

# カップラージョイントスタッドのせん断耐力および疲労強度特性

Characteristics of shear capacity and fatigue strength of the stud jointed with a coupler

石川 敏之\*, 寺田 典生\*\*, 福永 靖雄\*\*\*, 中村 和己†, 田中 一††

Toshiyuki ISHIKAWA, Norio TERADA, Yasuo FUKUNAGA, Kazumi NAKAMURA, Hajime TANAKA

\*工修, 駒井鉄工株式会社, 技術本部技術研究室 (〒293-0011 千葉県富津市新富 33-10)

\*\*日本道路公団静岡建設局, 構造技術課 課長 (〒420-0857 静岡県静岡市御幸町 11-30 エクセルワード静岡ビル 14F)

\*\*\*日本道路公団静岡建設局, 構造技術課 課長代理 (〒420-0857 静岡県静岡市御幸町 11-30 エクセルワード静岡ビル 14F)

†日本道路公団静岡建設局, 構造技術課 (〒420-0857 静岡県静岡市御幸町 11-30 エクセルワード静岡ビル 14F)

††日本道路公団静岡建設局 清水工事事務所, 清水中工事区 工事長 (〒424-0014 静岡県清水市庵原町 219-11)

The shear connector that is adopted for the NAKANOSAWA Bridge is a stud jointed with a coupler. Height of the stud is 280mm and the effective diameter is 22mm. Shear capacity and fatigue strength of this type of the stud has not been reported in the past. The purpose of this study is to investigate the characteristic of shear capacity and fatigue strength of the stud. In the first, authors carry out push-out tests for some arrangements of these studs and carry out push-out test for a stud which has no coupler to compare. Authors obtain the shear capacities and the slippage characteristics of these studs by push-out tests. Next, authors carry out some push-out fatigue tests to know fatigue strengths of these studs. In this paper, characteristics of shear capacity and fatigue strength of stud jointed with coupler are described.

Key Words: stud jointed with coupler, shear capacity, fatigue strength, slippage characteristic  
 キーワード: カップラージョイントスタッド, せん断耐力, 疲労強度, ずれ定数

## 1. はじめに

現在, 建設が進められている第二東名高速道路中之沢橋(以後, 中之沢橋)は, PC床版を有する鋼2主桁橋である。全幅員は, 上り線最大19.107m, 下り線17.510mであり, 床版支間は上り線11.5m, 下り線10.0mである。したがって, 従来のRC床版より耐久性の高いPC床版を採用している。床版厚は主桁上で上下線それぞれ560, 550mm, 支間中央では上下線それぞれ370, 360mmであり, 下面が放物線形状の床版である。PC床版と鋼桁とのずれ止めには日本道路公団設計要領第二集<sup>1)</sup>に規定されているスタッドジベルを用いている。

中之沢橋のPC床版は主桁上で床版厚が560mm(上り線)と従来のPC床版と比べて非常に厚い。Eurocode4<sup>2)</sup>によると, 縦方向せん断力に対する照査が規定されており, 床版が厚くなった場合, 床版内の水平せん断力が大きくなるため, スタッド長さをある程度確保しなければならないという規定がある。これらを考慮して, スタッド長さを十分確保することを考え $H=280\text{mm}$ (床版厚の1/2)とした。

中之沢橋の主桁高さは, フランジを含め2950mmである。本橋で使用するスタッドは, 長さ $H=280\text{mm}$ であるため, 輸送上の制約により, 現場で溶植するか, もしくはカップ

ラーで継ぐ形式を用いなければならない。本橋では現場工程およびスタッド溶接の品質管理を考慮してカップラーで継ぐ形式を採用した。カップラーで継ぐ形式では, カップラーの位置が問題となる。既往の研究では, スタッドの長さ $H$ と直径 $d$ との比 $H/d$ が5.5以上の場合, スタッドの変形は根元部に集中すると報告されている<sup>3)</sup>。したがって, スタッド根元部にカップラーを設けると, スタッドのせん断耐力, 変形状態が通常のスタッドの特性と異なると考えられる。さらに, スタッドのせん断耐力はスタッド根元部のコンクリートの充填状態により大きく左右されると報告されている<sup>4)</sup>。そのため, カップラーの位置はコンクリートが完全に充填される粗骨材最大寸法(25mm)よりも高い位置とし, さらに輸送上の制約を考慮した高さに設け

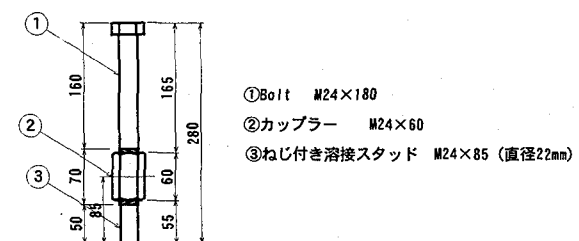


図-1 カップラージョイントスタッド

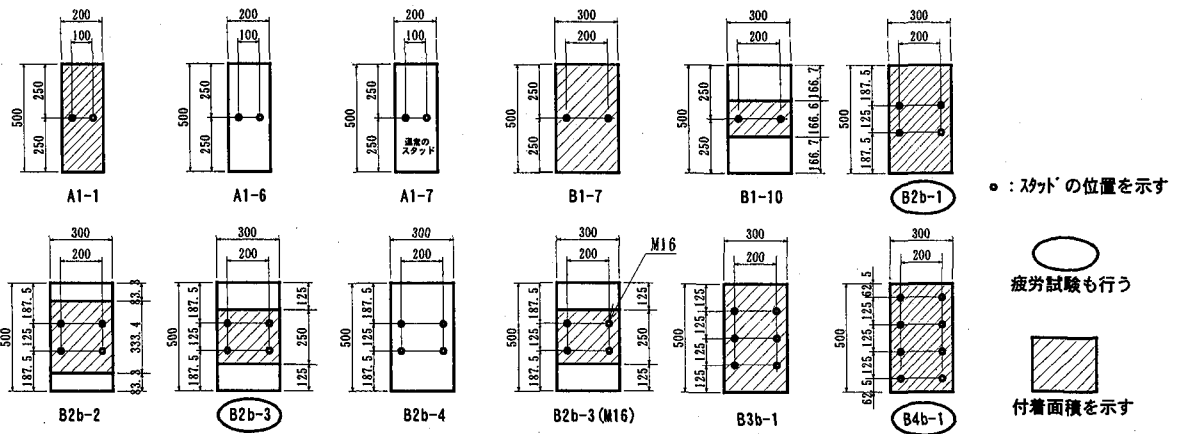


図-2 スタッドの配置および付着面積形状

た。本橋で用いるスタッドの詳細を図-1に示す。

本論文では、図-1に示す  $H/d=11.7$  という通常よりも長尺なカップラー付きスタッド（以下、カップラージョイントスタッド）の静的せん断耐力を明らかにし、道路橋示方書・同解説<sup>9)</sup>（以下、道示）によるスタッドの設計方法が、図-1に示している長尺のカップラージョイントスタッドの設計に用いることができることを確認した。スタッドの疲労にも着目し、設計で用いた活荷重範囲を繰返し载荷し、疲労の安全性を確認した。さらに、コンクリート床版と鋼桁との合成度の評価の一つであるずれ定数  $K$  に着目し、付着の有無によるずれ定数  $K$  の変化および繰返し荷重を受けるスタッドのずれ定数  $K$  の変化を調べた。

## 2. 静的押抜き試験および押抜き疲労試験

### 2.1 実験供試体

本実験で用いた静的押抜き試験および押抜き疲労試験供試体のスタッド配置および付着面積を図-2に示す。実験供試体は日本鋼構造協会 頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）<sup>7)</sup>（以下、JSSC 試験法）を参考とし、実橋のスタッド配置、コンクリートと鋼との付着の影響を考慮した。供試体 A グループのコンクリートブロック寸法は  $560 \times 600 \times 550\text{mm}$ 、供試体 B グループは  $560 \times 800 \times 600\text{mm}$  とした。主桁の端支点部ではスタッドの配置が密になるため、列方向の影響についても確認できる供試体とした。スタッドの実験は JSSC 試験法に示されているように、1列配置での実験が一般的である。しかし、多列配置のスタッドのせん断耐力が 1列配置でのスタッドのせん断耐力よりも低下すると報告<sup>8)</sup>されていることもあり、スタッド配置が密になる端部のモデルを考へて 3列、4列配置の実験を行い、多列による影響も調査した。さらに、スタッドの橋軸直角方向の間隔も変化させ比較を行った。付着面積については、JSSC 試験法で示されている標準の試験方法に則した供試体（付着の人工剥離）に加え、付着を全面有効にした供試体、さらにスタッドが受け持つ水平せん断力の範囲を付着させた供試体を用意した。

疲労試験供試体は、繰返し荷重が载荷されるスタッドの

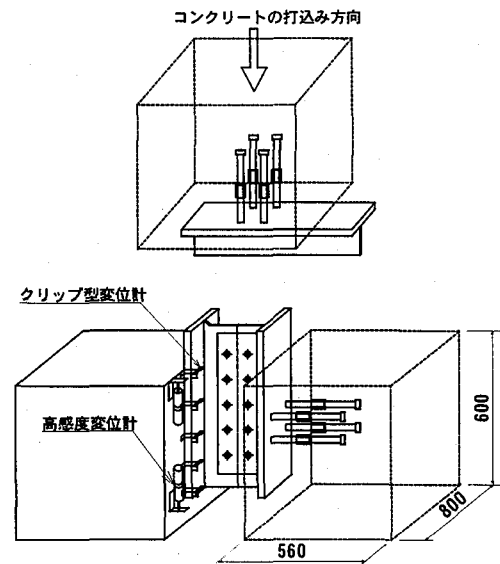


図-3 コンクリートの打込み方向および実験供試体

ずれ定数  $K$  に着目し、付着の影響を考慮した供試体とした。疲労試験についても、スタッド配置が密な端支点付近に着目しているためスタッドの列方向の影響を考慮した試験体を用意した。さらに、多列配置のスタッドの疲労の影響を確認するために最大 4 列配置の疲労供試体を用意した。

供試体のコンクリート打込み方向は実橋と同じ方向（正立<sup>4)</sup>）とした（図-3）。使用するスタッドは実橋で用いる形状（図-1）とし、さらにそれに対応する寸法を有する通常のスタッド（ $D22, H=280\text{mm}$ ）の試験も行った。使用するコンクリートは圧縮強度  $40\text{N/mm}^2$  を有する PC 床版用コンクリートとし、日本道路公団 土木工事共通仕様書<sup>9)</sup>に従って配合した。鋼フランジ部材は SM490Y 材を用いた。コンクリートと鋼との接触面は実橋と同じ条件（素地調整程度 G-a、機能性プライマー）<sup>10)</sup>となるように表面処理を施した。さらにコンクリートと鋼との人工剥離は、鋼フランジに紙製のクラフトテープを貼付し、その上にグリスを添布することで人工剥離させた。表-1に材料試験結果を示す。

### 2.2 実験方法および測定項目

表-1 材料試験結果  
コンクリートの強度試験結果

| No | 材令<br>日 | 養生 | 圧縮強度              | 引張強度              | ポアソン比 | ヤング係数                |
|----|---------|----|-------------------|-------------------|-------|----------------------|
|    |         |    | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |       | N/mm <sup>2</sup>    |
| 1  | 7       | 水中 | 43.3              | 3.78              | —     | —                    |
| 2  | 28      | 水中 | 50.6              | 4.59              | —     | —                    |
| 3  | 28      | 気中 | 47.5              | 3.06              | 0.180 | 2.88×10 <sup>7</sup> |
| 4  | 89      | 気中 | 49.4              | 3.65              | 0.186 | 2.91×10 <sup>7</sup> |

鋼部材の引張試験結果

|      | 鋼種      | 板厚<br>mm | 試験片形状           | 降伏点               | 引張強さ              | 伸び |
|------|---------|----------|-----------------|-------------------|-------------------|----|
|      |         |          |                 | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | %  |
| フランジ | SM490YB | 28       | JIS Z 2201 1A 号 | 398               | 540               | 31 |
| ウェブ  | SM490YB | 20       | JIS Z 2201 1A 号 | 420               | 547               | 27 |

スタッドの材料試験結果

| スタッド寸法     | 降伏点               | 引張強さ              | 破断位置 (3体)   | 伸び   | 曲げ試験<br>(3体) |
|------------|-------------------|-------------------|-------------|------|--------------|
|            | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |             | %    |              |
| M24×85×35S | —                 | 458               | 3-軸部        | —    | 割れなし         |
| M16×85×35S | —                 | 531               | 2-軸部, 1-ねじ部 | —    | 割れなし         |
| D22×280    | 308.0             | 447               | 3-軸部        | 34.2 | 割れなし         |

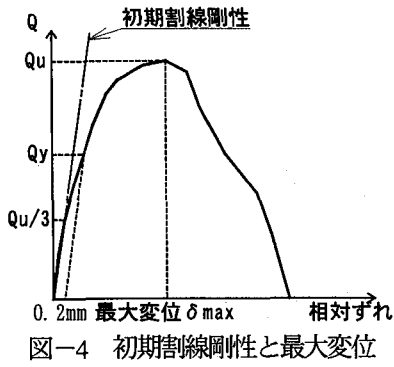


図-4 初期割線剛性と最大変位

静的押抜き試験は JSSC 試験法に従い、全ての供試体において荷重・除荷を繰返す漸増繰返し荷重とした。押抜き疲労試験は、静的押抜き試験により明らかにした付着荷重範囲、設計で用いる活荷重範囲および過去の疲労試験結果より決定された S-N 曲線<sup>11)</sup>を用いて算出した荷重範囲 (以後、終局荷重範囲) を圧縮側の片振りで繰返し荷重した。活荷重範囲については、活荷重により発生する上り線の端支点付近の水平せん断力を用いている。

計測は 4 辺の上下端のコンクリートと鋼との相対ずれを高感度変位計およびクリップ型変位計を用いて計測した。計測機器の取付け位置を図-3 に示す。

表-2 スタッド実験結果一覧

| 供試体        | スタッド形状            | スタッド      | スタッド        | 付着面積<br>縦 × 横<br>mm × mm | 最大荷重<br>Pmax<br>kN | せん断<br>耐力 Qu<br>kN/本 | せん断<br>耐力比<br>Qu/Oa | 付着<br>荷重<br>kN | 降伏<br>荷重 Qy<br>kN/本 | 降伏<br>荷重比<br>Qy/Qa | 最大変位<br>δ max<br>mm | ずれ定数<br>K<br>kN/mm/本 |
|------------|-------------------|-----------|-------------|--------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
|            |                   | 本数 N<br>本 | 高さ Hs<br>mm |                          |                    |                      |                     |                |                     |                    |                     |                      |
| A1-1       | M24カップラージョイントスタッド | 4         | 280         | 500 × 200                | 1107               | 277                  | 9.7                 | 98             | 119                 | 4.2                | 8.02                | 322.7                |
| A1-6       | M24カップラージョイントスタッド | 4         | 280         | 0 × 0                    | 1033               | 258                  | 9.1                 | —              | 98                  | 3.4                | 10.08               | 215.9                |
| A1-7       | D22頭つきスタッド        | 4         | 280         | 0 × 0                    | 829                | 207                  | 7.3                 | —              | 77                  | 2.7                | 20.41               | 164.0                |
| B1-7       | M24カップラージョイントスタッド | 4         | 280         | 500 × 300                | 1006               | 252                  | 8.9                 | 196            | 143                 | 5.0                | 9.04                | 675.7                |
| B1-10      | M24カップラージョイントスタッド | 4         | 280         | 167 × 300                | 901                | 225                  | 7.9                 | 78             | 125                 | 4.4                | 8.27                | 490.9                |
| B2b-1      | M24カップラージョイントスタッド | 8         | 280         | 500 × 300                | 1694               | 212                  | 7.5                 | 216            | 134                 | 4.7                | 11.11               | 742.9                |
| B2b-2      | M24カップラージョイントスタッド | 8         | 280         | 333 × 300                | 1695               | 212                  | 7.5                 | 216            | 127                 | 4.5                | 6.64                | 724.7                |
| B2b-3      | M24カップラージョイントスタッド | 8         | 280         | 250 × 300                | 1846               | 231                  | 8.1                 | 137            | 128                 | 4.5                | 8.06                | 584.3                |
| B2b-4      | M24カップラージョイントスタッド | 8         | 280         | 0 × 0                    | 1629               | 204                  | 7.2                 | —              | 107                 | 3.8                | 8.55                | 347.6                |
| B2b-3(M16) | M16カップラージョイントスタッド | 8         | 280         | 250 × 300                | 873                | 109                  | 8.8                 | 118            | 67                  | 5.4                | 5.74                | 494.0                |
| B3b-1      | M24カップラージョイントスタッド | 12        | 280         | 500 × 300                | 2269               | 189                  | 6.7                 | 177            | 123                 | 4.3                | 6.06                | 462.2                |
| B4b-1      | M24カップラージョイントスタッド | 16        | 280         | 500 × 300                | 3526               | 220                  | 7.8                 | 275            | 136                 | 4.8                | 6.94                | 533.4                |

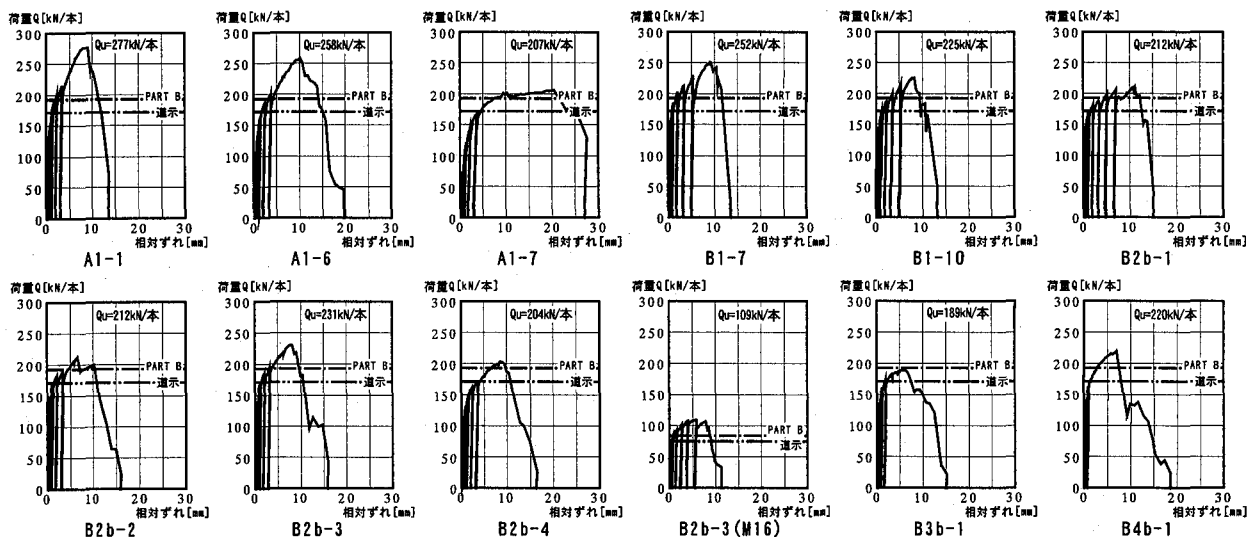


図-5 荷重と相対ずれとの関係

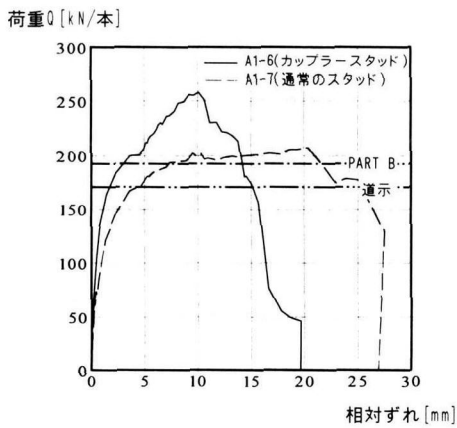


図-6 カップラーによる影響

### 3. 試験結果

#### 3.1 静的押抜き試験結果

静的押抜き試験結果を表-2に示す。試験体は全てスタッドのせん断による破壊であった。表-2には、最大荷重  $P_{max}$ 、スタッド1本当たりのせん断耐力  $Q_u$ 、せん断耐力比  $Q_u/Q_a$ 、付着荷重、降伏荷重  $Q_y$ 、降伏荷重比  $Q_y/Q_a$ 、最大変位  $\delta_{max}$ 、ずれ定数  $K$  を示している。

せん断耐力  $Q_u$  は最大荷重  $P_{max}$  をスタッドの本数で除した値である。せん断耐力比はせん断耐力  $Q_u$  をコンクリートの設計基準強度を用いて算出した道示のスタッドの許容せん断力  $Q_a$  で除した値である。付着荷重は荷重と変位の関係が急変した変曲位置の荷重とした。降伏荷重  $Q_y$  は図-4に示しているように、0.2mm オフセットで求めた。降伏荷重比はせん断耐力比と同様に  $Q_y$  を  $Q_a$  で除した値である。最大変位  $\delta_{max}$  は図-4に示すように、せん断耐力  $Q_u$  発生点での相対ずれである。ずれ定数  $K$  は図-4に示すようにせん断耐力  $Q_u$  の1/3倍の荷重点での初期割線剛性を示す。

##### (1) せん断耐力

図-5に荷重と相対ずれとの関係を示す。相対ずれは、高感度変位計とクリップ型変位計の平均値を用いている。同図に道示および鋼構造物設計指針 PART B<sup>12)</sup> (以下、PART B)によるせん断耐力を示している。道示によると、

スタッドのせん断耐力は許容せん断力の6倍以上の安全率をもつと記されているため、道示によるせん断耐力は許容せん断力  $Q_a$  の6倍とした。PART Bによるスタッドのせん断耐力は、PART Bの第5編 資料編「C.頭付きスタッドの強度評価式の検討」を参考にし平均値の式を用いている。せん断耐力は次式で示される。

$$Q_u' = 63d^2(\sigma_{ck})^{0.5} \quad (H/d \geq 5.5) \quad (1)$$

ここに、 $Q_u'$ ：スタッド1本当たりのせん断耐力(N/本)、 $d$ ：スタッドの直径(mm)、 $\sigma_{ck}$ ：コンクリートの圧縮強度( $N/mm^2$ )、 $H$ ：スタッドの長さ(mm)

供試体 B3b-1 を除いた全ての試験体において、道示および PART B によるせん断耐力を有していることが確認できた。

##### (2) カップラーによる影響

図-6にカップラージョイントスタッドと通常のスタッドの荷重と相対ずれとの関係を示す。この図より、カップラージョイントスタッドと通常のスタッドでは、最大荷重の大きさおよび最大荷重発生以後の相対ずれの収束度合いに相違が見られた。これは、通常のスタッドは D22 であるのに対し、カップラージョイントスタッドはねじ付きスタッドの直径は 22mm であるが、カップラーおよびボルトは M24 であるため通常のスタッドよりも剛性が高い。したがって、カップラージョイントスタッドと通常のスタッドとは終局時の変形状態が異なると考えられる。しかし、スタッドの設計を考えると、通常のスタッドと同様にカップラージョイントスタッドのせん断耐力も 1/6 以下であるため、道示で示されているスタッドの許容せん断力を用いた設計で良いと言える。

##### (3) 橋軸直角方向間隔による影響

図-7にせん断耐力と橋軸直角方向スタッド間隔との関係を示す。コンクリート側の破断面のコンクリート剥離およびクラック形状を図-8に示す。図-7よりも明らかにように、橋軸直角方向間隔が広くなるとせん断耐力が低下する。これは、橋軸直角方向のスタッドの間隔を広くすることにより、それぞれのスタッドに均一に力が作用しないためであると考えられる。したがって、橋軸直角方向間隔の影響を考慮したスタッドのせん断耐力を明らかにするためには、実橋でのスタッド間隔を用いた実験を行うのが望ま

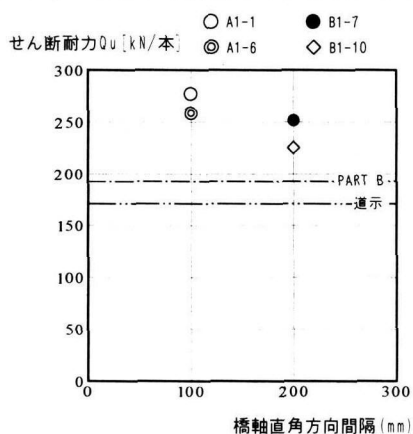
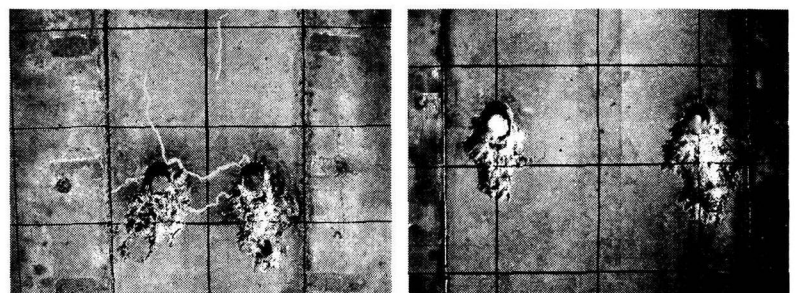


図-7 橋軸直角方向間隔による影響



供試体 A1-1

供試体 B1-7

図-8 コンクリートの破断面

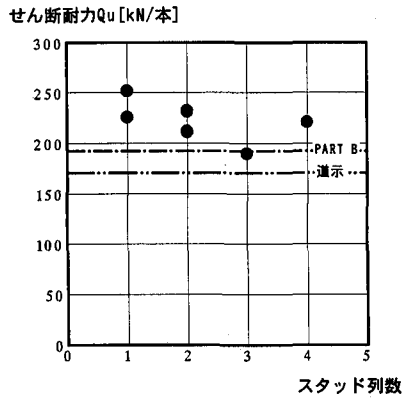


図-9 橋軸方向列数による影響

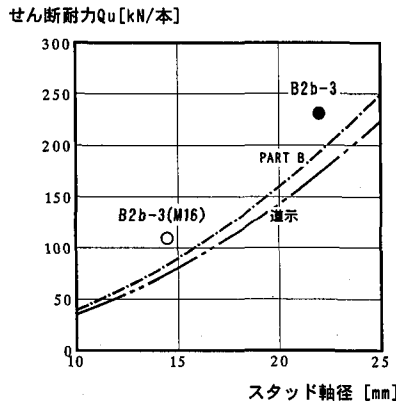


図-10 スタッドの軸径による影響

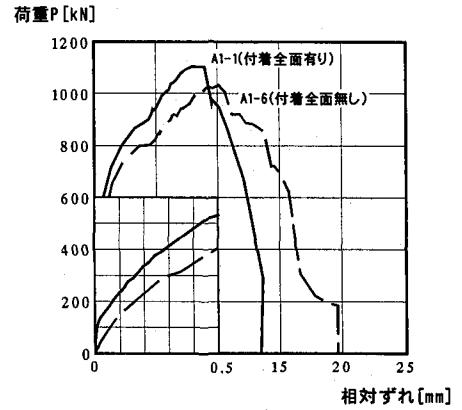


図-11 付着の有無による影響

しい。

(4) 橋軸方向列数による影響

図-9にせん断耐力と橋軸方向スタッド列数との関係を示す。実橋の橋軸方向スタッド間隔の最小値は端支点付近の125mmであることから、供試体のスタッド間隔は125mmピッチとした。この図より明らかなようにスタッドの列数が多い供試体のせん断耐力は、スタッドが一列配置の供試体のせん断耐力よりも低下している。これは、個々のスタッドに均等にせん断力が作用しないため、せん断耐力が低下したと考える。したがって、端支点付近のように密なピッチで配置されているスタッドのせん断耐力は、スタッド単体ではなく、多列（もしくは群）の挙動を考慮したせん断耐力を用いることが適切であると考えられる。その場合、図-9よりも明らかなように、3列配置において若干小さな値となったが、4列配置の結果を考えると多列による影響は2列配置の供試体により考慮されることが考えられる。今後、図-9の相関をより明らかにするために、多列配置によるスタッドのせん断耐力のデータ蓄積が必要である。

(5) スタッドの軸径による影響

図-10にせん断耐力とスタッドの軸径との関係を示す。スタッドの軸径はねじ付き溶接スタッドの軸部の直径を示している。道示によると、スタッドの許容せん断力は  $H/d \geq 5.5$  においてコンクリート強度が等しい場合は、スタッドの軸径の2乗（もしくは面積）に比例して増加する。これは、式(1)に示す通り、PART Bも同様である。図-10よりも明らかなように、カップラージョイントスタッドにおいても、せん断耐力は軸径の2乗に比例する傾向があると考えられる。

(6) 付着の有無による影響

図-11に供試体A1-1とA1-6との荷重と相対ずれとの関係を示す。相対ずれの小さな範囲を一部拡大している。この図からも明らかなように、小さな荷重において付着が有る供試体A1-1の相対ずれは、付着を人工剥離した供試体A1-6よりも小さいことがわかる。この影響により、3.3節で述べるずれ定数Kの値も異なる結果を得た。

3.2 押抜き疲労試験結果

表-3 疲労試験結果一覧

| 疲労試験供試体(スタッド)   | 荷重ケース    | 上限荷重       | 下限荷重       | 荷重範囲             | 繰返し回数       | 備考   |
|-----------------|----------|------------|------------|------------------|-------------|------|
|                 |          | Pmax<br>kN | Pmin<br>kN | $\Delta P$<br>kN | Ni<br>cycle |      |
| B2b-1F<br>(8本)  | 活荷重範囲*   | 202.0      | 53.9       | 148.1            | 2,000,000   | —    |
|                 | 2倍の活荷重範囲 | 404.0      | 107.9      | 296.2            | 2,000,000   | —    |
|                 | 終局荷重範囲   | 660.0      | 175.5      | 484.4            | 2,000,000   | —    |
| B2b-3F<br>(8本)  | 付着荷重範囲   | 117.7      | 31.4       | 86.3             | 2,000,000   | —    |
|                 | 活荷重範囲    | 202.0      | 53.9       | 148.1            | 2,000,000   | —    |
|                 | 終局荷重範囲   | 931.6      | 248.1      | 683.5            | 501,112     | 疲労破断 |
| B4b-1F<br>(16本) | 付着荷重範囲   | 255.0      | 67.7       | 187.3            | 2,000,000   | —    |
|                 | 活荷重範囲    | 404.0      | 107.9      | 296.2            | 2,000,000   | —    |
|                 | 2倍の活荷重範囲 | 808.0      | 215.8      | 592.4            | 2,000,000   | —    |

\*) 付着荷重範囲と活荷重範囲が同じ

荷重範囲  $\Delta Q$  [kN/本]

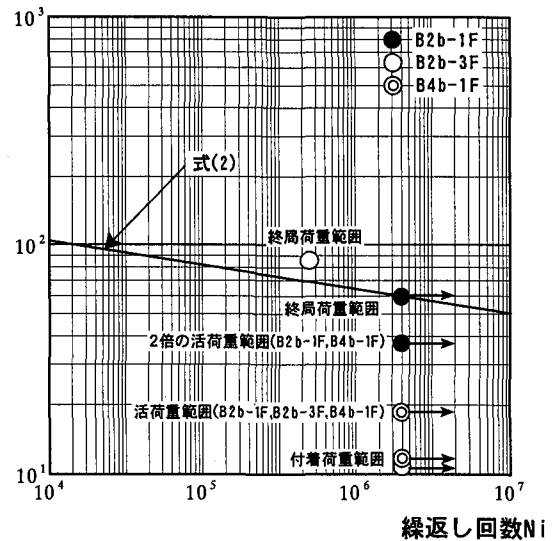


図-12 荷重範囲と繰返し回数の関係

(1) スタッドの疲労強度

図-2に示す3体の疲労試験供試体を用いて疲労試験を行った。スタッド1本当たりの付着面積が実橋のものと等しい疲労試験供試体2b-3F, B4b-1Fに加え、付着の疲労への影響を考えて全面付着の疲労試験供試体B2b-1Fを用いた。各供試体毎に、付着荷重範囲、活荷重範囲（もしくは2倍の活荷重）および終局荷重範囲の試験を行った。付着荷重範囲は静的押抜き試験の結果より付着が剥離した荷重より20kN程度下げた値を上限荷重Pmaxとした。活荷

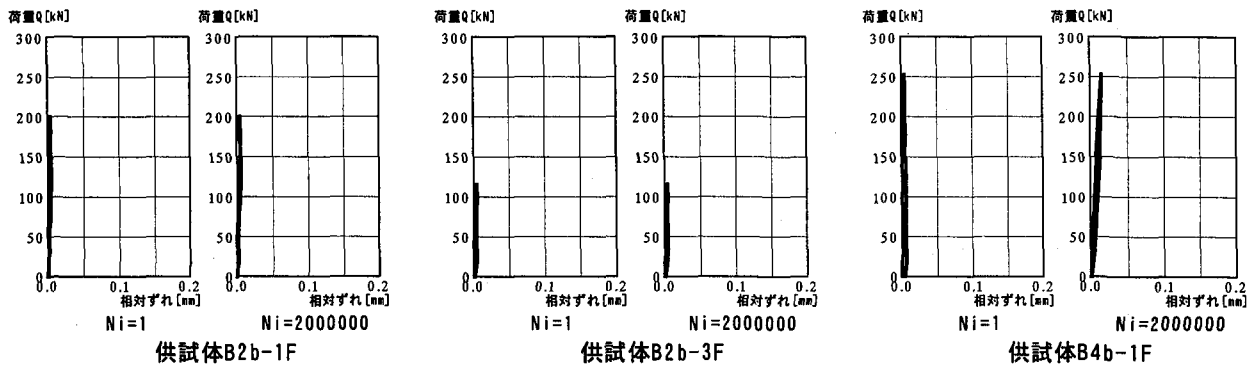


図-13 Ni=1回, 200万回の荷重と相対ずれとの関係

重範囲は、実橋の桁端部のスタッドの設計に用いた活荷重範囲とした。終局荷重範囲は、過去の事例<sup>11)</sup>で示されているスタッドのS-N曲線より算出した荷重範囲を用いて疲労試験を行った。荷重比Rは設計で用いた合成後死荷重と活荷重+合成後死荷重との比( $R=0.266$ )とした。疲労試験の上限荷重Pmax, 下限荷重Pmin, 載荷荷重範囲 $\Delta P$ および繰返し回数Niを表-3に示す。繰返し回数の上限は200万回とした。

疲労試験結果を図-12に示す。縦軸に荷重範囲 $\Delta Q$  ( $\Delta P$ /スタッド本数), 横軸に繰返し回数Niを示している。疲労発生寿命Niは、残留ずれが大幅に変化したときの繰返し回数を用いている。同図に、過去の事例<sup>11)</sup>で示されているスタッドのS-N曲線を示している。この図より、本試験で行ったカップラージョイントスタッドの荷重範囲 $\Delta Q$ と繰返し回数Niの関係は、下式に示す過去の事例<sup>11)</sup>によるスタッドのS-N曲線式を満足した。

$$\log Ni = 1.02 - 9.52 \log(\Delta Q / Qu) \quad (2)$$

ここに、Ni: 繰返し回数,  $\Delta Q$ : スタッド1本当たり作用する繰返し荷重範囲 (kN/本), Qu: スタッド1本当たりのせん断耐力 (kN/本)

図-12に示している式(2)のせん断耐力Quの値は、静的押抜き試験結果のうち2列配置の供試体B2b-1~4の4体のせん断耐力の平均値 ( $Qu=215$  kN/本) を用いている。

式(2)を用いて活荷重範囲の荷重が繰返し載荷された場合の疲労発生寿命Niを算出すると、 $Ni=1.44 \times 10^{11}$  回とな

る。したがって、活荷重範囲の荷重の繰返しにおいて、本研究で用いたカップラージョイントスタッドは疲労に対して安全であると言える。

(2) 付着荷重範囲による疲労

各疲労試験供試体において、付着荷重範囲の荷重を繰返し載荷させた。繰返し回数の上限は200万回とした。各疲労試験供試体の初期載荷(Ni=1)と付着荷重範囲の疲労試験終了時(Ni=200万回)について荷重と相対ずれとの関係を図-13に示す。疲労試験供試体B4b-1Fでは、繰返し回数150万回の計測の時点で剥離が生じ付着が減少していた。それ以外の試験体では、繰返し回数200万回の時点でも付着が良好で剥離は生じていなかった。疲労試験供試体B4b-1Fについては、付着力のばらつきが原因であると考える。

(3) 疲労試験終了後の荷重と相対ずれとの関係

疲労試験供試体B2b-3F, B4b-1Fにおいて、疲労試験終了後に押抜き試験を行った。それぞれの荷重と相対ずれとの関係を図-14, 15に示す。図-14には供試体B2b-3, B2b-4, 図-15には供試体B4b-1の静的押抜き試験結果も示している。

図-14に示すように、疲労試験供試体B2b-3Fはスタッドに疲労亀裂が発生しているため、小さな荷重でも相対ずれが大きく表れている。さらに、せん断耐力Quは152 kN/本と小さな値となった。疲労試験供試体B4b-1Fは、全ての荷重範囲において疲労破断しなかった。図-15よりも

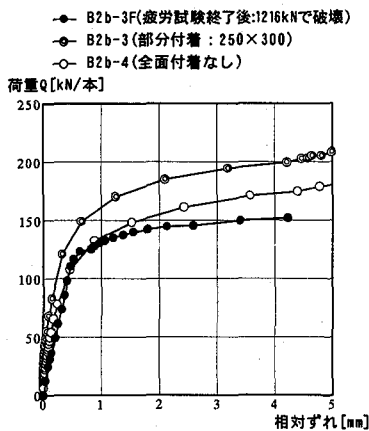


図-14 荷重と相対ずれとの関係 (疲労試験供試体 B2b-3F)

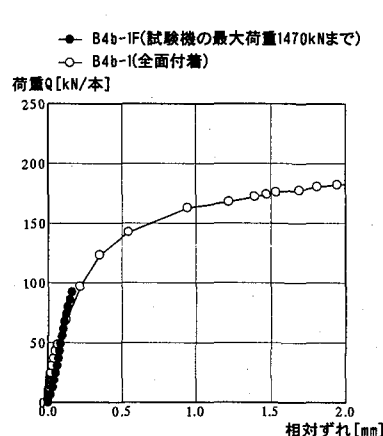


図-15 荷重と相対ずれとの関係 (疲労試験供試体 B4b-1F)

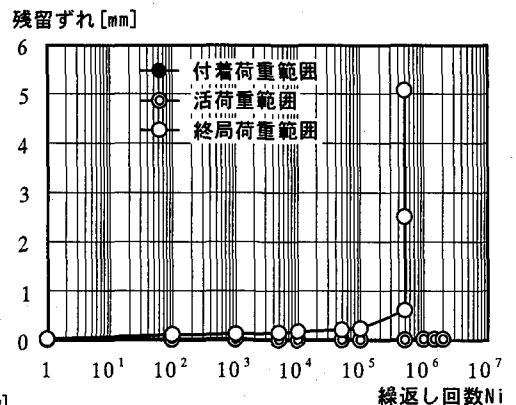


図-16 残留ずれと繰返し回数との関係 (疲労試験供試体 B2b-1F)

ずれ定数K [kN/mm/本]

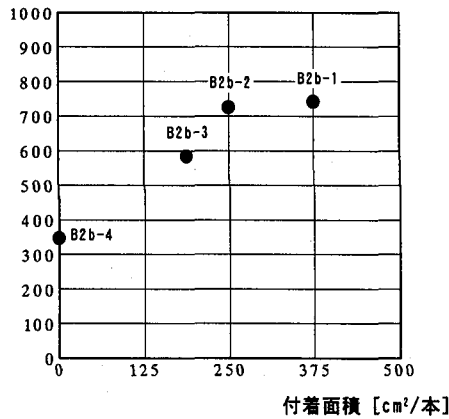


図-17 ずれ定数と付着面積との関係

明らかなように疲労試験供試体 B4b-1F は、静的押抜き試験の供試体 B4b-1 の荷重と相対ずれとの関係と比べて差は見られない。ただし、疲労試験を行った試験機の载荷能力が最大 1470kN であるため、疲労試験供試体 B4b-1F の静的载荷は  $P=1470\text{kN}$  ( $Q=92\text{kN/本}$ ) までとした。この結果より、2 倍の活荷重範囲の荷重を繰返し回数 200 万回載荷させても、荷重と相対ずれとの関係に影響は無いと言える。

(4) 疲労荷重下での残留ずれ

図-16 に、疲労試験下での残留ずれと繰返し回数の関係を示す。疲労試験供試体 B2b-3F の値を示している。この図より明らかなように、付着荷重範囲および活荷重範囲の荷重の繰返しにおいて残留ずれはほとんど生じていない。しかし、疲労破断が生じた終局荷重範囲においては、徐々に残留ずれが増加しており、残留ずれが 0.6mm (繰返し回数  $N_i=50$  万回の計測) に達した直後、残留ずれが急激に増加した。

3. 3 スタッドのずれ定数 K

(1) ずれ定数 K と付着面積との関係

供試体 B2b-1~4 のずれ定数 K とスタッド 1 本当たりの付着面積との関係を図-17 に示す。この図より、ずれ定数 K は、スタッド 1 本当たりの付着面積に比例して増加している。したがって、ずれ定数 K はスタッド 1 本当たりの付着面積に大きく左右されると言える。

(2) 疲労過程でのずれ定数 K

図-18 に各疲労試験供試体の繰返し回数  $N_i$  とその時のずれ定数  $K_i$  との関係を示す。同図には、各疲労試験供試体と同じ供試体の静的押抜き試験のずれ定数 K も示している。ずれ定数  $K_i$  は 3.1 節で述べた方法で算出した。ただし、活荷重、2 倍の活荷重範囲のずれ定数  $K_i$  は、疲労試験の上限荷重  $Q_{max}$  と、その時点での相対ずれを用いて算出した。これは、活荷重範囲の上限荷重  $Q_{max}$  が静的押抜き試験により得られたせん断耐力  $Q_u$  の 1/3 を越えていないためである。この図からも明らかなように、ずれ定数  $K_i$  と繰返し回数  $N_i$  は一定の傾きを有することがわかる。

表-4 各荷重範囲の傾き m の値

| 供試体    | 活荷重範囲 | 2倍の活荷重範囲 | 終局荷重範囲 |
|--------|-------|----------|--------|
| B2b-1F | —     | 48.4     | 39.7   |
| B2b-3F | 16.1  | —        | 27.9   |
| B4b-1F | 62.7  | 51.1     | —      |

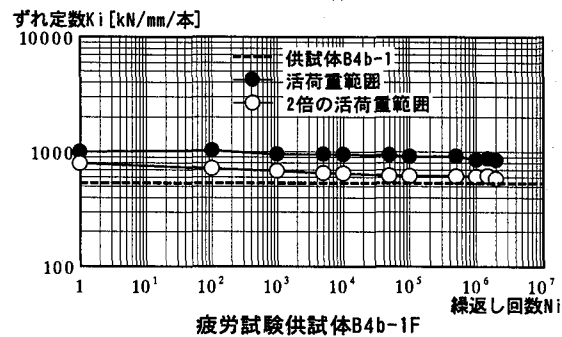
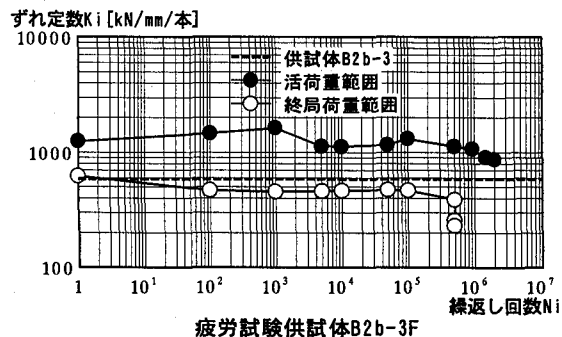
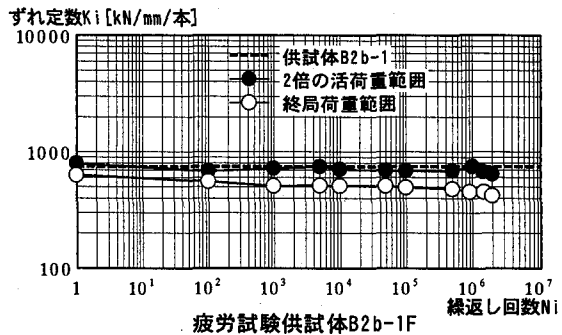


図-18 ずれ定数と繰返し回数との関係

したがって、一定の傾き m を有する両対数グラフの直線式を考える。

$$K_i^m \times N_i = \text{一定} \quad (3)$$

ここに、 $N_i$ : 繰返し回数,  $K_i$ :  $N_i$  でのずれ定数 (kN/mm/本)

最小二乗法を用いて算出した各疲労試験供試体の各荷重範囲の傾き m を表-4 に示す。疲労試験供試体 B2b-3F の活荷重範囲に対する傾き m の値が他の傾き m の値よりも小さい。この違いは、疲労試験供試体 B2b-3F の活荷重範囲に対する  $K_i$  と  $N_i$  との関係が、他のケースよりも大きくばらついていることが原因であると言える。

今後、これらの値を蓄積し疲労荷重荷重でのずれ定数 K の評価を行うのが良いと考える。

4. 結論

中之沢橋のPC床版と鋼桁とのずれ止めとして用いている長尺のカップラージョイントスタッドの静的押抜き試験、押抜き疲労試験を行った結果、下記の結果を得た。

- 1) 長尺なカップラージョイントスタッドのせん断耐力は道示に示されているせん断耐力を満足しており、道示にしたがって設計すれば安全である。
- 2) 端支点付近などスタッドの配置が密な場合の影響を考慮したせん断耐力を調べるためには、実橋のスタッド配置（橋軸方向、橋軸直角方向）の供試体を用いた実験を行うのがよい。
- 3) 活荷重範囲の荷重の繰返しにおいて、カップラージョイントスタッドは疲労に対して安全である。
- 4) 付着面積が増加すると、ずれ定数  $K$  の値が大きくなる傾向がある。
- 5) 活荷重範囲および 2 倍の活荷重範囲の荷重の繰返し過程において、カップラージョイントスタッドのずれ定数  $K$  の値を示した。今後、これらのデータを蓄積し、疲労荷重下におけるずれ定数  $K$  の精度良い評価を得る必要がある。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学土木工学科 三木千壽教授に貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表します。本実験を遂行して頂いた（社）日本建設機械化協会 建設機械化研究所 研究第二部の方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第二集，1998.
- 2) CEN：Eurocode 4 Part2 (1997)，1997
- 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評価，土木学会論文集，No362/I-4，pp.285-292，1985.
- 4) 赤尾新助・栗田章光・平城弘一：頭付きスタッドの押抜き挙動に及ぼすコンクリートの打込み方向の影響，土木学会論文集，No380/I-7，pp.311-320，1987.
- 5) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，1996.
- 6) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 SI 単位系移行に関する参考資料，1998.
- 7) （社）日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状，JSSC テクニカルレポート No.35，1996.
- 8) 平城弘一・武藤和好・松井繁之・石崎茂：柔スタッドの配置が及ぼす押抜きせん断挙動への影響，土木学会 7 第 53 回年次学術講演会概要集，I-A322，pp.644-645，1998.
- 9) 日本道路公団：土木工事共通仕様書，1999.
- 10) 日本道路公団：鋼構造物施工管理要領，1999.
- 11) 松井繁之・平城弘一・福本・士：頭付きスタッドの強度評価式の誘導-疲労強度評価式-，構造工学論文集，Vol.35A，pp.1233-1244，1989.
- 12) （社）土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物編，1997.

(2000年9月14日受付)