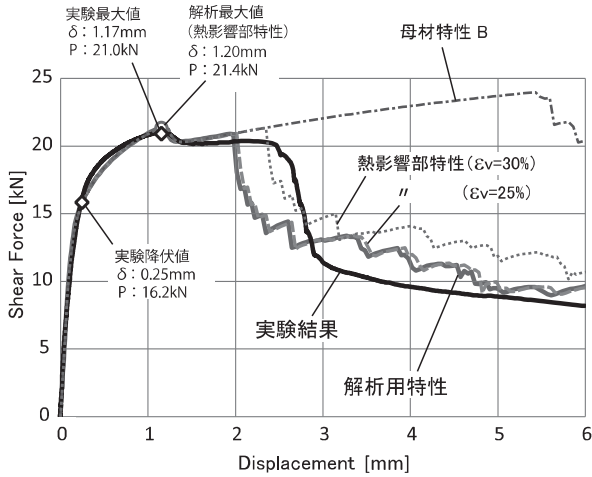


図9 焼抜き栓溶接部の実験と解析の荷重-変位関係

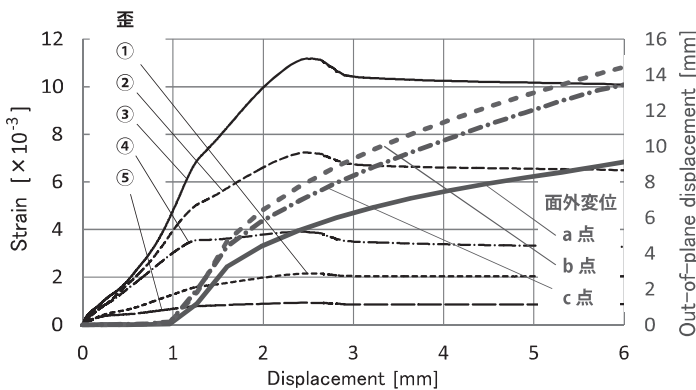


図10 歪とせん断変位の関係（実験結果）および面外変位とせん断変位の関係（解析結果）

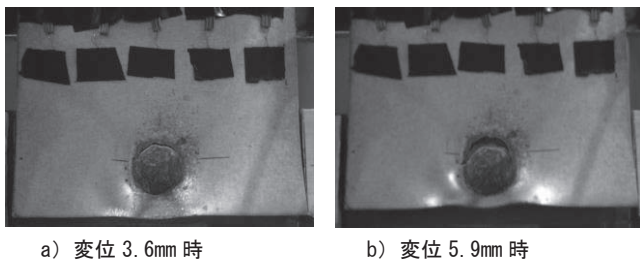


図11 接合部周辺の亀裂発生状況

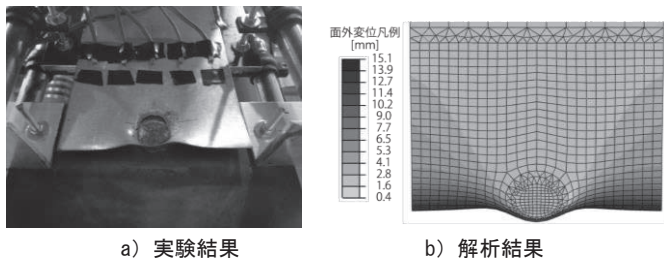


図12 せん断変位 6.2mm 時の鋼板の面外変形の様子

5. 焼抜き栓溶接部の解析

焼抜き栓溶接接合部の実験を前述の図2と表2の材料特性を用いたFEM解析により評価する。図13に解析モデルの概要を示す。モデルの溶接部径と板厚はそれぞれ試験体の測定値と同じ21.2mmと

1.01mmである。応力集中の有無に応じて要素の大きさを調整した。具体的には、溶接部を2mm、モデル下端から120mm以内を5mm、下端から130-160mmを10mm、上端から90mm以内を15mmとした。積分点等の要素の特性は前述の材料引張試験の解析モデルと同様である。試験体の隅肉溶接箇所各節点でめっき鋼板の変位を拘束し、焼抜き栓溶接部内の全節点について、図中-Y方向の強制変位を与えた。また、溶接接合部以外の節点について、実験治具との接触方向への面外変位を許容しない。解析は局部座屈や破断など急激な耐力低下を伴い、静的な解析では不安定になりやすい現象を評価する目的で、動的陽解法(ABAQUS/Explicit)を用いた^{9,10)}。これは、時間を増分変数として、構造物の固有周期よりも十分長い時間をかけて準静的に強制変位を与える方法である。

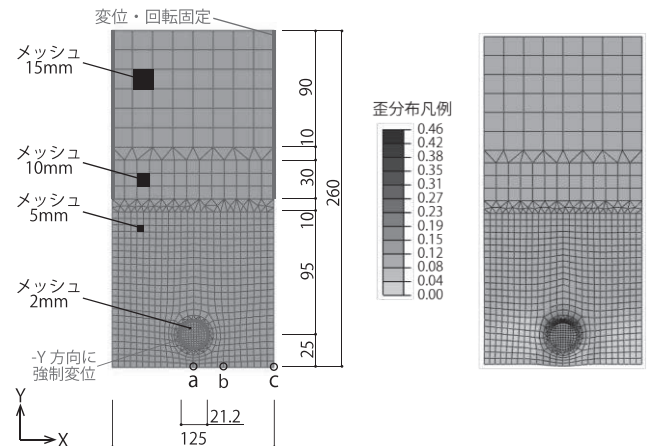


図13 焼抜き栓溶接部の解析モデル 図14 変位約2.6mm時歪分布

材料特性として、図3の母材特性Bを採用した場合の解析結果の荷重-変位関係を図9の実験結果に併記した。前章では、母材特性Dが材料引張試験の結果を精度よく評価できることを示した(図5)が、後述のように接合部のせん断挙動は40%を超える歪領域の材料特性の影響をほとんど受けないため、比較的単純な母材特性Bを用いて実験と比較した。つまり、焼抜き栓溶接部周辺の熱影響部の材料特性を考えたとき、母材の材料特性で検討したような40%を超える歪領域までの伸び性能はなく、その場合、母材特性BとDの差は限定的である。解析モデルの単純化の目的から、指数関数で定義した母材特性Dよりも母材特性Bの方が汎用性が高いことを踏まえて、母材特性Bを基本として接合部の挙動を考える。母材特性Dは材料引張試験とのキャリブレーションから、大きな歪領域の母材の材料特性を追求した結果であり、本章では、熱影響部の伸び性能が大きくない結果を見据えて、より単純な材料特性の設定を試みる。

実験における治具の変形は無視できると考え、実験の標点間変位と解析の焼抜き栓溶接部と隅肉溶接固定部の間のせん断変位をそれぞれグラフの横軸とした。初期剛性を含めて、せん断変位1mm付近までの解析結果は実験結果によく一致した(図9)。図13に示す接合部はしあき側の3点の面外変位を図10に併記した。これらは実験でも比較的大きな面外変位が確認された箇所であるが、特にb点で面外変位が大きくなる現象を解析でも評価できた(図12)。また、せん断変位約1mmから面外変位が増大しており、この時に最大せん断耐力が記録されている。従って、最大せん断耐力は接合部はしあ

き部の面外変形の進行により決定されたと考えられる。一方、実験では、せん断変位 2.5 mm 付近で耐力が大きく低下したのに対し、解析では、一定の剛性を保ったまま、せん断変位 5.5 mm 付近まで耐力が上昇した。この相異の理由として、焼抜き栓溶接部周囲の熱影響部の材料特性が評価できていないことが考えられる。実験では熱影響部の伸び性能の低下により焼抜き栓溶接部周囲の加力側に亀裂が発生しているが、解析ではこれを評価できていない。そこで、熱影響部の材料特性（熱影響部特性）を母材特性 B と同様として、耐力喪失時歪 ϵ_r のみをパラメトリックに変更して実験と解析の結果を比較した。解析モデルではルーフデッキ鋼板全体に対して、熱影響部特性を適用した。これは、試験体に発生する応力は焼抜き栓溶接部周辺で最大となり、同部の亀裂により接合部の塑性せん断変形が直接的に発生することから、焼抜き栓溶接部周辺とその他の領域で材料特性を区別することによる解析結果への影響がほとんどないためである。

実験結果と比較的整合した $\epsilon_r=25\%$ と 30% の場合の解析結果を図 9 に併記した。 $\epsilon_r=25\%$ の場合、実験では、亀裂発生による耐力低下時のせん断変位が約 2.5 mm であるのに対し、解析では約 2.0 mm となった。 $\epsilon_r=30\%$ の場合、亀裂発生による耐力低下時のせん断変位は約 2.5 mm と実験とほぼ一致するものの、耐力低下直前の耐力が最大耐力に近い。耐力喪失時歪到達前に剛性が低下するような材料特性を設定すれば、より精度の高い結果が得られると考えられるが、解析用には材料特性の設定をできるだけ単純な形にしておきたいことと、確かな剛性低下の設定根拠も存在しないことから、熱影響部特性の ϵ_r を 25% に設定する。接合部のせん断変形に対する変形性能は過小評価になるが安全側の設定とした。せん断変位約 2.6 mm 時の解析歪分布を図 14 に示す。接合部周囲の引張側で歪が 25% を超えている。また、実験同様に当該部分での亀裂発生を評価できている。

本解析では、熱影響部特性をルーフデッキ鋼板全体の材料特性として適用したが、これにより、溶接接合部周囲の熱影響部で応力集中して亀裂が発生する接合部実験の現象を評価できた。最大せん断耐力後のせん断変位が 2 mm より大きい範囲の解析の精度はそれほど高くないが、最大せん断耐力時変位を超える範囲まで良好な精度で評価できれば、実用上は大きな問題ではないと考えられる。これは、本研究の目的であるルーフデッキ鋼板に屋根面内の剛性と耐力を期待する工法の開発において、焼抜き栓溶接部の変形性能には期待しない使い方を想定するためである。

6. 解析用の単純材料特性の設定

これまで検討してきた母材特性および熱影響部特性では、一様伸び限界点まで真応力-真歪関係をそのまま用いた。この形では、解析利用上の汎用性が低いことから、同部をトリリニアに置換して単純化した解析用の材料特性（解析用特性）を考える。解析用特性では、第 1 折点を降伏点、第 3 線分を一様伸び限界点の接線とした。第 3 線分の始点である第 2 折点を真応力-真歪関係と一様伸び限界点までの消費エネルギーが等しくなるように設定した。すなわち、図 15 は図 3 の解析用特性の第 2 折点近傍の拡大図であるが、図中の N 部と P 部の面積が等しくなるように第 2 折点位置を決定した。第 2 折点を与える歪 ϵ_2 の値は 7.6% であった。また、第 3 線分の終点を第 3

折点として、これを耐力喪失点とした。図 3 に解析用特性を併記した。耐力喪失点は、熱影響部特性の耐力喪失点と同じである。

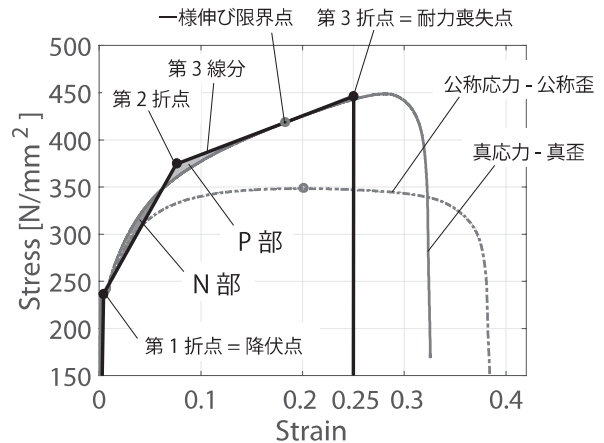


図 15 解析用単純材料特性の第 2 折点の設定

板厚と規格の異なるルーフデッキ鋼板の機械的性質と第 2 折点の歪 ϵ_2 の値を表 3 に示す。これらは 3 体ずつの材料引張試験結果の平均値である。第 2 折点を与える歪 ϵ_2 の値は 7.1-10.5% であった。図 16 に表 3 の各鋼板の材料引張試験結果の真応力-真歪関係（実線）と解析用特性（点線）の比較を示す。ここでは、解析用特性の耐力喪失時歪 ϵ_r はいずれも 25% と仮定した。物理的な必然性は存在しないが、真応力-真歪関係の ϵ_r 値は 25% に近い。

表 3 ルーフデッキ鋼板の機械的性質

鋼板規格	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)	第 2 折点歪 ϵ_2 (%)
SDP1TG	1.00	237	349	39	7.6
SDP1TG	1.18	281	384	33	9.1
SDP2G	1.00	373	479	29	7.1
SDP2G	1.20	311	431	37	10.5

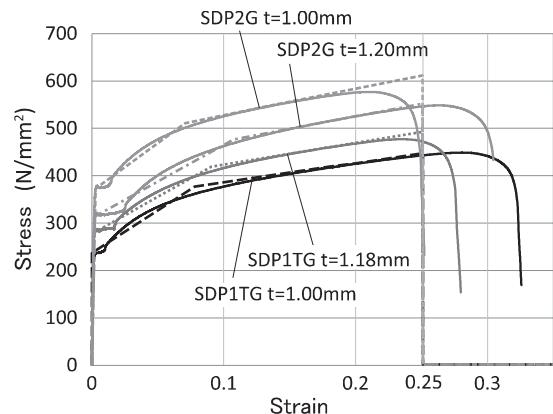


図 16 各規格の真応力-真歪関係と解析用特性

図 3 の解析用特性を用いた焼抜き栓溶接部の解析結果を図 9 に併記した。解析結果が概ね良好な精度で実験結果に一致することが確認できる。

7. 結論

本研究では、鉄骨建物に用いられるルーフデッキが焼抜き栓溶接により固定される場合を想定して実験と解析を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) ルーフデッキ鋼板の材料引張試験を行い、引張強さ後の挙動を有限要素法（FEM）解析によって良好な精度で評価できる材料特性（母材特性）を設定した。引張強さ時の公称応力と公称歪を体積一定則に基づいて換算した真応力と真歪を一樣伸び限界点として、母材特性は一樣伸び限界点まで同換算で得た真応力-真歪関係とした。一樣伸び限界点より大きい歪の範囲について、一樣伸び限界点の剛性を保持する場合と、剛性が歪の1次関数として連続的に増大する場合と減少する場合の材料特性を検討した。材料引張試験の解析で、剛性が増大する場合は、試験で確認されたくびれを伴う局部伸びが進展せず、塑性域が一樣に分散した。その結果、材料引張試験の破断時変位が整合するよう特定した母材特性上の耐力喪失時歪は大幅に減少した。また、剛性が減少する場合は、同様に特定した耐力喪失時歪が大きく増大すると共に、材料引張試験の破断前の耐力を過小評価した。剛性を保持するとした場合の耐力喪失時歪は80%程度であった。
- 2) 一樣伸び限界点より大きい歪の範囲について、歪に対する指数関数を導入して耐力喪失前に連続的に剛性が低下する母材特性を検討した。材料引張試験の破断前の挙動をより高い精度で評価できた。
- 3) ルーフデッキ鋼板の焼抜き栓溶接部のせん断実験を行った。板厚1.0mmのめっき鋼板を直径約20mmの焼抜き栓溶接で固定した場合、せん断変位1mm付近で最大せん断荷重は21kNであった。焼抜き栓溶接部周辺の鋼板の面外変形によって最大耐力が決定された。また、せん断変位2.5mm付近で焼抜き栓溶接部周囲の熱影響部に亀裂が発生し、荷重が大きく低下した。
- 4) 焼抜き栓溶接部のせん断実験のFEM解析に母材特性を用いると、熱影響部の伸び性能の低下が評価できず、変形性能が過大になった。熱影響部の材料特性（熱影響部特性）を母材特性と同様として、耐力喪失時歪のみを変更して25%とした場合、最大せん断耐力を含めて、せん断変位2mm付近までの焼抜き栓溶接部の挙動を良好な精度で評価できた。熱影響部特性を試験体の鋼板全体に適用した解析で、熱影響部でのみ応力集中により亀裂が進展することから実験のせん断挙動を評価できることを確認した。最大せん断耐力後のせん断変位が2mmより大きい範囲の解析の精度はさほど高くないが、実用上は大きな問題ではないと考えられる。

- 5) 焼抜き栓溶接により接合されるルーフデッキ鋼板の数値解析用の材料特性を設定した。材料特性は耐力喪失時歪までをトリリニア型とし、第1折点を降伏点、第3線分を一樣伸び限界点の接線とした。第3線分の始点と終点である第2折点と第3折点はそれぞれ、真応力-真歪関係と消費エネルギーがほぼ等価になる点と耐力喪失点として設定した。これを用いた焼抜き栓溶接部の解析結果が概ね良好な精度で実験結果と整合することを確認した。

参考文献

- 1) 西山留実子, 高木次郎, 大津達郎, 岡田忠義, 佐藤由悟: 焼抜き栓溶接により接合される乾式ルーフデッキの面内せん断実験と解析的分析その1 実験概要および実験結果, 日本建築学会大会学術公演梗概集(中国), pp. 1105-1106, 2017. 7
- 2) 大津達郎, 高木次郎, 岡田忠義, 佐藤由悟, 西山留実子: 焼抜き栓溶接により接合される乾式ルーフデッキの面内せん断実験と解析的分析その2, FEM解析と溶接数の影響, 日本建築学会大会学術公演梗概集(中国), pp. 1107-1108, 2017. 7
- 3) 清水信孝, 五十嵐規矩夫: 面内せん断力を受ける波形鋼板パネルの端部崩壊挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第645号, pp. 2119-2126, 2009. 11
- 4) European convention for constructional steelwork : European recommendations for the application of metal sheeting acting as a diaphragm, 1995
- 5) 横田大吾, 越智健之: 冷間成形角形鋼管材料の応力-ひずみ関係のモデル, 日本建築学会大会学術公演梗概集(北海道), pp. 705-706, 2013. 8
- 6) 奥村敏恵, 堀川浩甫: 構造用鋼板の伸び能力について, 土木学会論文集 1968 巻第152号 pp. 34-38, 1968
- 7) 水沼晋, 山口重裕, 阿部光延, 速水哲博: 薄鋼板の引張試験における局部伸びの支配因子, 鉄と鋼 66 巻第2号, 日本鉄鋼協会, pp. 221-230, 1980
- 8) 合成スラブ工業会: 合成スラブの設計・施工マニュアル, 2015. 4
- 9) Abaqus/CAE, ver6.14-2. 2014
- 10) 浅沼愛実, 高木次郎, 遠藤俊貴: 角波鋼製薄板による既存木造住宅の外付耐震補強壁の性能評価実験, 日本建築学会技術報告集第49号, pp. 1027-1030, 2015. 10

[2018年2月6日原稿受理 2018年5月24日採用決定]