

高強度スタッドボルトを用いた合成床版の合理化継手の開発

～片面施工が可能な摩擦接合継手～

Development of Rationalized Joint for Steel Plate-Concrete Composite Deck Using High-strength Stud Bolts

吉田 賢二^{*1}
YOSHIDA Kenji

奥原 大貴^{*2}
OKUHARA Hiroto

山田 忠志^{*3}
YAMADA Tadashi

田島 久嗣^{*4}
TAJIMA Hisatsugu

岩田 幸三^{*5}
IWATA Kozo

塩田 恵市^{*6}
SHIOTA Keiichi

鋼・コンクリート合成床版の底鋼板継手には、高力ボルト摩擦接合が一般的に用いられており、底鋼板の上面のみから高力ボルトを施工する種々の工法が提案されている。しかし、底鋼板が塗装仕様の場合では、高力ボルトの頭周辺の塗装のために足場や高所作業車が必要となる。本研究は、従来の底鋼板の継手形式の課題に着目して、底鋼板の上面のみから十全に施工ができる継手形式の開発について報告するものである。具体的には、高強度スタッドボルトを用いた片面摩擦接合を提案し、継手性能を確認するためにこの継手形式の部分模型を用いた性能確認試験を実施した。さらに、高強度スタッドボルトの材料特性を把握し、スタッド溶接および導入された軸力の底鋼板への影響を検証することで、合成床版の継手に要求されるすべり係数などの性能を十分に満足することを確認した。

キーワード：鋼・コンクリート合成床版、底鋼板継手、高強度スタッドボルト、摩擦接合

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版）は、床版厚低減による死荷重の軽減、高い耐荷力および耐疲労性を有するほか、施工面では底鋼板がコンクリート打設時の型枠の役割を果たすなど、安全性、施工性の高い床版形式である。合成床版の底鋼板の継手には、写真1に示す高力ボルト摩擦接合が一般的に使用されている。しかし、高力ボルト摩擦接合では、底鋼板の外表面が塗装仕様の場合、ボルト頭周辺の塗装のために底鋼板の下面に足場や高所作業車が必要となる。著者らは、このような従来の底鋼板の継手の課題に着目して、底鋼板の上面のみから作業ができるとともに、施工効率に優れた継手形式の開発について報告するものである。

具体的には、底鋼板の上面からのみで施工が可能となる継手として、高強度スタッドボルト（以下、スタッドボルト）を用いた摩擦接合継手を検討している。近年、スタッドボルトが高強度化され、板厚12mmの鋼板にスタッドボルトを溶接した摩擦接合継手に関する研究¹⁾が行われているが、導入軸力は低く抑えられている。加えて、板厚が12mmより小さいものに対するスタッド

ボルトの使用に関する検討は行われていない。一方、合成床版の底鋼板の板厚は6mmもしくは8mmであり、入熱量が大きいスタッド溶接により鋼板が変形し、不陸による接触面積の減少がすべり係数の低下をもたらす恐れがあること、さらには、鋼板の塑性変形が大きくなり、所定の軸力を導入できない恐れがあることなど、適用にあたっては確認および検討すべき事項は多い。スタッド溶接時の熱影響（鋼板の変形や抜け落ち）を抑えるため、頭付きスタッドに関して、溶接される板厚は軸径の1/3以上と規定されている²⁾。

本研究では、これらの知見を参考に、継手部の構造を底鋼板の板厚を8mm、スタッドボルトのボルト呼び径

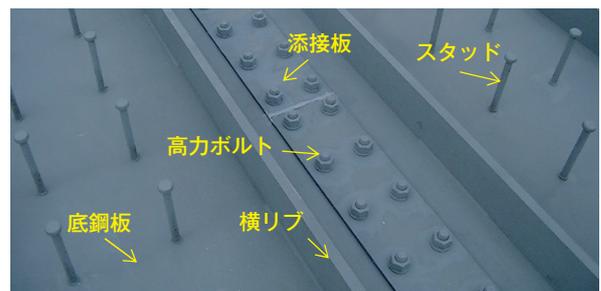


写真1 合成床版の底鋼板の継手構造

*1 川田工業㈱鋼構造事業部技術部大阪技術課 主幹
*2 川田工業㈱鋼構造事業部技術部東京技術課
*3 川田工業㈱北陸事業部富山工場生産技術課 係長

*4 川田工業㈱北陸事業部富山工場生産技術課 課長
*5 川田工業㈱鋼構造事業部技術部 次長
*6 川田工業㈱鋼構造事業部工務部大阪工務課 総括工事長

M22、軸径 20.3mm とした。スタッドボルトの軸径は、ねじ部の軸径としている。これは、スタッド溶接部のカラーを小さくし、連結板の孔径を小さくするためである。表 1 に高力ボルトとスタッドボルトを用いた摩擦接合による合成床版の底鋼板継手部の構造比較を示す。

本研究では、スタッドボルトへの導入軸力の決定およびすべり挙動の確認を目的としている。そこで、まず、スタッドボルトのひずみによる軸力管理方法を検討するため、線材引張試験およびキャリブレーション試験を行った。次に、スタッド溶接時の底鋼板の変形量の計測、スタッドボルトの締付け試験およびすべり試験体を模倣した解析モデルに対して FEM 解析を行い、軸力導入時の鋼板の応力性状を調べ、スタッドボルトへの導入軸力の検討を行った。最後に、継手部の接触状況およびすべり挙動を確認するため、接合面の接触圧分布の計測およびすべり試験を実施し、摩擦接合継手としての性能について検討した。

2. 線材引張試験

スタッドボルトに使用する鋼材は、材料強度と溶接性を考慮した研究実績¹⁾があり、溶接構造用圧延鋼材 SM570 相当の機械的性質を有する HT570³⁾ 材を用いている。この鋼材は、SM570 材相当の強度を有している一方で、炭素当量が抑えられており、SM570 材より溶接性が優れている。

(1) 試験体および試験方法

試験体は図 1 に示すように、線材の両端をスタッドボルトと同様に M22 のねじ切りを行ったものを使用した。試験体数は 3 体とし、試験体名は W1 ~ W3 とした。試験は写真 2 に示すように、日鉄ボルテン(株)が所有する 2000kN 万能試験機を用い、導入軸力 130kN まで引張载荷を行った。軸平行部の中央に 90 度ごとに計 4 枚ひずみゲージ (株東京測器製, FLA-5-11-03LH) を貼付して軸方向ひずみを計測した。

(2) 試験結果

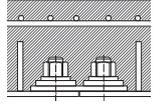
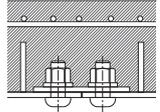
軸力管理を念頭に、試験から得られた線材の荷重-ひずみ関係を図 2 に示す。ここで、図中のひずみは、4 枚の平均値としている。図より、各試験体の試験結果のばらつきは小さく、80kN 付近から荷重-軸ひずみ関係の傾きが小さくなった。これは、HT570 材が高力ボルトで行われている焼入れや焼戻しを行っていない非調質鋼であり、線形限界が低いためである。

3. キャリブレーション試験

(1) 試験体および試験方法

後述するすべり試験体に用いるスタッドボルトの軸力管理方法を検討するため、キャリブレーション試験を行った。試験体数は 6 体とし、試験体名は C1 ~ C6 とした。

表 1 底鋼板継手部の構造比較

名称	高強度スタッドボルト摩擦接合	高力ボルト摩擦接合
構造図		
特徴	不要	底鋼板の防錆仕様が塗装の場合にはボルト頭部周辺の現場塗装が必要

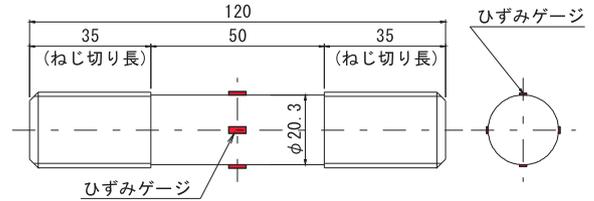


図 1 線材引張試験体

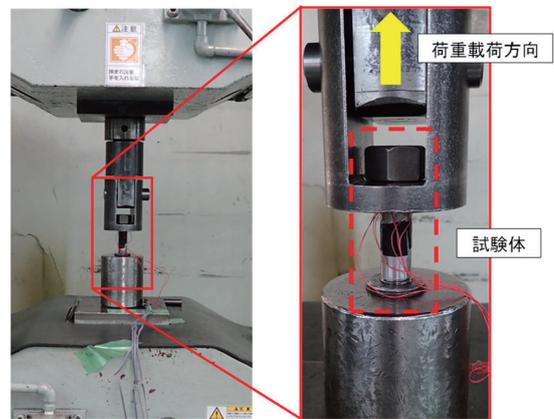


写真 2 線材引張試験

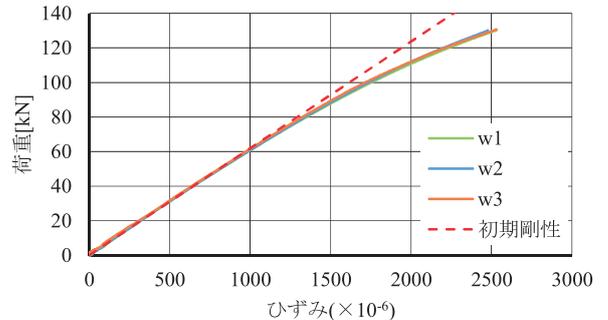


図 2 線材の荷重-ひずみ関係

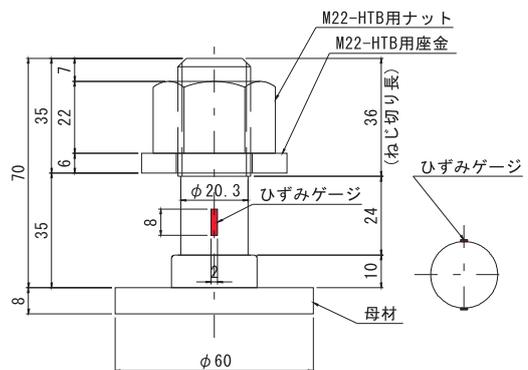


図 3 キャリブレーション試験体

試験体は図3に示すように、直径60mm、鋼板厚8mmの円形鋼板（SS400材）にスタッドボルトを溶接したものである。スタッドボルトの傾きは、頭付きスタッドの傾きの限界許容値5度²⁾を参考に、軸力導入時のスタッドボルトへの付加曲げの影響が小さくするため、傾きが2度以内に収まるように管理した。軸平行部には180度対称位置に2枚のひずみゲージを貼付し、ボルト軸部の軸方向ひずみを計測した。なお、180度対称位置に2枚のひずみゲージを貼付したのは、線材引張試験の結果から4枚のひずみゲージの値のばらつきが小さかったためである。試験では、写真3に示すように万能試験機に試験体を設置し、固定鋼板を押すことで130kNまで引張载荷を行った。

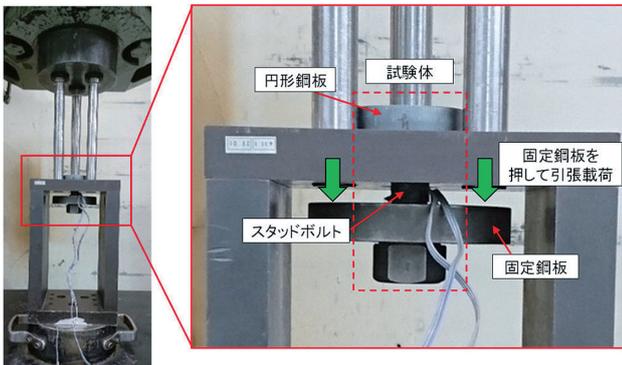


写真3 キャリブレーション試験状況

(2) 試験結果

試験より得られたスタッドボルトの荷重-ひずみ関係を図4に示す。図より、線材引張試験と同様に非線形な挙動を示している。また、荷重が大きくなるにつれてひずみがばらついていくが、これはスタッド溶接時に生じるスタッドボルトの傾きや残留応力など施工のばらつきによるものと考えられる。

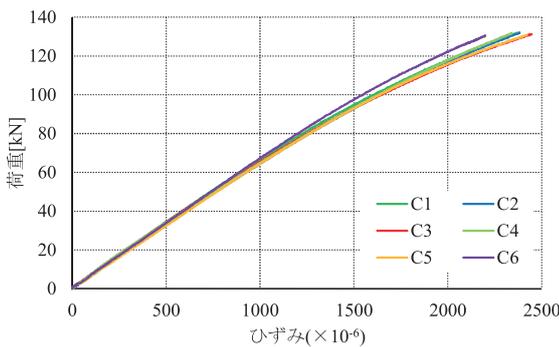
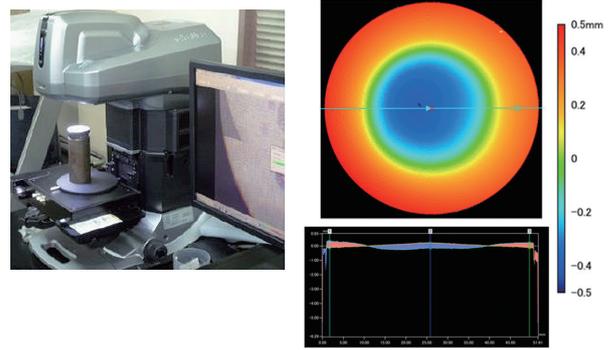


図4 荷重-ひずみ関係

4. 締付けおよびスタッド溶接による鋼板変形量

(1) 試験体および試験方法

試験体は、前述の図3と同様である直径60mm、鋼板厚8mmの円形鋼板にスタッドボルトを溶接したものを使用した。ここで、鋼板の直径は、载荷治具との取り合いから決定している。また、鋼板と座金の間には軸力計



a) 計測状況 b) 計測結果

図5 締付け後の鋼板変形量の計測

および高さ調整用のライナー材を挟んでいる。試験はトルクレンチを用いて目標軸力まで手動で一度に締付けたケースを3体（T1～T3）とした。加えて、スタッド溶接による初期変形を確認するため、軸力を導入しないケースを3体（T4～T6）設け、3D形状測定機（株式会社キーエンス製、VR-3200）を用いて鋼板下面の変形量を計測した。

締付けボルト軸力 N_s は高力ボルト摩擦接合で使用する高力ボルトの設計ボルト軸力の算出式⁴⁾である式(1)および式(2)より、130kNとした。

$$N = \alpha \cdot \sigma_y \cdot A_{be} \tag{1}$$

$$N_s = 1.1 \cdot N \tag{2}$$

ここで、 N : 設計ボルト軸力 (N)

N_s : 締付けボルト軸力 (N)

α : 低減係数 (0.86)

σ_y : ボルトの降伏点 (460N/mm²)

A_{be} : ボルトの有効断面積 (303mm²)

(2) トルク-軸力関係

スタッドボルト締付け時におけるトルク-軸力関係を図6に示す。図中の赤点線は3体の試験結果より得た近似直線である。これより、トルク-軸力関係では図2および図4に示す結果よりも非線形性が弱まっていることがわかる。各試験体のトルク-軸力関係から最小二乗法により算出した傾き T/N およびトルク係数値を表2に示す。なお、トルク係数値 k は式(3)より算出した。

$$k = \frac{T}{N \cdot d} \tag{3}$$

ここで、 T : トルク (N・m)

N : 軸力 (kN)

d : ボルト呼び径 (mm)

表2より、締付けボルト軸力が130kNまでの範囲で、文献5)に示されているトルク係数および変動係数の規定範囲 (0.110～0.150 および5%以下) を個体数は少ないがそれぞれ満足している。

以上より、規定範囲のトルク係数を得ることで、高力ボルトと同様にトルク法によってスタッドボルトの軸力管理が可能と考えられる。

(3) 溶接による鋼板の初期変形

図7にスタッド溶接時に生じた鋼板の鉛直方向の変形量分布を示す。鉛直変形量（鉛直上向きの変形を正）は円形鋼板の縁端を基準として計測している。図中の赤点線はスタッドボルトの軸径、赤実線は試験機の孔径の位置を示している。

図より、鋼板の中心付近が最も変形量が大きく、最大で0.40mmであった。文献4)では、接合部における肌すき量が1mm以下の場合、軸力導入により接合部が密着するためフィラー挿入が不要とされており、スタッド溶接による摩擦接合継手のすべり耐力への影響は小さいと予想される。

5. 導入軸力による鋼板の変形および応力

(1) 解析モデル

スタッドボルトへの軸力導入時における鋼板の変形および応力状態を調べるために、汎用構造解析プログラムAbaqus⁶⁾を用いて弾塑性FEM解析を行った。解析モデルとそれに与えた境界条件を図8に示す。

解析モデルは6章で使用するすべり試験体の添接板から補強リブを取り除いた1/4モデルである。なお、スタッド溶接による鋼板の変形は、定量的に設定することが難しいため、ここでは無視している。母板とスタッドボルトは溶接部のカラーも含め一体としてモデル化し、カラーはスタッドボルトと同じ材料特性を仮定している。使用する要素は8節点ソリッド要素を基本とした。要素分割状況を図8b)に示す。メッシュサイズは、約1mmの立方体を基本とした。母板-添接板間の摩擦係数は、後述するすべり試験で得られたすべり係数 μ_2 の平均値である0.689とした。座金-添接板間の摩擦による影響を除くため、両者間の摩擦は無視することとし、文献7)を参考に0.01とした。材料特性は表3および図9に示すように、SS400材は材料試験結果を基にしたトリリニア型、HT570材は2章の試験結果を基に400N/mm²までを2次曲線、それ以降の勾配を0とした。また、座金およびナットは十分強度があると見做し、弾性体としている。スタッドボルトへの軸力は、2本同時に導入した。軸力は、図8b)に示すスタッドボルト溶接部の上面とナット間の中央に定義した予張力断面にボルト軸力に相当する締結力を作用させている⁸⁾。ここでは、スタッドボルトに軸力を導入した後、図8a)に示すチャック部にz軸負の方向の強制変位を与えることで引張载荷を行った。解析ケースは、導入軸力を82.5kN、110kN、120kN、130kNと変化させた4ケースである。

(2) 鋼板の変形量と応力分布

軸力と鋼板下面（スタッドボルトの中心直下）の変形量との関係を図10に示す。鉛直変位は、軸力が0kNの時点を基準に上向きを正としている。

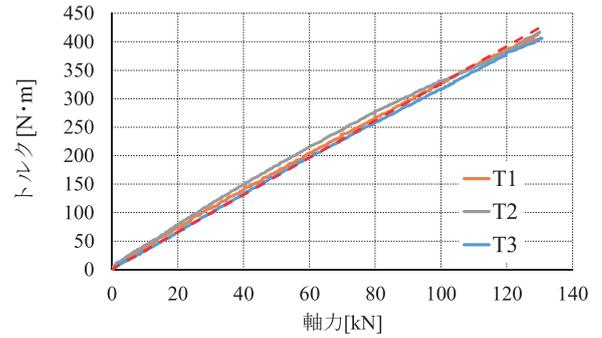


図6 トルク-軸力の関係

表2 図6の傾きとトルク係数値

試験体名	T/N	決定係数	呼び径d	トルク係数k	変動係数 [%]
			[mm]		
T1	3.139	0.993	22	0.143	0.39
T2	3.110			0.141	
T3	3.123			0.142	

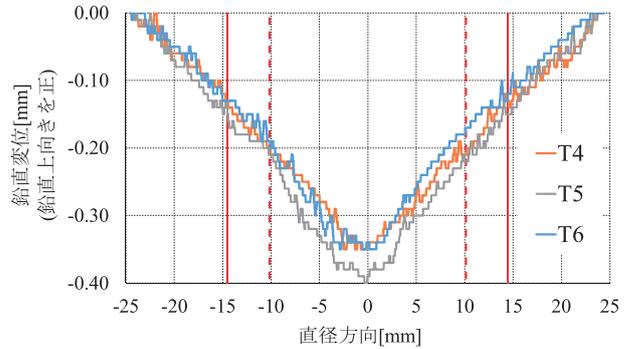


図7 鋼板の初期変形量

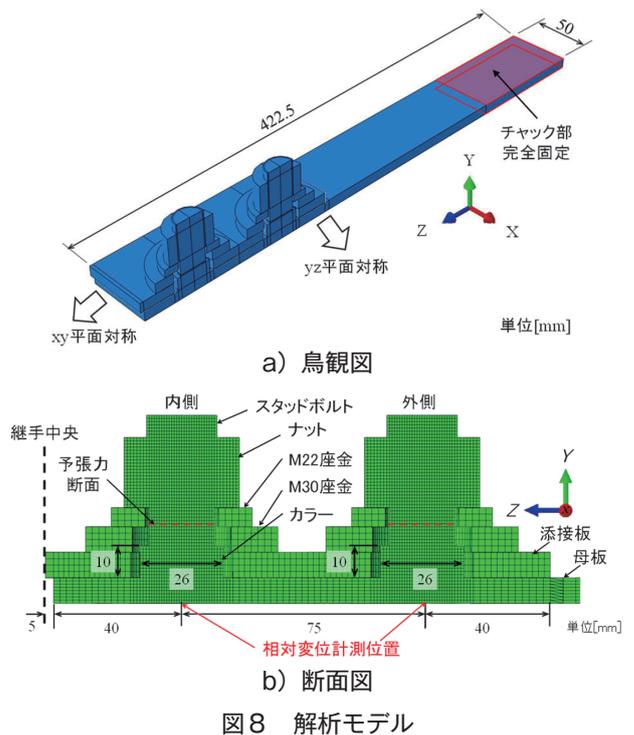


図8 解析モデル

表3 材料特性

部材	鋼種	ヤング率	ポアソン比
		[N/mm ²]	
母板 添接板	SS400	1.97E+05	0.3
スタッドボルト	HT570	1.91E+05	
ナット 座金	-	2.00E+05	

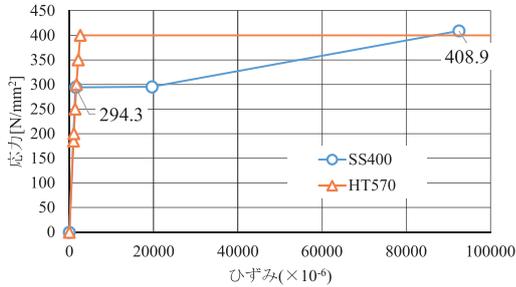


図9 SS400およびHT570の応力-ひずみ関係

図より、軸力が80kN付近まで鋼板が線形に挙動し、それ以降は直線の傾きが小さくなった。また、軸力が80kNでの鉛直変位は0.04mm程度であり、図7に示したスタッド溶接によって生じた初期変形ほど鋼板は変形しないことがわかる。

軸力導入時における母板および添接板のMises応力分布を図11に示す。図11a)より、内側、外側ともに、80kN程度で鋼板の一部に高いMises応力が発生していることがわかる。これは、図中のyz平面におけるせん断応力によるものと考えられる。さらに、軸力を増加させると図11b)からd)に示すように板厚方向に塑性域が進展し、鋼板の変形が増加する。

(3) 導入軸力によるすべり係数の変動

スタッドボルトへの導入軸力とすべり係数との関係を図12に示す。ここで、すべり係数は、引張荷重時における最大荷重を導入軸力とボルト本数の積で除した値とした。図より、導入軸力が増加するとすべり係数が小さくなっていることがわかる。特に、82.5kNから110kNにかけてすべり係数は小さくなる。これは、軸力導入時に鋼板がyz平面のせん断により塑性化したこと、その後z方向の引張力によって母板の塑性化が進展したためと考えられる。

以上より、スタッドボルトへの導入軸力は、弾性範囲内とする場合は、鋼板が弾性である82.5kNが望ましい。しかし、この場合、図7に示したスタッド溶接による鋼板の変形が残り、接合面に規定の接触力が存在しないことが考えられる。一方で、導入軸力が高い場合は一層の塑性域の進展によりすべり係数が低下する。したがって、6章の継手試験では、スタッドボルトへの導入軸力(締付けボルト軸力)を110kNとして検討を行う。

6. 継手試験

(1) 試験体

試験には図13に示すすべり試験体を用いた。鋼材は

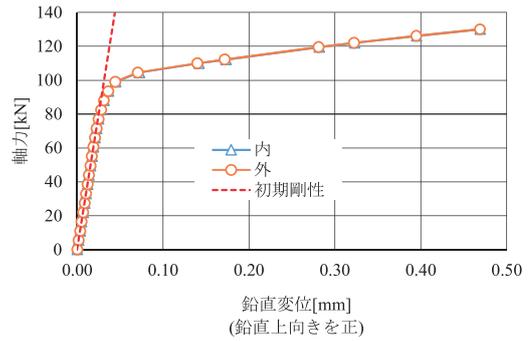


図10 軸力-鉛直変位関係 (スタッドボルト中心)

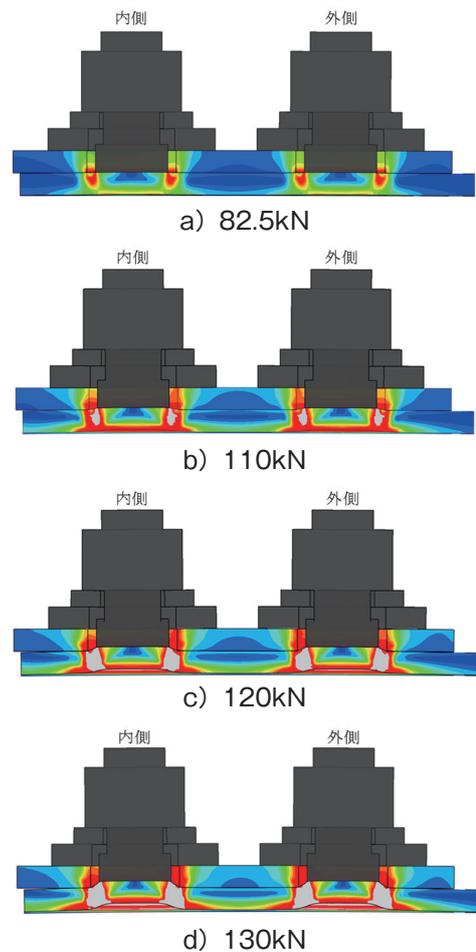


図11 軸力導入時のMises応力分布図 (単位: N/mm², 変形倍率5倍)

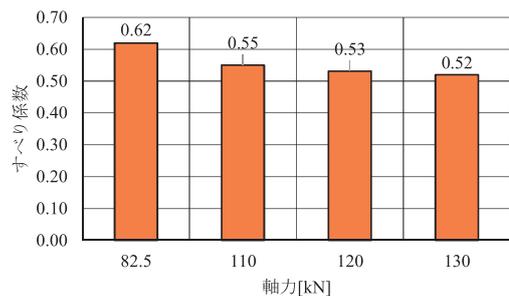


図12 導入軸力とすべり係数の関係

合成床版と同様に底鋼板 8mm (SS400) を使用した。添接板は、スタッド溶接部のカラーとの干渉を避けるため、孔径を 32mm の拡大孔とし、拡大孔用に M30 用座金を使用した。また、合成床版の継手部ではコンクリートが底鋼板の面外曲げ変形を拘束することから、それを模擬するため、添接板には板厚 8mm、高さ 100mm の補強リブを溶接している。

軸力はスタッドボルト軸部に貼付したひずみゲージを用いて計測した値をもとに管理した。なお、ひずみゲージのリード線の導線を確保するためにライナー材も使用している。試験体の母板および添接板の摩擦接合面処理は、ともに無機ジンクリッチペイントを 75 μm 塗布している。図 13 の試験体のすべり / 降伏耐力比 β は、後述する表 6 の値を用いると、式 (4) より 0.38 であり、すべり先行型の試験体である。

$$\beta = \frac{\mu \cdot m \cdot n \cdot N}{(w-d) \cdot t_1 \cdot \sigma_y} \quad (4)$$

- ここで、
- β : すべり降伏耐力比
 - μ : すべり係数 (0.45)⁴⁾
 - m : 接合面数
 - n : ボルト本数
 - N : 設計ボルト軸力 (100kN)
 - w : 板幅 (mm)
 - d : 孔径 (mm)
 - t₁ : 母板厚 (mm)
 - σ_y : 鋼材の降伏点 (N/mm²)

(2) 接触応力計測結果

a) 試験方法

鋼板にスタッドボルトを溶接すると、図 7 に示すように変形が生じる。摩擦接合では、締付けボルト軸力によって導入される接合面の接触力が重要である。そこで、摩擦接合継手の試験体で、接触応力分布を計測し、軸力ごとに接合面の接触状況を確認した。

試験ケースを表 4 に示す。試験体数は各ケース 1 体とした。P1 は導入軸力を 110kN とした場合の接触力を把握するため、高圧用プレスケールを使用している。P2 および P3 では、接触応力の広がり把握するため、中圧用プレスケールを使用している。P2 は、軸力導入時に鋼板が弾性変形する軸力として、導入軸力を 40kN とした。接触圧の計測には、中圧用プレスケール、高圧用プレスケールおよびプレスケール圧力解析システム (ともに 株式会社 FUJIFILM 製) を使用した。

b) 試験結果

高力ボルトにおける接触圧は図 14 のように広がり円形に分布しているとされ、その半径は文献 9) では式 (5) の提案式のように示される。

$$r = \frac{D_{n1}}{2} + \frac{t}{2} + t_s \quad (5)$$

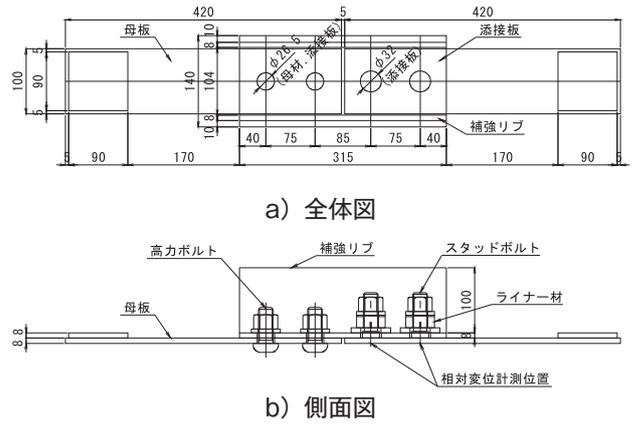


図 13 すべり試験体

表 4 接触応力測試験ケース

試験体名	P1	P2	P3	
プレスケール	高圧用	中圧用		
計測範囲	[N/mm ²]	50~130	10~50	
導入軸力	[kN]	110	40	110

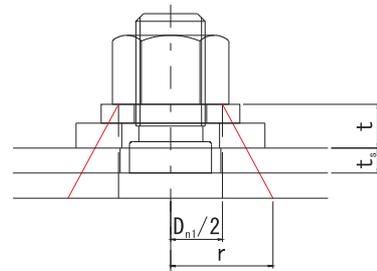


図 14 接触面の接触半径

- ここで、
- D_{n1} : ナット接触径 (33mm)
 - t : 座金板厚 (14mm)
 - t_s : 添接板厚 (8mm)

式 (5) によると本試験での接触半径は 31.5mm となる。接触応力の測定結果を表 5 に示す。接触面積の提案値 A_d は、式 (5) より得た接触半径を用いて算出した面積から、添接板の孔の断面積を差し引いた値としている。接触力 C と導入軸力 N の比 C/N に着目すると、P1 では接触力と導入軸力がほぼ一致した。一方で、P2 では C/N が 60% 程度となり、接触力と導入軸力との間に差が生じた。すなわち、導入軸力が小さい場合、接合面の接触力と導入軸力が一致しないことが確認できた。また、接触面積に着目すると、接触面積の実験値と提案値の比 A/A_d は P3 で約 90%、P2 で約 70% となっており、導入軸力が小さい場合、接触面積も小さくなった。これは、4 章で述べたスタッド溶接による鋼板の変形により、スタッドボルトに導入した軸力が接触力だけではなく、鋼板の変形に使用されたこと、スタッド溶接時の変形が軸力導入時に打ち消せていないことによるものと考えられる。

接合面の接触状況を図 15 に示す。図より、P3 では

接触圧がスタッドボルトの中心から同心円状に分布している。一方、P2では接触圧が同心円状にならず、接触していない箇所が見られる。ここからも、スタッド溶接による鋼板の局所的な変形を軸力導入によって打ち消されていないと考えられる。

(3) すべり試験

a) 試験方法

すべり試験状況を写真4に示す。引張荷重は、大阪市立大学が所有する1000kN万能試験機を使用した。試験はスタッドボルトへの軸力導入後、初期に発生する大きな軸力低下が生じた後に行った。各スタッドボルトの軸力低下率の経時変化を図16に示す。材料試験は、JIS Z 2241金属材料引張試験方法¹⁰⁾に従って実施した。材料試験結果を表6に示す。試験結果はJIS G 3101一般構造用圧延鋼材¹¹⁾を満足していた。

b) すべり係数

試験より得られたすべり荷重およびすべり係数を表7に示す。ここで、すべりの判定は文献12)を参考に内側ボルト位置における母板-添接板間の相対変位が0.2mmを超えた点とし、すべり荷重はその時点における荷重としている。すべり係数は式(6)から(8)により算出した。

$$\mu_0 = \frac{P}{n \cdot m \cdot N_0} \quad (6)$$

$$\mu_1 = \frac{P}{n \cdot m \cdot N_1} \quad (7)$$

$$\mu_2 = \frac{P}{n \cdot m \cdot N_2} \quad (8)$$

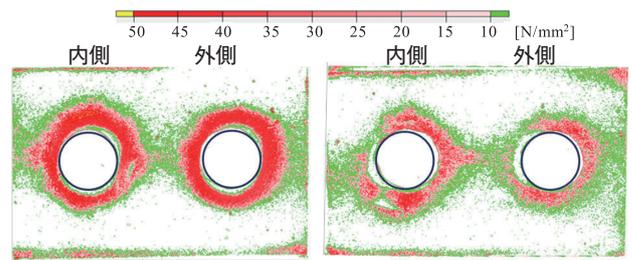
- ここで、
- P : すべり荷重 (kN)
 - n : ボルト本数
 - m : 摩擦面数
 - N₀ : 設計ボルト軸力 (kN)
 - N₁ : 試験前ボルト軸力 (kN)
 - N₂ : すべり時ボルト軸力 (kN)

表7より、いずれの試験体においても、すべり係数は0.45より十分高い値を得た。したがって、鋼板厚8mm(SS400)にスタッドボルト(HT570)を用いて、面外変形を拘束した一面摩擦接合継手において、十分なすべり耐力が得られた。

試験後の添接板における接合面状況の一例を写真5に示す。接合面付近に相対変位計を設置するための治具を取付ける際に使用した接着剤が付着しているが、すべり挙動への影響は小さい。写真中に示す矢印は、荷重方向および板幅方向におけるすべり痕が最も大きくなった箇所の長さを表す。内側、外側ともにすべり痕が現れ、その大きさは板幅方向で60mm程度となった。これは、図15a)に示す接触面とほぼ一致している。また、荷重方向の広がり方に着目すると、内側で無機ジンクリッチペイントが大きく剥離していることがわかる。これは、

表5 接触応力計試験結果

試験体名	P1		P2		P3	
ボルト位置	内側	外側	内側	外側	内側	外側
プレスケール	高圧用		中圧用			
導入軸力 N [kN]	110.9	110.5	56.2	44.8	110.0	110.2
接触力 C [kN]	110.1	115.4	35.0	27.6	/	/
C/N [%]	99.3	104.4	62.3	61.6	/	/
接触面積 A [mm ²]	1512.0	1492.0	1750.0	1597.0	2185.0	2033.0
接触面積 A _d (提案値) [mm ²]	2313					
A/A _d [%]	/	/	75.7	69.0	94.5	87.9



a) P3(110kN) b) P2(40kN)

図15 各試験体の接触状況

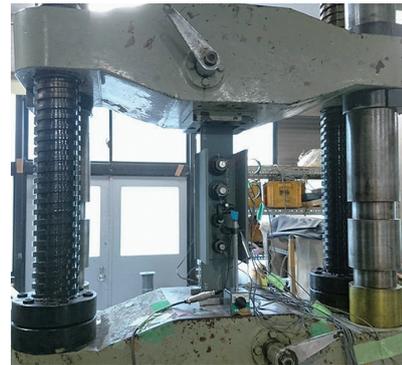


写真4 すべり試験状況

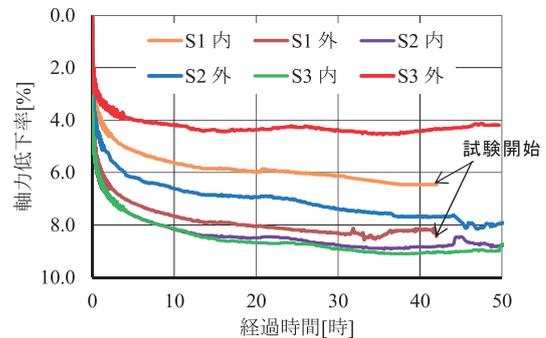


図16 軸力低下率の経年変化

表6 材料試験結果

鋼種	板厚	降伏応力σ _y	引張応力σ _u	ヤング率E	ポアソン比ν
	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
SS400	8	295.2	431.9	1.98E+05	0.29

引張載荷時に母板が接合面から離れる方向に挙動し、内側に高い接触圧が発生したためと考えられる。

表7 材料試験結果

試験体名		S1	S2	S3
すべり荷重	[kN]	135.6	137.2	137.5
設計軸力	[kN]	100		
試験前軸力	内側 [kN]	104.2	102.4	101.6
	外側 [kN]	101.3	101.4	108.8
すべり時軸力	内側 [kN]	101.5	100.0	97.9
	外側 [kN]	95.0	96.4	102.4
すべり係数	μ_0	0.678	0.686	0.687
	μ_1	0.660	0.673	0.653
	μ_2	0.684	0.699	0.684

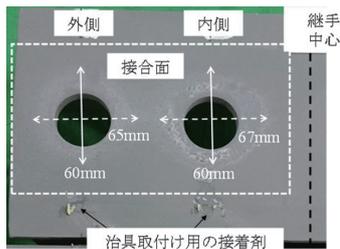


写真5 試験後の接合面状況

7. まとめ

本研究は、合成床版を対象として、従来の底鋼板の継手形式の課題に着目し、高力ボルトの代わりにスタッドボルトを用いた摩擦接合の合成床版の底鋼板継手部への適用可否の検討したものである。スタッドボルト溶接時の鋼板の変形量の計測、スタッドボルトの締付け試験を行った。加えて、スタッドボルトを用いた摩擦接合継手の応力性状、すべり耐力およびすべり挙動を確認するため、スタッドボルトを用いた一面摩擦接合継手のすべり試験体によるFEM解析およびすべり試験を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) スタッドボルトの荷重－ひずみ関係は非線形性を示したが、トルク－軸力関係は線形性を示したことにより、高力ボルトと同様にトルク法で軸力管理できる。
- (2) スタッドボルトを用いたすべり試験の弾塑性FEM解析により、軸力導入時に鋼板が塑性化すると、すべり係数は低下することが確認された。
- (3) 一方、接触応力計測試験より、スタッドボルトへの導入軸力を110kNとすると、接合面の接触力は導入軸力とほぼ一致したが、導入軸力を40kNとすると、スタッド溶接時の局所的な変形により、接合面での接触力は導入軸力の60%程度、接触面積は文献9)の接触半径から算出した接触面積の70%程度となった。
- (4) 導入軸力を110kN、設計軸力を100kNとしてすべり試験を行った結果、すべり荷重を設計軸力で除したすべり係数が0.45を上回り、十分なすべり係数を確保することができた。

(5) 荷重－相対変位関係や、ボルト軸力の推移、接合面のすべり痕より、スタッド溶接による鋼板の局所的な変形が本試験のすべり挙動に与える影響は小さく、スタッドボルトを用いた摩擦接合継手は適用可能と考えられる。

(6) 軸力と接触力の関係およびすべり試験の結果から、摩擦接合継手における導入軸力は110kNが望ましいと考えられる。

今後の課題として、スタッド溶接による変形のモデル化およびスタッドボルト溶着部の材料特性を考慮したモデル化が挙げられる。

最後に、本研究には大阪市立大学の山口教授に多大なご指導をいただきました。紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田畑晶子, 儀賀大己, 小野秀一, 山口隆司: ねじ付きスタッドにより当て板した鋼板の繰り返し引張挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.1, pp.114-125, 2017.2.
- 2) スタッド協会: 溶接技能者のためのスタッド溶接施工の手引き, 鋼構造出版, 2012.10.
- 3) 日本スタッドウェルディング(株): 「製品情報 高強度スタッド」, <http://www.nsw-j.com.html> (参照日 2019.9.)
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 丸善, 2012.3.
- 5) 土木学会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針 (案), 丸善(株), 2006.
- 6) SIMULIA: Abaqus Analysis User's Manual, Ver.6.16, 2016.
- 7) 山口隆司, 森猛, 橋本国太郎: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり強度/降伏強度とすべり係数に関する研究, 構造工学論文集, Vol.51A, 土木学会, pp.1737-1748, 2005.3.
- 8) 玉越隆史, 石尾真理, 横井芳輝, 山崎健次郎, 水口知樹: 高力ボルト摩擦接合のボルト軸力導入に着目した解析モデルに関する研究, 鋼構造論文集第21巻, 第84号, pp.95-110, 2014.12.
- 9) 日本鋼構造協会: 高力ボルト接合技術の現状と課題, JSSC テクニカルレポート No.96, 2013.3.
- 10) JIS Z 22412011: 金属材料引張試験方法, 日本規格協会, 2015.10.
- 11) JIS G 31012010: 一般構造用圧延鋼材, 日本規格協会, 2015.8.
- 12) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 丸善(株), 2007.10.