

高強度ねじ付きスタッドを用いた鋼・コンクリート合成床版

底鋼板継手構造の開発とその力学的挙動に関する研究

STUDY AND DEVELOPMENT ON THE LOWER STEEL PLATE JOINT OF THE STEEL CONCRETE COMPOSITE DECK STRUCTURE BY USING STEEL HIGH STRENGTH STUDS AND ITS MECHANICAL BEHAVIOR

橋梁工学分野 奥原 大貴
 Bridge Engineering Hiroto OKUHARA

床版上面からのみの施工可能な工法として、合成床版底鋼板継手部にスタッドボルトを適用するため、実験及びFEM解析より、スタッドボルトへの導入軸力やすべり挙動を検討した。結果、鋼板の塑性化を抑制するため、導入軸力の制限が必要であるとした。また、押抜き試験より、添接板に頭付きスタッドを設けると、底鋼板継手部のせん断耐力が向上する一方、はりによる曲げ試験より、すべり耐力の低下が生じた。また、高力ボルトよりもスタッドボルトはすべり止め効果があることを示した。

In order to apply the high strength stud bolt to the joint of steel concrete composite decks between the bottom plates, some experiments and FEM analysis was carried out to examine the introduction axial force to stud bolt and slip behavior. As a result, it is necessary to limit the axial force to keep the plate from plasticity. From the push out test, it was shown the shear shearing strength of the joint of bottom plate improves by head stud on the splice plate. However, it showed the slip resistance decreases from the bending test by beam. In addition, it was clarified the stud bolt is more effective as shear connectors than high tension bolts.


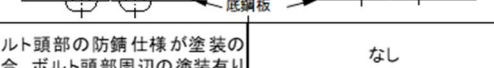
1. 研究背景および目的

近年、軽量かつ高耐荷力および耐疲労性を有する、鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版）の採用事例が増加している。合成床版の底鋼板継手部には、高力ボルトによる一面摩擦接合継手が使用されている。しかし、ボルトの防錆仕様が塗装である場合、吊足場の設置など、床版下面からの施工工程が必要となり、施工効率が良くない。そこで、床版上面からのみの施工が可能な継手構造として、高強度ねじ付きスタッド（以下、スタッドボルト）の使用を検討している。底鋼板継手部の構造概要を表-1に示す。

合成床版の底鋼板の板厚は一般的に6~8mmが使用されている。一方、スタッドボルトは表-1のように鋼板にボルトを溶接する構造である。鋼板厚が小さい場合、スタッドボルト溶接時や軸力導入時に鋼板が変形する恐れがある。したがって、スタッドボルトへの適切な軸力を検討する必要があるが、軸力を制限すると、現行の設計よりもボルト本数が増加する。

本研究では、合成床版の底鋼板のような薄鋼板の摩

表-1 底鋼板継手部構造比較

名称	高力ボルト摩擦接合	高強度スタッドボルト摩擦接合
構造図		
底鋼板下面での作業	ボルト頭部の防錆仕様が塗装の場合、ボルト頭部周辺の塗装有り	なし

擦接合継手へのスタッドボルトの適用および、コンクリート断面を活用し、底鋼板継手部のボルト本数を削減できる継手構造の開発を目的としている。そこで、第一に薄鋼板にスタッドボルトを用いた摩擦接合継手に関して、スタッドボルトへの導入軸力決定のため、FEMにより検討を行った。また、スタッドボルトを用いた摩擦接合継手のすべり挙動を把握するため、すべり試験を行った。次に、底鋼板継手部の力学的挙動を把握することを目的として、底鋼板継手部を模擬した試験体により押抜き試験を行った。最後に合成床版の一部をはり形状とした試験体による曲げ載荷試験より、床版作用時における底鋼板継手部の挙動および構造を変化させたことによる底鋼板継手部の応力伝達性能の

違いに着目した検討を行った。

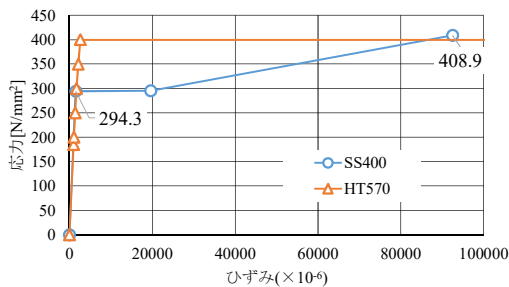
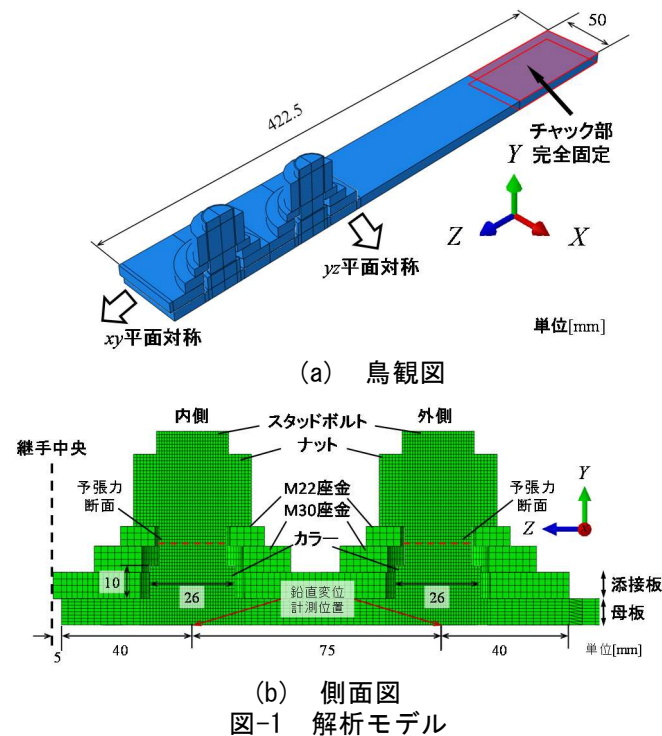
2. 摩擦接合継手へのスタッドボルトの適用

2.1 導入軸力の検討

2.1.1 解析モデル

解析モデルとそれに与えた境界条件を図-1 に示す。母板および添接板の板厚は 8mm としている。試験体寸法については、文献 2) に示す標準すべり試験片を参考としている。使用する要素は 8 節点ソリッド要素を基本とし弾塑性 FEM 解析を行った。材料特性は、図-2 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として、母板および添接板に使用している。また、HT570 材は 400N/mm² までを 2 次曲線、それ以降の勾配を 0 とし、スタッドボルトおよびカラーに使用した。座金およびナットは十分強度があるとし、ヤング率 $E=2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ の弾性体とした。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-添接板間の静止摩擦係数は、両者間の摩擦は無視することとし、文献 3) を参考に 0.01 とした。

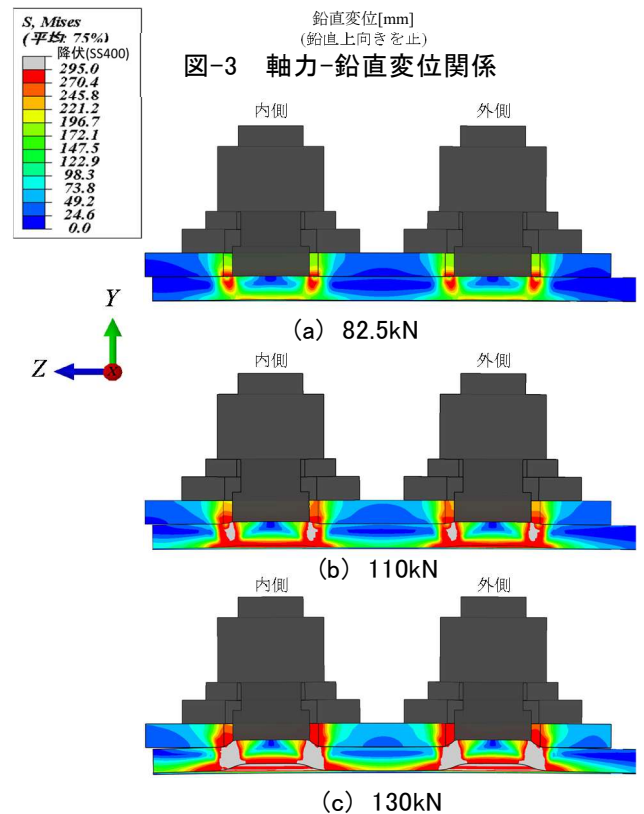
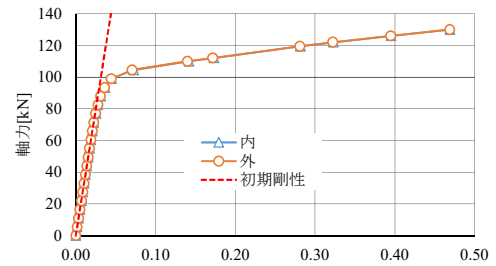
解析ステップは、①スタッドボルト 2 本同時に軸力を導入、②図-1 (a) に示すチャック部に z 軸負の方向の



強制変位を与えて引張载荷を行った。軸力は、図-1 (b) に示すスタッドボルトの母板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。導入軸力は、鋼板が塑性していない軸力から文献 4) に示す導入軸力までとして、82.5kN, 110kN, 120kN, 130kN の 4 ケースとした。

2.1.2 鋼板の変形量と応力分布

軸力と鋼板下面の変形量との関係を図-3 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 程度であった。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。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-4 に示す。図-4 (a) 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、底鋼板内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-4 (b), (c) に示すように板厚方向に



(変形倍率 5 倍, 単位: N/mm²)

塑性域が進展し、鋼板の変形が増加する。

2.1.3 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-5に示す。ここで、すべり係数は、引張载荷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、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、鋼板厚8mmのSS400材である場合、鋼板が弾性である82.5kNが望ましい。しかし、スタッド溶接による鋼板の変形が残り、接合面に所定の接触力が現れないことが考えられる。一方、導入軸力が高い場合、母板における一層の塑性域の進展によりすべり係数が低下する。以上より、次節のすべり試験では、スタッドボルトへの導入軸力を110kN、締付け後10%程度の軸力低下を想定し、設計軸力を100kNとして検討する。

2.2 すべり試験

2.2.1 試験体

すべり試験には図-6に示す試験体を使用した。鋼材は合成床版と同様に鋼板厚8mmのSS400材とし、材料特性を表-2に示す。添接板は、スタッド溶接部のカラーをかわすため、スタッドボルト側の孔径を32mmとし、拡大孔用にM30用座金を使用した。合成床版底鋼板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ため、鋼板厚8mm、高さ100mmの補強リブを添接板に溶接して面外変形を拘束した。スタッドボルトの軸力は、軸部に貼付したひずみより管理した。このひずみゲージのリード線を逃がすため、ライナー材を使用している。接合面には、合成床版と同様に母板、添接板とも無機ジンクリッチペイントを75 μ m塗布している。

2.2.2 板厚の違いがすべり挙動に与える影響

母板の板厚の違いがすべり挙動に与える影響を比較するため、本研究よりも鋼板厚が大きく、スタッドボルトを使用した一面摩擦接合継手のすべり試験を行った文献5)の試験結果との比較を行う。試験体の諸元の比較を表-3に示す。

荷重-相対変位関係を図-7に示す。相対変位は図-6に示す内側ボルト位置のコバ面で計測したものとする。なお、ケース内で同様の傾向が見られたため、1体分の試験結果のみ示している。また、図中の縦軸は試験時の荷重Pをすべり荷重 P_{Sl} で除した値としている。相対変位は図-6(b)に示す内側のスタッドボルト位置で計測した母板と添接板間の相対変位である。図-7より、両者はほぼ一致しており、緩慢なすべりが生じている。したがって、面外変形を拘束した一面摩擦接合

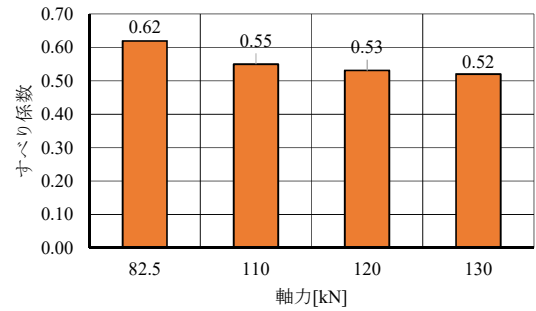


図-5 導入軸力とすべり係数の関係

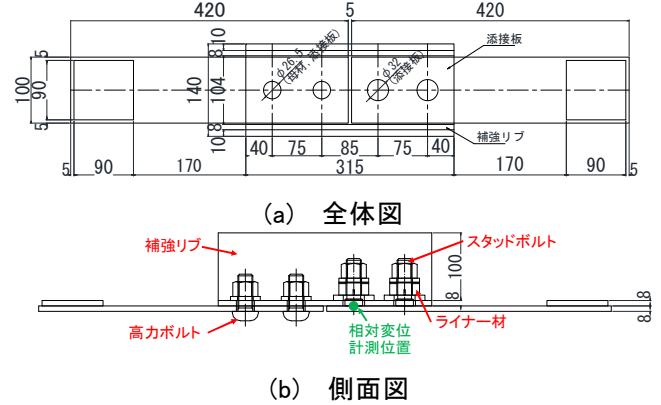


図-6 すべり試験体(単位: mm)

表-2 SS400 材材料試験結果

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

表-3 文献5)との構造比較

試験ケース	S1~S3	文献5)	
母板厚	8 [mm]	19	
添接板厚	8 [mm]	19	
接合面処理	母板	無機ジンク75 μ m 2種ケレン	
	添接板	無機ジンク75 μ m	
使用ボルト	スタッドボルト		
ボルト呼び径	M22	M20	
接合面数	1		
設計軸力	kN	100	165
すべり/降伏耐力比 β	0.58	0.37	

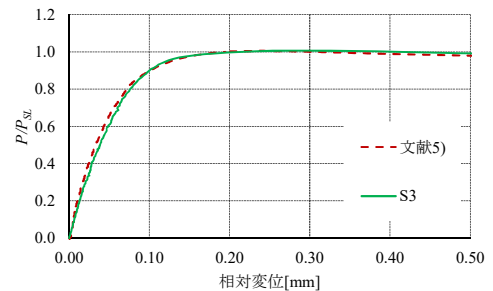


図-7 荷重-相対変位関係

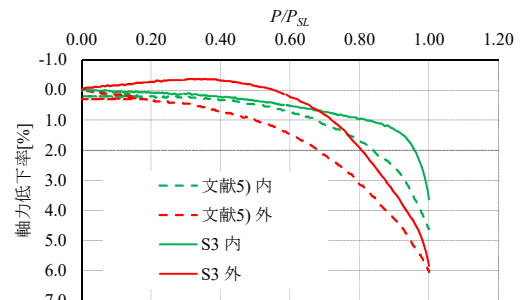


図-8 軸力低下率-荷重関係

継手において、スタッド溶接時に生じる面外変形が荷重-相対変位関係に与える影響は小さいと考えられる。

次に、引張载荷時におけるスタッドボルトの軸力低下率-荷重関係を図-8 に示す。軸力低下率は各スタッドボルトの試験前軸力を基準としている。厚板の継手である文献5)では内側よりも外側の軸力低下率が大きい。これは2.1.2でも述べたように、軸力導入時に鋼板が塑性化し、引張载荷時にスタッドボルト周辺の母板に塑性化が進展したため、および外側母板は内側母板よりも荷重分担が大きいためである。すべり時では厚板の継手と同様の傾向が確認され、その軸力低下率もほぼ同じとなった。すべり直前における軸力低下率は本試験の方が大きくなっている。

以上より、軸力低下率-荷重関係の挙動に差異が認められる点もあるが、結果的にすべり時の軸力低下率に差異はほとんど見られない。したがって、面外変形が抑えられる底鋼板の継手においては板厚の違いがすべり挙動に与える影響は小さいと考えられる。

3. 底鋼板継手部を模擬した押抜き試験

3.1 試験体

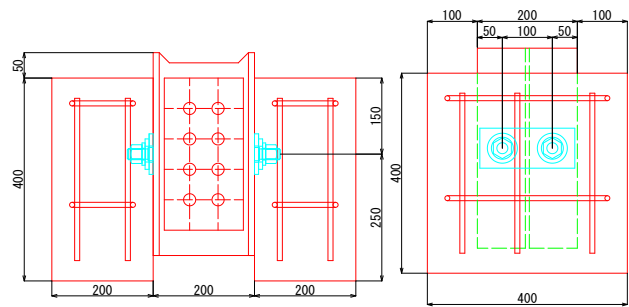
試験体は、図-9 および図-10 に示す添接板の頭付きスタッドの有無をパラメータに2ケースとした。試験体寸法は文献6)を参考に決定した。使用した材料および材料特性を表-4、表-5 に示す。

载荷は、载荷冶具を試験体 H 鋼フランジ面に当てて圧縮することで行った。载荷速度は 1kN/s を基本とした。試験体のコンクリート面における不陸調整にはモルタルを使用し、コンクリートの開きを抑えるため、開き止めを設置した。

3.2 荷重-相対変位関係

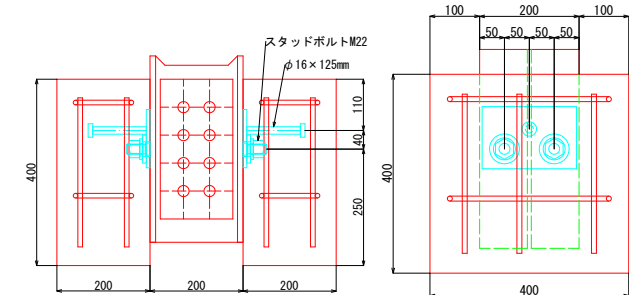
荷重-相対変位関係を図-11 に示す。図中の赤点線は設計すべり荷重(180kN)を表す。载荷を開始して 100kN 程度までは両ケースともに相対変位がほとんど生じない。これは、スタッドボルトへの軸力導入により、母板-添接板間に摩擦力が生じているためと考えられる。その後、急激に相対変位が大きくなるケースが多く見られた。さらに荷重は上昇していき、スタッドボルトの破断により試験が終了した。相対変位の急変点までにおける初期剛性に注目すると、ケース HS の方がやや高い。

急激に相対変位が変化する点、もしくは相対変位が 0.01mm となる点の荷重をすべり荷重と定義すると、表-6 のように試験体間でばらつきが大きいものの、各試験のすべり荷重から算出したすべり係数の平均値は、2 章で述べたすべり試験結果のそれよりも大きくなった。これは、底鋼板継手部がコンクリートで覆われていることで、荷重をコンクリートでも分担しているためと考えられる。また、頭付きスタッドでも継手部に



(a) 側面図 (b) 正面図

図-9 押抜き試験体(ケース S)



(a) 側面図 (b) 正面図

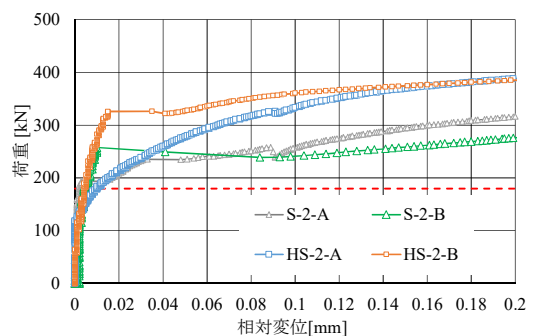
図-10 押抜き試験体(ケース HS)

表-4 材料特性(鋼材)

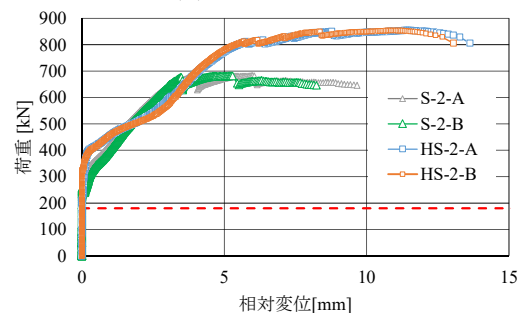
	鋼種	降伏点	引張強度	伸び
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
H鋼	SS400	320	443	31
添接板	SS400	301	424	32
スタッドボルト	HT570	577	643	25
頭付きスタッド	SS400	388.3	472.3	30

表-5 材料特性(コンクリート)

種類	ヤング率	ポアソン比	圧縮強度	引張強度
	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]
30-8-25N	3.54E+04	0.21	42.5	3.79



(a) 0.2mm まで



(b) 終局まで

図-11 荷重-相対変位関係

生じるせん断力に対して抵抗しているため、ケース S よりも HS の方がすべり荷重および終局耐力が高い。以上より、継手部にせん断が生じる場合、頭付きスタッドを添接板に設ける工法はせん断力が継手において優位になる可能性を示した。

4. 合成床版底鋼板継手部を模擬したはり試験

4.1 試験体

ケース S の試験体形状を図-12 に示す。試験体ケースは、この他に高力ボルト（ケース H）およびスタッドボルトと頭付きスタッドの併用（ケース HS）のケースを設けた。各部材で使用した鋼種および材料特性を表-7 に示す。ここでは材料手配の関係上、底鋼板には SM400 材を使用している。この試験における設計荷重 P_d は、床版支間 4.0m の連続版を対象に試設計を行い、床版作用時に底鋼板に生じる応力が、はり試験体のそれと一致する荷重(189.1kN)とした。また、想定すべり荷重 P_{ed} は、継手部に配置したボルトの許容耐力と作用力が一致する時の荷重(H:608.2kN, S,HS:395.6kN)とした。はり試験体への載荷方法は、4点曲げとする。

計測項目は、支間中央および載荷点での鉛直変位、支点沈下量、底鋼板間開き量、底鋼板下面ひずみ、添接板上面ひずみ、鉄筋軸方向ひずみ、コンクリート上縁ひずみ、頭付きスタッド軸ひずみ(ケース HS のみ)とした。また、コンクリートのひび割れ発生箇所を明確にするため、試験体の側面には、約 100mm 四方のメッシュを描いている。

4.2 試験結果

4.2.1 荷重-母板間変位関係

試験より得られた荷重-母板間変位関係を図-13 に示す。図中には設計荷重 P_d および、床版断面全面を有効とした際のコンクリートひび割れ荷重を併記している。また、添接板-母板間におけるすべりを判定するため、文献 5) を参考に母板間変位が 0.2mm, 0.4mm の時点に着目した。各母板間変位が生じた際の荷重を表-8 に示す。ケース HS は他の 2 ケースと比較して低い荷重で傾きの低下が生じた。これは、曲げ載荷時、添接板に溶接した頭付きスタッドが引っ張られ、添接板が底鋼板から剥離する方向へ動くため、接合面の接触力が低下するためと考えられる。

図-13 の縦軸である載荷荷重 P を P_{ed} で除したグラフを図-14 に示す。また、各母板間変位における P/P_{ed} を図-15 に示す。ケース H は P/P_{ed} が低い段階で傾きが小さくなり、母板間変位が 0.2mm, 0.4mm の段階で P/P_{ed} が 1.0 未満となった。一方、ケース S および HS ではケース H よりも P/P_{ed} が高い段階で傾きが低下し始め、 $P/P_{ed}=1.0$ 付近で荷重が停滞した。これは、高力ボルトがボルト孔を通して鋼板を締結している一方で、スタッドボルトは母板に溶接しているため、スタッド

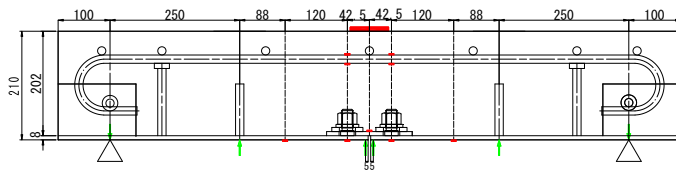
ボルトの方がずれ止めの効果が高いためと考えられる。

4.2.2 設計荷重時の継手断面におけるひずみ分布

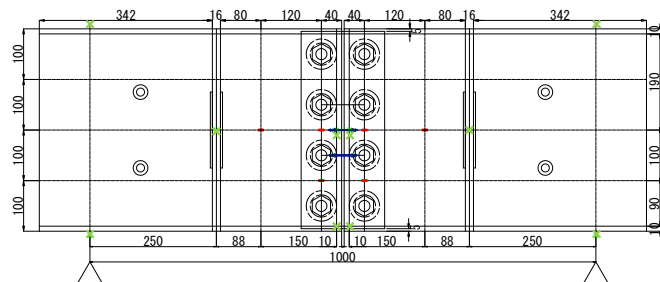
設計荷重時におけるコンクリート上縁、鉄筋、添接板、母板の 4 カ所で測定したひずみ分布を図-16 に示す。なお、図中に示す赤線は、コンクリート断面の引張領域を無視した断面における中立軸位置を表す。ひずみは、試験体中央から見て対称の位置にある値を平均している。図より、ケース H は中立軸位置が計算値とほ

表-6 押抜き試験におけるすべり荷重

試験体名	A	B	平均	すべり係数	標準偏差	C.V. [%]	
S	1	133.3	149.0	184.8	0.71	39.7	21.5
	2	193.6	258.0		1.13		
	3	181.0	193.7		0.94		
HS	1	241.2	190.9	211.4	1.08	39.3	18.6
	2	182.7	279.2		1.15		
	3	160.9	213.6		0.94		

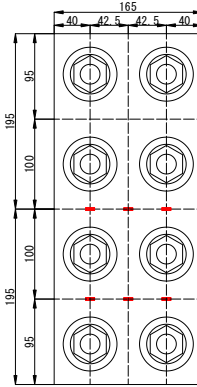


(a) 側面図

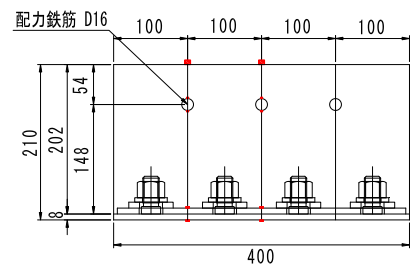


■ : ひずみゲージ × : CDP ← : π 型変位計

(b) 鋼板下面



(c) 添接板



(d) 継手断面

図-12 はり試験体

(ケース S, 単位 : mm)

表-7 各部材の使用材料および材料特性

	鋼種	降伏点	引張強度	伸び
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
底鋼板	SM400A	318	470	29
添接板	SS400	301	424	32
鉄筋	SD345	404	542	26
スタッドボルト	HT570	577	643	25
頭付きスタッド	SS400	388.3	472.3	30

ば一致するが、ケース S および HS では中立軸位置がやや高い。これは、スタッドボルトが母板に溶接されているため、スタッドボルトに作用するせん断力が母板に伝達され、母板および添接板のひずみが大きくなるためと考えられる。中立軸位置が高いことで、引張側コンクリートがひび割れやすくなることが予想されるが、その検討に関しては、今後の課題である。

5. 結論

本研究では、薄鋼板にスタッドボルトを用いた摩擦接合継手の開発および、底鋼板継手部の合成効果に着目した押抜き試験およびはり試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 鋼板厚 8mm の SS400 材を使用した底鋼板継手部に、軸径 20.3mm のスタッドボルトを使用する場合、底鋼板の塑性化によるすべり係数の低下を考慮して、110kN とするのがよい。
- 2) 押抜き試験により、底鋼板継手部のずれ挙動について検討した結果、頭付きスタッドを使用したケースの方がスタッドボルトのみと比較して初期剛性、終局耐力ともに高い。これより、せん断力が卓越する位置にある底鋼板継手部では、有効な構造となると言える。
- 3) 合成床版の一部をはり形状で模擬した試験体で 4 点曲げ載荷を行った。結果、スタッドボルトを底鋼板継手部に使用することで、ずれ剛性が高まり、すべりが生じるまでのボルト 1 本あたりの耐力が高力ボルトを用いた摩擦接合継手よりも大きくなった。一方、添接板に頭付きスタッドを設けると、頭付きスタッドが引っ張られることで、スタッドボルトのみの場合と比較して 10% 程度すべり荷重が低下した。したがって、曲げが卓越する位置にある底鋼板継手部では、頭付きスタッドを設ける必要はないと考えられる。

参考文献

- 1) 渡辺滄, 片岡章悟, 山岸武志, 内田修平, 街道浩, 石井等: SC デッキの開発横リブで補強されたロビンソン型合成床版, 川田技報 Vol.17, 1998.1
- 2) 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, 2006.12.
- 3) 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.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 丸善, 2017.11.
- 5) 山本佑大, 山口隆司, 田畑晶子, 原田潤, 奥村学, 彭雪: 片面施工ボルトを用いた摩擦接合継手の力学的挙動に関する研究, 土木学会関西支部平成 29 年度年次学術講演会概要集, 2017.5.
- 6) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案), JSSC

テクニカルレポート, 1996.8.

7) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 丸善, 2007.10

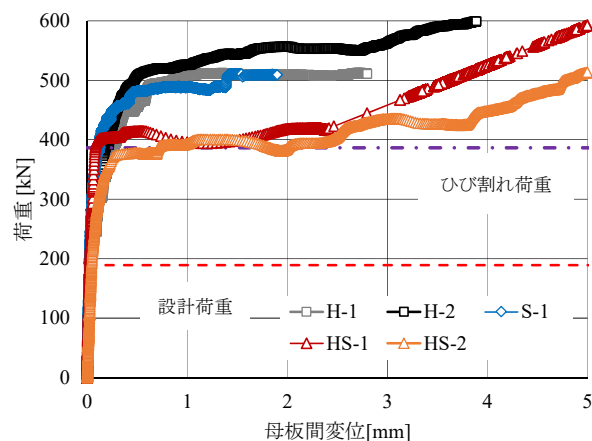


図-13 荷重-母板間変位関係

表-8 母板間変位ごとの荷重

母板間変位	H [kN]	S [kN]	HS [kN]
0.2mm	366.7	417.4	388.1
0.4mm	460.7	457.1	391.2

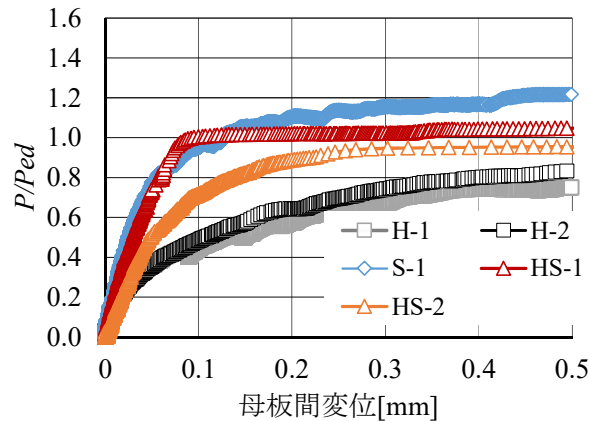


図-14 P/P_{ed} -母板間変位関係

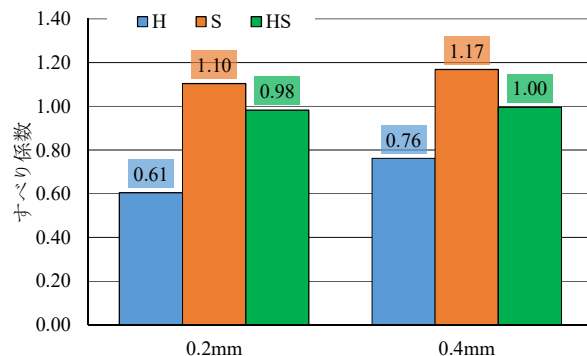


図-15 各母板間変位における P/P_{ed}

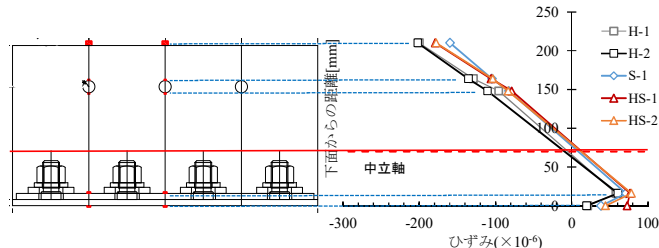


図-16 設計荷重時における継手断面のひずみ分布