

# 横向き溶接したトルシア形高力スタッドボルトの検討

すぎたにがわばし  
—杉谷川橋 下り線—

大阪支店	土木技術部	河中涼一
大阪支店	土木技術部	武智愛
大阪支店	土木工事部	西濱智博
大阪支店	土木技術部	橋野哲郎

**概要：**完成形拡幅工事を行っている新名神高速道路杉谷川橋（下り線）は、波形鋼板ウェブ橋で、既設床版の両側に新設床版を増設してストラットで支持する計画であるが、暫定形施工時に下床版を波形鋼板ウェブの内側に構築したことから外側にストラットの受け台が設けられていない。そこで、波形鋼板ウェブ下端にストラットを接合するガセットプレートを取り付ける必要がある。ガセットプレートの固定にはトルシア形高力スタッドボルトを横向き溶接してナットで締結する計画であるため、横向き溶接したスタッドボルトの引張強度試験および疲労試験を実施し、横向き溶接の影響がないことを確認した。

**Key Words：**トルシア形高力スタッドボルト，横向き溶接，引張試験，疲労耐久性

## 1. はじめに

完成形拡幅工事を行っている新名神高速道路杉谷川橋（下り線）は波形鋼板ウェブ橋で、現在は暫定形で供用中である。図-1に示すとおり、完成形は、既設床版の両側に新設床版を増設してストラットで支持する計画である<sup>1)</sup>。そこで、波形鋼板ウェブ下端にストラットを接合するガセットプレートを取り付ける必要がある。

図-2に示すとおり、ガセットプレートの固定には呼び径がM20でF8T相当のトルシア形高力スタッドボルト（以下、スタッドボルト）

を横向き溶接してナットで締結する計画であるが、呼び径がM20のスタッドボルトの横向き溶接は実績がない。横向き溶接では、鉛直溶接のように溶接基部のカラーが均一に形成されないため、本実験では、各種の要素試験により横向き溶接したスタッドボルトの引張強度を確認するとともに、疲労強度も評価した。

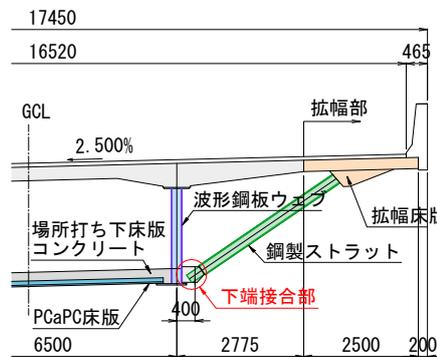


図-1 構造概要図（単位:mm）

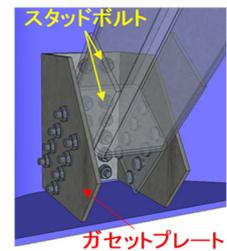


図-2 下端接合部



河中涼一



武智愛



西濱智博



橋野哲郎

## 2. 引張強度試験

### 2.1 実験概要

スタッドボルトの引張試験は JIS Z 2241 に準拠した。図-3 は引張試験の概要図であり、供試体は鉛直に設置した母材にスタッドボルトを横向きで溶接して作製した。実構造ではガセットプレートをスタッドボルトで接合することを想定し、試験体にも当て板を設置した。スタッドボルトには熱処理を施しており、JIS B 1186 で F8T に求められる耐力  $640\text{N/mm}^2$  にねじ部の有効断面積  $245\text{mm}^2$  を乗じた値は  $156.8\text{kN}$  (以下、降伏耐力)、引張強さ  $800\text{N/mm}^2$  にねじ部の有効断面積を乗じた値は  $196.0\text{kN}$  (以下、引張強度) となる。本橋で採用するスタッドボルトの導入軸力は  $110\text{kN}\pm 15\%$  の  $93.5\sim 126.5\text{kN}$  で管理し、設計ボルト軸力は下限の  $93.5\text{kN}$  とした。ストラット下端接合部の設計ボルト軸力に合わせ、溶接は、母材を静置した条件 (以下、静的溶接) に加え、実施工では供用下で溶接することを想定して母材を振動させた条件 (以下、振動溶接) でも行った。振動の条件は、実橋の振動計測より得られた、最大振幅が生じた際の変位 ( $3.1\text{mm}$ ) および振動数 ( $2.6\text{Hz}$ ) と振動機の加振可能な振動数に基づき、振幅  $3.1\text{mm}$ 、振動数  $3.0\text{Hz}$  とした。母材厚は、本橋の波形鋼板ウェブの最小板厚である  $10\text{mm}$  と、スタッドボルトの全強を得られる最低板厚である  $19\text{mm}$  とした。供試体は、母材厚  $10\text{mm}$ 、 $19\text{mm}$  とともに静的溶接が 9 体、振動溶接が 5 体とした。スタッドボルト基部にひずみゲージを設置したのは、静的溶接 9 体中の 2 体、振動溶接の 5 体全てである。

### 2.2 実験結果

図-4 は、母材厚が  $10\text{mm}$  の試験から得られた引張荷重とスタッドボルト基部で計測したひずみの関係を示している。この図から、静的溶接および振動溶接のいずれも荷重とひずみの関係や引張強度に明らかな差は見受けられないが、ひずみゲージを設置していない静的溶接の供試体を含む 9 体のうち 2 体および振動溶接の 5 体のうち 2 体は引張強度が  $196.0\text{kN}$  を下回った。計 4 体の試験結果が引張強度  $196.0\text{kN}$  に達しなかったのは、全 14 体中の 12 体の破壊形態が母材からの抜けであったことに起因し、図に示すスタッドボルトの荷重とひずみの関係が降伏後に複雑な挙動を示しているのはその影響である。写真-1 の左に母材厚が  $10\text{mm}$  の場合に母材抜けで破壊に至った状況を示す。スタッドボルト下端には、すり鉢状に引き抜けた母材が確認できることから、溶接部で破断したのではないことが分かる。

図-5 は、母材厚が  $19\text{mm}$  の試験から得られた引張荷重とスタッドボルト基部で計測したひずみの関係を示している。この図からも、静的溶接および振動溶接のいずれも荷重とひずみの関係や引張強度に明らかな差は見受けられず、全ての結果が引張強度  $196.0\text{kN}$  を上回った。破壊形態は、すべて写真-1 の右に示すとおり、スタッドボルトねじ部の破断であった。以上の結果より、4 体の試験結果が引張強度に達しなかったものの、母材厚  $10\text{mm}$  および  $19\text{mm}$  の全ての試験結果は、スタッドボルトの導入軸力の上限值である  $126.5\text{kN}$  および降伏耐力  $156.8\text{kN}$  を上回ることを確認した。

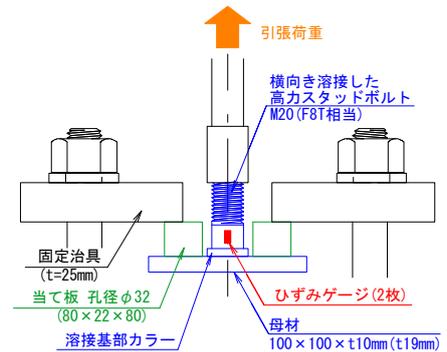


図-3 引張試験概要図 (単位:mm)

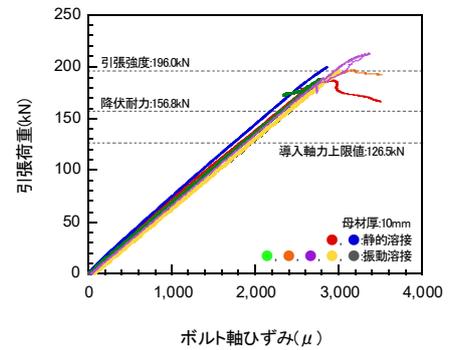


図-4 母材厚 10mm の試験結果

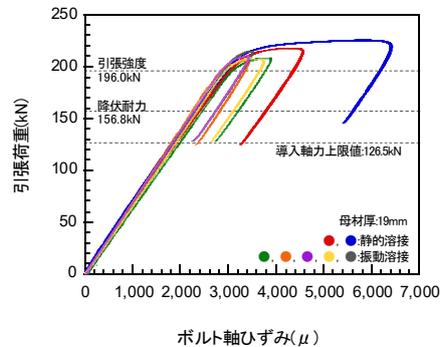


図-5 母材厚 19mm の試験結果



写真-1 引張試験での破壊状況

母材厚が 10mm の場合、多くの供試体の破壊形態が母材抜けであり引張強度に達しない結果も得られたため、非線形 FEM 解析を用いて軸力導入時の母材の挙動および応力分布を確認した。解析モデルには、スタッドボルト溶接基部のカラーも考慮した。その結果、荷重とボルト頭部の変位関係が非線形挙動を示すのは荷重が約 180kN を超えてからであり、破壊モードは母材降伏先行であることを確認した (図-6)。また、Mises 応力コンター図より、導入軸力の最大値 126.5kN で降伏域はカラー部に留まり母材の全断面降伏には至らないことを確認した (図-7)。なお、図中に示す 100kN は導入軸力の標準値、85kN は 100kN に導入軸力のばらつき 15% を考慮して低減した値、126.5kN および 132kN は導入軸力を各々 115kN および 120kN と仮定した場合の軸力に増締め 10% を考慮した値である。

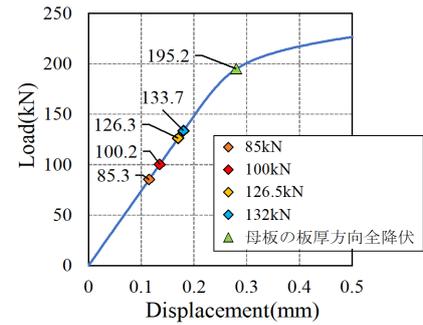


図-6 荷重-変位(ボルト天端) 関係

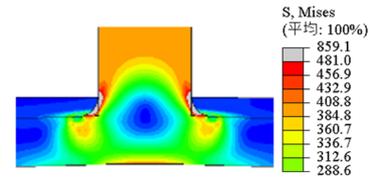


図-7 Mises 応力コンター図

### 3. 疲労試験

#### 3.1 面内疲労試験

##### 3.1.1 実験概要

面内疲労試験では、スタッドボルトを 1 本横向き溶接した母材を振動疲労試験機<sup>2)</sup>で上下方向に振動させることで、母材に面内の疲労荷重を与えた (図-8)。スタッドボルト位置の応力は、完全片振り引張りとなるようバネを用いて調整した。この試験では、接合部に用いるガセットプレートを当て板で再現し、スタッドボルトに設計ボルト軸力 93.5kN を導入して 1 週間経過後に疲労試験を開始した (図-9)。接合面は、当て板を無機ジンクリッチペイント、母材を 2 種ケレンとした。なお、比較のために当て板がない試験体も作成 (図-10) し、試験体は各々 No.1~3 の計 3 体を準備した。No.1, No.2 の応力範囲は 100N/mm<sup>2</sup> とした。No.3 は応力範囲を 150N/mm<sup>2</sup> とすることで、No.1 および No.2 と異なる疲労寿命の結果を得た。

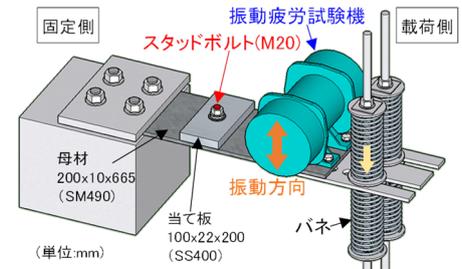


図-8 面内疲労試験概要図

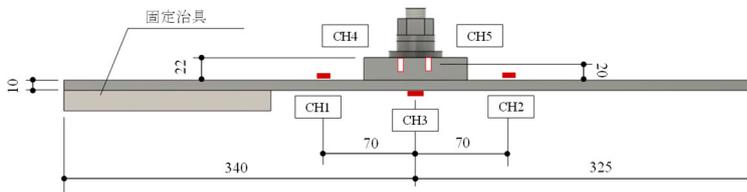


図-9 面内疲労試験体のひずみ測定位置 (当て板あり)

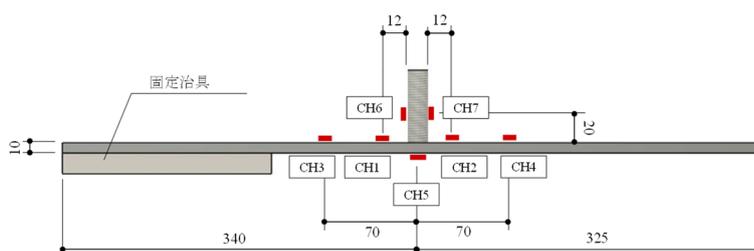


図-10 面内疲労試験体のひずみ測定位置 (当て板なし)

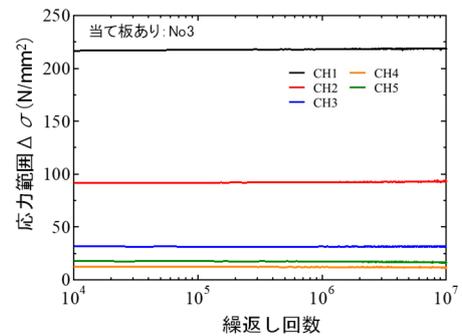


図-11 応力変化 (当て板あり:No.3)

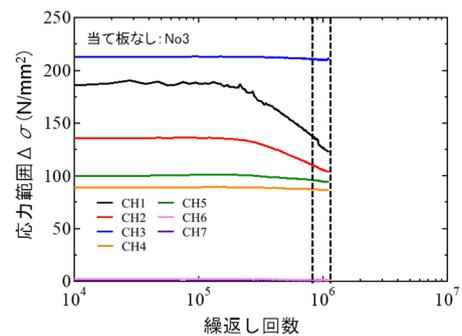


図-12 応力変化 (当て板なし:No.3)

### 3.1.2 実験結果

図-11は、応力範囲を150N/mm<sup>2</sup>とした当て板ありのNo.3の試験体で計測した母材およびスタッドボルトの応力範囲と繰返し回数の関係を示している。ひずみの計測位置は図-9に示すとおりである。縦軸は振動によって母材に与えた応力範囲で、スタッドボルトの固定側と载荷側に設置したひずみゲージで計測されたひずみに鋼材のヤング係数である2.0×10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>を乗じて応力に変換したものである。この図から明らかなように、応力範囲が繰返し回数1,000万回に達した段階でも変化しなかったことから、高力スタッドボルトの溶接部に疲労き裂は発生していないと判断できる。当て板ありのNo.1およびNo.2も同様の結果であった。

図-12は、応力範囲を150N/mm<sup>2</sup>とした当て板なしのNo.3の試験体で計測した母材およびスタッドボルトの応力範囲と繰返し回数の関係を示している。当て板なしのNo.3の試験体は、繰返し回数が28.1万回において母材表面で計測した応力範囲が5%低下した。ここで、本試験では、母材表面で計測した応力の範囲が5%低下した時の繰返し回数をN<sub>5%</sub>と定義した。また、当て板のないNo.1およびNo.2の試験体は、N<sub>5%</sub>が各々46.4万回および62.4万回であった。

図-13は、本試験で得られたN<sub>5%</sub>の結果を、同寸法の試験体から得られた既往の研究結果<sup>2)</sup>と比較したS-N関係である。ただし、既往の研究では、N<sub>5%</sub>ではなく、溶接止端部に銅線を接着し、銅線が切れた時の繰返し回数N<sub>toe</sub>が示されていたが、N<sub>5%</sub>とN<sub>toe</sub>に大きな差がないため、本研究で得られたN<sub>5%</sub>の結果はN<sub>toe</sub>と比較する。図中の矢印は、凡例に示す応力範囲とN<sub>toe</sub>でも亀裂が生じなかったこと (run-out) を示す。この図には、参考までにJSSC (日本鋼構造協会) の疲労強度等級も示した。この図より、当て板なしの結果は、いずれも既往の研究から得られた疲労強度と同程度であることから、横向きで高力スタッドボルトを溶接しても疲労強度に影響を及ぼさないことが分かる。また、当て板を設けた場合、通常のスタッドと比べて疲労強度が著しく向上していることが分かる。

## 3.2 面外疲労試験

### 3.2.1 実験概要

面外疲労試験では、スタッドボルトを4本横向き溶接したベースプレートに、ガセットプレートを模したエンドプレートを取付けたH形鋼を接合し、H形鋼の天端に取付けた振動疲労試験機で水平方向に振動させることで、スタッドボルトに軸方向の疲労荷重を与えた(図-14)。応力範囲は完全両振りとした。面外方向载荷の試験体では、実構造の波形鋼板ウェブの板厚よりも厚い板厚50mmのベースプレートを用い、スタッドボルトに設計ボルト軸力93.5kNを導入する方法でH形鋼を接合した。ガセットプレートの接合面は無機ジンクリッチペイント、母材は2種ケレンとした。スタッドボルトの軸方向の設計応力範囲は、活荷重時を想定した本橋のFEM解析より80N/mm<sup>2</sup>と求まり、本試験では安全側の100N/mm<sup>2</sup>を試験荷重として採用した。

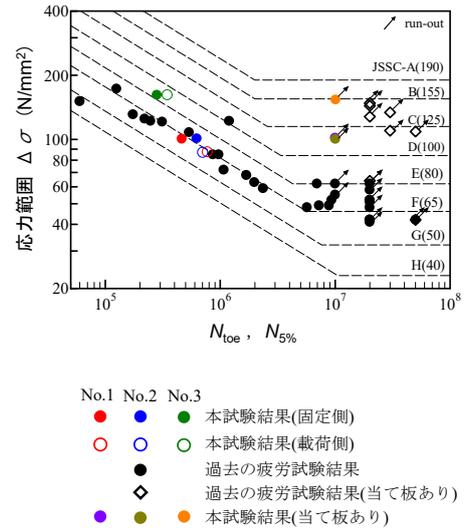


図-13 N<sub>5%</sub>のS-N関係

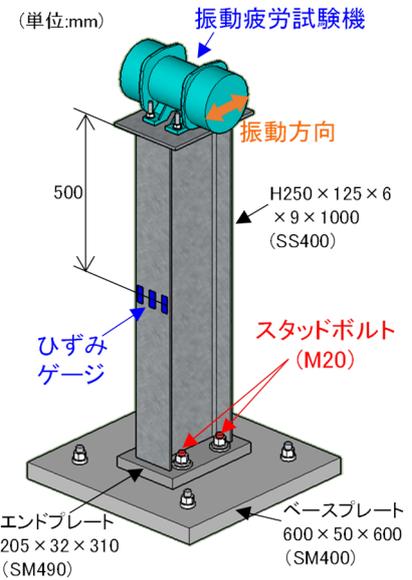


図-14 面外疲労試験概要

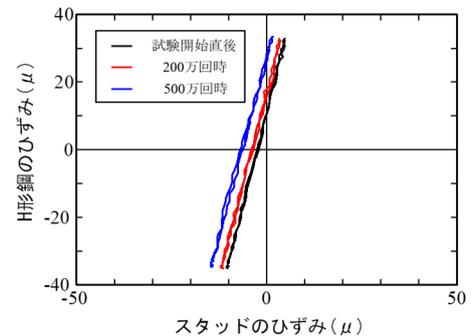


図-15 面外疲労試験の鋼材応力変化

スタッドボルト基部に  $100\text{N}/\text{mm}^2$  を与える曲げモーメントがエンドプレート下面に生じるように、H 形鋼に設置したひずみゲージで応力を計測し、振動疲労試験機の出力を調整した。

### 3.2.2 実験結果

図-15 は、H 形鋼天端から 500mm の位置で計測したひずみとスタッドボルト軸部で計測したひずみの関係を示したものである。载荷初期、繰返し回数 200 万回および 500 万回の結果を示しているが、繰返し回数 500 万回でも試験結果の傾きが変化していないことからスタッドボルト軸部に疲労き裂が発生していないと判断できる。なお、スタッドボルト軸部のひずみが繰返し回数増加とともに中央値が若干変動しているのは、リラクセーションによるひずみの抜けと推察されるが、導入軸力によるひずみが  $1,500\mu$  程度であることを鑑みると変動は少なく、影響は小さいと考える。また、試験終了後にベースプレートから H 形鋼を取り外し、スタッドボルトの溶接部の磁気探傷試験 MT を行い、すべてのスタッドボルトの溶接止端部に疲労き裂が発生していないことを確認した (図-16)。

### 4. まとめ

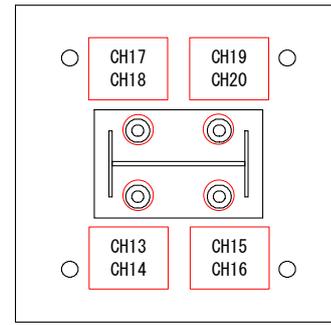
引張試験の結果より、呼び径が M20 のスタッドボルトの横向き溶接は、静置と振動のいずれの条件でも引張強度に大きな影響を及ぼさず、耐荷性能に問題ないことが確認できた。疲労試験の結果より、スタッドボルトを横向き溶接した場合でも、面内および面外のいずれの疲労強度も、当て板がある場合は十分に設計疲労荷重に耐えられるものであることが確認できた。また面内疲労試験については、当て板がない場合でも、既往の鉛直下向き施工のスタッドと同等の疲労強度を有することから、スタッドボルトを横向き施工する影響はないことが確認できた。

### 謝辞

本試験の計画から実施において、多大なるご指導とご支援を頂きました大阪公立大学・山口隆司教授、関西大学・石川敏之教授、西日本高速道路(株)の皆様、(株)駒井ハルテックの皆様および全ての関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 河中涼一, 橋野哲郎, 福田雅人, 井田和輝: 波形鋼板ウェブ橋のストラット下端接合部に関する検討—杉谷川橋 下り線—, プレストレストコンクリート工学会 第 32 回シンポジウム論文集, pp. 119-122, 2023. 10
- 2) 石川敏之, 上田宗: スタッド溶接継手の板曲げ疲労強度, 構造工学論文集, Vol. 67A, pp. 488-496, 2021



検査箇所平面図

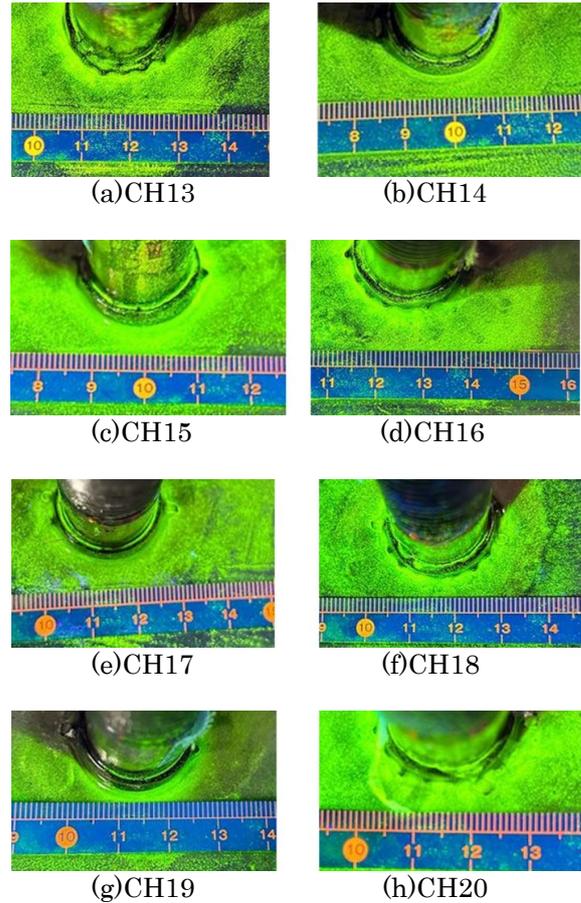


図-16 スタッドボルト溶接部の磁気探傷試験