

(33) 曲げ引抜き力を受けるスタッドジベルに関する実験的研究

Experimental study on stud shear connectors subjected to bending pull-out force

紫桃孝一郎*, 鈴木永之*, 谷中聡久**, 辻幸佐**, 済藤英明**, 鈴木俊光***

Koichiro Shito, Noriyuki Suzuki, Toshihisa Yanaka, Kousuke Tsuji, Hideaki Saitou, Toshimitsu Suzuki

*日本道路公団試験研究所橋梁研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

**日本橋梁建設協会 (〒104-0061 東京都中央区銀座 2-2-18)

***工修, 日本橋梁建設協会 (〒104-0061 東京都中央区銀座 2-2-18)

PC deck slabs are remarkably deformed by the live load or the residual dead load in the case of a small number of steel main girders. Bending pull-out force is occurred at the position where deck slabs and steel girders are connected and deflection is restricted at the positions of cross-beams. In this study, loading tests are executed to check out of the mechanical properties and fatigue durability of stud shear connectors.

As a result, (1) Acting stress of studs stick out around tips of stiffeners at the case of direct arrangement. (2) Non-direct arrangement of studs makes acting stress reduced remarkably around the tips of stiffeners. (3) Arrangement of studs hardly affect the ultimate configuration.

Keywords : stud, shear connector, pull-out force, fatigue test

1. はじめに

近年、鋼橋の合理化、省力化の構造として床版支間が長く張出しが大きいPC床版を有する鋼少数主桁橋の採用実績が増加している。この形式の橋梁の中間支点部、横桁位置の上フランジに配置されたスタッドジベル（以下、スタッドという）には、橋軸方向の水平せん断力だけでなく、橋軸直角方向の曲げモーメントが作用することが報告^{1), 2)}されている。この曲げモーメントは活荷重や後死荷重による床版のたわみ変形により生じ、その変形を拘束する垂直補剛材の直上位置ではスタッドに鉛直方向の引抜き力（以下、曲げ引抜き力という）が作用する。

本研究では、主桁と床版接合部の耐力および耐久性の向上を目的として、スタッドの曲げ引抜き力に着目し、スタッド作用力のメカニズムを調べるための静的載荷実験および疲労実験を実施した。実験にあたっては、スタッドの配置に着目し、垂直補剛材の直上に配置した場合、直上を避けて配置した場合について曲げ引抜き力への影響を比較した。

2. 実験方法

2.1 実験ケース

実験の対象とした橋梁の断面形状および曲げ引抜き力を生じる載荷ケースを図-1に示す。対象とした

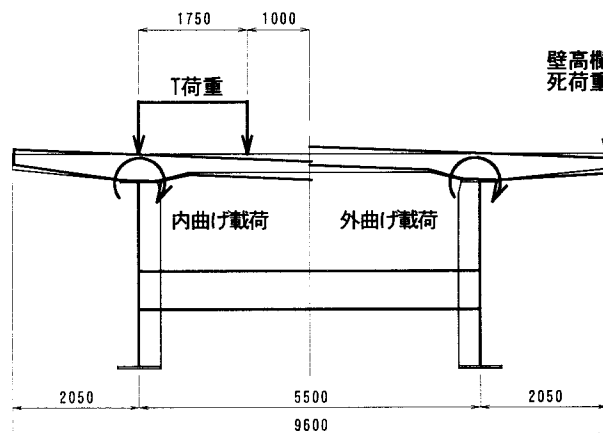


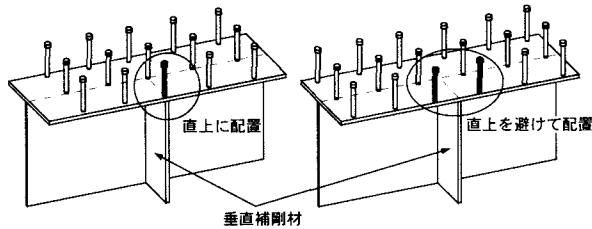
図-1 載荷ケース模式図

橋梁は、支間長45m、主桁間隔5.5mのPC床版を有する合成2主1桁橋である。曲げ引抜き力の生じる載荷ケースとして、主桁間が下に凸にたわみ変形するT荷重を載荷したケース（以下、内曲げ載荷という）、床版張出し部がたわみ変形する壁高欄死荷重を載荷したケース（以下、外曲げ載荷という）を想定した。

実験ケースは表-1に示したように、静的載荷実験および疲労実験を実施した。スタッド配置は、図-2に示すように垂直補剛材の直上に配置したケース（以下、直上配置という）、橋軸方向にずらして直上を避けて配置したケース（以下、非直上配置という）の2種類とした。先に述べた載荷ケースとスタッド配置の組み合わせで、合計4ケースの静的載荷実験を実施した。

表－１ 実験ケース

	内曲げ载荷		外曲げ载荷	
	直上配置	非直上配置	直上配置	非直上配置
静的载荷実験	1体	1体	1体	1体
疲労実験	1体	1体	—	—



図－２ スタッド配置

疲労実験においては、壁高欄死荷重を想定した外曲げ载荷は行わず、内曲げ载荷のみの合計2ケースとした。なお、供試体数は各ケースとも1体ずつである。

2.2 実験供試体

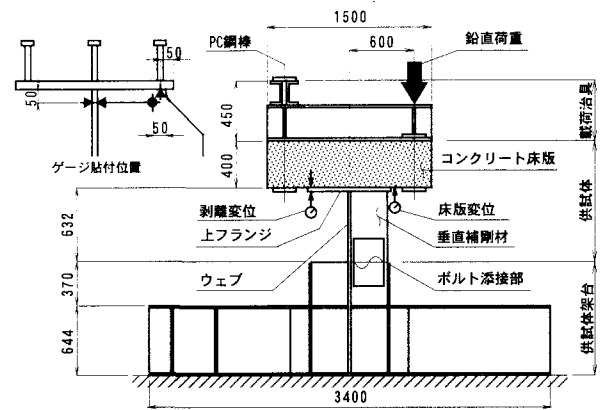
供試体形状を図－３～図－５に、使用材料の諸元を表－２に示す。供試体は横桁から上部をモデル化し、橋軸方向に1.5m、橋軸直角方向に1.5mを取り出した実物大の部分モデルである。横桁は剛な部材と仮定し、供試体の架台として試験床に固定した。床版上には、橋軸直角方向の载荷位置を変化させるための载荷治具を取り付けた。スタッド配置は橋軸直角方向に3本、橋軸方向に250mmピッチとし、非直上配置は125mmずらした位置とした。なお、床版はプレストレスを導入しないRC構造とし、フランジ上面には剥離剤を塗布し付着を切った構造とした。

2.3 载荷および計測方法

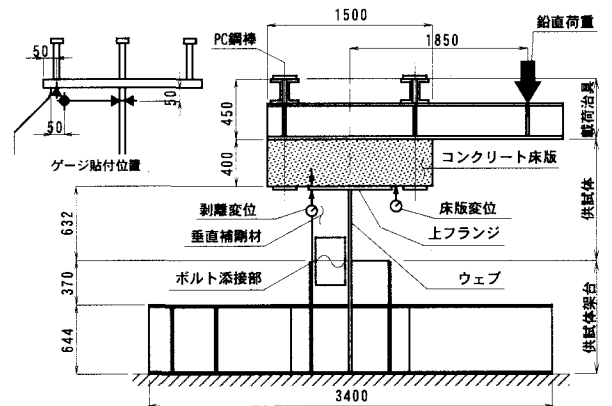
橋軸直角方向の载荷位置については、実橋の接合部に発生する断面力を模擬できるように設定した。すなわち、接合部には床版のたわみ変形による曲げモーメントと床版の鉛直方向の反力である軸力が作用すると考えられるが、その比率が、床版、主桁および横桁のラーメン構造を構成する実橋と片持ち構造の供試体で同程度になるように载荷位置を決定した。

静的载荷実験の载荷は、スタッドに生じる最大ひずみに着目した。スタッドのひずみが降伏に達するまでは漸増繰返し载荷、スタッドのひずみが降伏ひずみに達した後は単調载荷とした。

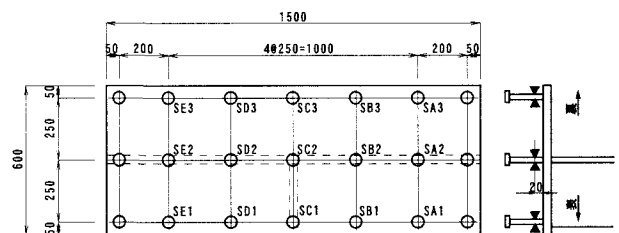
疲労実験の载荷は、静的载荷実験結果および既往の実験結果^{3), 4)}をもとにスタッドの曲げ引抜きに対する疲労強度曲線を仮定し、载荷の繰返し回数が200万回程度で疲労強度曲線に達するような荷重振幅とした。



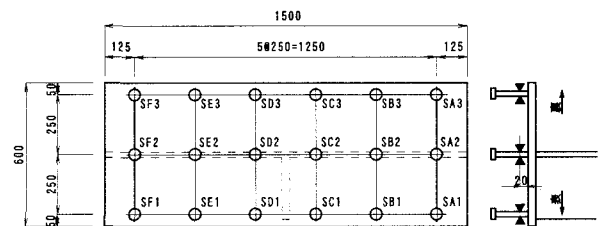
図－３ 内曲げ载荷供試体



図－４ 外曲げ载荷供試体



(a) 直上配置



(b) 非直上配置

図－５ 供試体のスタッド配置図

表－２ 供試体の材料諸元

名 称	寸法, 材質
上フランジ	t=32mm (SM490A)
ウェブ	t=22mm (SM490A)
垂直補剛材	t=32mm (SM490A)
スタッド	φ22×200 (JISB1198)
床版コンクリート	40-8-20-H
主鉄筋	D13 (SD345)
配力筋	D19 (SD345)

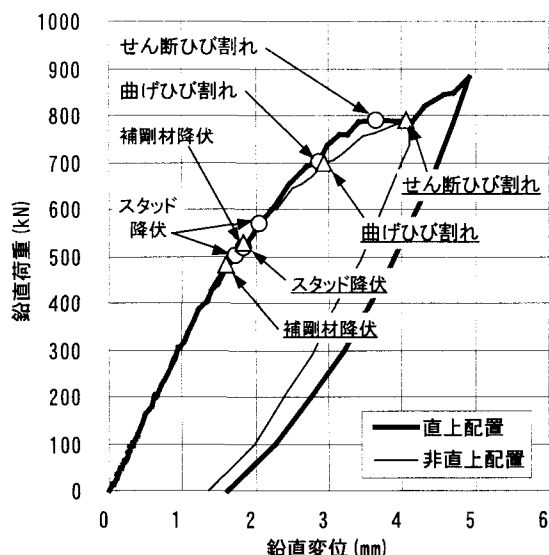


図-6 内曲げ載荷の荷重と鉛直変位の関係

計測項目は、載荷荷重、床版の鉛直変位、床版と上フランジの剥離変位、スタッドの軸方向ひずみ、垂直補剛材、ウェブおよびフランジのひずみとした。

3. 静的載荷実験結果

3.1 供試体の変形状

図-6～図-8に変位の計測結果を示す。図-6～図-7は供試体中央断面の床版の鉛直変位と荷重の関係、図-8は中央断面の上フランジと床版の剥離変位と荷重の関係である。剥離変位は載荷位置と反対側のフランジ端面で計測した。以下に結果の特徴を述べる。

- (1) 鉛直変位と荷重の関係によると、鉛直変位はスタッド配置による差が小さいことがわかる。特に内曲げ載荷 600kN、外曲げ載荷 60kN 以下においては、直上および非直上配置の変位は同等であった。
- (2) 剥離変位と荷重の関係によると、内曲げ載荷では 200kN 以上で僅かに剥離変位が計測されたものの、最大で 0.2mm 程度と非常に小さな値であった。一方、外曲げ載荷では荷重の増加に伴い剥離変位が増加した。荷重 20kN 以下の初期段階においてスタッド配置による差 (20kN 載荷時で直上配置 0.47mm、非直上配置 0.62mm) が若干見られた。なお、外曲げ載荷の計測値が剥離変位 4mm 程度までとなっているのは変位計の容量に達したためである。

3.2 スタッドのひずみ性状

図-9に供試体中央付近の SC 列スタッド、垂直補剛材側(スタッド記号の末尾番号が1の橋軸方向の列)のスタッドの軸方向応力分布を示す。図示した計測値は、内曲げ載荷 400kN、外曲げ載荷 20kN 載荷時の値である。なお、ここでいう応力とは、計測したひずみ値にヤング率 ($2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$) を乗じた値である。

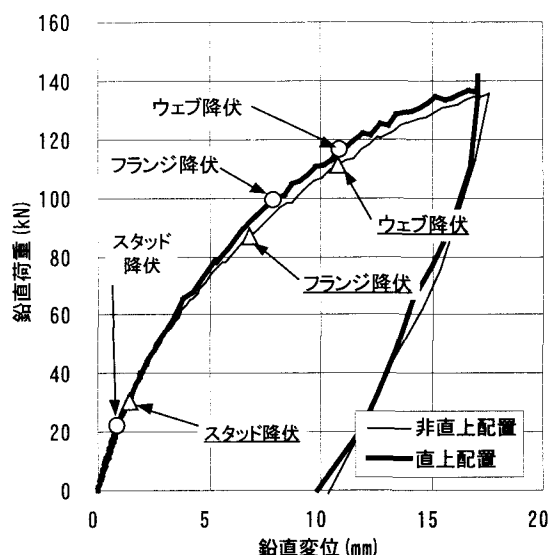


図-7 外曲げ載荷の荷重と鉛直変位の関係

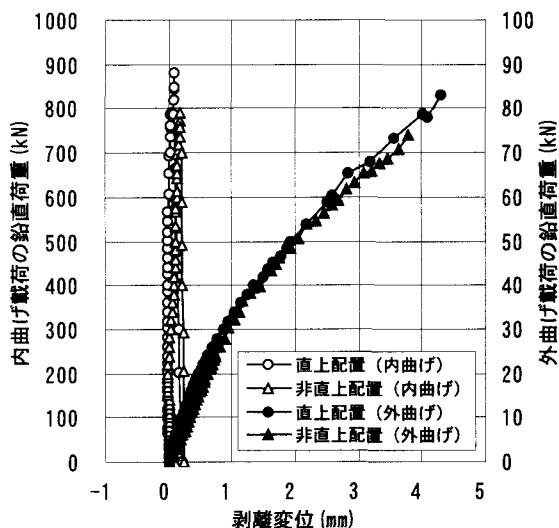


図-8 上フランジと床版の剥離変位

また、軸方向応力とはスタッド軸部の表裏計測値の平均値である。以下に結果の特徴を述べる。

- (1) SC 列スタッドの橋軸直角方向分布図によると、軸方向応力は、直上配置の SC1 スタッドの値が大きいことがわかり、その傾向は内曲げ、外曲げの載荷方向に関わらずに見られた。
- (2) また、計測応力度の大きな SC1 スタッドにおいて内曲げ、外曲げ載荷ともスタッド配置の影響が顕著に現れた。すなわち、内曲げ載荷の場合は 251N/mm^2 から 18N/mm^2 に減少(-93%)、外曲げ載荷の場合は 223N/mm^2 から 125N/mm^2 に減少(-44%)した。一方、SC2, 3 ではスタッド配置の影響は小さかった。
- (3) 応力度の大きい SC1 スタッドを含む橋軸方向断面の応力分布図によると、前述のスタッド配置の影響がより顕著に見られた。すなわち、直上配置の SC1 スタッドの値だけ (非直上配置では SD1 スタッドも同様) が、配置の違いにより明確に減少した。

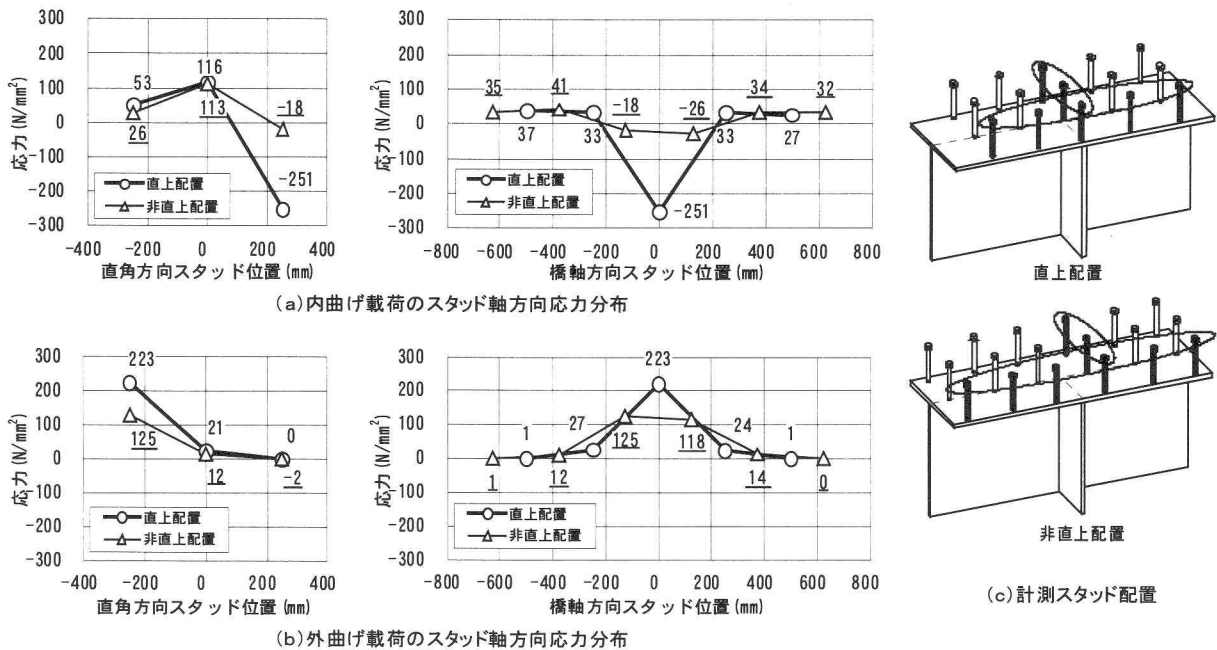


図-9 スタッドの軸方向応力分布

- (4) ここでは図示していないが、スタッドの曲げ応力（スタッド軸部の表裏計測値の差の1/2）はウェブ直上の値が大きいが、前述の軸方向応力の1/2以下であり分布にも明確な特徴が見られない結果であった。

3.3 床版切断面の状況

写真-1～写真-2に実験後の床版切断面（直上配置供試体）の状況を例示する。切断位置は全てSC列スタッドの中心断面で、スタッド配置による差は見られなかった。以下に結果の特徴を述べる。

- (1) 内曲げ载荷供試体の切断面では、载荷中に観察されたフランジ直上の曲げひび割れと载荷点付近のせん断ひび割れの表面ひび割れが観察された。また、床版表面では観察されなかったSC2スタッドの頭部を通るせん断ひび割れが生じていた。その他には、スタッドやフランジ上面とコンクリートの剥離等の変状は確認されなかった。
- (2) 外曲げ载荷供試体の切断面では、SC1スタッドの頭部にひび割れが観察された。また、床版下面とフランジ上面の剥離がSC1～SC2スタッドにかけて生じていた。ひび割れはスタッド頭部の円形に沿った形で生じていると推定され、かつ頭部の下側にも空隙が見られた。
- (3) 写真を示していないが、内曲げ载荷供試体の実験後の外観は、フランジと床版接合部の剥離した形跡が見られず、载荷の最終段階である700kN以降に、床版の上面および側面に橋軸方向の曲げひび割れ、载荷梁直下にせん断ひび割れを生じた。
- (4) 外曲げ载荷供試体は、フランジと床版接合部が大きく剥離し床版の傾きを生じており、大きな残留変形が確認された。ただし、载荷荷重が小さいこともあり床版には表面ひび割れが一切確認されなかった。

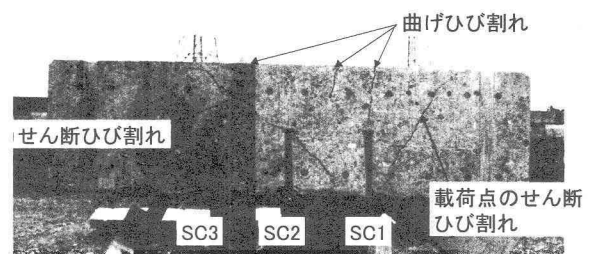


写真-1 直上配置、内曲げ供試体

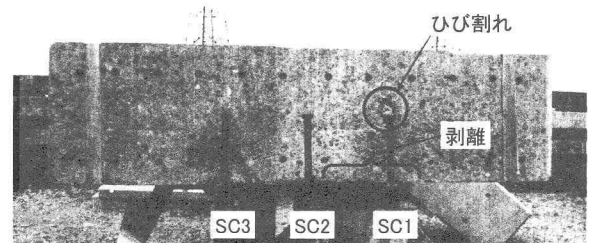
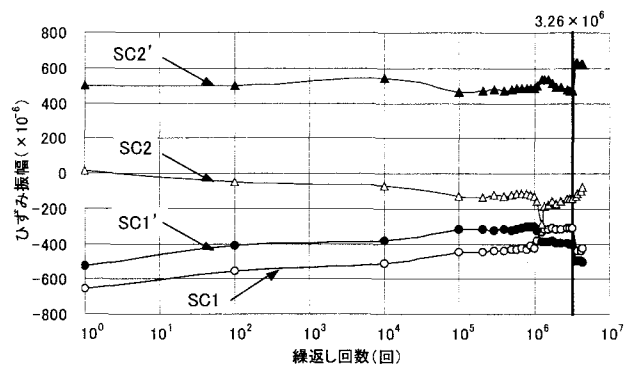


写真-2 直上配置、外曲げ供試体

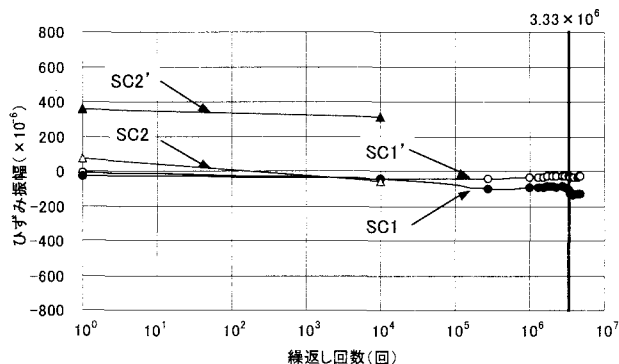
3.4 供試体各部の降伏、ひび割れ順序

図-6～図-7には、スタッドおよび鋼桁各部の降伏順序および床版のひび割れ発生順序も示した。図中の順序は、スタッドや鋼桁各部材において計測値が降伏ひずみに達した段階の荷重を示している。以下に供試体の状態について述べる。

- (1) 内曲げ载荷供試体は、500kN前後で垂直補剛材先端とウェブ直上のスタッドが初めに降伏した。その後700～800kNにかけて床版のひび割れが発生した。垂直補剛材とスタッドの降伏に伴い図-6の曲線の傾きが小さく変化するの分かる。しかし、床版のせん断ひび割れを生じた後も荷重は増加しており、供試体の荷重が低下するには至らなかった。
- (2) 外曲げ载荷供試体は、20～30kN程度と低い荷重



(a) 直上配置



(b) 非直上配置

図-10 スタッドひずみの計測結果

で垂直補剛材先端のスタッドが降伏した。その後 80～100kN にかけてフランジの降伏、続いて 110kN を超えたところでウェブが降伏した。スタッド、フランジ、ウェブ等の降伏した段階と図-7の曲線の傾きの変化点の関係は明確ではなかった。

(3) 内曲げ荷重供試体に関しては、ウェブ直上のスタッドが初めに降伏するためスタッドの降伏段階に、スタッド配置の影響は見られなかった。垂直補剛材の降伏段階、床版のひび割れ段階も同様である。一方、外曲げ荷重供試体に関してはスタッド配置の変化により、スタッドの降伏荷重が 40%程度増加したが、フランジやウェブの降伏荷重は低下する結果となった。

3.5 降伏荷重と設計荷重の比較

本供試体における内曲げ、外曲げ荷重の設計荷重を、それぞれ 200kN、16.5kN と仮定すると、図-6～図-7に示したスタッドの降伏荷重は下記(a)～(d)の倍率のとおりである。なお、ここでの設計荷重とは、内曲げ荷重の場合はT荷重1組の荷重に相当する実験時の鉛直荷重を、外曲げ荷重の場合は壁高欄荷重(供試体長 1.5m 当たり)に相当する実験時の鉛直荷重を表す。

- (a) 直上配置(内曲げ) : 2.51 倍
- (b) 非直上配置(内曲げ) : 2.65 倍
- (c) 直上配置(外曲げ) : 1.34 倍
- (d) 非直上配置(外曲げ) : 1.84 倍

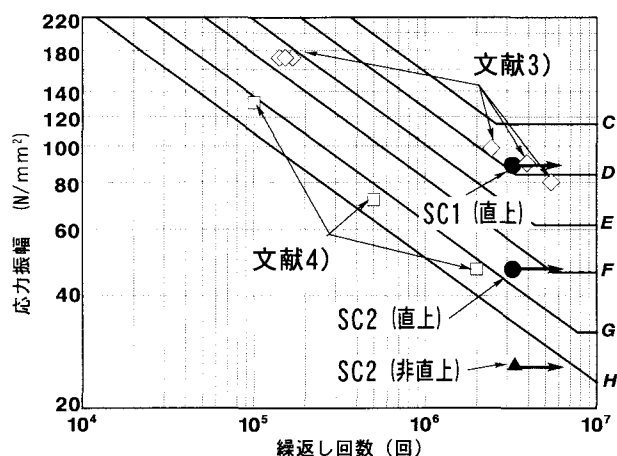


図-11 応力振幅と繰返し回数の関係

内曲げ荷重の設計荷重に対するスタッド降伏荷重の比率は 2.5 倍以上と余裕のある値である。この結果は、1.5m 幅のモデルの結果であるため橋軸方向の床版等の連続性を考慮すると、上記倍率はさらに大きくなり実橋の接合部はT荷重に対して十分な耐力があると考えられる。

外曲げ荷重の設計荷重に対するスタッドの降伏荷重の比率は 1.34, 1.83 倍である。非直上配置の優位性を示した結果となった。また、先と同様に供試体では床版や壁高欄の連続性が考慮されていないため、直上配置においても実橋は所定の耐力を有していると考えられる。

4. 疲労実験結果

4.1 供試体のひずみ計測結果

図-10にスタッドのひずみ振幅の計測結果を示す。直上配置は繰返し回数 326 万回、非直上配置は 333 万回までは荷重振幅を 20kN～220kN とした。その後、荷重振幅を 20kN～280kN に増加させて、直上配置は繰返し回数 446 万回、非直上配置は 478 万回まで荷重を行った。実験後にスタッドをはりだして確認した結果、スタッド溶接部に亀裂を生じていなかった。以下に結果の特徴を述べる。

- (1) 直上配置の SC1 スタッド、SC2 スタッドのひずみ振幅は、100 万回～120 万回にかけて振幅が変化した。特に SC1 スタッドのひずみは表裏の計測値が入れ替ったような値に変化した。
- (2) 直上配置は、その後 326 万回で荷重振幅を増加した直後から、SC1、SC2、SC2'のひずみ振幅がそれぞれ減少する傾向を示した。この時点で計測値に変状が見られたと考えて荷重を終了した。
- (3) 非直上配置の SC2 スタッドのひずみ振幅は表裏の差が大きく、直上配置と同様の傾向である。また、SC1 スタッドのひずみ振幅は、表裏平均値がゼロ程

度で直上配置の 600×10^6 から激減しており、静的載荷実験と同様の結果となった。

- (4) 非直上配置の SC1 スタッドは、先と異なり表裏の値が入れ替わるような現象は生じていない。SC2 スタッドの計測値は、1 万回を超えた時点で計測不能となったためその後の傾向は不明となった。なお、このような SC1 スタッドおよび SC2 スタッドの傾向は、SD スタッドにおいても同様であった。

4.2 スタッドの応力振幅と繰返し回数の関係

図-11 に応力振幅と繰返し回数の関係を示す。図-10 に示した直上および非直上配置の SC1, SC2 スタッドの計測値を示す。図中には、純引抜き力（スタッドの軸方向力のみ載荷）を負荷した文献 3)、曲げ引抜き力を負荷した文献 4)の実験結果および疲労強度曲線⁵⁾を付記した。応力振幅は全てスタッド軸方向応力の値である。

直上配置の SC1 スタッドは純引抜き力を負荷した文献 3)と同程度の応力振幅、SC2 スタッドは曲げ引抜き力を負荷した文献 4)と同程度の応力振幅に対して十分な強度を示した。また、非直上配置のスタッドは応力振幅が低減し疲労耐久性が向上することが考えられる。本実験では、スタッド溶接部に疲労亀裂を生じておらず、既往の疲労実験結果以上の疲労耐久性を有していたと考えられる。

5. まとめ

以上、合成 2 主 I 桁橋の主桁・床版接合部について、床版変形に伴う曲げ引抜き力によるスタッドの応力性状、耐久性を調べるために、静的載荷実験および疲労実験を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

(1) スタッドの応力性状

曲げ引抜き力によるスタッドに生じる軸方向応力は、直上配置の垂直補剛材先端のスタッドが突出して大きく、内曲げ、外曲げなどの載荷方向によらず同じ傾向であった。また、スタッド配置の影響については、垂直補剛材先端のスタッドで顕著に見られ、非直上配置とすることで直上配置よりも 50%以上低減することがわかった。

(2) 床版コンクリートのひび割れ性状

内曲げ載荷の供試体では、接合部が剥離した形跡は見られず、床版表面に曲げひび割れを生じた。また、橋軸方向中央部の切断面では、スタッド近傍のひび割れは発生しなかった。一方、外曲げ載荷の供試体では、垂直補剛材先端部でフランジの剥離が顕著に観察されたが床版表面のひび割れは発生しなかった。中央部の切断面では垂直補剛材先端のスタッド頭部に半円状のひび割れと頭部下面に空隙を生じていた。いずれの供試体もスタッド配置による差はなかった。

(3) 接合部の終局段階における性状

内曲げ載荷の供試体ではスタッド、垂直補剛材の降伏が生じ、次いで床版にひび割れが生じた。また、外曲げ載荷の供試体ではスタッドの降伏が生じ、次いでフランジ、ウェブの降伏が生じた。スタッドが降伏する荷重は設計荷重に対して大きく、十分な耐力を有していると考えられる。

(4) 疲労実験結果

200kN の荷重振幅を 330 万回程度載荷し、その後も 1.3 倍の荷重振幅で合計 400 万回以上の載荷を実施したが、両配置ともスタッド溶接部に疲労亀裂は発生しなかった。本実験のスタッドは既往の疲労実験結果以上の疲労耐久性を有していると考えられる。

(5) 今後の課題

今後、T 荷重載荷を想定した疲労照査を行うにあたっては、スタッド作用力の計算方法を確立することが必要であり、簡易モデル等により算出する場合は床版の連続性の評価方法が問題となると考えられる。例えば、実橋載荷等による実応力レベルの調査が必要であると考えられる。

また、外曲げ載荷のフランジ下面応力では非直上配置としたことでひずみが増加する結果も得られており、フランジと垂直補剛材溶接部の耐久性の検討も必要であると考えられる。

謝辞：本実験は、日本道路公団試験研究所と（社）日本橋梁建設協会による共同研究「鋼橋の接合部に関する研究」の一環として行われたものであり、委員各位に貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 石川裕一、長井正嗣、八部順一、大垣賀津雄、済藤英明：PC 床版合成 2 主桁橋の床版－鋼桁接合部の応力特性に関する実験的研究，土木学会第 53 回年次学術講演会概要集，I-A317，1998.10
- 2) 済藤英明、大垣賀津雄、八部順一、長井正嗣、石川裕一：PC 床版合成 2 主桁橋の床版－鋼桁接合部の終局耐力に関する実験的研究，土木学会第 53 回年次学術講演会概要集，I-A318，1998.10
- 3) 井ヶ瀬良則、鈴木永之、町田文孝、辻幸佐：引抜き力を受けるずれ止め構造についての実験的研究，土木学会第 57 回年次学術講演会概要集，I-356，2002.9
- 4) K.Shito, Y.Kamihigashi, N.Suzuki, T.Tsujimura, M.Sakurada and F.Machida: Study on Trans-verse Behavior of Connection between Concrete Slab and Corrugated Steel Web, Proceedings of the 1st. fib Congress, pp.233-242, Osaka, 2002.10
- 5) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善株式会社，2002.3.