

# アップリフト作用を受ける頭付きスタッドの疲労強度に関する実験的研究

Experimental Study for Fatigue Strength on Stud Dowels to Uplift from a Floor Slab

橋 吉宏  
Yoshihiro TACHIBANA

川田工業(株)橋梁事業部技術部  
技術開発部開発課課長

牛島 祥貴  
Yoshitaka USHIJIMA

川田工業(株)橋梁事業部技術部  
大阪技術部設計一課

山本 成昭  
Shigeaki YAMAMOTO

川田工業(株)橋梁事業部技術部  
大阪技術部設計一課

早川 清  
Kiyoshi HAYAKAWA

川田工業(株)橋梁事業部生産企画部  
富山工場生産技術一課係長

鉄道橋における2主桁合成桁のずれ止めには、一般的には馬蹄形ジベルが使用されるものの、ジベル耐力の関係から頭付きスタッドが使用される。また、道路橋においても頭付きスタッドが多く用いられている。頭付きスタッドを適用した場合、活荷重による床版の曲げ変形が横桁取付け部で拘束され、スタッドには引抜き力が生じる。スタッドに働くこの引抜き力は合成桁としてスタッドに橋軸方向のせん断力が加わった組み合わせ応力条件下で発生する。そこで著者らは、アップリフト作用を受けるスタッドの継手強度等級を求めるため、複合加力による疲労試験を実施した。その結果、設計上有用な試験データが得られたので報告する。

キーワード：アップリフト，スタッド，疲労，S-N線

## 1. はじめに

2主1桁橋は主桁の数が少ないため、溶接延長や材片数の低減による製作の省力化、部材数が少ないことによる現場施工の工期短縮、塗装面積の減少によるメンテナンス費の低減などを図ることが可能であり、経済的な構造である。さらに、2主合成1桁橋は、多主桁橋よりも桁から床版に伝達される1主桁あたりの水平せん断力が増加する。このため、ずれ止め部は橋軸直角方向の配置本数が多くなり腹板中心部からの離れが大きくなるため、後述する引抜き力の影響を考慮したずれ止め部の疲労特性を把握することが重要となってくる。

鉄道橋におけるずれ止めは、一般に腹板直上のフランジに配置した馬蹄形ジベルであるが、複線2主1桁形式の合成桁のずれ止めには、ジベル耐力の関係から頭付きスタッド（以下、スタッドと記す）が使用される。また、道路橋における合成桁に用いるずれ止めは、道路橋示方書<sup>1)</sup>（以下、道示と記す）に記されているとおりスタッドが一般的とされている。一方、非合成桁においてもスラブアンカーに代わって頭付きスタッドを用いる場合がある。

このスタッドを適用した場合、活荷重が作用されると、荷重作用位置とスタッド位置が異なるため、横桁取付け部において偶力によるモーメントが発生し、結果的にス

タッドには引抜き力が作用する<sup>2), 3)</sup>。さらに、引抜き力は合成作用によってスタッドに橋軸方向のせん断力が加わった組み合わせ応力条件下で発生する。このスタッドが軸引張力あるいは軸引張力とせん断力を同時に受ける場合について、西ドイツ（現在はドイツ）においては、一般構造物のアンカー材としての設計規準が整備されている<sup>4)</sup>。我が国においても、スタッドの軸引張力についての設計法が提案されているものの、スタッドが繰返し軸引張力と曲げ、および静的なせん断力を同時に受けた場合の疲労強度についての研究は少なく、設計法が規定されていないのが現状である<sup>5), 6)</sup>。

そこで著者らは、アップリフト作用を受けるスタッドの継手強度等級を求めるため、複合加力による疲労試験を実施した。その結果、設計上有用な試験データが得られたので、ここで報告する。

## 2. 複合加力疲労試験の概要

スタッドを用いた供試体の概念図を図1に示す。図1の破線で示す部分がコンクリート床版に相当する。スタッドのひずみを直接計測するため、後述する埋込み型のひずみゲージをまずスタッドに挿入し、その後スタッドを溶接した。また、床版をモデル化したコンクリート下面と鋼桁上フランジ上面との付着を除去するため、写真1に示すように鋼桁上フランジ上面に鉛系塗装+パラフィ



表1 コンクリートの材料特性

圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
37.7	$2.92 \times 10^4$	3.01

る橋軸方向の桁の曲げ作用を再現するため、道示 9.5.6 によればスタッドを橋軸直角方向に3本配置した場合の許容せん断力は56 kNであるが、試験機の都合上50 kNの静的ジャッキを用いて一定の水平荷重（50 kN）を作用させた。使用コンクリートの材料特性を表1に示す。鋼部材と鉄筋はそれぞれSS400・SD295Aを使用した。

表2 試験条件および疲労試験結果

荷重条件	供試体タイプ	載荷荷重 範囲 $p$ (kN)	破壊回数 ( $\times 10^4$ 回)	破壊様式	S-N線図傾き	スタッドの換算 応力範囲 (MPa)
水平荷重 なし (H=0 kN)	S-0-1	150	2	コンクリート	1/9.21	
	S-0-2	120	9	スタッド		
	S-0-3	90	40	スタッド		
	S-0-4	90	90	スタッド		
	S-0-5	70	1 000			
水平荷重 あり (H=50 kN)	S-5-1	150	1.2	コンクリート	1/3.10	
	S-5-2	110	17	スタッド		
	S-5-3	90	70	スタッド		
	S-5-4	70	170	スタッド		
	S-5-5	50	800	スタッド		
	S-5-6	50	1 000			

供試体タイプのSはスタッド、0はH=0 kN、5はH=50 kNを示す。

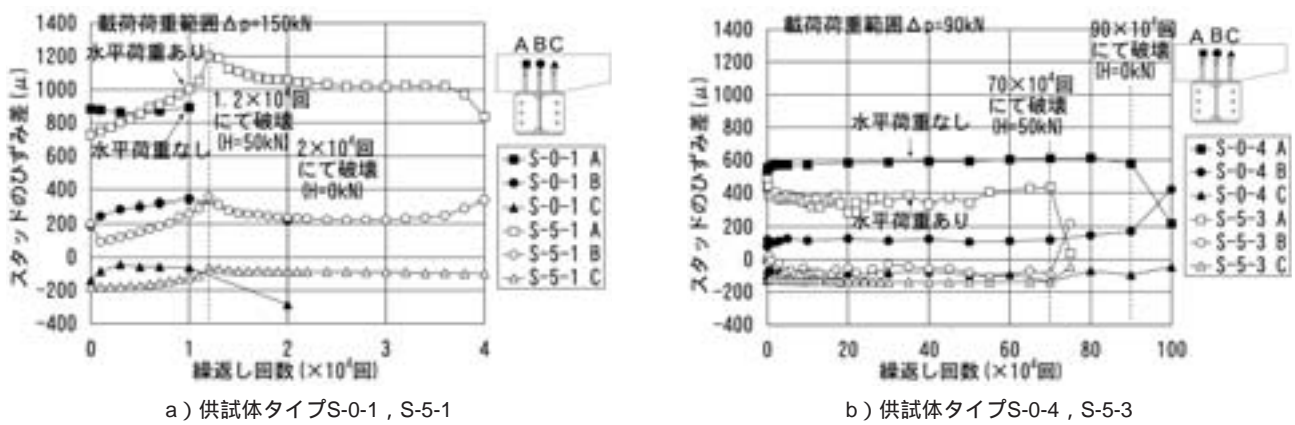


図3 スタッドのひずみ差と繰返し回数の関係

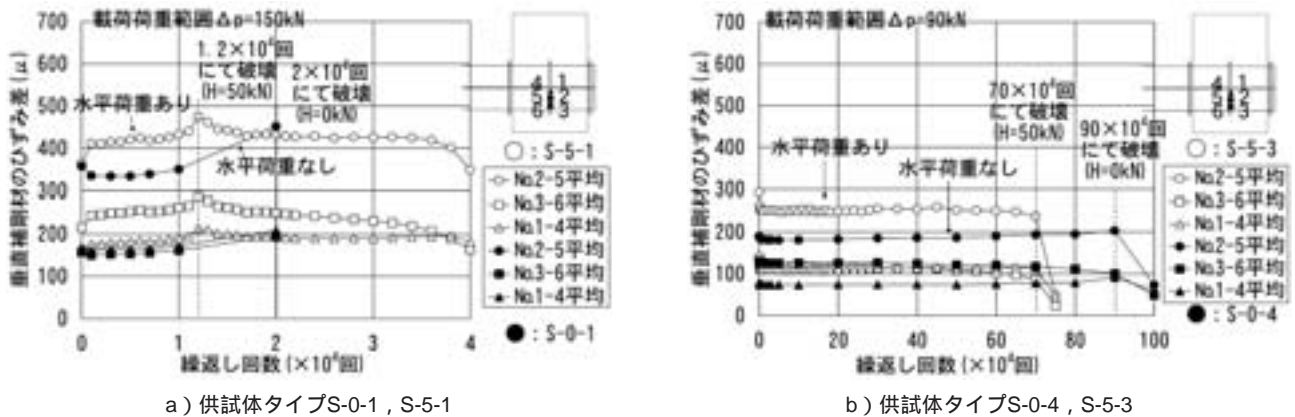


図4 垂直補筋材のひずみ差と繰返し回数の関係

### 3. 疲労試験結果

試験条件および疲労試験結果を表2に示す。各タイプの破壊回数は後述する図3, 図4と同様に, ひずみ値の変化点で判定した。破壊様式において, コンクリート破壊とは, コンクリート表面にひび割れが確認され, 耐力を失った状態のことを示し, スタッド破壊はスタッドが根元部で疲労破壊したことを意味している。

#### (1) スタッドおよび垂直補剛材のひずみ計測結果

水平荷重あり・なしのスタッド軸部中心に埋込んだゲージのひずみ値と繰返し回数の関係を図3a(例:S-0-1, S-5-1), 図3b(例:S-0-4, S-5-3)に示す。同様に, スタッド直下の垂直補剛材に貼付したゲージのひずみ差と繰返し回数の関係を図4a(例:S-0-1, S-5-1), 図4b(例:S-0-4, S-5-3)に示す。高サイクル疲労した図3b)および図4b)において水平荷重ありの場合は,  $70 \times 10^4$ 回にてスタッドA(鋼桁ウェブより外側)およびその直下の垂直補剛材に貼付したNo.2とNo.5のひずみ値が急激に変化しており, この時点でスタッドAが疲労破壊したと判断した。水平荷重なしの場合は, それらのひずみ値が急激に変化しているのは  $90 \times 10^4$ 回であると判断した。水平荷重あり・なしに限らずスタッドAが疲労破壊した後は, スタッドBのひずみ値が大きくなっており, 応力の再配分が行われたと考えられる。

一方, コンクリートがひび割れて低サイクル疲労した図3a)および図4a)について, 水平荷重なしの場合は  $2 \times 10^4$ 回においてコンクリートの表面にひび割れが見られ(写真4), 変形が大きくなったため疲労試験を中断し

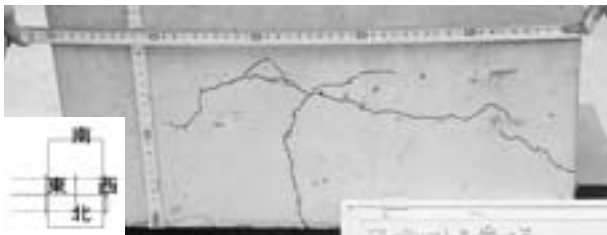


写真4 コンクリート表面のひび割れ 北側 (例: S-0-1)

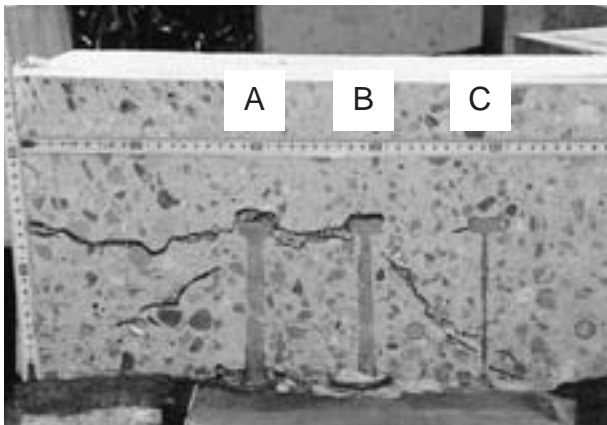


写真6 疲労破壊状況 (例: S-0-1)

た。よって, この時点でコンクリートが破壊したと判断した。また, 水平荷重ありの場合はコンクリートの表面にひび割れが見られ, スタッドおよび垂直補剛材のひずみが急激に変化した  $1.2 \times 10^4$ 回の時点でコンクリートが破壊したと判断した。コンクリートが破壊した後も疲労試験を続けた結果, スタッドおよび垂直補剛材のひずみが徐々に低下していき, 最終的に  $4 \times 10^4$ 回の時点でスタッドが疲労破壊した。スタッドおよび垂直補剛材のひずみが徐々に低下していく現象は, 内部のコンクリートのひび割れが徐々に進展していき, スタッドに応力が伝わらなくなっていったために生じたと考えられる。そして, ひび割れた状態でスタッドに応力が作用して, 最終的にスタッドが疲労破壊したと考えられる。疲労破壊後, 供試体をカットしたものを写真5に示す。

#### (2) 供試体疲労破壊状況

水平荷重なしの場合でコンクリートから低サイクル疲労した供試体タイプS-0-1の疲労破壊状況を写真6に示す。これは疲労試験後, 供試体をカットしたものである。コンクリートのひび割れ状況をわかりやすくするため, ひび割れ箇所をマジックで描いた。スタッドAとBを中心にコンクリートがコーン破壊を起こしていることがわかる。スタッドAの頭部から図中左側にひび割れが進展しているのは, スタッドに対して軸引張ではな



写真5 疲労破壊状況 (例: S-5-1)

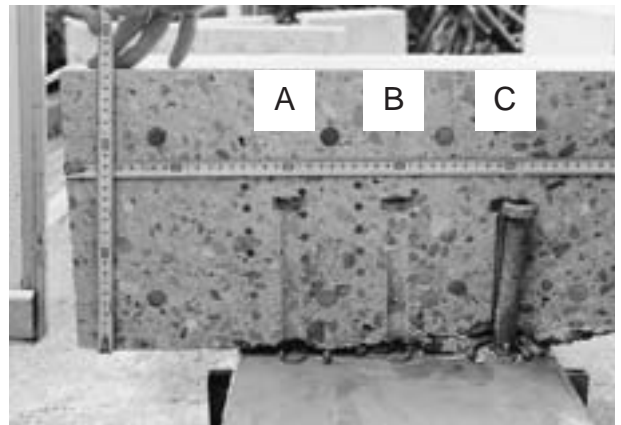


写真7 疲労破壊状況 (例: S-5-3)

く、アップリフトによる回転曲げによる影響であると  
考えられる。

一方、水平荷重ありの場合でスタッドから高サイクル  
疲労した供試体タイプS-5-3の疲労破壊状況を写真7に示  
す。スタッドAとBが溶接カラーを残し、抜け落ちたよ  
うな疲労破壊を起こしたことがわかる。スタッドの疲労  
破壊の順序は、アップリフトによる作用力が大きい図中  
左側のスタッドAが疲労破壊を起こし、次に真ん中のス  
タッドBが疲労破壊を起こしたと考えられる。写真7よ  
り高サイクル疲労の場合では、コンクリートにはひび割  
れが起こらず、スタッドによる疲労破壊であることが確  
認できる。

#### 4. S-N線の算出

水平荷重あり・なしのスタッドのひずみ分布を図5に  
示す。各スタッドのひずみ値はスタッド頭部近くのひず  
み値であることから、軸引張のみによるひずみであると  
考えられる。スタッドのひずみ分布が勾配を持っている  
のは、アップリフトによる回転曲げの影響であると考え  
られる。よって、スタッド根元の溶接部のひずみ値は、

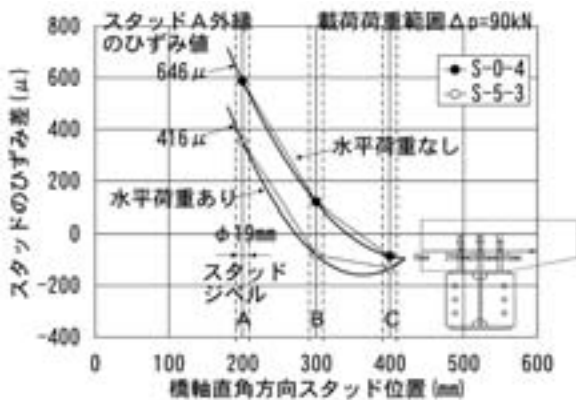


図5 スタッドのひずみ分布 (例: S-0-4, S-5-3)

ひずみ分布の勾配を求めて、スタッド軸部表面のひずみ  
値を算出することによって考慮することができると考え  
られる。そこで、スタッドAに作用するアップリフトに  
よるひずみ値は、図5中に示すように3点のひずみ値を2  
次式で外挿して求めた。

本実験から得られたスタッドAに対するS-N線を図6に  
示す。図6の縦軸に記すスタッドの応力範囲は、ア  
ップリフトによる回転曲げを考慮して換算したスタッド  
Aのひずみ値に鋼のヤング係数を乗じることにより算出  
した。なお、同図にはJSSC疲労設計指針<sup>7)</sup>のD等級、F等  
級、S等級のS-N線、および、文献8)におけるスタッド  
の軸引張試験のS-N線も直接比較するために併記してい  
る。この図から、水平荷重あり・なしによって、S-N線  
の傾きが大きく異なっていることがわかる。つまり、水  
平荷重ありのS-N線の傾きは、1/3.10となり、JSSCのS-N  
線の傾き (1/3.0) とほぼ同等であり、水平荷重なし  
(H=0 kN) のS-N線の傾きは、水平荷重あり (H=50 kN)  
の場合に比べて、極めて緩い (1/9.21) ことがわかる。  
そして、水平荷重ありのS-N線はJSSCのF等級のS-N線と  
ほぼ同等であることがわかった。また、文献8)の軸引  
張試験においては $200 \times 10^4$ 回疲労強度がJSSCのC等級を  
満足しているのに対し、水平荷重なしの疲労強度はJSSC  
のD等級であった。参考として、スタッドに作用する水  
平せん断力の疲労強度はJSSCのS等級 ( $200 \times 10^4$ 回疲労  
強度は80 MPa, S-N線の傾きは1/5.0) である。

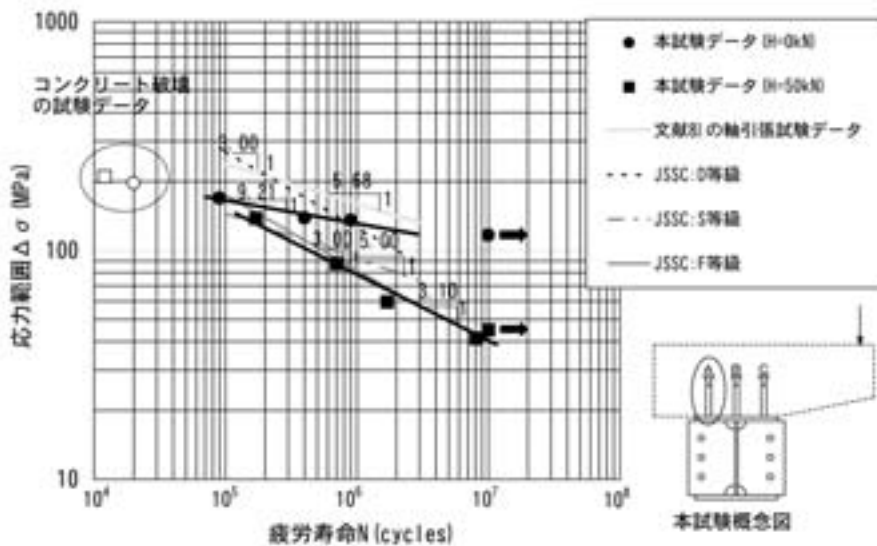


図6 S-N線

## 参考文献

## 5. おわりに

FEM解析により、スタッドにはせん断力に加え引抜き力が生じていることを確認している<sup>3)</sup>。今回、複合加力の疲労試験により、疲労設計上有用となるアップリフト作用を受ける場合のスタッドのS-N線を示すことができた。

本実験を行うにあたり、多大なご指導をいただきました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紙面を借りてお礼を申し上げます。

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説， 鋼橋編， 1996.12.
- 2) 橋，保坂，笹川，渡辺：鉄道橋への2主桁橋の適用に関する考察，土木学会第52回年次学術講演会概要集， 1997.9.
- 3) 保坂，堀地，辻角，橋，依田：鉄道橋への複線2主I断面合成桁橋の適用に関する解析的検討，土木学会第53回年次学術講演会概要集， 1998.10.
- 4) 松井，平城，三好：西ドイツの頭付きスタッドの新しい認可と設計計算例 アンカー材として用いるスタッド， 橋梁と基礎， 1986.9.
- 5) 大垣，川口，八部，長井：連続合成2主桁橋のずれ止め設計に関する一考察，鋼構造論文集，第4巻第15号， 1997.9.
- 6) 川口，大垣，八部，長井：連続合成2主桁橋のずれ止め設計法に関する一検討，土木学会第52回年次学術講演会概要集， 1997.9.
- 7) (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， 1993.4.
- 8) Welz,W., Dietrich,G. : Festigkeitsuntersuchungen an Bolzenschweissverbindungen, Schweißen und Schneiden, 23, No.8, pp.308-311, 1971.