

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 性能評価

IN-PLANE SHEAR PERFORMANCE EVALUATION OF ROOF DECK PLATES CONNECTED WITH PUDDLE WELDING

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

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

キーワード：
ルーフデッキ, 面内せん断性能, 焼抜き栓溶接, 実験, 有限要素法

Keywords:
Roof deck plate, In-plane shear performance, Puddle welding,
Experiment, Finite element analysis

Corrugated fold roof deck plates are widely used for roofs in steel building structures, typically connected with puddle welding. These plates are designed to have sufficient strength and stiffness against loads in out-of-plane directions such as wind and snow. Moreover, they have certain capability to resist loads in in-plane direction. In this research, in-plane shear performance of the roof deck plates is evaluated both experimentally and analytically. Detailed FEM models are created for the puddle welding connections. Inelastic behavior including local buckling and rupture of the connections and deck plates are well simulated.

1. 序論

鋼構造建物の乾式屋根に用いられる鋼製薄板の折曲面材には、防水性能があり外部に露出させて用いるものと断熱と防水層の支持材として用いるものがある。本報では後者をルーフデッキと呼ぶ。ルーフデッキ屋根には、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、コンクリートと一体化される合成スラブと比べて面内剛性と耐力が低く、水平ブレースと併用されることが多い。しかしながら、ルーフデッキ屋根にも一定の面内剛性と耐力があり、接合部の耐力が確保できれば面内せん断力の伝達要素として利用できる可能性がある。そこで本研究では、ルーフデッキの面内せん断性能を評価する。ルーフデッキは風や雪などによる面外方向の荷重に対する剛性と耐力を有する。そして、支持材である鉄骨梁との接合部には吹上げによる引抜き方向の耐力確保の目的から、焼抜き栓溶接、発射打込み鋸、タッピングねじが用いられる。ここでは、より一般的に用いられる焼抜き栓溶接によりルーフデッキが固定される場合を考える。

既往研究として、焼抜き栓溶接接合部の実験的な性能評価¹⁾のほか、断面形状をパラメータとした波形折板の面内せん断実験にもとづく設計式の提案²⁻⁴⁾や、FEM解析による薄板ボルト接合部の評価⁵⁾および、せん断座屈耐力の評価⁶⁾などがあるが、鋼板と接合部を精緻にモデル化した解析的評価は行われていない。一般的に薄板の解析は局部座屈や破断などの影響で解が不安定になりやすいが、時間を増分変数として静的な釣り合いを運動方程式より求める動的陽解法により、解析の安定性を向上できる^{7,8)}。

本研究では、接合を焼抜き栓溶接とした2辺支持ルーフデッキの

面内せん断性能を実験とFEM解析の両面から評価する。焼抜き栓溶接接合部のせん断挙動を実験により確認し、動的陽解法を用いたFEM解析により鋼板の座屈や破断を含めた局所的な挙動を評価する。さらに、ルーフデッキの面内せん断挙動を実験により確認し、それを解析的に評価することでルーフデッキ全体の变形状態と各接合部のせん断力分布を評価する。

2. ルーフデッキ屋根の構成

ルーフデッキを用いた屋根面の構成を図1に示す。また、本研究で対象とするルーフデッキの断面形状を図2に示す。ルーフデッキの各寸法は板厚1.0mm、幅600mm、折板部の立ち上り75mmである。本研究では焼抜き栓溶接で梁に接合された場合の接合部とデッキの面内せん断性能を評価する。焼抜き栓溶接はルーフデッキを溶接熱で

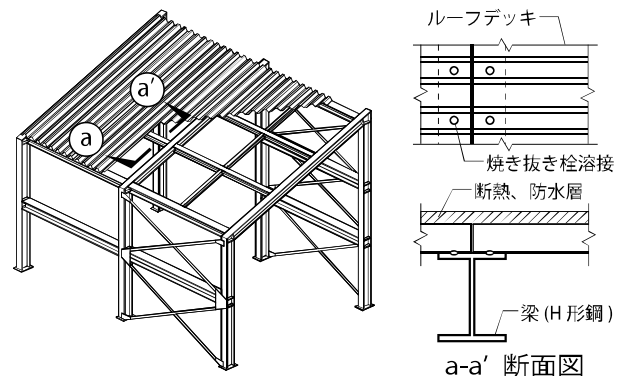


図1 鋼構造建物ルーフデッキ屋根の構成

¹⁾ ㈱建築構造研究所 修士 (工学)
(〒141-0021 東京都品川区上大崎4-5-37-312)
²⁾ 首都大学東京都市環境科学研究科 准教授・Ph.D.
³⁾ 日鐵住金建材㈱ 博士 (工学)
⁴⁾ 日鐵住金建材㈱ 修士 (工学)
⁵⁾ 首都大学東京都市環境科学研究科建築学域 大学院生

¹⁾ Building Structure Institute, M. Eng.
²⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan Univ., Ph.D.
³⁾ Nippon Steel and Sumikin Metal Product Co., Ltd., Dr. Eng.
⁴⁾ Nippon Steel and Sumikin Metal Product Co., Ltd., M. Eng.
⁵⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan Univ.

溶かしながら、鉄骨梁フランジと接合する方法である。焼抜き栓溶接施工要領⁹⁾の定める溶接部の径は18mm以上である。

3. 焼抜き栓溶接接合部せん断実験

3.1. 実験概要

本実験では、ルーフデッキに用いる鋼材と支持部材(梁等)との焼抜き栓溶接接合部のせん断挙動および性能の確認を行う。材料引張試験より得られたデッキ鋼板の機械的性質および応力歪関係を表1と図3に示す。降伏強度は260N/mm²、引張強さは364N/mm²である。材料試験では歪6%を越えるデータが得られておらず、別途実施した同じ鋼種の材料試験結果(表1)を参考に歪6%以降の公称応力-公称歪関係を設定した。設定方法は5.1節に示した。

図4に試験体形状および加力概要を示す。試験体鋼板の幅は101mm、板厚は1.0mm(実測1.015mm)である。これを梁フランジを模した鋼製治具(治具A)と、鋼板端部から25mmの位置で径18mm(実測18.9mm)の焼抜き栓溶接により接合した。焼抜き栓溶接の施工は施工要領⁹⁾に準拠して行った。鋼板と加力治具(治具B)とは一体と見なせるよう隅肉溶接接合とした。実験は、万能試験機にて単調引張载荷した。接合部にせん断力を与え、最大耐力を示した後、荷重が最大耐力の50%に低下するまで载荷した。図4に示すスタッドボルト間の相対変位を試験体の表と裏で測定し、せん断変位とした。

3.2. 実験結果と考察

実験の荷重-変位関係を後述の解析結果と合わせて図5に示す。これから算出した実験結果の初期剛性は217kN/mm、最大耐力とそれに対応する変位は20.7kNと0.71mmである。なお、初期剛性は、荷重が最大耐力の1/3に対応する点と原点との割線剛性とした。

せん断変位0.2mm付近から、接合部の端あき側(加力反対側)の鋼板が治具Aとの非接触方向へ面外変形を示した。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、耐力が低下した。せん断耐力が最大値の50%となったせん断変位1.8mm時と、参考として強制変位を5.4mmまで与えた時の状況(同ロット別試験体)を図6に示す。

4. ルーフデッキ面内せん断実験

4.1. 実験概要

ルーフデッキの面内せん断挙動の確認を行う目的で面内せん断実験を実施した。実験概要を図7、ルーフデッキの断面形状を図2に示す。試験体は、ルーフデッキと梁フランジを想定した梁プレートを4箇所の焼抜き栓溶接で接合したものである。4隅をピン接合とした载荷治具に高力ボルトで梁プレートを固定した。ルーフデッキ材端の一方の载荷治具(図7中の下辺)を反力床に固定し、他方を油圧ジャッキにて水平に単調载荷し、ルーフデッキに面内せん断力を作用させた。ルーフデッキの寸法は幅600mm、長さ3000mm、板厚1.0mmであり、ルーフデッキ材端から50mmの位置で径18mm(実測値平均20mm)の焼抜き栓溶接で梁プレートに固定した。焼抜き栓溶接の施工施工要領⁹⁾に準拠して行った。加力側治具の水平変位を上辺と下辺の接合部間距離2900mmで除した値をルーフデッキの面内せん断変形角とし、荷重が最大耐力の70%に低下するまで载荷した。なお、ルーフデッキの鋼材は接合部せん断実験で用いたものと同一である。

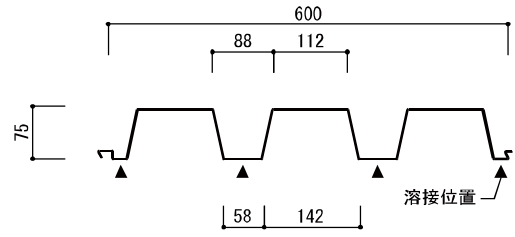


図2 ルーフデッキ断面

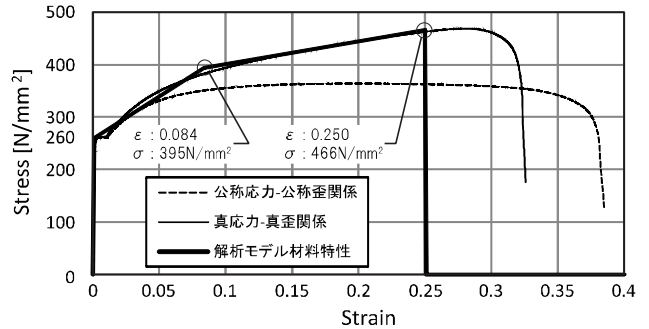


図3 鋼板材料特性および解析モデル材料特性

表1 デッキ鋼板の機械的性質

	鋼材の種類	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
実験対応材料試験	SDP1TG	1.015	260	364
参考材料試験	SDP1TG	1.000	236	349

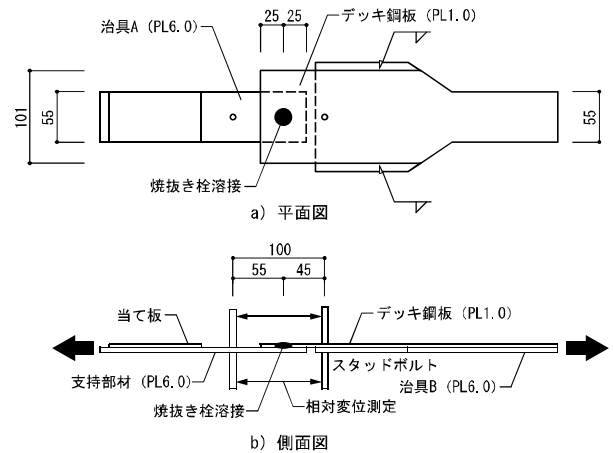


図4 試験体形状および加力概要

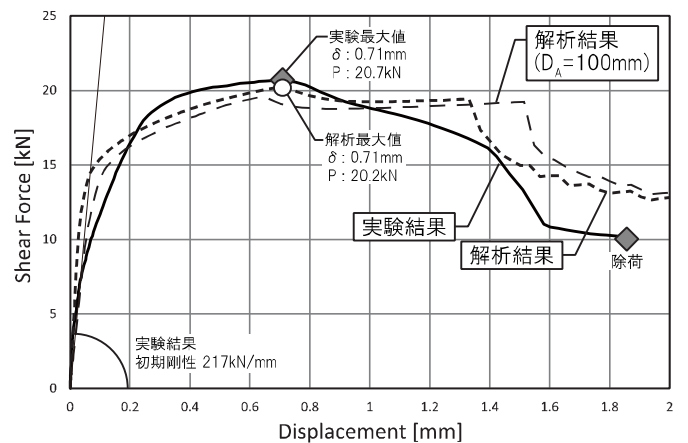


図5 接合部せん断実験および解析結果

4.2. 実験結果・考察

実験の荷重-せん断変形角関係を後述のルーフデッキ面内せん断解析結果と合わせて図8に示す。図8より算出した実験結果の初期剛性は16.8kN/% (0.58kN/mm)、降伏耐力および最大耐力とそれに対応する変形角は6.3kNと0.49%および8.3kNと0.95%である。なお、初期剛性は荷重が最大耐力の1/3に対応する点と原点との割線剛性と定義し、降伏耐力は初期剛性と最大耐力から水平に引いた直線との交点のせん断変位に対応する荷重 (General Yield Strength法) とした。

図9に最大耐力直後 (せん断変形角1.00%) のルーフデッキの変形状況を示す。降伏耐力程度までは目視による変化は観察されなかった。降伏耐力後、変形角0.7%程度から、ルーフデッキ側辺の面外変形と、引張が作用する接合部周辺の鋼板の亀裂が確認された。また、ルーフデッキ断面の山部がせん断方向と逆側に倒れ込む挙動が見られた。この挙動は文献2での報告と一致する。最大耐力となる変形角1.00%付近では、引張側接合部の亀裂の進展による鋼板の破断と、ルーフデッキ側辺の面外変形が進展することで耐力が低下し始めた。このとき圧縮が作用する接合部付近には目視では損傷は見られなかった。更に変形が進むと、引張側接合部では破断が進展し、圧縮側接合部では接合部に板がめりこむ挙動と亀裂が観察された。

5. 接合部の解析

5.1. 解析概要

本章では、焼抜き栓溶接接合部のFEM解析モデルを作成し、解析結果を前述の接合部せん断実験の結果と比較する。解析と実験の最大せん断耐力と破壊形式を含めた挙動の整合性を確認し、構築した接合部モデルを次章のルーフデッキの解析モデルに用いる。

図10に解析モデル、図3にモデル材料特性を示す。鋼板の寸法は2章で示した試験体と同様の、厚さ1.015mm、幅101mm、長さ175mmであり、焼抜き栓溶接の直径は18.9mmである。鋼板のヤング係数と密度を205kN/mm²と7.85×10⁻⁹ton/mm³とする。

材料試験では歪6%程度までの公称応力-公称歪関係と引張強度しか得られていない。そこで、別途、破断までの公称応力-公称歪関係が得られた同鋼種同板厚の材料試験結果(表1)を降伏強度および引張強度の比率に応じて係数倍し、破断までの公称応力-公称歪関係(鋼板材料特性)を設定した。具体的には降伏点(歪0.003)までを1.10倍、降伏棚より大きい歪領域(歪0.010以上)で1.04倍とした。降伏棚の範囲(歪0.003から0.010まで)は降伏強度で耐力一定とした。歪6%までのデータをそのまま利用しなかったのは、切り替え部分で不自然に接線剛性が不連続になるのを避けたためである。作成した公称応力-公称歪関係を真応力-真歪関係に換算し、一様伸びから局部伸びへの移行点までの消費エネルギーが等価になるようトリリニア型に置換した。破断時歪を25%とした¹⁰⁾。

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。具体的には、接合部中心から半径20mm以内を2mm、モデル左端から85mm以内を5mm、左端から95-115mmを10mm、右端から40mm以内を20mmとした。焼抜き栓溶接接合部は左端から25mm、幅

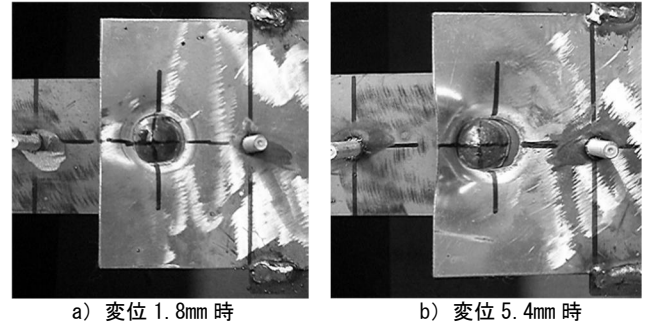


図6 試験体の接合部状況

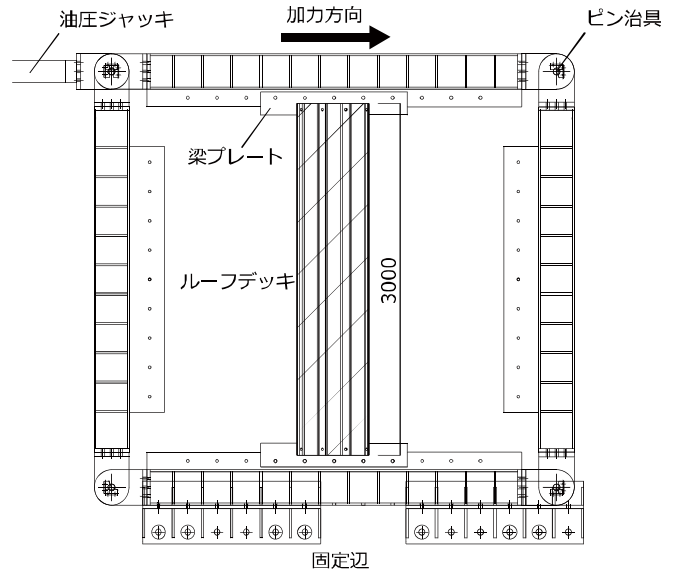


図7 面内せん断実験概要

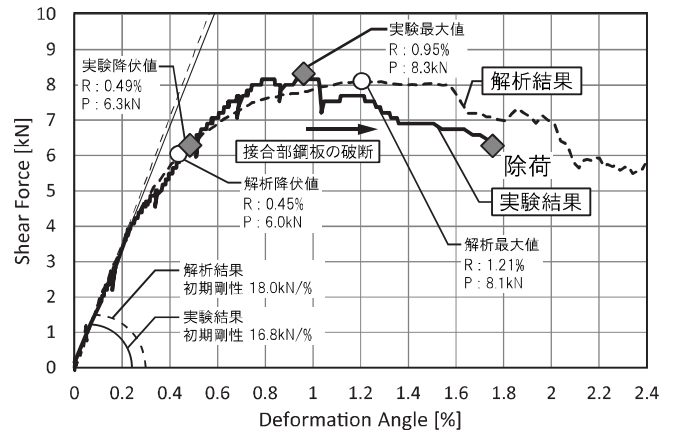


図8 面内せん断実験および解析結果

方向中央の位置にあり、溶接接合部内の全節点の並進を拘束し、図10中の上下辺右側(太線部)に図中X方向の強制変位を与える。溶接接合部以外の鋼板は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の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)^{11,12)}を用いる。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。

5.2. 解析結果と考察

実験結果と解析結果の荷重-変形関係を図5の実験結果に上書きして示す。グラフの縦軸は接合部に加わるせん断力 (kN) を示す。接合部実験では図4のスタッドボルト間の相対せん断変位を測定した。すなわち、図4中の溶接接合部左側の治具Aと右側のデッキ鋼板の弾性変形を含む。治具Aの変形はデッキ鋼板の変形に比べると小さいと考えられることから、解析では溶接部とそこから治具B側に45mmの測定点 (図10) との相対せん断変位として図5に示す。

荷重 5kN 程度までの剛性は実験と解析とで概ね一致した (図5)。荷重 5kN 以上で実験では剛性が低下したのに対して解析では低下していない。この原因は不明であるが、焼き抜き栓溶接の入熱による鋼板の実験前の面外変形の影響が考えられる。最大耐力は 20.2kN であり、実験結果の約 98% である。最大耐力時変位は 0.71mm であり実験値と一致している。解析結果の溶接部から測定点までの弾性変形分を除いた値、すなわち接合部の塑性せん断変位は 0.56mm である。

解析モデルの強制変位約 1.8mm 時の応力等高線を図11に示す。接合部近傍に応力度がゼロに近い範囲がある。この部分は、解析上ひずみ度が 25% を超えて応力を喪失しており、鋼板が破断した状態を表している。これは実験での亀裂、破断の発生位置と一致しており、解析では、最大せん断耐力確認直後に接合部周辺で破断が確認された。

接合部せん断試験体 (図4) では溶接部と鋼板支持部の距離 (図10の D_A) が比較的近づいており、図11の応力図では、溶接部と支持部間の張力場が確認できる。張力場上の鋼板が降伏することでせん断変位が増大した可能性も考えられることから、図10の D_A を大きく、100mm とした場合についても解析を行った。この場合でも、荷重-変形関係に大きな差は見られず、本検討の範囲内では溶接部と支持部間距離の影響は無視できることを確認した (図5)。

6. ルーフデッキの解析

6.1. 解析概要

本章ではルーフデッキの FEM モデルを作成し、解析結果を4章の実験結果と比較する。挙動の整合性を確認し、面内せん断力下のルーフデッキの変形モードおよび接合部反力と変形角の関係を分析する。

モデルの概要を図12に示す。鋼板は実験試験体と同様、幅 600mm、長さ 3000mm (デッキ材軸方向の接合部間距離 2900mm) である。接合部解析モデルの板厚は試験体実測値に準じて 1.015mm としたが、本解析モデルの板厚は試験体平均板厚より 1.0mm とする。試験体の焼き抜き栓溶接の実測直径平均値は 20.0mm であることから本解析モデルの接合部はすべて直径 20mm とした。

図12のように、接合部に J1 から J8 の番号をつける。図12中下部接合部4箇所 (J1 から J4) の全方向の並進を拘束する。図12中上部接合部4箇所 (J5 から J8) の Y, Z 方向並進を拘束して +X 方向に強制変位を与える。鋼板のヤング係数、密度、降伏強度、引張強度、鋼板破断時ひずみ及び接合部近傍の要素分割方法は接合部解析モデルと同様で、板厚を 1.0mm とすることと接合部の直径を 20mm とすることのみ異なる。図12のようにメッシュの大きさを設定する。接合部中心から半径 20mm 以内は 2mm、ルーフデッキ上下端から 100mm 以内は 5.0mm、上下端から 120mm より中央側は 20mm である。ルーフデッキ上下端から 100mm 以内は実験治具 (鋼製梁) が存在するため、同部の治具接触方向への面外変位を許容しない。解析は接合部せん断

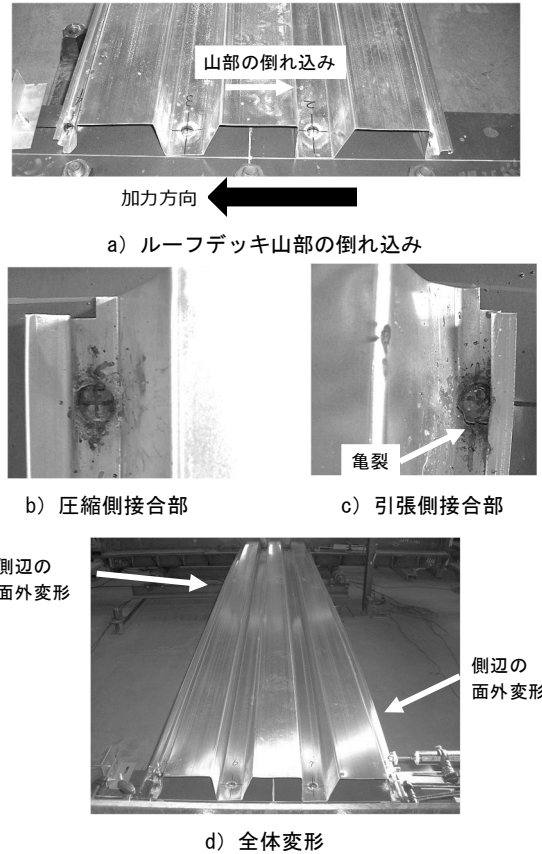


図9 面内せん断挙動 (せん断変形角 1.0%時)

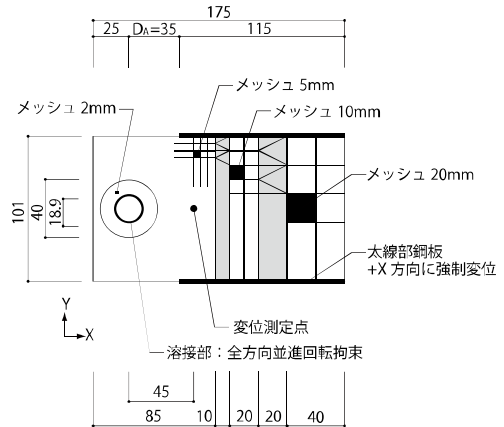


図10 接合部解析モデル概要

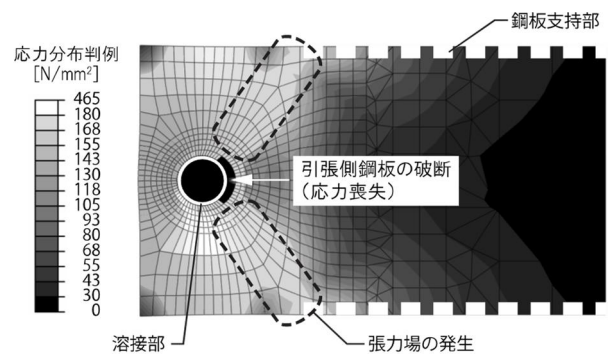


図11 変位約 1.8mm 時応力図

実験と同様に動的陽解法 (ABAQUS/Explicit) を用いる。また、計算負荷の軽減を目的として質量の設定を操作するマスキングを利用する。本解析では質量を実際の 400 倍とした。

6.2. 解析結果と考察

解析結果の荷重-変形角関係を図 8 の実験結果に上書きして示す。グラフの縦軸はデッキに発生する X 方向のせん断力 (kN)、横軸はモデル下部接合部と上部接合部の X 方向の相対変位から算出した変形角 (%) である。解析結果は剛性、耐力ともに良好に実験結果を近似しており、準静的解析の利用と材料特性での破断のモデル化により最大耐力後の耐力低下を評価できている。変形角 $R \approx 2.0\%$ 時の接合部周辺の変形と応力の様子を図 13 に示す。図 9 のルーフデッキ面内せん断実験の接合部の損傷の様子とよく対応していることが分かる。接合部の解析と同様に、接合部周辺の鋼板の引張側に破断が確認された。一方、圧縮力を受ける接合部周辺では鋼板の局部座屈が発生した (図 14)。これらも実験結果に対応している。

6.3. ルーフデッキの変形モードの割合分析

ルーフデッキに屋根面の水平剛性と耐力を期待する場合、ルーフデッキのせん断変形の性状分析と、接合部に作用するせん断力の評価が必要である。本節と次節で、それらについて考察する。

面内せん断力下のルーフデッキの変形について、接合部近傍の変形に起因する変形¹³⁾ (以下、「接合部起因変形」)、曲げ変形、せん断変形の各モード成分の合成で評価できると考える (図 14)。この仮説にもとづいて、本節では、各変形モードの割合を分析し、ルーフデッキの変形挙動を評価する。

接合部起因変形は、接合部近傍の塑性変形に起因する変形であり、ルーフデッキの矩形平面形状は変形しないと考え。曲げ変形はルーフデッキ材を梁材と考えた場合の変形である。せん断変形を無視して、材軸に直交する材断面が平面を保持すると考える。せん断変形はせん断変形角のみによる変形である。

接合部起因変形では、図 14 に示すようにルーフデッキ上下端がデッキの材軸方向に変形する。すなわち、接合部周辺の鋼板が材軸方向に塑性変形することで接合部起因変形が発生すると考え、塑性変形量の近似直線が図 14 の水平線となす角度を接合部起因変形による変形角 R_c と定義する。接合部周辺の鋼板の塑性変形量は接合部中心から 30mm デッキ内側の節点までの塑性変形量として評価した。これは、塑性変形が接合部中心から概ね 30mm 以内に納まることを確認したためである。

接合部の Z 軸方向の変形量は図 15 のように、上下辺中央からの距離に概ね比例したことから、上下辺の変形角は両端の接合部変形量をその距離で除した値とした。曲げ変形による変形角はデッキプレートに梁理論を適用して算出する。図 14 の曲げ変形下では材軸方向中央の断面 (以下「中央断面」) が図 13 中の Y 軸まわりに回転変形する。中央断面の回転変形角は接合部起因変形と曲げ変形の両方によって発生する。中央断面の回転角を中央断面の両端接点の材軸方向変位より算出し、接合部起因変形による回転角 R_c を差し引いた値を曲げ変形による中央断面の回転角 θ_B と定義する。これを用いて曲げ変形によるルーフデッキの変形角 R_B を算出する。ルーフデッキ全体の変形角 R から接合部起因変形による変形角 R_c と曲げ変形による変

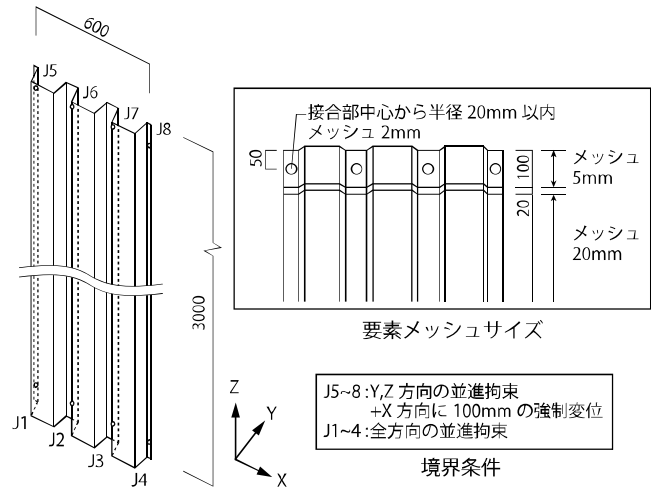


図 12 ルーフデッキ解析モデル概要

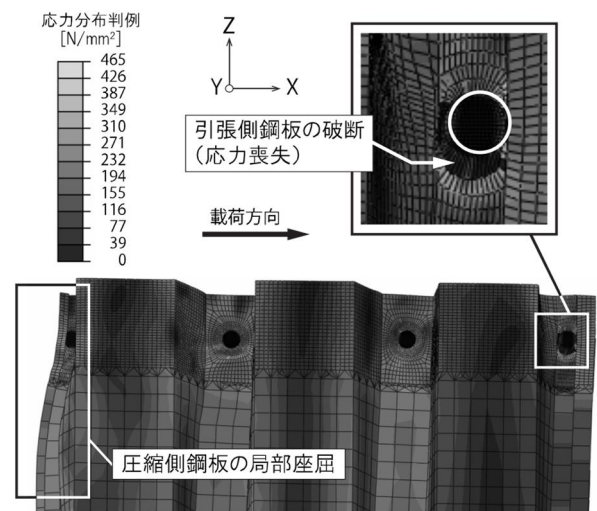


図 13 ルーフデッキモデル応力等高線図 (変形角約 2.0%時)

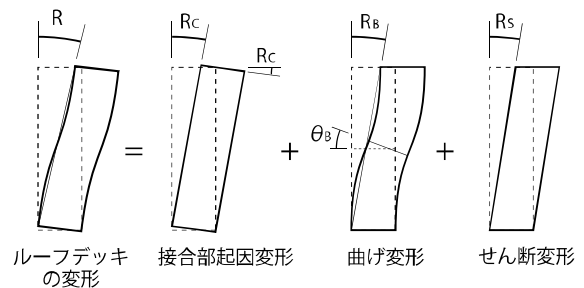


図 14 ルーフデッキ変形モード概要

形角 R_B を差し引いた値をせん断変形による変形角 R_s と定義する。

図 16 に各変形モードによる変形角が全体の変形角 R に対して占める割合の推移を示す。 $R \leq 0.2\%$ の範囲では接合部周辺の鋼板は弾性範囲にとどまり、接合部起因変形は発生せず、70%程度がせん断変形、30%程度が曲げ変形である。 R の増大に伴い接合部起因変形の割合が増大し、 $R = 1.5\%$ 付近で接合部起因変形の割合は 20%程度、せん断変形の割合は 50%程度である。曲げ変形の割合は $R \geq 0.8\%$ では 25%程度である。これらの変形モードの分析結果はルーフデッキの幅、スパン、接合部数等の影響を受けるものの、建物への適用を想定した部材寸法に対する検討であり、ルーフデッキのせん断挙動を理解する上で

の一資料と位置づけられる。

6.4. ルーフデッキの接合部の反力と変形

各接合部に発生する反力と変形角 R の関係について考察する。図 15 に上端接合部の $R=0.5, 1.0, 2.0$ 時の反力ベクトルを示す。また、各接合部の材軸方向 (Z 軸方向) の変形量 (接合部近傍の塑性変形量) を示す。 $R=0.5$ 時の反力ベクトル分布は、幅中央点に対して概ね対称であるが、 $R=1.0$ 時には圧縮を受ける接合部 (図 15 左端) の反力が増加していないことが分かる。これは圧縮力下で鋼板に局部座屈が発生したためである。 $R=0.5$ 時から $R=1.0$ 時にかけて、引張を受ける接合部 (図 15 右端) の反力は増加しているが、それ以降の反力は一定の値となっている。この原因は、引張力下の接合部周辺の鋼板降伏後の破断である。引張側接合部は $1.0\% \leq R \leq 2.0\%$ で鋼板の破断が進展し、塑性変形量が大幅に増大している。

両端接合部の反力ベクトルの主力方向は材軸方向であり、内側 2 箇所は材軸方向から若干角度がついている。両端部の接合部の反力ベクトルが大きく、検討したデッキ幅と材長の条件では、材端の曲げモーメントによる影響が大きいことが分かる。また、デッキに作用する面内せん断力、すなわち X 方向反力は主に内側 2 箇所の接合部が負担していることが分かる。

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対象として、実験と解析の両面から面内せん断性能を評価した。

- 1) 焼抜き栓溶接接合部の 1 面せん断挙動の評価において、実験と FEM 解析の結果を比較した。その結果、最大せん断耐力とそれを与える変位及び崩壊形について、実験と解析とで良好な対応が得られることを確認した。最大せん断耐力は約 20kN であり、最大耐力時の塑性せん断変位は約 0.7mm である。
- 2) ルーフデッキの面内せん断実験を行った。これに対して、接合部解析モデルを組み込んだルーフデッキの解析モデルを構築した。薄板の局部座屈と接合部破断を伴う解析不安定性の高い挙動に対して、動的陽解法を用いることにより、最大せん断耐力までの挙動と崩壊形を良好な精度で評価できることを確認した。解析結果より、幅 600mm 長さ 3000mm 板厚 1.0mm のルーフデッキについて、最大せん断耐力は 8.3kN (13.8kN/m) であり、最大せん断耐力時変形角は約 1.0% であった。
- 3) 面内せん断力下のルーフデッキの変形モードの分析を行った。その結果、検討したルーフデッキの寸法と仕様において、 $R \leq 0.2\%$ の範囲ではせん断変形の割合は 70% 程度であり、接合部起因変形の割合はわずかであった。 $R \geq 0.2\%$ 以降、接合部周辺の塑性化が進行して、接合部起因変形の割合が増加することを確認した。接合部起因変形の進展に伴いせん断変形と曲げ変形の割合は減少した。 $R \geq 0.8\%$ で曲げ変形の割合は概ね 15% であった。接合部に作用するせん断力の主力方向はルーフデッキの材軸方向が支配的であり、4 隅の接合部耐力が面内せん断耐力に与える影響が大きいことを確認した。

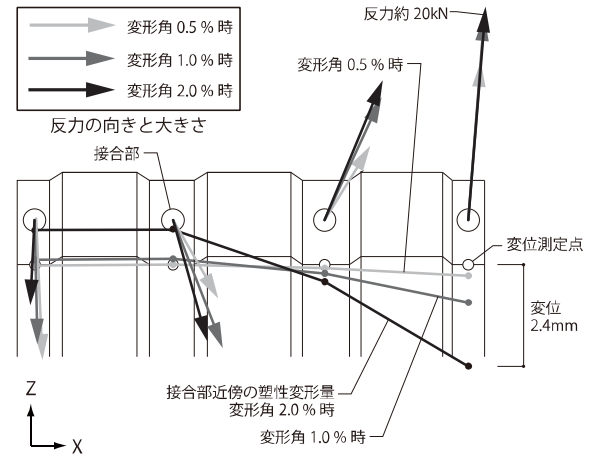


図 15 上部接合部反力と塑性変形量

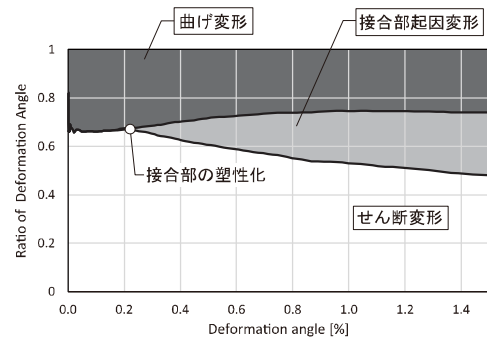


図 16 ルーフデッキ変形モード割合

参考文献

- 1) 河野光雄：焼抜き栓溶接に関する実験的研究 (亜鉛メッキデッキプレートと梁フランジの接合), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1165-1166, 1976
- 2) 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
- 3) 五十嵐規矩夫, 中野修太, 清水信孝：矩形形状を有する波形鋼板のせん断剛性, 日本建築学会構造系論文集, 第 646 号, pp. 2327-2334, 2009. 12
- 4) 清水信孝, 岡田忠義, 五十嵐規矩夫：波形鋼板パネルのせん断座屈後挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 651 号, pp. 1013-1020, 2010. 5
- 5) 金泰洙, 桑村仁：薄板ボルト接合部の破断解析に関する有限要素法の適用性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 I, pp. 77-80, 2004
- 6) 五十嵐規矩夫, 藤澤逸志, 清水信孝：矩形形状を有する波形鋼板のせん断弾性座屈耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 632 号, pp. 1883-1890, 2008. 5
- 7) Hongxia Yu, I. W. Burgess, J. B. Davison, R. J. Plank : numerical simulation of bolted steel connections in fire using explicit dynamic analysis, Journal of Constructional Steel Research Vol. 64, pp. 515-525, 2008
- 8) 津田政明, 萩原一郎：準静的大变形問題の動的陽解放有限要素法に関する基礎研究, 日本機械学会論文集 (A 編) 64 巻 622 号 (1998), pp. 114-121
- 9) 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
- 10) 高木次郎, 庄子恭史, 岡田忠義, 佐藤由悟, 大津達郎：ルーフデッキ鋼板の材料特性と焼抜き栓溶接接合部のせん断挙動, 日本建築学会技術報告集 第 59 号, 2019. 2
- 11) Abaqus/CAE, ver. 6.14-2, 2014
- 12) 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, 2015. 10
- 13) European convention for constructional steelwork : European recommendations for the application of metal sheeting acting as a diaphragm, 1995

[2018 年 10 月 3 日原稿受理 2019 年 1 月 7 日採用決定]