

スタッド径と鋼板厚に関する一考察

A Consideration of Relationship between Stud Dia Meter and Steel Plate Thickness

梶田 智子
Tomoko MASUDA

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部

高田 嘉秀
Yoshihide TAKADA

川田工業(株)橋梁事業部EM室

宮地 真一
Shinichi MIYACHI

川田工業(株)橋梁事業部東京技術部

大石 隆宏
Takahiro OISHI

川田工業(株)橋梁事業部保全室

スタッドジベルは、全円周方向にずれ抵抗機能を有するという特徴があり、鋼・コンクリート合成構造のずれ止めとして使用されている。スタッドジベルの静的・疲労強度特性に関しては、これまでに多くの実験・解析が行われており、それらの結果が設計基準などに反映されている。しかし、スタッド径とスタッドを溶接する鋼板厚の関係に関しては、明確に示されていないのが現状である。そこで本報告では、スタッド径と鋼板厚の関係に着目し、既往の研究を整理し、スタッド径と鋼板厚をパラメータとしたスタッドの引張試験、鋼板引張疲労試験を実施し、スタッドを溶接する鋼板厚に関して考察するものである。

キーワード：スタッド付き鋼板、最小板厚、疲労強度

1. はじめに

スタッドジベル（以下、スタッドと記す）は全円周方向にずれ抵抗機能を有するという特徴があり、鋼・コンクリート合成構造のずれ止めとして使用されている。スタッドが溶接された鋼板（以下、スタッド付き鋼板と記す）の疲労特性については、これまで多くの実験が行われており、それらの結果が「鉄道構造物等設計標準・同解説、鋼・合成構造物」（運輸省監修、2000年7月）¹⁾、「鋼構造物疲労設計指針・同解説」（日本鋼構造協会、1993年）²⁾に反映されている。これらに示された、スタッド付き鋼板の疲労強度は図1に示すように、スタッド付き鋼板のみに引張力を与えた場合と、スタッドのみにせん断力を与えた場合について、各々スタッド付き鋼板の板厚、スタッド径に無関係に疲労強度、疲労設計曲線が示されており、スタッド径とスタッドを溶接する鋼板厚の関係については、明確に示されていないのが現状であ

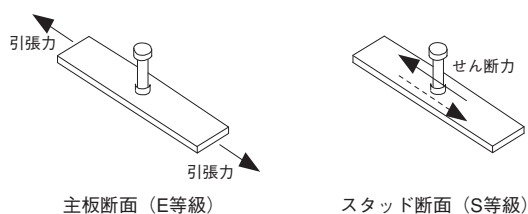


図1 スタッド付き鋼板の疲労強度等級

る。また、ずれ止めを溶接する鋼板の最小板厚については種々の規定^{1), 3), 4), 5), 6)}があるが、スタッドを溶接する鋼板の最小板厚を、それら各規定より小さくできる可能性について検討することで、スタッドの適用範囲の拡大やコスト縮減が期待できると考えられる。

そこで本研究では、これまでにスタッド径と鋼板厚の関係に関わる各基準や既往の文献を整理し⁷⁾、スタッド付き鋼板の板厚とスタッド径をパラメータとした鋼板引張疲労試験⁸⁾および、スタッドの静的引張試験を実施してきた。この研究成果としては、比較的施工が容易なスタッドについて疲労強度上の信頼性を高め、実施工への適用をさらに促進する上で、有用な技術資料が得られたことから、ここにその結果を報告する。

2. スタッド付き鋼板に関する基準

スタッド付き鋼板の最小板厚に関する基準を表1に示

表1 ずれ止めを溶接する鋼板の最小板厚に関する基準

文 献	基 準
鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物 ¹⁾	ずれ止めを溶接するフランジの板厚はI桁橋で15 mm以上、箱桁橋で13 mm以上
道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 ⁶⁾	スタッドを溶接するフランジの板厚は10 mm以上
スタッド溶接 (スタッド協会) ³⁾	溶落ちや極端なひずみを生じない板厚は、スタッド径の1/3 mm以上
BS5400 part5 ⁴⁾	スタッド軸径 $d \leq 2.0 \times$ (圧縮フランジ厚) スタッド軸径 $d \leq 1.5 \times$ (引張フランジ厚)
Eurocode 4 ⁵⁾	スタッド軸径 $d \leq 2.5 \times$ (圧縮フランジ厚) スタッド軸径 $d \leq 1.5 \times$ (引張・疲労フランジ厚)

す。文献1)では馬蹄形ジベルなどの剛なずれ止めに着目したものであり、スタッドに着目した基準ではない。いずれもスタッドの溶接性に着目した基準が多い³⁾が、BS5400⁴⁾、Eurocode4⁵⁾では、引張力を受ける鋼板と、圧縮力を受ける鋼板とでは最小板厚が異なる。引張力を受ける鋼板厚の方が圧縮力を受ける鋼板厚より大きくなっており、連続合成桁中間支点上の上フランジなどの引張力を受ける部材に配慮がなされている。しかしながら、いずれも最小板厚の明確な根拠は示されていない。

3. スタッド径と鋼板厚に着目した既往の研究

スタッド径と鋼板厚の関係に着目した既往の研究を以下に示す。板厚・スタッド径の影響に着目したこれらの試験は主に、スタッドにせん断力のみ作用させる押抜き試験タイプの試験方法で行われており、ここでは、押抜き試験でのスタッド径と鋼板厚の関係について考察する。

(1) 静的押抜き試験

G.G.GOBLE⁹⁾はスタッド径(d_s)と鋼板厚(t_f)の関係に着目した静的押抜き試験を行い、スタッド径と鋼板厚の比である d_s/t_f をパラメータとした押抜き試験体の破壊モードが $d_s/t_f=2.7$ を境に変化することを報告している。破壊モードは図2に示すように、 $d_s/t_f < 2.7$ の場合にはスタッドのせん断破壊、 $d_s/t_f > 2.7$ の場合には鋼板からの破壊であった。

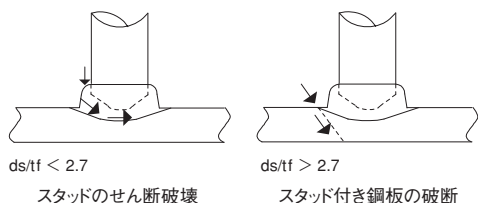


図2 静的押抜き試験による破壊形態 (G.G.GOBLE⁹⁾)

(2) 押抜き疲労試験

松井ら¹⁰⁾は、スタッド径と鋼板厚の関係に着目した押抜き疲労試験を行っている。この押抜き疲労試験は、ロビンソン型合成床版の下鋼板に溶接されるスタッドを想定しており、スタッドの根元部の回転拘束を合成床版に近似させるために、せん断力を載荷するH鋼とスタッドを溶接した鋼板との間に3 mm程度の隙間を設けた押抜き疲労試験である。試験体のスタッド径は13 mmに対し、鋼板厚を4.5, 6, 9 mmと変化させて疲労試験を行った結果、図3に示すような破壊形態が得られた。図3より板厚

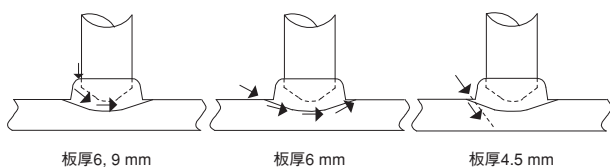


図3 押抜き疲労試験による破壊形態 (松井ら¹⁰⁾)

が小さい場合には、スタッド溶接側の鋼板に疲労亀裂が発生し、亀裂は鋼板下面まで斜めに進展し、鋼板が疲労破断する破壊形態であった。鋼板厚が大きくなると、疲労亀裂が溶接余盛下側から発生し、余盛ごとスタッドが疲労破断する破壊形態、あるいはスタッド軸部の溶接余盛部上側に疲労亀裂が発生し、スタッドが抜け出すような破壊形態であった。

この結果をG.G.GOBLEの静的押抜き試験で用いられたスタッド径と鋼板厚の関係である d_s/t_f で評価した結果を表2に示す。表2より、 $d_s/t_f=2.9$ では鋼板が疲労破断、 $d_s/t_f=2.2$ ではスタッドが疲労破断しており、 $d_s/t_f=2.7$ を境に破壊形態が変化した図2に示す結果との関連性が認められる。よって、スタッドがせん断力を受ける場合の鋼板の最小板厚は、 $d_s/t_f < 2.7$ の関係を満足する板厚(表3参照)とすればよいと考えられる。

表2 d_s/t_f で評価した疲労試験の結果

スタッド径 d_s (mm)	鋼板厚 t_f (mm)	d_s/t_f	破壊形態
13	4.5	2.9	鋼板が疲労破断
	6	2.2	余盛ごとスタッドが疲労破断
	9	1.4	余盛上側からスタッドが抜け出す

表3 スタッドを溶接する鋼板の最小板厚(せん断力が作用する場合)

スタッド径 d_s (mm)	最小板厚
13	5 mm以上
16	6 mm以上
19	8 mm以上
22	9 mm以上

4. 静的引張試験

スタッドの溶接性を確認するためにJIS B 1198⁹⁾にスタッド溶接部の引張試験が規定されている。これは、スタッドの軸方向に引張荷重を載荷したときに、溶接部で破断せず、スタッド軸部で破断することを確認する試験である。この試験方法に従い、引張力を受けるスタッドの鋼板厚とスタッド径の関係に着目し、スタッドの静的軸方向引張試験を行う。

(1) 試験体の形状と試験方法

引張試験の試験体の形状を図4に、試験体のスタッド径と板厚の組合せを表4に示す。スタッド径16 mmに対

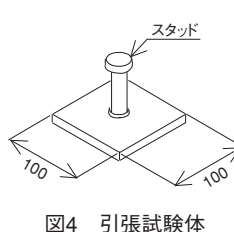


図4 引張試験体

表4 試験体の種類

試験体番号	板厚 (mm)	スタッド径 (mm)
T1	6	16
T2	9	
T3	10	
T4	11	
T5	10	19
T6	13	
T7	15	
T8	25	
T9	32	22
T10	13	
T11	15	
T12	25	
T13	32	

して鋼板厚は6, 9~11 mm, スタッド径19 mmに対しては, 鋼板厚は10, 13, 15, 25, 32 mm, スタッド径22 mmに対しては13, 15, 25, 32 mmの組合せの試験体を製作した。試験体の鋼板の材質はSS400, スタッドの材質はSS400相当である。試験体の大きさはJIS B 1198⁴⁾に従い決定し, 試験体の鋼板およびスタッド軸部にはひずみゲージを貼り, 荷重載荷時の鋼板およびスタッドのひずみを測定した。また試験治具には変位計を取り付け, 試験体の変位(伸び)を計測した。試験装置を写真1に示す。300 kNの油圧式万能試験機を使用し, 試験体に荷重載荷用の治具を取り付け, スタッド頭側から試験体に引張荷重を載荷した。

(2) 試験結果

図5に最大引張荷重と鋼板厚の関係を示す。スタッド径16 mmの試験体では, 板厚6 mmの試験体(No.T1)についてはスタッドが母材ごと栓抜けする破壊形態であった。鋼板厚9 mm以上の試験体は, すべてスタッド軸部で破壊する破壊形態であった。スタッド径19 mm, 22 mmの試験体もすべてスタッド軸部で破壊する破壊形態であった。最大引張荷重は, 板厚9 mm以上の試験体で, 板厚に関係なくスタッド径16 mmで約97.2 kN, スタッド径

19 mmで約126.4 kN, スタッド径22 mmで約171.4 kNであった。破壊形態が鋼板からの栓抜けであったスタッド径16 mm, 鋼板厚6 mmの試験体では, 最大引張荷重が約78.0 kNであった。この試験体No.T1のスタッド径(d_s)と鋼板厚(t_r)の関係は $d_s/t_r=2.7$ であり, 図2に示す破壊形態の境界であった。その他の試験体は $d_s/t_r < 2.7$ を満足する試験体であり, 破壊形態はスタッド軸部での破断であった。よってスタッドに軸引張力が作用する場合においても, スタッドを溶接する鋼板の最小板厚は, $d_s/t_r < 2.7$ を満足する方がよいと考えられる。

試験体No.T1の鋼板とスタッドの応力状態について, 図6に示す。図6より, スタッドを溶接した鋼板表面の応力分布から引張荷重が49.2 kNで鋼板が降伏していることがわかる。鋼板が降伏したときのスタッド軸部の応力状態からスタッドは弾性範囲内にあり, 鋼板が先行して降伏したことが確認できる。また試験体の鋼板上下面の応力状態から, 鋼板に板曲げが発生していることが確認できるが, 鋼板厚の大きな試験体ではこのような鋼板の板曲げは確認されなかった。

スタッド軸部から破壊した試験体では, スタッドに引張力を載荷することにより, 荷重の増加に伴い, スタッド軸部の中心付近でスタッドの伸びが大きくなり, 最大荷重に達した後, スタッド軸部がくびれて破断した。図7にスタッドの伸び率(試験終了後のスタッドの長さを試験開始前のスタッド長さで除した値)と鋼板厚の関係を示す。板厚に関係なくスタッドの伸び率は1.15~1.2倍であった。

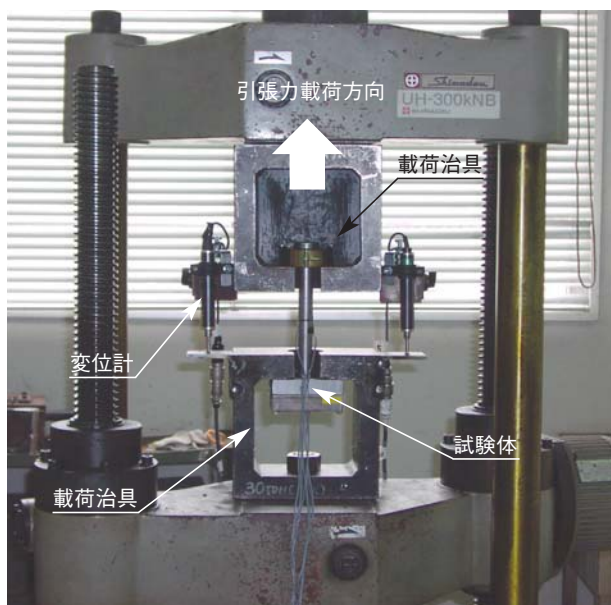


写真1 試験装置

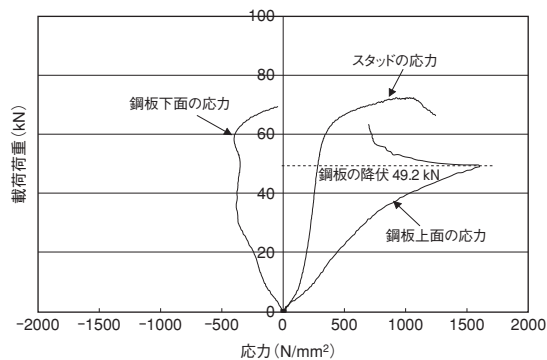


図6 鋼板とスタッドの応力状態 (試験体No.T1)

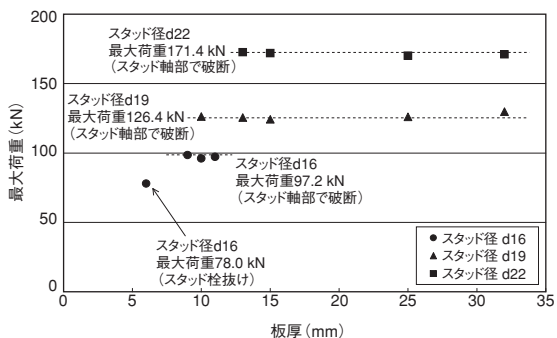


図5 鋼板厚と最大引張荷重の関係

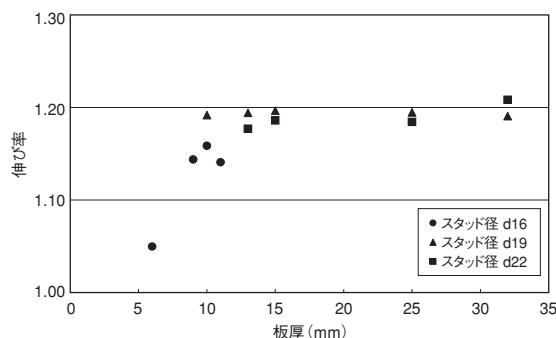


図7 スタッドの伸び率と鋼板の関係

5. 鋼板引張疲労試験

スタッド付き鋼板の板厚とスタッド径の関係を評価するために、鋼板が引張力を受ける場合のスタッド付き鋼板の疲労試験を実施する。

(1) 試験体の形状と試験方法

図8に示す形状・寸法の試験体を用いて、鋼板に引張力を載荷する疲労試験を行った。疲労試験体の鋼板厚とスタッド径の関係は引張試験と同様の組合せとする。また、試験体No.T3の試験体のスタッドをカットし、グラインダーで仕上げた試験体（No.T14）の疲労試験も行った。スタッドを溶接する鋼板の材質はSS400、スタッドの材質はSS400相当である。試験体の鋼板厚が15 mm以下の疲労試験は、100 kNの小型疲労試験機を使用し、鋼板厚25 mm、32 mmの試験体は、500 kNの油圧ジャッキを使用し疲労試験を行った。下限荷重10 kNの片振り引張とし、繰返し速度は10 Hzで鋼板の引張応力範囲を変化させて疲労試験を行った。

(2) 試験結果

疲労試験で得られたS-N線図を図9に示す。図の縦軸は鋼板の公称引張応力についての応力範囲、横軸は繰返し回数である。繰返し回数は試験機が停止した時点の回数とし、打ち切り限界は10 000 000回とした。図中には文献1)に示されている、スタッド付き鋼板に引張力を載荷した場合の疲労強度等級E等級を示している。

図9より、試験体No.T14をのぞき、すべての試験体の疲労強度等級はE等級と同程度であり、板厚、スタッド径の影響は見られなかった。写真2に試験体No.T3の破断面を示す。ピーチマークから疲労亀裂は、スタッド溶接止端部の鋼板側に発生し、板厚・板幅方向に亀裂が進展したことがわかる。この破壊形態は、すべての試験体で同じであった。スタッドをカットし、グラインダー仕上げた試験体（No.T14）とスタッドがある試験体を比較すると、スタッド溶接部の幾何学的形状の影響を取り除いた分、繰返し回数は長くなった。よってスタッド溶接部の疲労は、熱影響部よりも、スタッドを溶接したことによる幾何学的形状の変化の影響が大きいと考えられる。

6. スタッド溶接部近傍の応力状態

(1) 静的応力測定試験

疲労試験開始前に、各疲労試験体にひずみゲージを貼り付け、スタッド溶接部近傍の応力状態を確認した。スタッド溶接部近傍のひずみゲージは、図10に示す位置に貼り付けた。スタッド溶接止端部には、5連ゲージを貼り付け、溶接止端部の応力集中を確認した。5連ゲージは、ゲージの貼り付けが可能で溶接止端部に最も近い位置とし、各試験体の溶接余盛り部止端から3 mmの位置

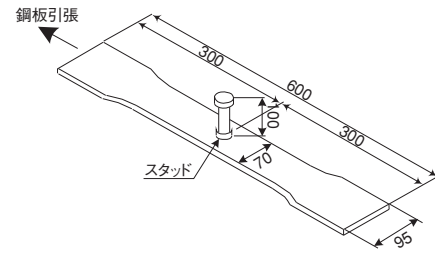


図8 疲労試験体

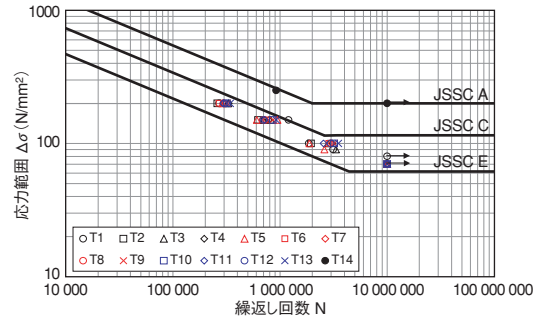


図9 S-N線図

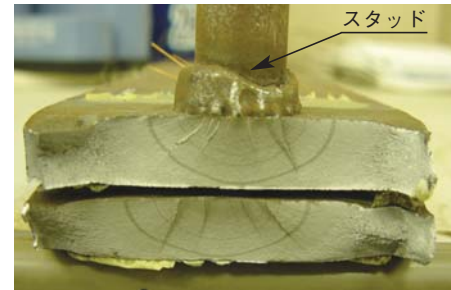


写真2 試験体No.T3の破断面

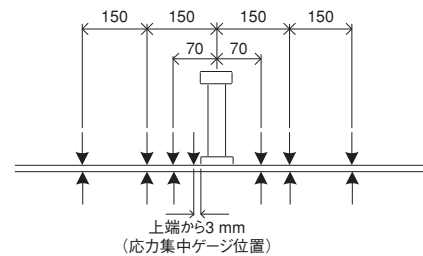


図10 試験体No.T3の破断面

に貼り付けた。測定したひずみは、スタッド付き鋼板の応力集中が最も卓越する応力成分である鋼板引張力荷重方向の σ_x のひずみを測定した。図11 (a), (b) に試験体No.T3, T14の荷重荷重方向のスタッド溶接側とスタッド非溶接側の鋼板表面応力分布の測定結果を示す。荷重荷重は、鋼板の公称引張応力が100 N/mm²の結果である。2つの試験体ともに疲労亀裂が発生したスタッド溶接止端部において左右対称に応力集中が生じている。スタッドをカットした試験体No.T3は、公称応力に対し1.07倍の応力集中が確認された。スタッドありの試験体No.T3では公称応力に対し1.22倍の応力集中が確認された。これより、スタッド溶接部の熱影響より、スタッドを溶接したことによる幾何学的形状の変化が応力集中に与える影響が大きいことがわかった。スタッドが溶接された

試験体すべてにおいて、スタッド溶接止端部の応力集中率は公称応力に対して約1.2~1.3倍であり、板厚・スタッド径に関係なくほぼ一定であった。

(2) 立体有限要素法解析

静的な応力測定結果から、スタッド溶接止端部において応力集中が確認された。そこで立体有限要素法解析によりスタッド溶接止端部の応力状態を明らかにする。解

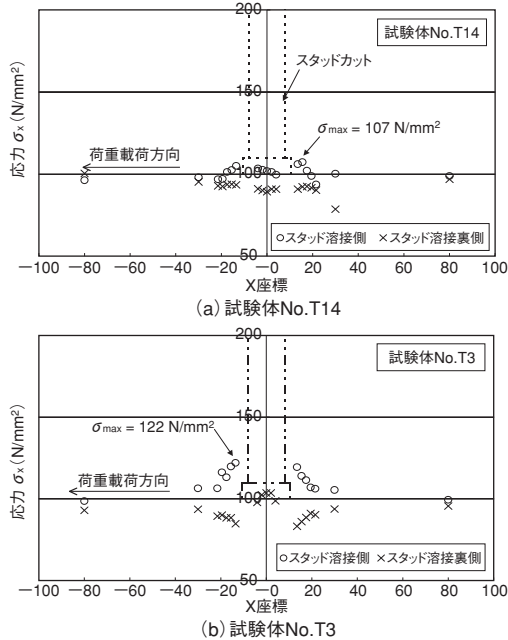


図11 スタッド溶接部近傍の応力分布 (σ_x)

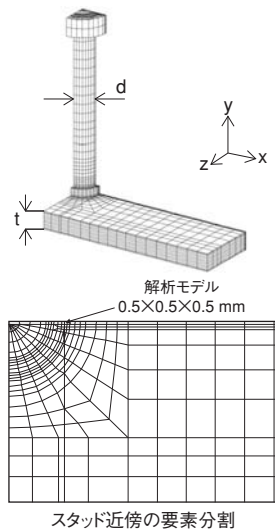


図12 解析モデルとスタッド近傍の要素分割

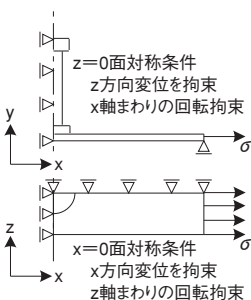


図13 境界条件

表5 スタッドと鋼板厚の組合せ

鋼板厚 (mm)	スタッド径 d (mm)	
6	16	19
9	16	19
10	16	19
11	16	19
20	—	19
25	—	19
30	—	19
50	16	19

析モデルを図12に示すように、試験体の対称性を利用して全体の1/4についてモデル化を行った。スタッド溶接部の余盛り形状は、平均的な余盛りの形状を参考として円筒形(余盛りと鋼板のなす角度は 90°)とし、図12に示すように、応力集中が予想される溶接止端部付近の鋼板表面の要素は、 $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ mmの立方体に分割した。なお、スタッド径と鋼板厚が変化しても溶接止端部付近の要素の大きさは等しいものを使用した。境界条件は図13に示すように、試験体の1/4をモデル化していることによる対称条件と、荷重を与えている面では、全節点がx方向に同一の挙動を示すようにし、y軸周りの回転が生じないようにした。解析に使用した鋼材のヤング係数は $E_s = 2.06 \times 10^5$ N/mm²、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ である。また、表5に解析に使用したスタッド径と鋼板厚の組合せを示す。載荷荷重は、板厚に関係なく鋼板の公称応力 $\sigma_0 = 100$ N/mm²となる荷重を載荷した。

鋼板厚10 mm, スタッド径16 mmの組合せについて、最も卓越する荷重載荷方向の応力成分 σ_x に着目した解析結果を図14に示す。図の横軸は荷重載荷方向のx軸、縦軸は鋼板応力 σ_x である。図中には、応力集中を測定した結果も示しており、解析結果と実験結果がほぼ一致し、解析モデルの境界条件や、要素分割は検討目的に対して妥当であったと考えられる。この図より、疲労亀裂が発生したスタッド溶接止端部分で応力集中が確認できる。スタッド溶接止端の応力集中と鋼板厚の関係について、図15に示す。図の縦軸は、スタッド溶接止端の最大応力(σ_x)と公称応力との比である応力集中率(σ_x/σ_0)、横軸は鋼板厚である。この図より、解析より得られた溶接止端の応力集中率は、板厚が大きくなるにつれて大きくなり、

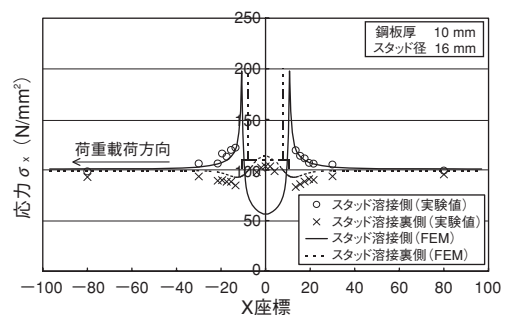


図14 解析結果

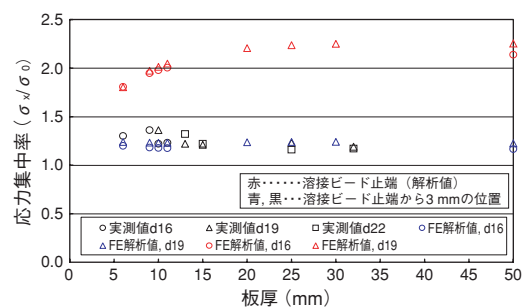


図15 スタッド溶接止端の応力集中

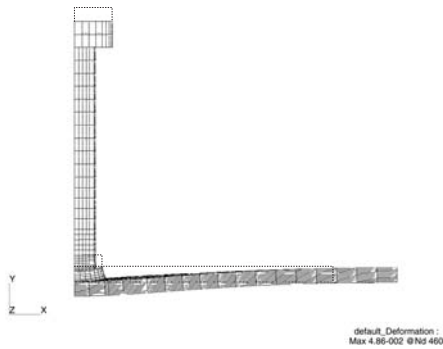


図16 変形図 (FE解析結果)

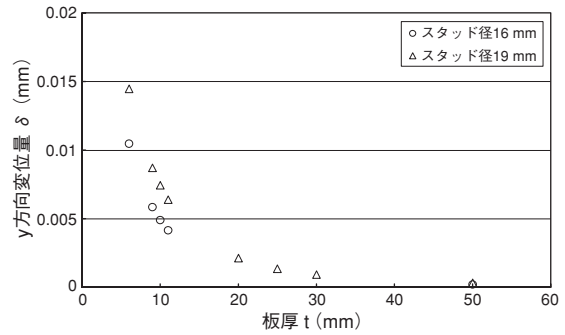


図17 板厚と変位量の関係

板厚25 mmを超えると応力集中率はほぼ一定になり、スタッド径の違いによる影響もほとんどなかった。またグラフ中には、静的応力測定試験で測定したスタッド溶接止端部の応力集中率も示している。このときのひずみゲージに貼り付け位置は、スタッド溶接止端部から約3 mmの位置であり、この位置の解析で得られた応力集中率も同時に示す。スタッド溶接止端部から3 mmの位置の応力集中率は、実測値、解析値ともに、板厚・スタッド径に関係なくほぼ一定であり、実測値と解析値はほぼ一致している。

図16に解析での鋼板厚6 mm、スタッド径16 mmの試験体の変形図を示す。この図より、スタッドが鋼板の片側のみに溶接されていることによる偏心（幾何学的非対称）の影響により、試験体がスタッドの高さ方向に変位していることがわかる。この変位は、スタッド溶接部で、スタッド溶接側の圧縮力、スタッド非溶接側で引張力が発生するような変位である。図17に偏心による変位と板厚の関係を示す。これより、板厚が小さい場合には変位量が大きくなるが、板厚が大きくなると変位量が小さくなっていることがわかる。よって、板厚が小さい場合には、変位が大きくなり、変位による圧縮力が大きくなる。そのため、鋼板に発生する引張応力が相殺されて溶接止端部の応力集中が緩和されたと考えられる。しかし、疲労試験の結果では板厚の影響が見られないことから、板厚による応力集中の違いは、疲労強度には影響を及ぼさないと考えられる。

7. まとめ

本研究では、スタッド径とスタッドを溶接する鋼板の板厚に着目し、既往の研究の整理、スタッドの引張試験、鋼板引張疲労試験を行った。鋼板引張疲労試験では、静的な応力集中測定試験と立体有限要素法解析を行い、応力性状を実験的・解析的に確認した。本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 既往の研究より、スタッドにせん断力が作用する場合のスタッド径 (d_s) と鋼板厚 (t_f) の関係は、 $d_s/t_f < 2.7$ を満足する鋼板の最小板厚とすれば、破壊形態は、静的・疲労ともにスタッドの破断となり、鋼板（母材）は

破断しない。

(2) スタッドの静的引抜試験の結果、スタッドを溶接する鋼板の板厚が小さいケース ($d_s/t_f \cong 2.7$) で、スタッドが鋼板から栓抜けした。鋼板（母材）からの栓抜けを避ける観点からも、 $d_s/t_f < 2.7$ を満足するのが良いと考えられる。

(3) 鋼板引張疲労試験の結果、鋼板が引張力を受ける場合は、鋼板厚とスタッド径に関わらず、疲労強度はほぼ一定であり、現行のE等級で評価できる。立体有限要素法解析の結果、疲労亀裂が発生したスタッド溶接止端部の鋼板側で応力集中が確認されたが、その分布は非常に局所的なものであった。

最後に、本研究は日本鉄道建設公団（現(株)鉄道建設・運輸施設整備支援機構）の委託業務研究であり、特に(株)レールウェイエンジニアリングの保坂鐵矢博士と摂南大学の平城弘一助教授には、多大なご指導をいただいた。紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 運輸省鉄道局：鉄道構造物等設計標準・同解説、鋼・合成構造物、丸善、2000。
- 2) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993。
- 3) スタッド協会：スタッド溶接、1998。
- 4) BSI：BS5400 Part10、1980。
- 5) CEN：Eurocode4 Part2、1999。
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、2002。
- 7) 保坂、平城、高田、宮地、梶田：合成構造に用いたスタッド付き鋼板の疲労特性に関する検討、土木学会年次学術講演会講演概要集、I-B283、2001。
- 8) 保坂、鈴木、平城、梶田、高田、宮地、大石：引張力を受けるスタッド付き鋼板の応力特性に関する検討、土木学会年次学術講演会講演概要集、I-352、2002。
- 9) G.G.GOBLE：Shear Strength of Thin Flange Composite Specimens, AISC ENGINEERING JOURNAL, pp.62-65、1968。
- 10) 松井、文、福本：合成床版の鋼板厚と疲労強度との関係について、土木学会関西支部年次学術講演会概要集、I-74、1992。
- 11) 日本規格協会：JISハンドブック4-2ねじII、2003。