

組合せ応力作用下におけるスタッド付き鋼板の疲労強度

Fatigue Strength of Steel Plate with Stud Shear Connector subjected to combined Tensile Stress and Shear Stress

鈴木喜弥*, 藤原良憲*, 平城弘一**, 榊田智子***, 高田嘉秀****, 宮地真一***

Yoshiya SUZUKI, Yoshinori FUJIWARA, Hirokazu HIRAGI, Tomoko MASUDA, Yoshihide TAKADA, Shinichi MIYACHI

*独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構設計技術室 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1)

** 工博 摂南大学助教授, 工学部都市環境システム工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

*** 川田工業株式会社橋梁事業部大阪技術部 (〒550-0014 大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)

**** 川田工業株式会社橋梁事業部 EM 室 (〒550-0014 大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)

In continuous composite bridge under repeated negative bending moment, the upper flange plate on which stud shear connectors were welded are subjected to combined fatigue stress of flexural tensile stress and bending stress by shear force acting on stud. In past research, evaluation for fatigue strength of upper flange plate subjected to combined tensile stress is not done. In addition, the fatigue strength is not considered to combination of diameter of stud and thickness of steel plate. This paper suggested equation of evaluating fatigue strength by using the result of the fatigue test and three-dimensional finite element method, which considered to combined tensile stress and bending stress, and combination of diameter of stud and thickness of steel plate.

Key Words: plate with stud, combined tensile and shear, minimum thickness, fatigue strength

キーワード: スタッド付き鋼板, 組合せ応力, 最小板厚, 疲労強度

1. まえがき

現在, 鋼鉄道橋においては騒音, 建設コストへの配慮から, 鋼桁とコンクリート床版を鋼桁上に溶接されたずれ止めで合成させた合成桁橋が主流となっている。この形式におけるずれ止め構造としては, 一般的に馬蹄形ジベルと頭付きスタッドジベル (以下, スタッドと略記) が使用されている。疲労限界状態の照査を不要としている馬蹄形ジベルは疲労強度に優れ, 使用実績は多い。一方, 全周方向にずれ抵抗機能を有するスタッドは施工能率がよく経済的ではあるが, 疲労強度に対する信頼性が馬蹄形ジベルに比べて劣り, 使用実績は多くはない。

スタッドが溶接された鋼板 (以下, スタッド付き鋼板と表記) 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いる。

一方, 連続合成桁の中間支点付近のように引張力を受ける鋼板にスタッドが溶接された場合, スタッド溶接部には鋼板に作用する引張力と, スタッド自身に作用するせん断力とそれに伴う曲げを同時に受けることになり, 文献 1), 2)のような, これまでの疲労強度の評価方法では合理的であるとはいえない。これに対して梶川・前田らは, 図-2に示すような, 鋼板に引張力とスタッドにせん断力を同時に与えた組合せ応力 (以下, 複合加力と表記) による疲労試験を実施し, これまでの個別の外力のみを作用させた場合に比べて大幅な疲労強度の低下を示すこと, 鋼板の疲労強度に対する評価応力としては, 疲労亀裂発生位置近傍

における相当応力で評価できること, スタッドを溶接する鋼板の材質の違いによる疲労強度には大差がないことなどを報告している³⁾。しかしながら, スタッド径と鋼板厚の組合せは, スタッド径 19mm, 鋼板厚 10mm の組合せに限定しており,

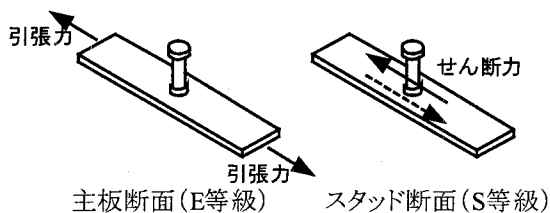


図-1 スタッド付き鋼板の疲労強度等級

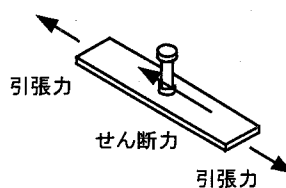


図-2 複合加力

スタッド径と鋼板厚の組合せのパラメータは考慮されていない。

そこで本研究では、複合加力による疲労強度の低下がせん断力に伴う曲げ応力とその応力集中に起因するものと判断し、応力集中を含んだ曲げ応力の影響を把握するために、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複合加力疲労試験（スタッドにせん断力、鋼板に引張力を同時に載荷）と立体有限要素法解析を実施し、スタッド付き鋼板に対する、疲労強度の評価法を提案するものである。この成果は、比較的施工が容易なスタッドの疲労強度の信頼性を高め、連続合成桁中間支点上、合成床版下鋼板等の実施工への適用がさらに促進できるものと期待される。

2. スタッド付き鋼板の基準と既往の研究

スタッド付き鋼板の最小板厚に関する基準を表-1に示すが、いずれもスタッドの溶接性に着目した規定が多いが、BS5400³⁾、Eurocode4⁶⁾では、引張力を受ける鋼板と、圧縮力を受ける鋼板とでは、最小板厚が異なり、応力の影響を考慮している。しかしながら、いずれも最小板厚の明確な根拠は記述されていない。

一方、スタッド径と鋼板厚の係数に着目した研究は、GGGOBLE⁷⁾が、スタッド径 (d_s) と鋼板厚 (t_f) の係数に着目した静的押抜き試験を行い、その結果、 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-3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、 $d_s/t_f>2.7$ の場合には鋼板の引抜き破壊であり、表-2に破壊モードに着目した、スタッド径に対する鋼板厚の組合せを示す。

松井ら⁸⁾は、スタッド径と鋼板厚の係数に着目した押抜き疲労試験を行っており、板厚の違いにより破壊形態が異なることを報告している。松井らの疲労試験では、スタッド径 13mm に対し、鋼板厚を 4.5、6、9mm と変化させ、図-4に示すように、板厚が小さい場合には、鋼板側に疲労亀裂が発生し、鋼板が疲労破壊する傾向にあり、板厚が大きくなるとスタッドが疲労破壊する傾向であった、と述べている。この実験結果は、GGGOBLE の静的押抜き試験の実験結果と同じ傾向であった。両者の研究では、せん断力に伴う曲げ応力の影響については言及していない。

3. 疲労試験

3.1 試験体の形状と試験方法

スタッド付き鋼板の板厚とスタッド径の関係、スタッド付き鋼板に作用する鋼板引張力と、スタッドに作用するせん断力の関係を評価するために、図-5に示す2種類の形状・寸法の試験体を用いて疲労試験を行った。図-5(a)に示す試験体は、鋼板に引張力のみを載荷する一方向疲労試験体である。一方向疲労試験は、100kNの小型疲労試験機を使用し、下限荷重 10kN の片振り引張（繰返し速度は 10Hz）で鋼板の引張応力範囲を変化させて一方向疲労試験

表-1 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	ずれ止めを溶接するフランジの板厚は、I桁橋で15mm以上、箱桁橋で13mm以上
道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 ⁴⁾	スタッドを溶接するフランジの板厚は10mm以上
BS5400 part5 ⁵⁾	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 ⁶⁾	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)

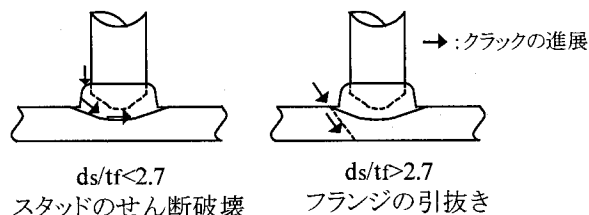


図-3 破壊モード (G.G.GOBLE⁷⁾)

表-2 スタッド径に対する破壊モード (G.G.GOBLE)

スタッド径 d (mm)	フランジ厚 (t_f (mm)) に対する破壊モード
13	$t_f \leq 4.3$ mm フランジの引抜き
	$t_f \geq 4.9$ mm スタッドのせん断破壊
16	$t_f \leq 6.6$ mm フランジの引抜き
	$t_f \geq 7.7$ mm スタッドのせん断破壊
19	$t_f \leq 6.6$ mm フランジの引抜き
	$t_f \geq 8.2$ mm スタッドのせん断破壊

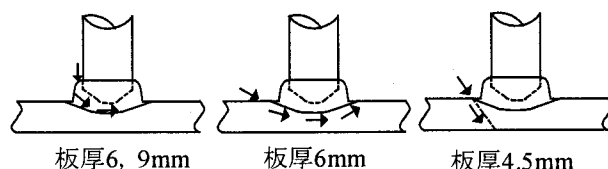
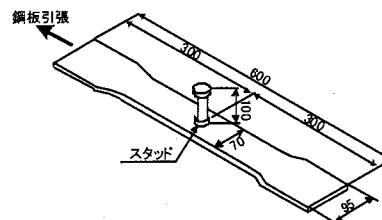
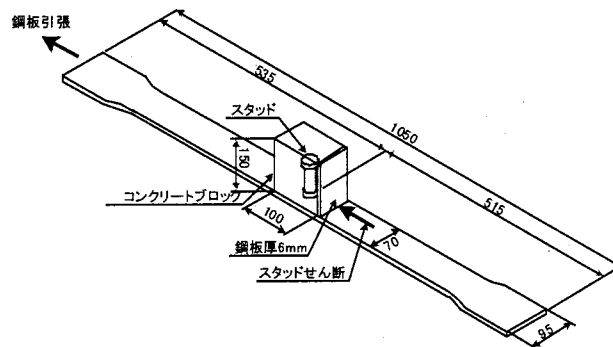


図-4 破壊モード (松井⁸⁾)



(a) 一方向疲労試験体



(b) 複合加力疲労試験体

図-5 試験体の形状

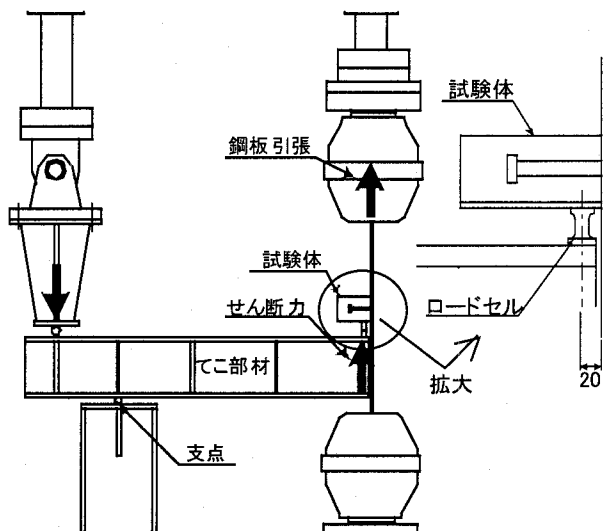


図-6 複合加力疲労試験装置

を行なった。図-5(b)に示す複合加力疲労試験体は、実際の桁における発生応力状態をできるだけ再現するために、スタッドの周囲にコンクリートブロックを取り付けた試験体で、スタッドにせん断力、鋼板に引張力を同時に載荷する複合加力疲労試験体である。実橋のコンクリート床版は連続体であり、複合加力試験体と比較すると回転変形を拘束しやすいことや、腹板直上に溶接されたスタッドやフランジ縁端に溶接されたスタッドなど、溶接位置によってフランジの変形が異なることや、連続合成桁の中間支点部付近での最大引張力と最大せん断力の同時載荷性が少ないことなど、本試験における試験方法、試験体の形状が実橋の挙動を適確に反映しているものではない。しかしながら、本試験の目的は、スタッド径と鋼板厚の関係が疲労強度に及ぼす影響を把握するための基礎的研究であり、データを得るために多くの組合せを必要とするため、クーパー試験体で疲労試験を行なっている。

コンクリートブロックは、せん断力作用時にコンクリートの先行破壊を避けるために、高強度のモルタル（14 日平均圧縮強度 49.2N/mm^2 ）を使用した。

図-6 に複合加力疲労試験の装置を示す。この装置は、油圧ジャッキを2基使用し、1基の油圧ジャッキで鋼板に引張力を載荷し、もう1基の油圧ジャッキで、てこ作用を利用して、スタッドにせん断力を載荷している。スタッドにせん断力を載荷する位置には、ロードセルを設置し、そのせん断力の大きさを測定した。スタッドに載荷するせん断力の位置は、スタッド径と鋼板厚に関係なく、スタッドを溶接する鋼板の表面から20mm一定とした。これは既往の研究⁹⁾から、せん断力の作用位置がスタッド軸径の1.5倍程度の高さまでであることを参考に決定した。

複合加力疲労試験では、鋼板に引張力、スタッドにせん断力が同時に作用するように、逆位相で油圧ジャッキを作動させた。逆位相でジャッキを作動させるために、荷重載荷位置でのてこ部材のたわみが1.0mm以下となるように、てこ部材の断面を決定した。試験体は、せん断力載荷方向に長い試験体であるため、せん断力を載荷すると、スタッドを溶接した鋼板は、実構造物に比べて曲げ変形しやすいものとなっている。また、スタッド付き鋼板とコンクリー

表-3 試験体の種類と載荷荷重の組合せ

試験体番号	鋼板厚 (mm)	スタッド径 (mm)	載荷荷重	
			鋼板引張	スタッドせん断
シリーズ No. 1~4	6	16	○	×
			○	○
			×	○
d16t6	6	16	○	×
			○	○
			×	○
d16t9	9	16	○	×
			○	○
			×	○
d16t10	10	16	○	×
			○	○
			×	○
d16t11	11	16	○	×
			○	○
			×	○
d19t10	10	19	○	×
			○	○
			×	○

トとの付着の影響を除去するために、鋼板の表面にはクラフトテープを貼り、その上からグリースを塗布した。鋼板引張力載荷側の下限荷重は10kN、スタッドせん断力載荷側の下限荷重は10kNとし、繰返し速度は、試験体が追従する範囲で1.5Hz~2.0Hzで載荷した。なお、複合加力疲労試験では、鋼板に下限荷重を載荷した状態で、スタッドにせん断力のみを載荷する疲労試験と、鋼板に引張力とスタッドにせん断力を同時に載荷する疲労試験を実施した。一方向疲労試験体、複合加力疲労試験体の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相当材を使用した。

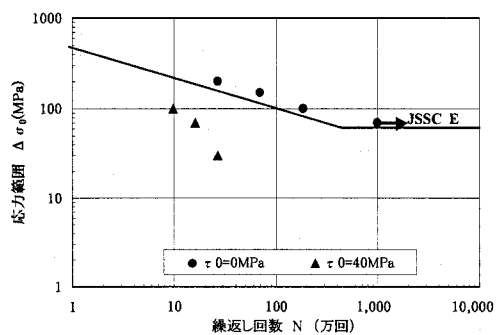
疲労試験体の鋼板厚とスタッド径の関係を表-3に示す。スタッド径16mmに対して鋼板厚を6, 9, 10, 11mmに変化させ、板厚の影響を確認する。スタッド径の影響は、板厚10mmの鋼板に溶接するスタッド径16mmと19mmの試験体で確認する。表の各シリーズのNo.1~4の試験体は、図-5(a)に示す一方向疲労試験体、残りのNo.は図-5(b)に示す複合加力疲労試験体であり、スタッドにせん断力のみを載荷する場合と、スタッドにせん断力、鋼板に引張力を同時に載荷する試験体である。

3.2 試験結果

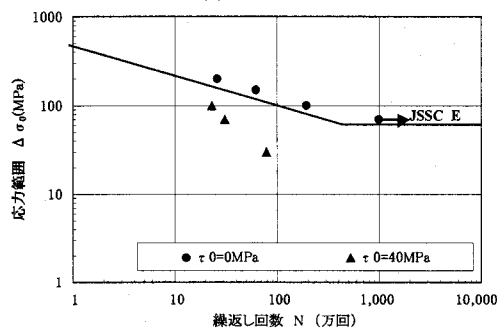
各シリーズの疲労試験で得られたS-N線図を図-7に示す。いずれも縦軸は鋼板の公称引張応力についての応力範囲、横軸は繰返し回数である。図中には、文献1)に示されている、スタッド付き鋼板に引張力のみを与えた場合の疲労強度等級E等級を示し、打ち切り限界は繰返し回数10,000,000回とし、疲労試験を行った。

各シリーズで、引張力のみを載荷した試験体 ($\tau_0=0$) は、疲労強度等級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。また、一方向疲労試験体の破壊形態を写真-1に示す。写真-1に示すのは、シリーズd16t10の破断面である。ビ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・板幅方向に亀裂は進展したことが分かる。

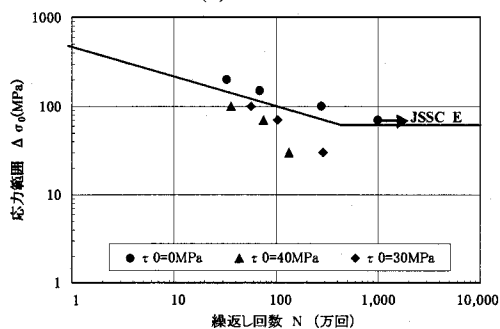
一方、複合加力疲労試験では、板厚が小さく、スタッド径が大きいくほど疲労強度は低下し、スタッドに作用するせん断力が大きくなると疲労強度は低下した。一方向疲労試験の試験結果と比較すると、疲労強度は大きく低下している。これは、スタッド溶接止端部の引張力のみによる応力集中だけでなく、せん断力に伴う鋼板の応力集中を含む曲



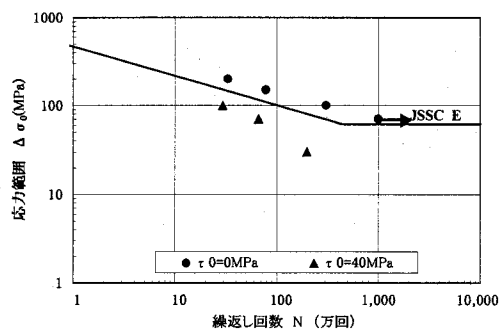
(a) シリーズd16t6



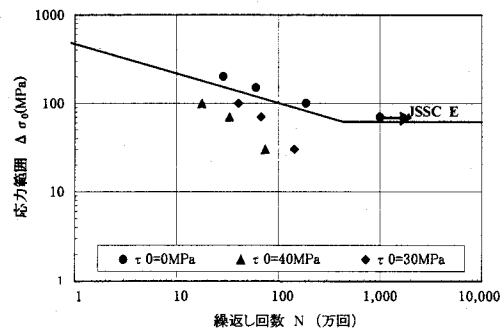
(b) シリーズd16t9



(c) シリーズd16t10



(d) シリーズd16t11



(e) シリーズd19t10

図-7 S-N線図

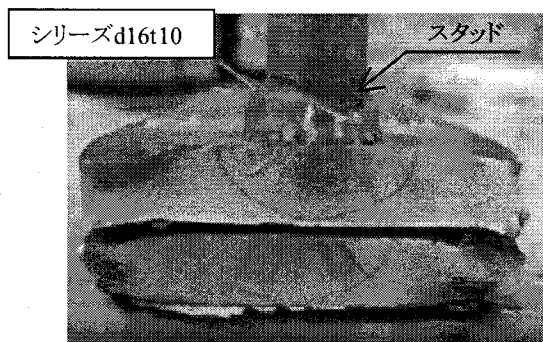


写真-1 一方向疲労試験破断面(ビーチマーク試験)

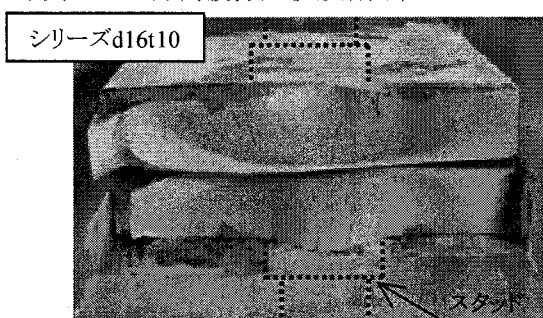


写真-2 複合加力疲労試験破断面

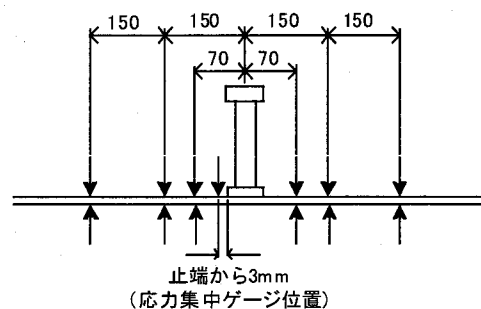


図-8 スタッド溶接部近傍のひずみ測定位置

げ応力に起因すると考えられる。複合加力疲労試験体の破壊形態を写真-2に示す。写真-2に示すのは、シリーズd16t10の破断面である。ほとんどの試験体において、疲労亀裂はせん断力作用側のスタッド溶接止端部から発生し、鋼板の板厚・板幅方向に亀裂は進展した。せん断力が作用したコンクリート部分には、コンクリートの支圧破壊はみられなかった。一方向疲労試験の破断面は、鋼板に直角で比較的平らな破面であったが、複合加力疲労試験体では、スタッドにせん断力が作用しているために、亀裂は溶接線に沿って熱影響部をえぐるような形跡が見られた。また、スタッドにせん断力のみを作用させた試験体においては、シリーズd16t10, d16t11の試験体で疲労亀裂がスタッド溶接余盛り部上側に発生し、スタッドの軸部の熱影響部をえぐるような形で疲労亀裂が進展した。これは板厚が大きくなると、板の剛性が大きくなるため、板曲げの影響が小さくなったことが要因ではないかと考えられる。

4. スタッド溶接部近傍の応力状態

4.1 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-8に示す位置に貼り付けた。スタッド溶接止端部には、応力集中ゲージを貼り付け、溶接止端部の応力集中を確認した。応力集中ゲージは、ゲージの貼り付けが可能で溶接止端に最も近い位置とし、各試験体の溶接余盛り部止端から3mmの位置に貼り付けた。これらの実験結果から、スタッド付き鋼板における応力集中が最も卓越する応力成分である鋼板引張力載荷方向の σ_x のひずみを測定した。図-9にシリーズd19t10の荷重載荷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。図-9(a)は鋼板に引張力のみを載荷した場合、図-9(b)はスタッドにせん断力のみを載荷した場合、図-9(c)は鋼板に引張力、スタッドにせん断力を同時に載荷した(複合加力)場合の結果である。載荷荷重は、鋼板の公称引張応力が100MPa、スタッドに作用する公称せん断応力が40MPaの場合の結果である。それぞれのケースにおいて、疲労亀裂が発生したスタッドの溶接止端部における応力集中が確認される。(a)鋼板

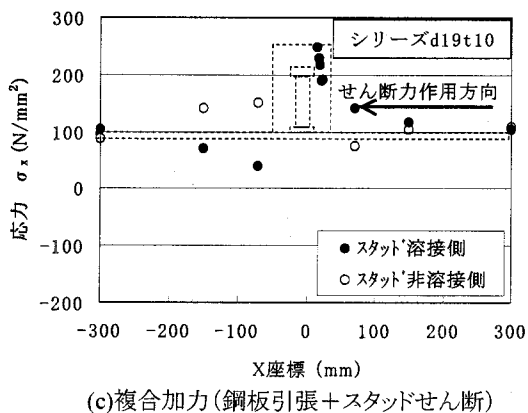
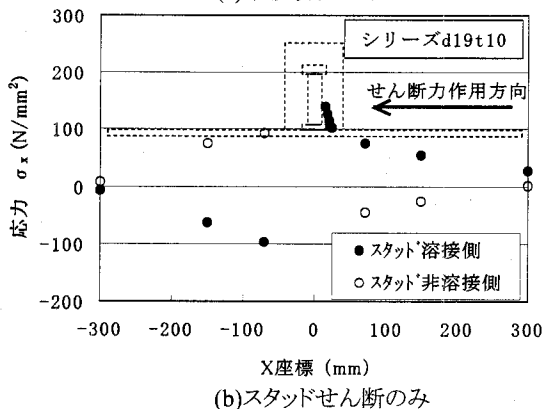
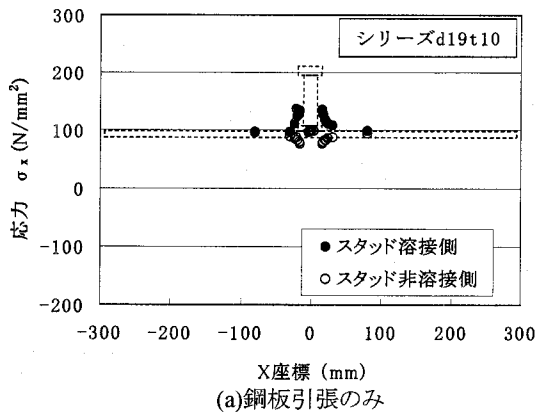


図-9 スタッド溶接部近傍の応力分布(σ_x)

に引張力のみを載荷した場合は、スタッド溶接止端部に左右対称に応力集中が生じている。(b)スタッドにせん断力のみを載荷した場合、せん断力載荷側のスタッド溶接止端部で応力集中が生じており、応力分布形状から、せん断力が作用することにより、鋼板に板曲げが発生していることが分かる。(c)複合加力を載荷した場合も、せん断力載荷側のスタッド溶接止端部で応力集中が生じている。応力分布は、鋼板に引張力を載荷した場合とスタッドにせん断力を載荷した場合を重ね合わせた形状をしている。

スタッド溶接止端部の応力集中と、スタッドに載荷する公称せん断応力の関係を図-10、図-11に示す。図-10は鋼板に載荷する公称引張応力 $\sigma_0=100\text{MPa}$ の場合、図-11は $\sigma_0=0\text{MPa}$ の場合の結果であり、図の横軸はスタッドに作用する公称せん断応力範囲、縦軸はスタッド溶接止端部の応力である。図より、板厚が小さく、スタッド径が大きくなると、スタッド溶接止端部の応力集中は大きくなり、鋼板引張応力とスタッドに載荷するせん断力が大きくなると、応力集中も大きくなっている。スタッド溶接止端部の応力集中に及ぼす、スタッド径、鋼板の板厚、鋼板引張応力範囲、スタッドせん断応力範囲の影響は、疲労試験の結果と一致している。

4.2 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部近傍の応力状態を明らかにする。解析は、一方向疲労試験と対応する、鋼板に引張力を載荷した場合と、複合加力疲労試験体と対応する、鋼板に引張力、スタッドにせん断力を同時に載荷した場合の解析を行った。

(1) 一方向疲労試験

一方向疲労試験で使用した解析モデルは図-12に示す

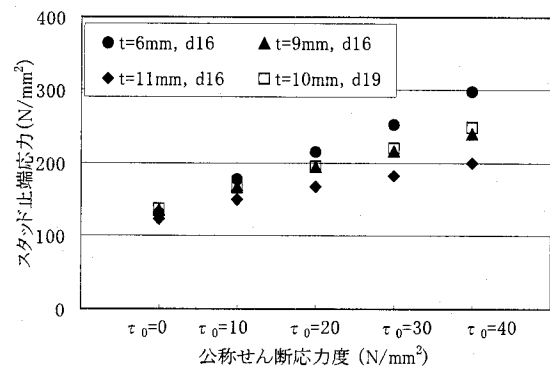


図-10 応力集中とせん断力の関係($\sigma_x=100\text{MPa}$)

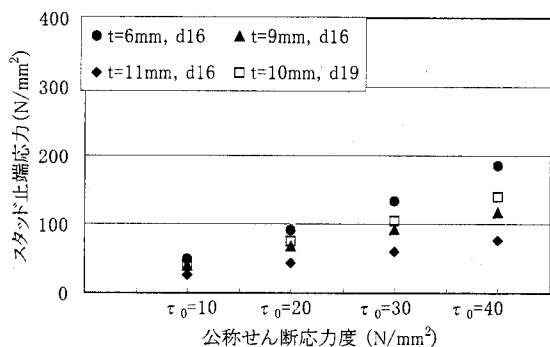
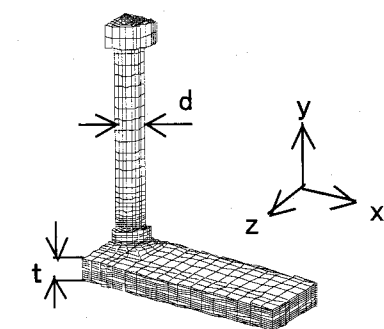
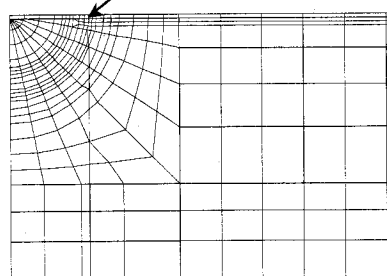


図-11 応力集中とせん断力の関係($\sigma_x=0\text{MPa}$)



一方向疲労試験の解析モデル
0.5×0.5×0.5mm



スタッド近傍の要素分割

図-12 解析モデルとスタッド近傍の要素分割

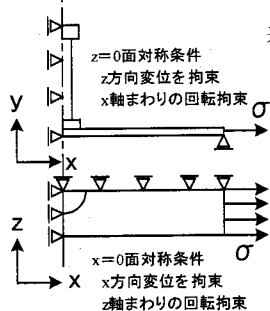


図-13 境界条件

表-4 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

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、 $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}$ 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、一方向疲労試験体と複合加力試験体のスタッドと、スタッド溶接止端部の要素分割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。解析に使用した材料定数は、鋼材のヤング係数 $E_s = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ である。また、表-4 に解析したスタッド径と鋼板厚の組合せを示す。疲労試験を行っていないが、板厚の影響を確認するために、厚板の組合せについても解析を行った。載荷荷重は、板厚に関係なく、鋼板の公称応力 $\sigma_0 = 100 \text{ MPa}$ となる荷重を載荷した。

鋼板厚 10mm、スタッド径 19mm 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

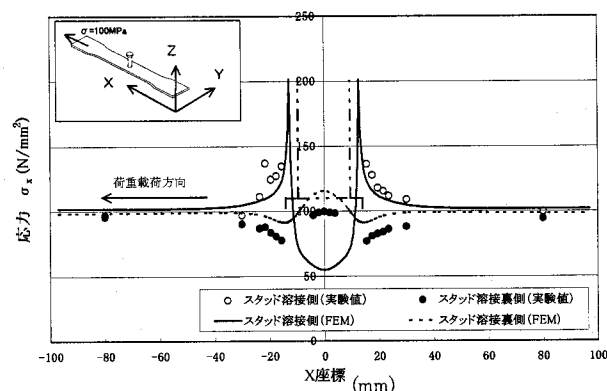


図-14 鋼板引張の解析結果 (σ_x)

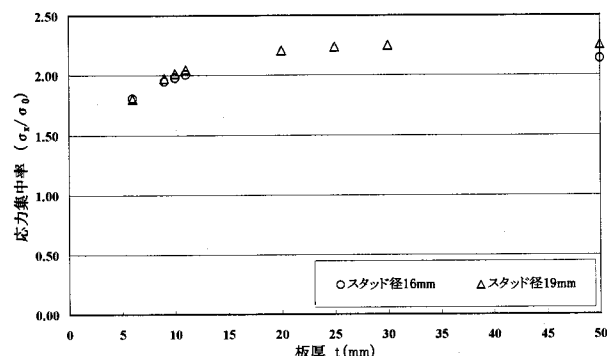


図-15 溶接止端の応力集中率

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 ($\sigma_{\max}/\sigma_0$)、横軸は鋼板厚である。この図より、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、板厚 25mm 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。これは、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たためである。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。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、疲労試験の結果から、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。

(2) 複合加力疲労試験

複合加力試験体の解析モデルも同様に図-16 に示すように、試験体全体の 1/2 をモデル化した。スタッドとスタッド溶接止端部のモデル化は、一方向疲労試験体と同じとしている。境界条件は、図-17 に示すように、試験体の 1/2 をモデル化していることによる対称条件と、鋼板載荷する引張力が、全節点が x 方向に同一の挙動を示すように

し、鋼板に引張力を载荷しない側の端部は、全方向拘束している。せん断力の载荷位置は、疲労試験の際にロードセルを設置した位置と同じ位置に载荷した。解析に使用した材料定数は、鋼材のヤング係数 $E_s=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s=0.3$ 、コンクリートのヤング係数 $E_c=2.34 \times 10^4 \text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu_c=0.167$ で、コンクリートのヤング係数は、実際に使用したモルタルのヤング係数を使用した。解析はスタッド径 16mm に対し、鋼板厚 6, 9, 10, 11mm の組合せについて行った。荷重の組合せは、鋼板に引張力のみ作用させた場合、スタッドにせん断力のみ作用させた場合、鋼板に引張力とスタッドにせん断力を同時に作用させた場合（複合加力）について解析を行った。鋼板に作用する引張力は、鋼板の公称応力 $\sigma_0=100 \text{MPa}$ 、スタッドに作用するせん断力は、スタッドの軸径に対し公称応力 $\tau_0=40 \text{MPa}$ を载荷した。

図-18～21 にスタッド径 16mm、鋼板厚 10mm の鋼板引張力载荷時、スタッドせん断力作用時、複合加力作用時の結果を併記している。図-18(a), (b)には、荷重载荷方向（x 軸方向）の最も卓越する応力である σ_x のスタッド溶接側、スタッド非溶接側の鋼板応力を示す。図-19(a), (b)は、疲労亀裂が発生したスタッド溶接止端部の板幅方向の応力分布である。図-18(a), (b)には、静的な応力測定試験で得られた、実測値を示しているが、実測値と解析値はほぼ一致しており、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。図-18, 19より疲労亀裂が発生した、せん断力载荷側のスタッド溶接止端部において応力集中が確認でき、複合加力を载荷した場合の応力集中部の応力度は、鋼板に引張力を载荷した場合と、スタッドにせん断力を载荷した場合の応力度の和とほぼ等しい結果となった。また、応力集中は、スタッド溶接止端部で、局所的な応力集中であることが分かる。スタッド溶接側とスタッド非溶接側の応力分布から、せん断力が作用することにより鋼板に板曲げが発生しており、この

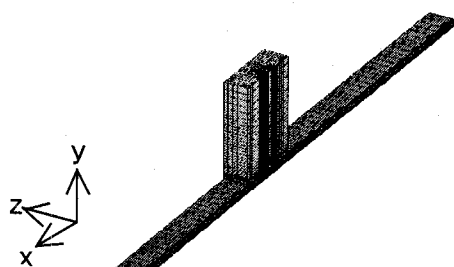


図-16 複合加力試験体の解析モデル

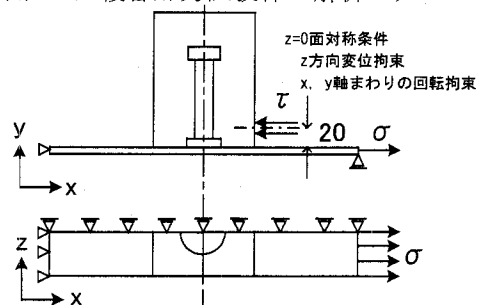
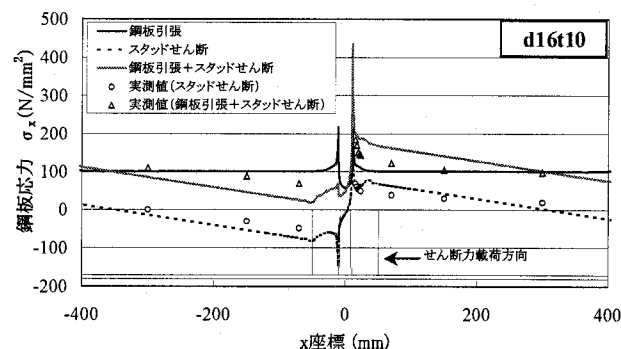
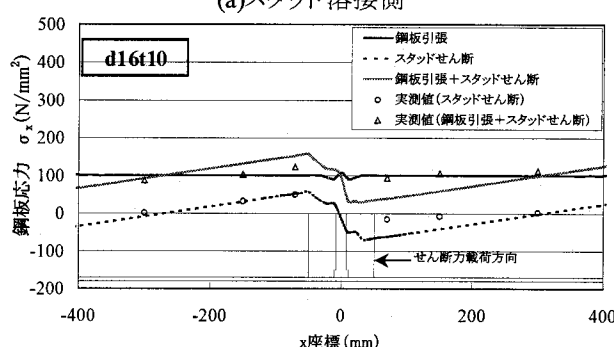


図-17 境界条件

板曲げは、スタッド周辺のコンクリートブロックを節としているため、コンクリートブロックの端部で応力の変化点が見られる。この板曲げの影響は、板厚が小さくなるとより顕著に見られ、鋼板厚 6mm の場合は、コンクリートブロック端部においても、応力集中が発生している。せん断力に伴う曲げ応力の影響は、図-20 に示す、スタッド溶

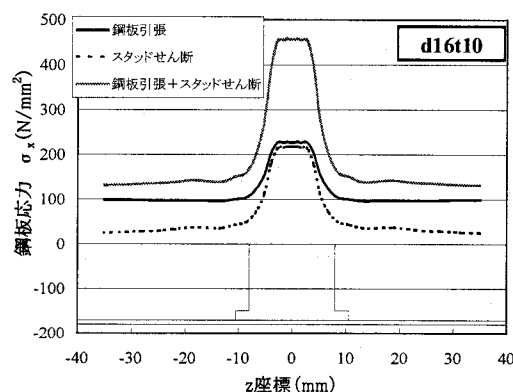


(a)スタッド溶接側

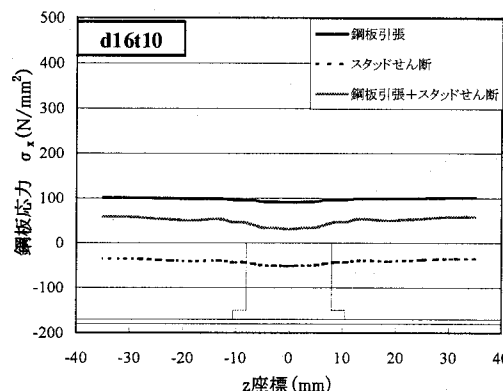


(b)スタッド非溶接側

図-18 荷重载荷方向の応力分布 (σ_x)



(a)せん断力载荷側溶接止端部(スタッド溶接側)



(b)せん断力载荷側溶接止端部(スタッド非溶接側)

図-19 板幅方向の応力分布 (σ_x)

接止端部の板厚方向の応力分布からも確認できる。図の縦軸はスタッド付き鋼板の鋼板厚、横軸は、スタッド溶接止端部の鋼板の応力である。鋼板に引張力のみ作用する場合は、スタッド溶接側の鋼板表面に非常に局部的な応力集中が発生している。複合加力が作用する場合の板厚方向の応力分布は、鋼板に引張力のみが作用する場合と、スタッドにせん断力のみが作用する場合を重ね合わせた応力分布を示している。スタッド高さ方向の応力分布を図-21(a), (b)に示す。せん断力作用方向のスタッド溶接止端部の鋼板側と、スタッド溶接ビード上側で応力集中が確認でき、せん断力作用位置で、スタッドの応力は最大値を示している。また、(a)せん断力載荷時、(b)複合加力載荷時を比較すると、鋼板の引張力の影響は、スタッド軸部には見られず、スタッド溶接止端付近に鋼板引張力の影響が現れている。

5. 疲労強度の評価

通常、疲労設計に用いる S-N 線図の応力範囲は、公称応力で示されたものであり、複合加力疲労試験の試験結果も図-7に示すように、縦軸を鋼板の公称引張応力の応力範囲として S-N 線図を作成した。その結果、一方向疲労試験では疲労強度等級が E 等級を満足する程度であったが、複合加力が作用した場合には、疲労強度が大きく低下することになった。この原因として考えられるのは、複合加力が作用する場合、スタッドにせん断力を載荷したことに伴い、鋼板に応力集中を含む曲げ応力が発生したためであり、応力測定試験の結果からも、せん断力を載荷した場合には、鋼板の板曲げが確認されている。図-9に示したスタッド溶接部近傍の応力分布を、疲労亀裂が発生したせん断力載荷側のスタッド溶接側の鋼板表面応力に着目した応力分布を図-22に示す。鋼板に引張力のみ載荷する場合のスタッド溶接部近傍の応力分布は、溶接止端部で局部的な応力集中で、スタッドの溶接止端から約 100mm 程度離れた位置の鋼板の応力は、公称応力程度であった。複合加力を載荷する場合のスタッド溶接部近傍の応力分布は、せん断力の載荷に伴う板曲げの影響により、スタッド溶接止端から離れた位置から応力が大きくなっており、スタッド溶接止端から約 300mm 離れた位置の鋼板の応力は、公称応力程度であった。つまり、一方向疲労試験の場合は、公称応力範囲が疲労亀裂発生位置に非常に近い位置であるのに対し、複合加力疲労試験の場合、鋼板の公称応力で評価することは、せん断力を載荷することによる曲げ応力の影響を評価しておらず、疲労強度の評価に使用する鋼板の公称応力範囲は、疲労亀裂発生位置と離れた位置の応力である。したがって、複合加力疲労試験の疲労強度は、実挙動を踏まえ、せん断力を載荷したことによる応力集中を含む曲げ応力の影響を加えて、疲労亀裂発生位置の応力で評価することが適当と判断される。本試験においては、疲労亀裂発生位置の応力をひずみゲージにて測定しているが、疲労設計を行う場合に、実応力を測定し、設計に反映することは困難であるため、疲労亀裂発生位置の応力(σ_x)は、鋼板の公称応力(σ_0)とスタッドに載荷したせん断力のスタッド

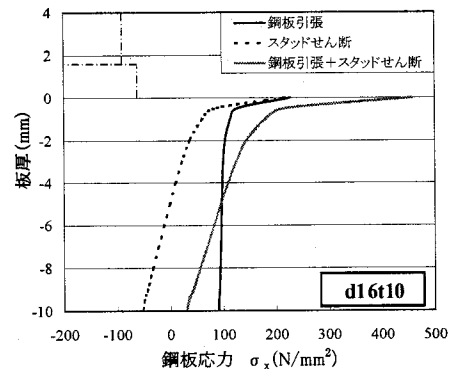
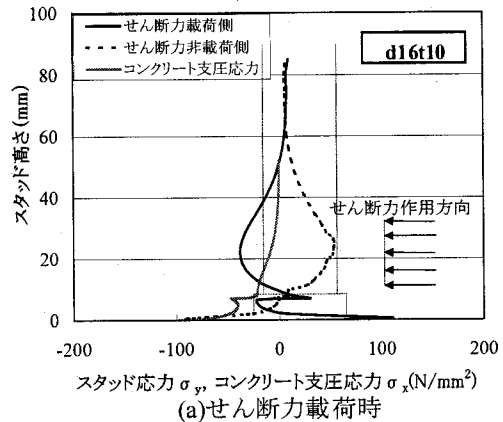
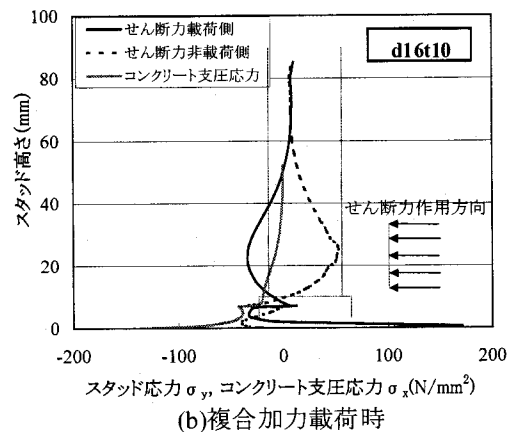


図-20 板厚方向の応力分布



(a)せん断力載荷時



(b)複合加力載荷時

図-21 スタッド高さ方向の応力分布

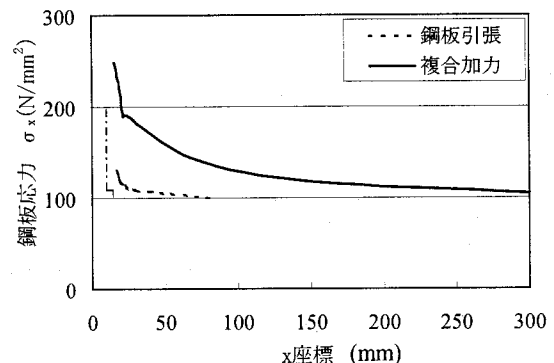


図-22 スタッド溶接止端の応力分布

軸径に対する公称応力(τ_0)の関数として評価する。

応力集中測定試験の結果より、鋼板に引張力のみ載荷する場合($\tau_0=0\text{MPa}$)の板厚と、最大応力と公称応力の比である応力集中度(σ_x/σ_0)の関係を図-23に示す。図-23と立体有限要素法解析の結果より、鋼板に引張力のみ載荷する

場合の応力集中率は、板厚、スタッド径に関係なくほぼ一定であり、式(1)となる。

$$\sigma_x / \sigma_0 = 1.295 \quad (1)$$

スタッドにせん断力のみを載荷する場合($\sigma_0=0\text{MPa}$)の板厚と鋼板の最大応力とスタッドの公称応力の比である応力集中率(σ_x/τ_0)の関係を図-24に示す。図-24は、スタッド径が16mmの場合の結果である。これより、 σ_x/τ_0 は、板厚が大きくなるにつれて小さくなる傾向であった。この関係を板厚 $t(\text{mm})$ の関数として算出すると式(2)となる。

$$\sigma_x / \tau_0 = -0.485 \cdot t + 7.565 \quad (2)$$

式(2)は、試験を実施したスタッド付き鋼板の板厚が6～11mm、スタッド径16mmの場合の式である。スタッド径の影響は、スタッドのせん断応力(τ_0)はスタッド軸径の断面積比で評価する。疲労亀裂発生位置の鋼板応力(σ_x)は、式(1)、(2)の重ね合わせであるため、スタッド径16mmの場合の σ_x を式(3)に、スタッド径19mmの場合の σ_x を式(4)に示す。なお、式(4)の右辺の2項目の係数は、スタッド径16mmと19mmの面積比 $A_{19}/A_{16}=1.41$ である。

$$\sigma_x = 1.295\sigma_0 + (-0.485 \cdot t + 7.565)\tau_0 \quad (3)$$

$$\sigma_x = 1.295\sigma_0 + 1.41(-0.485 \cdot t + 7.565)\tau_0 \quad (4)$$

式(3)、(4)で得られた疲労亀裂発生位置の鋼板応力(σ_x)とスタッドに作用するせん断応力(τ_0)の関係を図-25に示す。これらの図はスタッド径16mm、鋼板の引張応力範囲が $\sigma_0=100, 70, 30\text{MPa}$ の場合と、スタッド径19mmの場合の結果である。また、これらの図には応力集中測定試験より測定された実測値の結果も示している。図-25より明

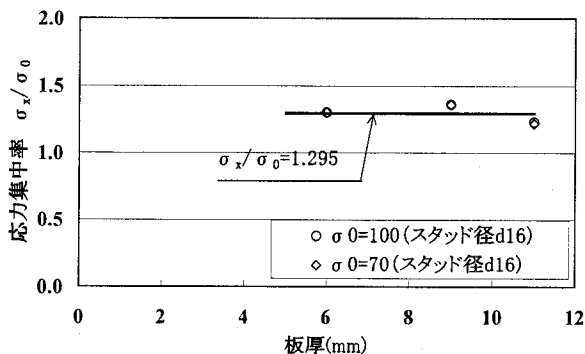


図-23 σ_x/σ_0 と板厚の関係

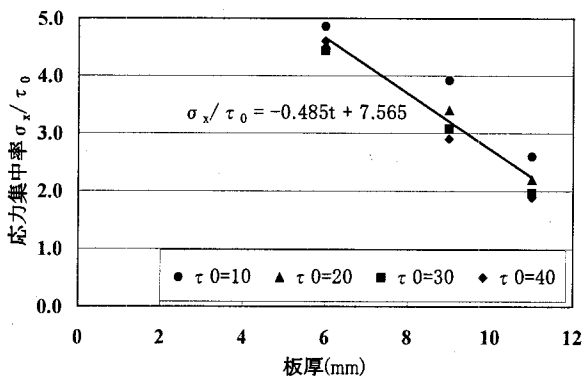


図-24 σ_x/τ_0 と板厚の関係

らかなように、式(3)、(4)で算出した疲労亀裂発生位置の鋼板応力と実測値とがほぼ一致したことを確認できた。このことから、式(3)、(4)を用いて、せん断力に伴う曲げ応力が発生する場合のスタッド付き鋼板の疲労強度を評価することが可能であると考えられる。

複合加力疲労試験の結果を評価する式(3)、(4)を用いて、疲労亀裂発生位置の応力を算出し、疲労亀裂発生位置の実応力で評価したS-N線図を図-26に示す。図中には、複合加力疲労試験の結果だけでなく、一方向疲労試験の結果も式(3)、(4)を用いて応力を算出してS-N線図上に併記している。図-26に示すように、板厚、スタッド径、せん断応力範囲の違いにより、それぞれのS-N線が存在していたが、1本のS-N線として評価ができる。このS-N線図はJSSCのE等級と同程度であった。

最終的に、設計から算出される公称応力{鋼板の引張力(σ_0)とスタッドに作用するせん断力(τ_0)}と疲労亀裂発生位置における鋼板の引張応力(σ_x)とを関係づける式として、次式を提案したい。

$$\sigma_x = 1.295\sigma_0 + \frac{A_{ss}}{201}(-0.485 \cdot t + 7.565)\tau_0 \quad (5)$$

ここで、

σ_x : 疲労亀裂発生位置における鋼板の引張応力(N/mm²)

σ_0 : 鋼板の公称引張応力(N/mm²)

τ_0 : スタッドに作用する公称せん断応力(N/mm²)

t : スタッドを溶接する鋼板の板厚(mm)

A_{ss} : スタッドの軸径の横断面積(mm²)

なお、式(5)は現時点において、本研究で使用したスタッド付き鋼板の、スタッド径16mm、19mm、鋼板厚6、9、10、11mmの組合せについて、試験結果との適合性が検証されたものである。今後は、他の組合せについても、実験的および解析的研究を進め、適用の妥当性があるか否かを検討していきたい。

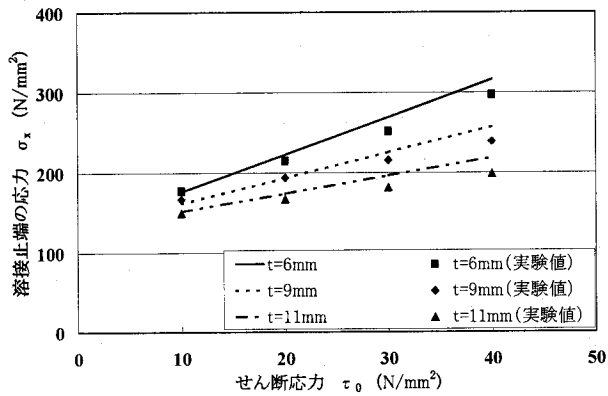
6. まとめ

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を種々変化した場合の、スタッド付き鋼板の一方向疲労試験、複合加力疲労試験を実施した。その応力性状は、静的な応力集中測定試験と立体有限要素法とにより実験的・解析的に確認した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

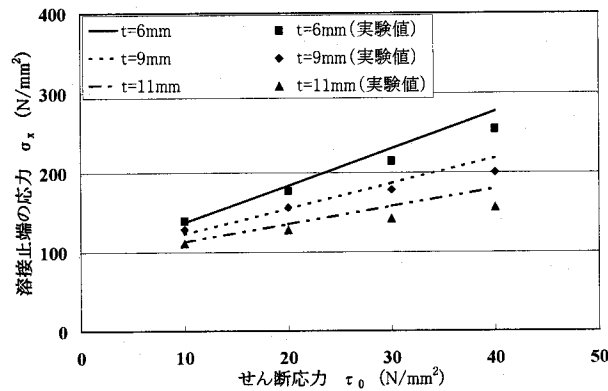
(1) 鋼板に引張力のみを載荷する場合のスタッド付き鋼板の疲労強度は、スタッド径、鋼板厚に関係なく一定であった。立体有限要素法解析の結果、疲労亀裂が発生したスタッド溶接止端部の鋼板側で応力集中が確認され、その分布は非常に局所的で、現行のE等級で評価できる。

(2) スタッドにせん断力、鋼板に引張力を載荷した複合加力状態の疲労強度は、鋼板の公称応力で評価した場合には、せん断力を載荷することに伴い、鋼板に曲げ応力が作用することにより大きく低下した。

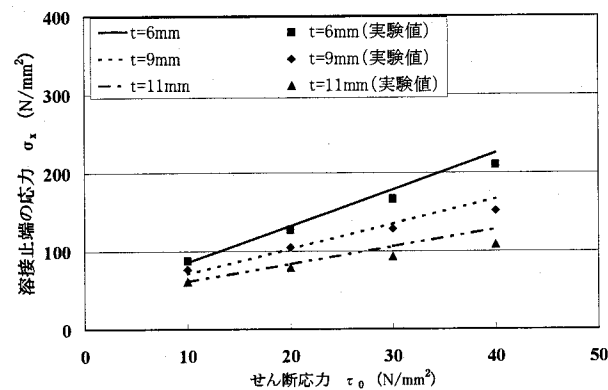
(3) 応力集中測定試験の結果から、せん断力に伴う板曲



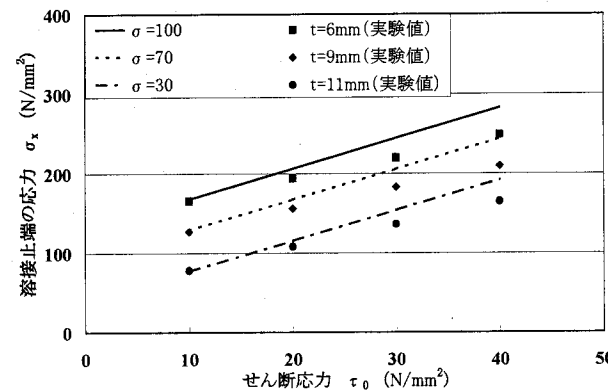
(a) 鋼板の引張応力範囲 $\sigma_0=100\text{MPa}$ (スタッド径 16mm)



(b) 鋼板の引張応力範囲 $\sigma_0=70\text{MPa}$ (スタッド径 16mm)



(c) 鋼板の引張応力範囲 $\sigma_0=30\text{MPa}$ (スタッド径 16mm)



(d) スタッド径 19mm, 鋼板厚 10mm

図-25 実応力算出式と実測値の比較

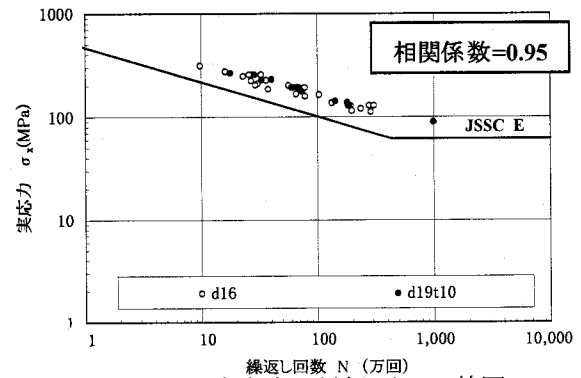


図-26 実応力で評価したS-N線図

げ応力の影響を受ける場合の疲労強度の評価は、疲労亀裂が発生する鋼板のスタッド溶接止端部の実応力を用いて評価することを提案し、鋼板の公称引張応力とスタッドの軸径に対する公称せん断応力を用いて、鋼板の実応力を算出する式を提案した。この式を用いて複合加力疲労試験の結果を評価すると、板厚、スタッド径、せん断応力範囲の違いによりそれぞれの S-N 線が存在していたが、1 本の S-N 線として評価ができる。この S-N 線図は JSSC の E 等級と同程度であった。

今後の課題として、立体有限要素法解析によりスタッド径と鋼板厚の組合せのパラメータ、せん断力と引張力の組合せのパラメータを種々変化させた、疲労強度に対する評価を行う予定である。また、本試験の結果は、クーボン試験体を用いたものであり、実橋の挙動を適確に反映した結果ではない。今後、広く実橋に供することを考え、クーボン試験体の試験結果と実橋の挙動との整合性が図られるよう検討する予定である。

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) 日本鋼構造協会：鋼構造物疲労設計指針・同解説：技報堂出版，1993。
- 3) 梶川靖治，前田幸雄：組合せ荷重下におけるスタッド溶接フランジの疲労強度の評価，土木学会論文集第362号/I-4，pp.285-292，1985。
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，2002。
- 5) BSI, BS5400, Part10, 1980。
- 6) CEN, Eurocode 4, Part2, 1999。
- 7) GGGOBLE : Shear Strength of Thin Flange Composite Specimens, AISC ENGINEERING JOURNAL, pp.62-65, 1968。
- 8) 松井繁之，文兌景，福本秀士：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。
- 9) 保坂鐵矢，平城弘一，小枝芳樹，橘吉宏，渡辺滉：鉄道用連続合成桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集 vol.44A，pp.1497-1504，1998。

(2003年9月12日受付)