

直径 19mm スタッド ジベルの 押し抜き疲労強度に関する研究

FATIGUE STRENGTH OF 19 mm DIAMETER STUD SHEAR
CONNECTOR

沢野 邦彦*・浜田 純夫**
若林 武忠***・成岡 昌夫****

By Kunihiro Sawano, Sumio Hamada, Taketada
Wakabayashi and Masao Naruoka

1. は し が き

合成桁の設計が示方書または指針に入ってきたのは、AASHTO の示方書では第 7 版 (1957)、わが国では日本道路協会の鋼道路橋の合成桁設計施工指針 (1959, 昭和 34 年) からである。

AASHTO の示方書の 1957 年の改訂の前には、イリノイ大学において、channel ジベルをもつはりを含む多くのはりの試験が行なわれ、useful capacity に関する AASHTO の示方書の公式は、コンクリートスラブと鋼桁との間のずれ量に制限をおくことを根拠とする静的挙動に関する研究から導かれている。この研究によれば、ずれ量を制限することによって、ジベルの疲労破壊を防ぎうるということがわかっている。1965 年までに、Lehigh Univ. で行なわれた静的・動的試験 (R.G. Slutter, G.C. Driscoll, Jr.)、および、Univ. of Texas で行なわれた動的試験 (A.A. Toprac) は、AASHTO の示方書の妥当性を証明したが、この公式は合成桁の設計において経済性を伴わないことが少しずつ明らかにされ、示方書を改訂するにあたっては、種々の形式のジベルの疲労強度についての広範囲な研究が必要であるという機運が生じてき、スタッドジベル、channel ジベルの疲労強度について、各方面で研究が行なわれている。

わが国では、昭和 34 年 8 月に、鋼道路橋の合成桁設計施工指針が制定され、昭和 40 年 6 月に改訂された。その際、スタッドジベルの条項が設けられ、スタッドジベルの許容せん断力が第 56 条に示されている。これによれば、この式を用いて設計したスタッドジベルは、

* 正会員 工修 福山コンサルタント (株)

** 学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程在学

*** 正会員 高田機工 (株) 技術開発室

**** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学教室

一般に、降伏に対して 3 以上、破壊に対して 6 以上の安全率をもつと考えてよいとしている。わが国での合成桁の実験は、最近までは、ほとんどが静的実験であり、ジベルの疲労に関しては、あまり多くは研究がなされていない。アメリカで指摘されたように、静的試験に基づいた示方書によって設計した合成桁が不経済であるとすれば、合理化の余地が残されていよう。このためには、ジベルの疲労強度を研究することが肝要であろう。

ジベルの破壊に対して、本質的には二つの場合が考えられる。

1. 合成桁のジベルにかかる水平せん断力は大部分活荷重によって生ずる。くり返し荷重であることから、ジベルの疲労破壊の生ずる可能性がある。コンクリートスラブ打設後の死荷重による鋼桁とコンクリートの間のせん断力は、コンクリートの乾燥収縮、および、クリープによって大幅に減ずる。したがって、ジベルの疲労強度を研究することが、ジベルの破壊に対して本質的問題となろう。

2. 静的荷重で合成桁が破壊する場合、ジベルが破壊せず、鋼桁の一般の破壊が生ずることが望ましい。つまり、ジベルは鋼桁の降伏によってコンクリートスラブが圧壊を生ずる終局荷重の際のせん断力に耐えうるようにしなければならない。

この研究では、直径 19 mm のスタッドジベルの押し抜き疲労試験を行ない、疲労強度を求めた。スタッドジベルの静的強度はコンクリートスラブの強度に影響されるので、コンクリート強度 240 kg/cm^2 、および、 360 kg/cm^2 の 2 種類について実験した。さらに、疲労試験においてスタッドジベルに作用する最小せん断応力を、1, 4, および、 7 kg/mm^2 の 3 種類に変化させた。

結果の解析には、単に $S-N$ 曲線を表示するにとどまらず、疲労問題に最もよく用いられる Weibull 分布関数を用いて、破壊の確率 P に対する $S-N$ 曲線、つま

り、 $S-N-P$ 曲線表示を求めた。

2. スタッド ジベルの押し抜き疲労試験に関する過去の研究

(1) アメリカ、イギリスでの研究

a) Sinclair の研究¹⁾

裸のスタッド ジベルの研究である。3/4"×4" ($H/d=5.3$) のスタッドの頭に直角にくり返し荷重をかけたものである。この結果を図-1に○で示す。

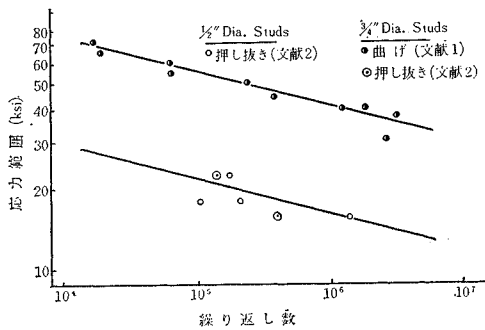


図-1 1/2", および, 3/4" dia. のスタッド ジベルの $S-N$ 曲線 (Sinclair, Thürlimann)

b) Thürlimann の研究²⁾

8 WF 40 のフランジの両側に 6" 厚のスラブ (コンクリート強度 389 kg/cm²) を打って、押し抜き試験を行なったものである。ジベルは 1/2"×4" のものを上部 1 1/2" だけを直角に曲げた L ジベルである。また、3/4" 径の upset head ($H/d=5.3$) のものを用いている。これらの結果を図-1に○と◎で示す。

c) Thürlimann の研究³⁾

18 WF 50 の鋼桁を 2 本ならべて、スパン 30' の桁とし、10'-11"×6" のコンクリート スラブ (強度 210 kg/cm²) を 3/4" 径のスタッド ジベル ($H/d=5.3$) と 1/2" 径の L 型ジベルで合成したものである。くり返し荷重としては、設計荷重の 0~100% で 100 万回、0~125% で 30 万回くり返したあと、0~150% で 256 800 回載荷した。このときのジベルに作用するせん断応力は $\tau=1 850\sim 15 700$ psi であるが、疲れを見せていない。

d) Chulver らの研究⁴⁾

8 WF 17 の鋼桁に 4"×2' の RC スラブ (コンクリート強度 391 kg/cm²) を 1/2" の L 型スタッド ジベルで合成したものを、スパン 10' の桁として、疲労試験を行なっている。(0.3~3.0)×10⁴ lbs を 1 022 900 回(ジ

ベルのせん断応力にして $\tau=1 500\sim 21 000$ psi (105~1 470 kg/cm²), さらに, (0.3~4.8)×10⁴ lbs を 122 400 回 ($\tau=1 500\sim 24 100$ psi (105~1 690 kg/cm²)) くり返したが、疲れは生じていない。

e) Driscoll らの研究⁵⁾

1/2" スタッド ジベルの疲労強度を求めるため、i) 8 WF 17 の鋼桁に 2'×3" の RC スラブ (強度 230 kg/cm²) を 1/2" の L 型ジベルで合成したものを、スパン 5' の桁として、また、ii) 12 WF 27 の鋼桁に 4'×4" の RC スラブ (コンクリート強度 245 kg/cm²) を 1/2" の upset head ジベル ($H/d=4$) で合成したものを、スパン 10' の桁として、それぞれ、疲労試験を行なっている。この結果を図-2に、● および、+ で示す。i) の場合、スラブが桁としての挙動とは異なる鉛直方向の動きを示しはじめるのを観察することによって、ジベルの破壊までの回数を求めているので、結果のばらつきは大きい。そこで、ii) では、桁端付近の上フランジのひずみを測定し、一对のジベルにクラックが入ったと思われる回数を N としている。すなわち、ジベルにクラックが入ると、その付近における応力が減少しはじめると考えられるからである。

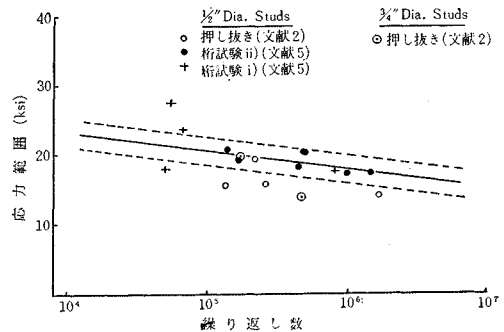


図-2 1/2", および, 3/4" dia. のスタッド ジベルの $S-N$ 曲線 (Driscoll らによる)

f) Toprac らの研究⁶⁾

8 WF 48 のフランジの両側に 6" 厚の量軽コンクリー

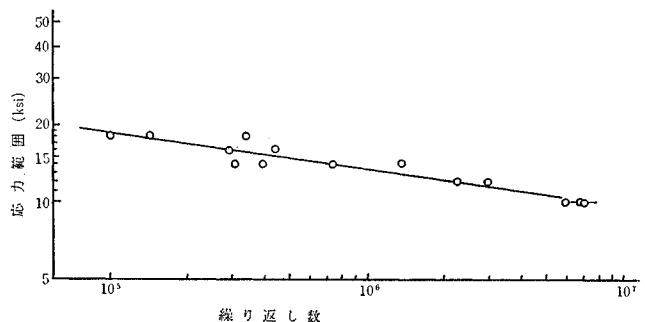


図-3 3/4" dia. のスタッド ジベルの $S-N$ 曲線 (Toprac らによる)

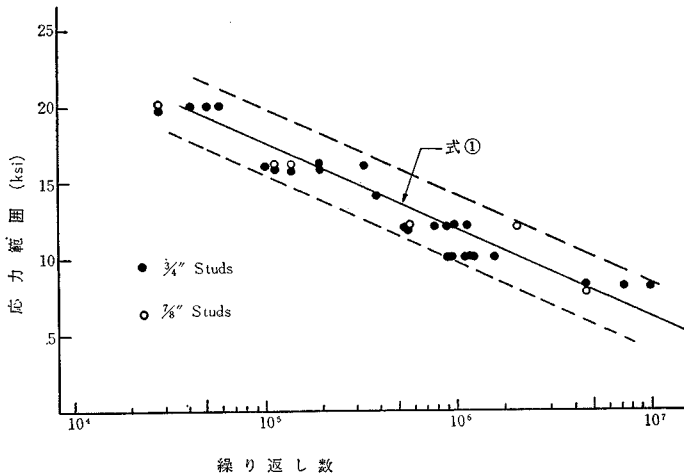


図-4 3/4", および, 7/8" dia. のスタッド ジベルの S-N 曲線 (Fisher らによる)

ト スラブ (強度 350 kg/cm²) を 3/4" 径のスタッド ジベルで合成した押し抜き供試体を用いている。その結果を 図-3 に示す。

g) Fisher らの研究⁷⁾

8 WF 40 のフランジの片側に 6" 厚の RC スラブを打設して、押し抜き疲労試験を行なった。ジベルとしては、3/4", 7/8" のスタッド ジベル、および、4"×5.4 lbs の channel ジベルの 3 種類 (コンクリート強度は、それぞれ、302, 314, および、425 kg/cm²) を用いている。スタッド ジベルを用いた場合の結果を、 図-4 に示す。Fisher らの実験は、片側スラブの供試体を用いているところに、特色がある。

スタッド ジベルの 疲労試験結果を解析して、 つぎの式を得ている。

$$\log N = 8.072 - 0.1753 S_r \dots\dots\dots (1)$$

ここで、N: 破壊までのくり返し回数, S_r: せん断応力範囲 (shearing stress range, ksi) である。

さらに、この実験結果をもとにして、 つぎのような設計指針を提案している。この研究には直接の関係はないが、参考までに示す。

ある荷重状態に対して、ジベルにかかる水平方向せん断力はつぎの式で与えられる。

$$H = V \cdot m / I \dots\dots\dots (2)$$

ここに、H: ジベルによって伝達される水平せん断力 (kips/in.), V: せん断力 (kips), m: 合成断面の中立軸に関するコンクリートの換算断面一次モーメント (in³), I: 合成断面の断面二次モーメント (in⁴), である。

疲労強度を基礎にすれば、ジベル間隔 p は、式 (3) で与えられる。

$$p = q_r / (H_{\max} - H_{\min}) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、q_r: ジベル 1 本あたりの許容せん断応力範囲 (lbs) であり、式 (2) から N=200 万回に対する S_r

=10 ksi が得られるので、

$$q_r = 7850 d^2 \dots\dots\dots (4)$$

d: ジベルの直径 (in)

Fisher らはジベル本数を式 (3) からのみ決めることなく、Slutter, および、Driscoll の研究⁸⁾を引用して、終局荷重状態の場合のジベルの本数を計算し、その本数を下まわってはならないと提案している。

h) Mainstone らの研究⁹⁾

Building Research Station (英) の Mainstone は、スタッド ジベル, bar ジベル, および, channel ジベルの疲労試験を行ない、さらに、これらのジベルを用いた合成桁の疲労実験を広範囲に行なっている。これは参考になるところが多い。

(2) わが国における研究

わが国においては、いままでにスタッド ジベルを対象とした赤尾・三宮の研究¹⁰⁾, 合成桁を対象とした阿部・中野の研究¹¹⁾などがあるが、後者の研究ははっきりした結論を出していないので、ここに取り上げないことにし、赤尾・三宮の研究を紹介する。

この研究では、フランジの両側に普通コンクリートを打設して、押し抜き疲労試験を行なった。ジベルには SS 41, および, SS 41 BD を用いている。SS 41, および, SS 41 BD ジベルの 200 万回疲労強度は約 11 kg/mm², 14 kg/mm² となっている。

なお、部分合成桁, プレストレスしない連続合成桁に関する前田・波田・梶川の研究があるが、この研究の対象外であるので、省略する。

アメリカにおいては、ジベルの押し抜き疲労試験が、以上のように、大規模に実施されており、また、イギリスにおいては、Building Research Station の研究のもとに British Standard Code of Practise, CP 117, Composite Construction in Structural Steel and Concrete, Part 2, Simply-Supported Beams in Bridge, 1967 が作成されている。しかし、わが国でのこの方面の研究は僅少である。この点にかんがみ、合成桁設計・施工指針改訂のさい、なんらかの参考になれば幸いと思われ、J.W. Fisher らの実験を範にとり、本実験を行なった。

3. 押し抜き実験方法

(1) 目的

橋の受ける荷重のうち、死荷重は予想外に大きい。し

たがって、合成桁のスラブに軽量コンクリートを用いるのは非常に有利と思われる。しかし、軽量コンクリート合成桁がくり返し荷重を受けた場合のジベルの挙動は、十分に研究されていないのが実状である。そこで、直径19mmのスタッドジベルを用い、押し抜き疲労試験によってジベルに作用するせん断応力度と疲労破壊との関係を明らかにするために、本実験を行なった。

(2) 押し抜き供試体

ジベルの強度を求めるおもな方法として、桁の曲げ試験によるものと、押し抜き試験によるものがあるが、ここでは後者を用いる。その理由として、つぎのことが考えられる。

i) 前者の場合には、一部のジベルの破壊によっておこる有効断面積の減少に応じて、個々のジベルに作用するせん断応力の分布が異なってゆくのに対し、押し抜き試験の場合には、このような応力の再分布はおこらず、試験中、応力は比較的一定に保たれていると考えられる。そのため、後者の結果はジベルの破壊に対して下限値を与えるものであり、設計にはこの値を用いるのが妥当であると考えられる。

ii) 前者の場合には、ジベルが破壊した時点を判定することが困難であり、そのため誤差も考えられる。

iii) 後者は前者に比較して関係する要素が少ない。

iv) 後者の方が容易、かつ、安価に行なうことができる。

また、ジベルとしては近年スタッドジベルが最も多く用いられるようになってきているので、この実験でも、それを用いた。

以上の点を考慮して、供試体の形状として図-5のものを用いた。従来は、押し抜き試験にも、フランジの両側にスラブのあるものが用いられたが、Fisherはフランジの片側にスラブのある供試体を用いた⁷⁾。この場合の疲労強度は約7kg/cm²であるが、図-2においては、

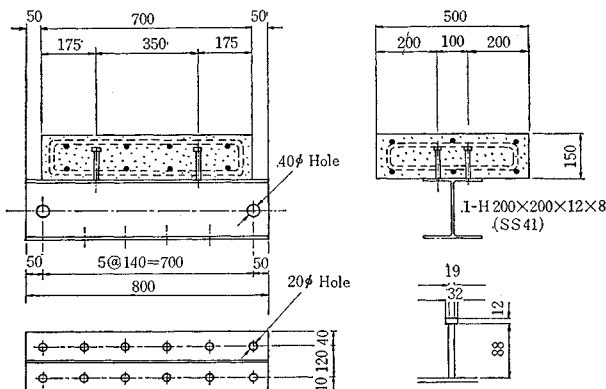


図-5 押し抜き供試体

表-1 コンクリートの配合 (疲労試験用)

| 目標強度 (kg/cm ²) | スラブ (cm) | 空気量 (%) | 水 (kg) | セメント (kg) | 水セメント比 (%) | 細骨材 (kg) | 粗骨材 (kg) | ポズリス (g) |
|----------------------------|----------|---------|--------|-----------|------------|----------|----------|----------|
| 360 | 51 | 4.5±1 | 156 | 340 | 45.9 | 497 | 628 | 850 |
| 240 | 51 | 4.5±1 | 158 | 256 | 62.0 | 647 | 530 | 637 |

表-2 コンクリートの配合 (静的試験用)

| コンクリート種類 | 目標強度 (kg/cm ²) | スラブ (cm) | 空気量 (%) | 水 (kg) | セメント (kg) | 水セメント比 (%) | 細骨材 (kg) | 粗骨材 (kg) | ポズリス (g) |
|----------|----------------------------|----------|---------|--------|-----------|------------|----------|----------|----------|
| ライオナイト | 360 | 3.8 | 4.0 | 150 | 366 | 41 | 567 | 569 | 916 |
| 〃 | 240 | 6.0 | 4.2 | 157 | 275 | 57 | 625 | 559 | 688 |
| メサライト | 360 | 3.2 | 3.9 | 145 | 354 | 41 | 523 | 607 | 885 |
| 〃 | 240 | 3.5 | 5.0 | 145 | 260 | 58 | 599 | 591 | 650 |
| 普通 | 360 | 6.0 | 5.0 | 145 | 296 | 65 | 761 | 1118 | 740 |
| 〃 | 240 | 5.4 | 5.5 | 145 | 224 | 49 | 850 | 1086 | 560 |

フランジの両側にスラブのある供試体を用いており、この場合は約10kg/cm²である²⁾。この原因には種々のものが考えられようが、これらの2つの実験を参照して、Fisher流にフランジの片側にスラブのある供試体を用いた。このほうが合成桁の実情に近いと思われる。

鋼桁、および、スタッドジベルにはSS41を用いた。ジベルの溶植条件は、電流：1700A、時間：40cyclesである。

また、コンクリートには、セメント：大阪セメント社の普通ポルトランドセメント、骨材：細粗骨材ともライオナイト、混和剤：ポズリス No. 8を用いた。その配合を表-1に示す。疲労試験開始時のコンクリートの圧縮強度は、目標強度360kg/cm²に対して354kg/cm²で、目標強度240kg/cm²に対して242kg/cm²であった。コンクリートは疲労試験の実施と歩調を合わせて打設した。打設から試験開始までの養生日数は45~60日で、強度に対する標準偏差は20kg/cm²程度であった。コンクリート打設にあたっては、鋼桁とコンクリートとの間の付着による影響を除去するために、鋼桁の表面にグリースを塗布した。

供試体の個数は高強度(目標360kg/cm²)に対して24個、低強度(目標240kg/cm²)に対して32個で、合計56個であり、円柱供試体は押し抜き供試体1個につき3個である。

静的試験用供試体は、ライオナイト軽量骨材コンクリートのみならず、普通コンクリート、および、メサライト軽量骨材コンクリートについても行なった。それらの配合を表-2に示す。

(3) 供試体の養生

すべての供試体を同一場所、同一条件で養生して、供試体間の強度のばらつきを最小にするため、湿砂養生室を設置し、試験直前まで養生

した。

(4) 試験法

押し抜き試験用載荷フレームを製作し、ローゼンハウゼン型脈動油圧発生装置を用い、静・動荷重の2種類について行なった。載荷装置を写真-1に示す。

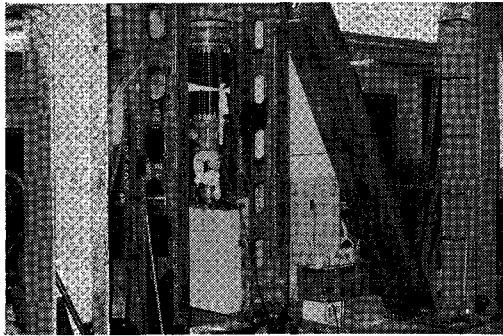


写真-1 押し抜き試験用載荷フレームおよび載荷用ジャッキ、供試体

a) 静的試験

12個の供試体について、静的試験を行なった。荷重はジベル、または、まわりのコンクリートが破壊するまで、2 ton ピッチで、0→2→0→2→4→0→4→6→0……のようにくり返しを行なった。

各荷重において、ずれ量を測定した。これは鋼、および、コンクリート スラブに設置した2対のダイヤルゲージの読みの差を用いて、それらの平均値を測定値とした。

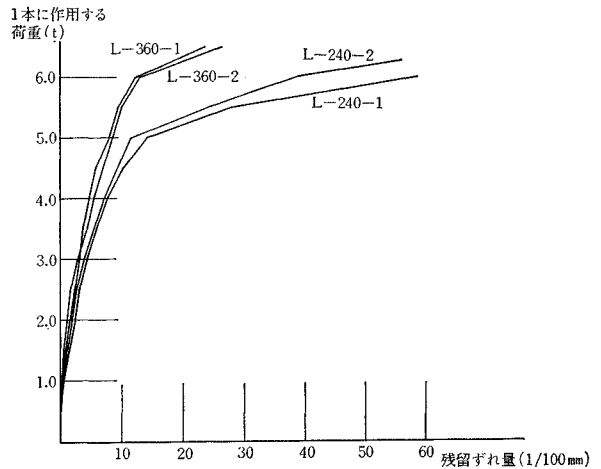
b) 疲労試験

載荷速度は 300 rpm とした。荷重は、最低荷重として、ジベルの受けるせん断応力度で、1, 4, および、7 kg/mm² の3種類とし、そのおのおのに対して、種類の応力範囲を与えた。また、同一の条件で3個の供試体で試験を行なうのを原則とした。せん断応力の範囲は 6.0 kg/cm² から 10.8 kg/cm² までの値とした。

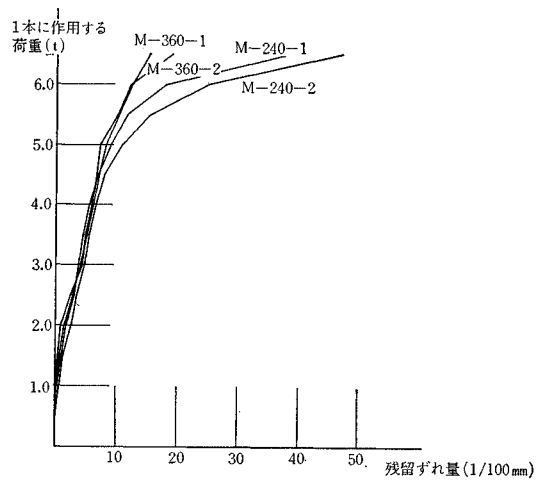
4. 実験結果、および、解析

(1) 静的試験結果

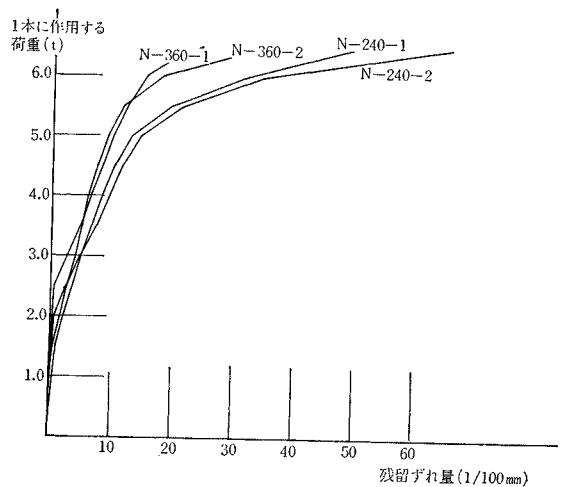
除荷したとき得られたずれ量（残留ずれ）と荷重との関係を図-6に示す。残留ずれはジベル、または、まわりのコンクリートの塑性変形に起因するので、ある荷重を境にして残留ずれが急増するのは、その荷重から激しい塑性変形が生ずることを意味する。そこで荷重を実用上使用に耐えうる限界の荷重と考えて、これを降伏荷重とした。また荷重-残留ずれ曲線におい



(a) ライオナイト軽量コンクリート



(b) メサライト軽量コンクリート



(c) 普通コンクリート

図-6 荷重-残留ずれ曲線

表-3 静的試験結果 (スタッドジベル1本あたり)

| | L-360 | M-360 | N-360 | L-240 | M-240 | N-240 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 限界荷重 (t) | 4.8 | 4.8 | 4.3 | 4.0 | 4.4 | 3.7 |
| 降伏荷重 (t) | 5.9 | 6.0 | 5.7 | 4.6 | 5.1 | 5.1 |
| 極限荷重 (t) | 9.3 | 9.6 | 9.9 | 7.8 | 8.3 | 8.8 |
| コンクリート強度 (kg/cm ²) | 310 | 323 | 346 | 194 | 205 | 223 |

記号: L:ライオナイト軽量コンクリート

M:メサライト軽量コンクリート

N:普通コンクリート

240:目標強度 240 kg/cm²360:目標強度 360 kg/cm²

て、残留ずれが 0.075 mm (AASHO の示方書においては、useful capacity を 0.003 in. の残留ずれに基準をおいている) となる荷重を限界荷重とした。このようにして求めた限界荷重、降伏荷重、および、破壊荷重を表-3 に示す。

AASHO の示方書では、スタッドジベルの限界耐力 (useful capacity) はつぎの式で与えられる。

$$Q_c = 8.75 d^2 \sqrt{\sigma_c} \quad (H/d \geq 4.2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_c = 21.2 dH \sqrt{\sigma_c} \quad (H/d \leq 4.2) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 d :スタッドジベルの直径 (cm), σ_c :コンクリートの圧縮強度 (kg/cm²), H :スタッドジベルの高さ (cm), Q_c :スタッドジベル1本あたりの限界耐力 (kg) である。

この式によって、useful capacity を計算すると、L-360, M-360, および、N-360 の平均コンクリート強度 326 kg/cm², および、L-240, M-240, および、N-240 の平均コンクリート強度 207 kg/cm² に対して、5.70 ton, および、4.55 ton となり、実験値と比較的よく一致している。

(2) 押し抜き疲労試験結果

押し抜き疲労試験の結果、破壊までの回数と応力範囲との関係を表-4、および、図-7 に示す。

破壊はすべてスタッドジベルの溶着部で起こり、その破壊の跡はクレーター状になっている。疲労破壊面の例を写真-2(a), および、(b) に示す。コンクリート強度 240 kg/cm², 最小応力 7 kg/cm² で応力範囲 7.5 kg/mm² の供試体の1つは、2本のジベルが疲労破壊したのちコンクリートスラブが破壊した。

表-4 疲労試験の結果

| コンクリート強度 240 kg/cm ² | | | | | コンクリート強度 360 kg/cm ² | | | | |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|
| 最小応力 (kg/mm ²) | 最大応力 (kg/mm ²) | 応力範囲 (kg/mm ²) | 破壊回数 N (10 ⁶) | log (N) | 最小応力 (kg/mm ²) | 最大応力 (kg/mm ²) | 応力範囲 (kg/mm ²) | 破壊回数 N (10 ⁶) | log (N) |
| 1.0 | 8.2 | 7.2 | 2.00 | 6.30 | 1.0 | 7.0 | 6.0 | 2.05 | 6.301 |
| | " | " | " | " | | 8.5 | 7.0 | 3.00 | 6.477 |
| | " | " | " | " | | 9.25 | 8.25 | 1.88 | 6.274 |
| | 10.0 | 9.0 | 0.91 | 5.96 | | " | " | 0.866 | 5.938 |
| | " | " | 0.83 | 5.92 | | " | " | 1.71 | 6.233 |
| | " | " | 1.59 | 6.20 | | 10.0 | 9.0 | 0.675 | 5.829 |
| | 11.8 | 10.8 | 0.05 | 4.74 | | " | " | 0.631 | 5.800 |
| " | " | 0.159 | 5.201 | " | " | 0.346 | 5.539 | | |
| " | " | 0.207 | 5.316 | | | | | | |
| 4.0 | 11.5 | 7.5 | 1.318 | 6.123 | 4.0 | 11.5 | 7.5 | 1.40 | 6.146 |
| | " | " | 0.792 | 5.899 | | 12.0 | 8.0 | 0.51 | 5.708 |
| | " | " | 2.300 | 6.362 | | " | " | 1.32 | 6.120 |
| | " | " | 1.762 | 6.246 | | " | " | 1.83 | 6.262 |
| | 12.0 | 8.0 | 1.720 | 6.236 | | 13.0 | 9.0 | 0.957 | 5.960 |
| | " | " | 2.165 | 6.335 | | " | " | 0.524 | 5.719 |
| | " | " | 1.233 | 6.091 | | " | " | 0.778 | 5.891 |
| | " | " | 1.216 | 6.085 | | 14.0 | 10.0 | 0.388 | 5.589 |
| | 13.0 | 9.0 | 0.258 | 5.412 | | " | " | 0.387 | 5.589 |
| | " | " | 0.268 | 5.428 | | " | " | 0.402 | 5.604 |
| | " | " | 0.711 | 5.852 | | | | | |
| 7.0 | 13.0 | 6.0 | 2.000 | 6.301 | 7.0 | 14.9 | 7.5 | 0.996 | 5.998 |
| | " | " | " | " | | 15.0 | 8.0 | 1.51 | 6.179 |
| | 13.5 | 6.5 | 1.474 | 6.168 | | " | " | 1.31 | 6.117 |
| | " | " | 2.128 | 6.328 | | " | " | 1.51 | 6.179 |
| | 14.0 | 7.0 | 1.195 | 6.077 | | " | " | 1.51 | 6.179 |
| | " | " | 1.777 | 6.250 | | 16.0 | 9.0 | 0.221 | 5.344 |
| | 14.5 | 7.5 | 0.638 | 5.804 | | | | | |
| " | " | 0.647 | 5.811 | | | | | | |

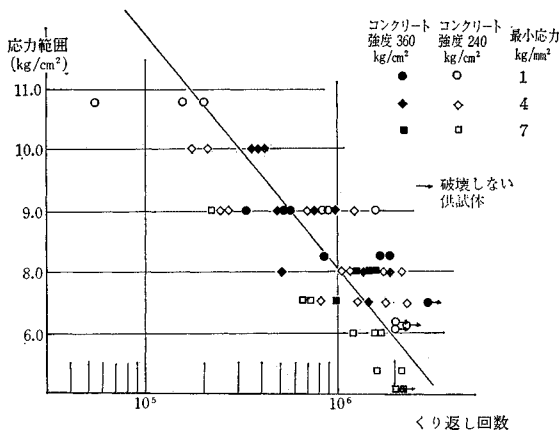
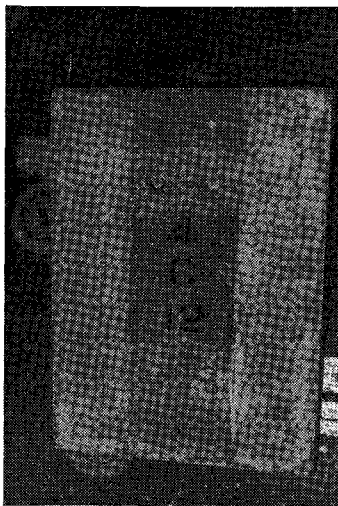
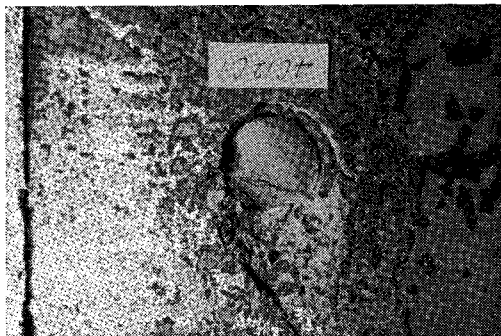


図-7 S-N 曲線 (疲労試験の結果)



(a)



(b)

写真-2 スタッド ジベル疲労破壊面

(3) S-N 曲線

S-N 曲線の関数形として従来提案されている実験式には、耐久限度以上に対し、

$$S = AN^{-b} \dots\dots\dots (7)$$

$$S = a - b \log N \dots\dots\dots (8)$$

耐久限度も同一の式に含むものとして、

$$\log(S-A) = a - b \log N \dots\dots\dots (9)$$

$$\log(S-A) = a + b \log(N+B) \dots\dots\dots (10)$$

などがある。ここに、S、および、N はそれぞれ載荷応力、および、くり返し回数であり、A、B、a、および、b は定数である。

S-N 曲線がどういう関数で表わせうのかという試みは、実験的には古くから行なわれているにもかかわらず、これまではっきりしたデータはない。これは一定の S に対するばらつきが大きいことに起因すると考えられる¹²⁾。

ここでは、スタッド ジベルの押し抜き試験の解析に最も多く用いられる式 (8) で、S-N 曲線を表わそう。

スタッド ジベルの押し抜き疲労試験結果を、最小自乗法を利用して、S-N 曲線に表わすと、つぎの式が得られる。

$$\log N = 8.10 - 0.261 S_r \dots\dots\dots (11)$$

ここで、N、および、S_r は、それぞれ、くり返し回数、および、応力範囲 (最大応力-最小応力) である。この試験では、200 万回で破壊しない供試体は、そこで試験を中止した。さらに、これらのデータを式 (11) には含めなかった。

図-7 からは、最小応力、および、コンクリート強度の相違によるスタッド ジベルの疲労強度は、ほとんど変わらないように思える。厳密にこれらの相違による疲労強度の変化を知るために、S-N 曲線式 (11) から実測値に対する偏差を考える。各条件、つまり、最小応力 (1, 4, および、7 kg/mm²)、および、コンクリート強度 (240 kg/cm²、および、360 kg/cm²) に対する平均偏差値 \bar{d} は、つぎの式から得られる。

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log N_i - 8.10 + 0.261 S_{r_i}) \dots\dots (12)$$

ここで、N_i、および、S_{r_i} はくり返し回数、および、応力範囲の実測値である。この式から得られた結果を、コンクリート強度、および、最小応力に対して、それぞ

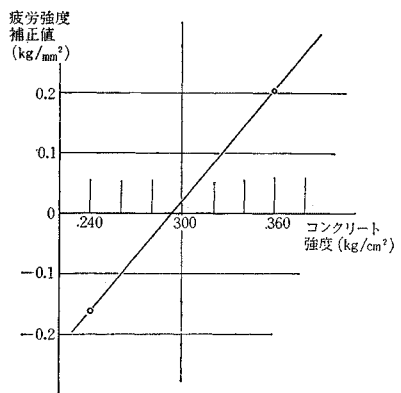


図-8 コンクリート強度による疲労強度の補正值

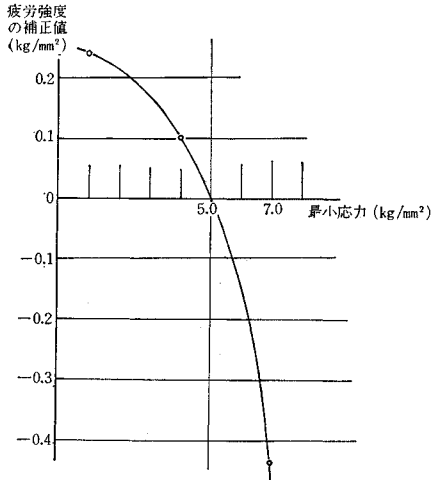


図-9 最小応力による疲労強度の補正值

れ、図-8、および、図-9 に示す。

図-8、9 を用いると、コンクリート強度、および、最小応力に対して疲労強度を容易に補正できる。この意味で、平均偏差値 \bar{d} を改めて補正值としよう。

たとえば、コンクリート強度 300 kg/cm^2 、最小応力 3 kg/mm^2 に対する軽量コンクリート スタッド ジベルの 200 万回疲労強度を推定してみよう。軽量コンクリート スタッド ジベルの 200 万回疲労強度は、式 (11) から 6.90 kg/mm^2 、コンクリート強度に対する補正值は図-8 から $+0.02 \text{ kg/mm}^2$ 、最小応力に対する補正值は図-9 から $+0.16 \text{ kg/mm}^2$ となるので、この条件に対するスタッド ジベルの 200 万回疲労強度は、 $6.90 + 0.02 + 0.16 = 7.08 \text{ kg/mm}^2$ であると推定されよう。

なお、Fisher らの行なった $3/4''$ のスタッド ジベルの実験では、コンクリート強度が 302 kg/cm^2 の普通コンクリートであった。式 (1) から、200 万回疲労強度は 7.11 kg/mm^2 が得られるので、200 万回疲労強度のみから判断すれば、コンクリートが普通コンクリートでも軽量コンクリートでもほとんど変わらないと思われる。

Toprac の実験によれば、強度 350 kg/cm^2 の軽量コンクリートを用いて、200 万回疲労強度は 9 kg/mm^2 となっている。著者らの実験との相違は供試体の形状（片側スラブか両側スラブか）によるものと思われる。

(4) P-S-N 曲線¹³⁾

破壊の確率 P と S-N 曲線が、 P の一定の値（一般には $P=50\%$ ）に対して与えられていると、一つの方程式で P-S-N 関係式が得られる。さらに、S 方向、すなわち、 N の値に対する P の、あるいは、 N 方向、すなわち、 S の値に対する N の偏差に関する統計分布がわかる。

P-S-N 関係式を導くまえに、一つの仮定が必要であ

ろう。つまり、平均 S-N 曲線から破壊までのくり返し回数 N の偏差の分布は、S-N 曲線によって与えられる N から独立していることである。このように仮定すると、S-N 曲線からすべての偏差が同じグループに属することになる。平均 S-N 曲線を最小自乗法で決定し、すべての観測値に対する偏差が計算されると、他の方法よりもはるかに大きな分布変数が得られる。

平均 S-N 曲線には式 (11) を、偏差の分布関数には Weibull 分布関数を用いて、P-S-N 曲線を導こう。なお、偏差を求めるとき、コンクリート強度、および、最小応力に対して補正を前もって行ない、分布関係にあてはめた。

偏差を x とすれば、Weibull 分布関数はつぎの式で表わされる。

$$P = 1.0 - \exp \{ -[(x - x_0)/\beta]^{1/\alpha} \} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 α 、 β 、および、 x_0 は定数である。

任意のデータに対する偏差 x_i が

$$x_i = \log N_i - 8.10 + 0.261 S_{pi} \dots\dots\dots(14)$$

であることを考えると、式 (13) はつぎのようになる。

$$P = 1.0 - \exp \{ -[(\log N - 8.10 + 0.261 - x_0)/\beta]^{1/\alpha} \} \dots\dots\dots(15)$$

式 (15) の解析方法として、確率紙を用いて、グラフから、 α 、 β 、および、 x_0 を決定する方法が容易に考えられるが、ここでは、Brom¹³⁾ によって提案された線形推定量を用いて解析しよう。

関数 P 中の α に対する β 、および、 x_0 の値は、つぎのようになる。

$$\beta = \sum f_i x_i, x_0 = \sum g_i x_i \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 f_i 、および、 g_i は線形推定法により求められた係数で、 x_i は順序統計量にしたがう量である。

一般的に、 α も未知数であるので、 α 、 β 、および、 x_0 を決定するのに最尤推定法を利用するとよい。

尤度 L は、

$$L = \sum \log p(x_i)$$

で与えられる。ここで、 $p(x_i) = dP/dx$ 、 x_i は観測値である。ここで、最良の条件は L が最大とならねばならない。数学的には、各パラメーター (α 、 β 、および、 x_0) に関する微分が 0 である。そのうちの 1 つの条件として、

$$\frac{\partial L}{\partial m} = \frac{n}{m} + \sum_{i=1}^n \log [(x_i - x_0)/\beta] - \sum_{i=1}^n [(x_i - x_0)/\beta]^m \cdot \log [(x_i - x_0)/\beta] = 0 \dots\dots\dots(18)$$

が得られる。ここで、 $m = 1/\alpha$ である。

α の値を仮定すれば、 β 、および、 x_0 は Brom の推定法で求められ、それらの値に対する $\partial L/\partial m$ の値が定まる。 α の値に対する $\partial L/\partial m$ の値のグラフをつくり、 $\partial L/\partial m = 0$ なる α の値を見出す。本実験では、 $\alpha = 0.124$ 、 $x_0 = -1.271$ 、および、 $\beta = 1.353$ が得られたの

で、式 (15) はつぎのようになる。

$$P=1.0-\exp \{-[\log N-9.37+0.261 S_r] / 1.353\}^2\} \cdots \cdots \cdots (19)$$

$P=0.5, 0.1$, および, 0.001 に対する 200 万回疲労強度は $6.9, 6.2$, および, 5.7 (kg/mm^2) である。

著者らは、ジベル 1 本の疲労強度 q_r として、破壊の確率を 0.1 として、上に求めた $6.2 \text{ kg}/\text{mm}^2$ を用いて、 $\phi 19 \text{ mm}$ のスタッド ジベル (SS 41) に対して、

$$q_r=6.2 \times (\pi/4) d^2=487 d^2 \quad (q_r : \text{kg}, d : \text{cm}) \cdots \cdots \cdots (20)$$

を提案したいと思う。破壊の確率を 0.1 としたのは、押し抜き疲労試験は、桁の曲げ試験よりも、ジベルの耐力についてやや小さい値を与えること (文献 2), 5) によると、図-2 のように、 $1/2$ スタッド ジベルの場合に約 $80 \sim 90\%$ となっている), 少数のジベルの破壊は必ずしも構造物全体の破壊につながらないことなどによっている。

さらに、厳密に、コンクリートの強度、および、最小応力まで検討するならば、図-8, および、図-9 の補正値を加算すればよい。たとえば、破壊の確率 0.1 に対する 200 万回疲労強度はコンクリート強度 $280 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 最小応力 $3 \text{ kg}/\text{mm}^2$ のときには、 $6.2-0.05+0.16=6.3 \text{ kg}/\text{mm}^2$ と推定されよう。この場合には、 $6.2 \text{ kg}/\text{mm}^2$ のかわりに上記のようにして求めた値を用いるとよい。

6. 結 論

以上のことから、 $\phi 19 \text{ mm}$ スタッド ジベルにおけるせまい範囲の実験ではあるが、つぎのことが結論されよう。

(1) くり返しを受けるスタッド ジベルの破壊はジベルの溶植部でおこった。その破壊のあとがクレーター状であった。

もっとも、これは正の曲げモーメントを受ける部分の圧縮側のフランジに溶植されたスタッド ジベルに適用されることで、連続合成桁の支承部のように、負の曲げモーメントを受ける引張側フランジに溶植されている場合には、フランジの引張り疲労で破壊するという実験結果が発表されている (J.E. Stallmeyer and W.H. Munse : Highway Research Record, No. 76, 1965, pp. 254-284; W. Roshardt : Schweiz. Bauzeitung, 84 (1966), pp. 906-908, 前田, および著者らの実験による)。

(2) スタッド ジベルの疲労強度は、静的強度と異なり、コンクリート強度、および、最小応力にあまり影響しないと考えられ、主として、応力範囲のみ関係すると考えられる。

(3) スタッド ジベルの疲労破壊のデータは相当ば

らつき、破壊の確率 0.1 に対する 200 万回疲労強度は、応力範囲として $6.2 \text{ kg}/\text{mm}^2$ が与えられる。したがって、 $\phi 19 \text{ mm}$ のスタッド ジベル 1 本に対する疲労強度は式 (20) で与えられる。

なお、ジベルの疲労強度に関するこれらの実験をもとにし、Fisher らの提案にしたがって、合成桁のジベルの設計を行なえば、従来の設計施工指針による設計にくらべ、経済的になることがわかっている。これらについては、新しい考え方によって設計した合成桁の曲げ疲労試験を行なっているので、改めて発表したいと思う。

これらの研究は、文部省の科学研究費 (試験研究)、および、建設技術研究補助金 (高田機工) によるものである。ここに記して謝意を表したい。

疲労試験結果の統計的解析については、山口大学工学部助教授 中川建治氏に御指導を賜わった。また、本文の原稿については、論文集編集委員より、懇切な討議、注意をいただいた。ここに記して深謝したい。

参 考 文 献

- 1) Sinclair G.M. : Fatigue Strength of 3/4 inch Welded Stud Shear Connectors, Nelson Stud Welding, Lorain, Ohio, Engineering Test Data, Sept. 1955.
- 2) Thürlimann B. : Fatigue and Static Strength of Stud Shear Connectors, ACI Journal, 30 (1959), pp. 1287-1302.
- 3) Thürlimann B. : Composite Beams with Stud Shear Connectors, Highway Research Board Bull. No. 174, pp. 18-38, 1958.
- 4) Culver Ch. and R. Coston : Tests of Composite Beams with Stud Shear Connectors, Proc. of ASCE, 87 (1961), ST No. 2.
- 5) King, D.C. R.G. Slutter and G.C. Driscoll : Fatigue Strength of 1/2 inch diameter Stud Shear Connectors, Highway Research Record No. 103, 1965, pp. 78-106, 1965 (Fritz Eng. Lab Reprint No. 294).
- 6) Lehman H.G. H.S. Lew and A.A. Toprac : Fatigue Strength of 3/4 inch Studs in Lightweight Concrete, Center for Highway Research, University of Texas, Austin, Texas, May, 1965.
- 7) Slutter R.G. and J.W. Fisher : Fatigue Strength of Shear Connectors, 45th Annual Meeting of Highway Research Board, 1966 (Fritz Eng. Lab. Report No. 316. 2, Jan., 1966).
- 8) Slutter R.G. and G.C. Driscoll : Flexural Strength of Steel-Concrete Composite Beams, Proceedings A.S.C.E., 91 (1965). STNo. 2
- 9) Mainstone R.J. and J.B. Menzies : Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Beams for Bridges, Concrete, Sept. 1967.
- 10) 赤尾・三宮 : スタッド合成桁の疲労試験について, 第 20 回年次学術講演概要第 1 部, 1-78, 昭和 40 年 5 月.
- 11) 阿部・中野 : 合成桁の疲労実験, 同上, 1-79.
- 12) 横堀武夫 : 材料強度学, 技報堂, 昭和 42 年 5 月.
- 13) Weibull W. : Fatigue Testing and the Analysis of Results, Pergamon Press, 1961.

(1969. 5. 6 受付)

追記 : AASHO の示方書第 10 版 (1969) の p. (29 合成桁のところは全面的に改訂され 1. 7. 101 せん断力 a) 水平せん断力のところは 1. 疲労, 2. 極限強さ, 3. Additional Connectors to Develop Slab Stress から構成され, J.W. Fisher の研究が全面にとり入れられ, "The shear connectors shall be designed for fatigue and checked for ultimate strength" となっている。 (1970. 2. 18)