

(24) 両振り載荷によるスタッドの静的および疲労強度に関する研究

A study on cyclic shear force-slip behavior of studs under alternating load condition

中島章典¹・小海昌伸²・岡村正巳³・斉木 功⁴・大江浩一⁵・佐藤 大⁶

Akinori Nakajima, Masanobu Kokai, Masami Okamura,

Isao Saiki, Hirokazu Ooe and Masaru Satoh

¹正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

²学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

³茨城県 石下土木事務所 道路河川整備第二課 (〒300-2706 結城郡石下町新石下 1317-10)

⁴正会員 工修 宇都宮大学助手 工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

⁵正会員 トピー工業 鹿沼製作所 (〒322-0014 鹿沼市さつき町 13-1)

⁶前田製管 橋梁設計部 (〒998-8611 酒田市上本町 6-7)

Studs are commonly used as shear connector in composite girder bridges. Nowadays, in examining static strength and fatigue strength of the stud, push-out tests are carried out under pulsating load condition. However, in actual composite girder bridges, horizontal shear force is applied to the studs alternatively by moving vehicles.

In this paper, we devise a new specimen to which the alternating load can be applied easily for investigating static strength and fatigue strength of studs under both the pulsating and the alternating load conditions. Consequently, it is revealed that a relation between the horizontal shear force and the relative slip of the studs under the alternating load condition is different from the one under the pulsating load condition, but that there is not significant difference between fatigue strength of the studs under both load conditions.

Key Words : stud, alternating load, pulsating load, horizontal shear force-slip behavior, static strength, fatigue strength

1. はじめに

合成桁では、コンクリート床版と鋼桁とを結合するずれ止めとして、一般にスタッドが数多く利用されている。頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)¹⁾には、スタッドの性能評価試験方法として、スタッドに作用するせん断力が一方向のみの片振り載荷試験である押抜き試験方法が提案されている。しかし、合成桁橋などでは、スタッドの位置に対する活荷重の作用位置により、スタッドに作用するせん断力の向きが正負両方向となる両振り載荷状態となる。

これに対して、山野辺らは地震時におけるスタッドのせん断強度を検討する目的から、正負交番くり返し載荷試験を行なっている²⁾。しかし、試験に用いた両振り載荷のための試験装置がおおがかりであり、疲労強度の検討のためには不都合な面もある。

本研究では、簡易にスタッドの両振り試験を行なうことのできる試験体を考案し、この試験体を用いて片振り載荷および両振り載荷状態におけるスタッドの静的強度および疲労強度を比較検討した。

2. 試験体概要

ここでは、両振り載荷の可能な試験体として、図-1のような試験体を考案した。この試験体は頭付きスタッ

ドの押抜き試験方法(案)¹⁾に示された押抜き試験体を全体的に小型化し、両振り載荷を可能とするためにコンクリートブロック部分に改良を加えたものである。

スタッドには、全高 100mm、径 13mm のものを用い、鋼フランジ部の下端から 150mm の位置にスタッドを水平間隔 60mm で 2 本溶接した。また、鋼フランジ部とコンクリートブロックとが接触する面は、摩擦を低減するためにクラフトテープを鋼表面に貼り、その上にグリスを塗布した。コンクリートブロックは高さ 350mm、幅 300mm、厚さ 165mm とした。試験時にコンクリートブロックが引張破壊することを防ぐために、補強筋として異形棒鋼 D10 を 3 列 2 段、帯鉄筋として異形棒鋼 D6 を 3 列配置した。これらの配筋はスタッドに近づきすぎないように注意を払った。さらに、コンクリートブロック上下端で断面寸法と同一な、厚さ 3.2mm の鋼板を D10 の補強筋と溶接することにより、コンクリートの引張破壊に対する強度を高めた。そして、左右対称の試験体の鋼ウェブ部を、添接板で前後から挟むようにして 6 本の M16 ボルトを用いて結合した。

コンクリートブロックには 4 本の縦穴を設け、全ネジを通すことにより台座とコンクリートブロックとを固定できるようにした。これにより、鋼ウェブ部を試験機でつかんで引張り上げる引張載荷、下方へ押し込む圧縮載荷に対応することができ、両振り載荷試験を

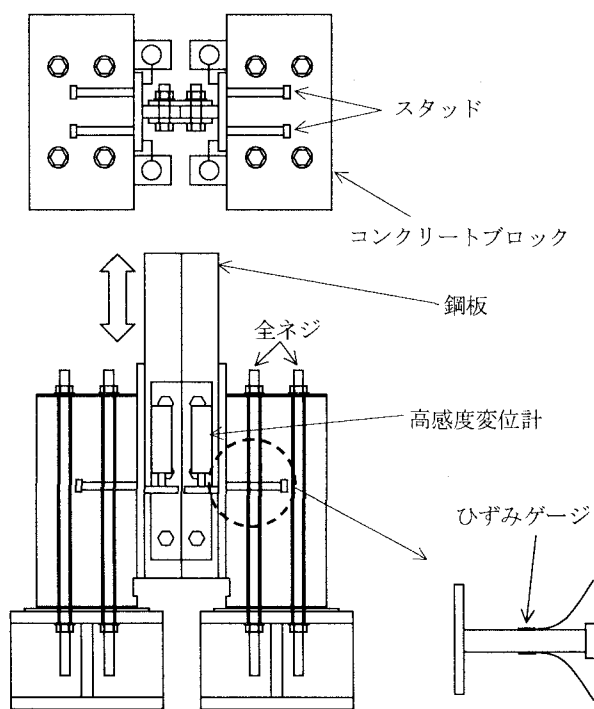


図-1 試験体 (タイプ1)

行うことができる。また、試験体を設置する際、台座とコンクリートブロックの間にゴムマットを数枚挟み込むことにより試験体を水平にし、荷重荷重が左右のスタッドに均等に作用するように注意した。

静的荷重および疲労荷重時の鋼部材とコンクリートブロックとの相対的なずれ変位を調べるため、スタッドが溶接されている高さと同じ位置に高感度変位計を4ヶ所取り付け、ずれ変位を計測した。また、静的試験および疲労試験中のスタッドの挙動を把握するために、図-1のようにスタッド高さ中央の荷重方向前面にひずみゲージを貼付した。

なお、今回の試験に用いたスタッドの降伏強度は 371N/mm^2 であった。また、静的試験および疲労試験の実施期間を通じたコンクリートの平均圧縮強度は約 47N/mm^2 であった。

3. 試験方法

3.1 静的試験

静的試験では、片振り荷重および両振り荷重それぞれ2体ずつの試験を実施した。

片振り荷重試験では、荷重サイクルを $0 \rightarrow 19.6 \rightarrow 0 \rightarrow 19.6 \rightarrow 0 \rightarrow 39.2 \rightarrow 0 \rightarrow 39.2$ (kN) … のように荷重と除荷を2回くり返し、ピーク荷重を 19.6kN ずつ増加させた。荷重の大きさが 137.2kN 以後については、単調荷重でスタッドの破断まで試験を行った。

両振り荷重試験では、荷重サイクルを $0 \rightarrow 19.6 \rightarrow 0 \rightarrow -19.6 \rightarrow 0 \rightarrow 19.6 \rightarrow 0 \rightarrow -19.6 \rightarrow 0 \rightarrow 39.2 \rightarrow 0 \rightarrow -39.2$ (kN) … のように荷重と除荷を2回くり返してピーク荷重を 19.6kN ずつ増加させた。荷重が 117.6kN 以後については、ピーク荷重を 9.8kN ずつ増

表-1 最大せん断耐力

試験体名	最大せん断耐力	平均値
静的片振り試験 No.1	49.3kN	52.0kN
静的片振り試験 No.2	54.6kN	
静的両振り試験 No.1	39.3kN	39.3kN
静的両振り試験 No.2	39.3kN	

加させてスタッドの破断まで試験を行った。

各試験時において、鋼部材とコンクリートブロックとのずれ変位、スタッドのひずみを計測した。

3.2 疲労試験

疲労試験では、片振り荷重および両振り荷重それぞれ4体ずつの試験を実施した。

片振り荷重試験では最小荷重を 4.9kN とし、最大荷重を変化させることにより荷重範囲を設定した。荷重範囲は、 34.3kN , 39.2kN , 44.1kN , 49kN の4段階に変化させて試験を行った。

両振り荷重試験では、荷重範囲を正負の範囲にとるため、その範囲は両振幅を基準とする。荷重範囲は、 34.3kN ($\pm 17.15\text{kN}$), 39.2kN ($\pm 19.6\text{kN}$), 44.1kN ($\pm 22.05\text{kN}$), 49kN ($\pm 24.5\text{kN}$) の4段階に変化させ試験を行った。

各試験とも振動数 3Hz で荷重を行い、鋼部材とコンクリートブロックとのずれ変位、スタッドのひずみを計測した。

4. 静的試験の試験結果および考察

図-2に静的片振り試験、図-3に静的両振り試験において得られたせん断力-ずれ変位関係を示す。縦軸は荷重荷重をスタッドの本数で除すことにより得られる、スタッド1本あたりに作用する水平せん断力であり、横軸はスタッド位置の鋼フランジとコンクリートブロックとのずれ変位である。これらの図より、片振り試験と両振り試験において得られるせん断力-ずれ変位関係は大きく異なっていることがわかる。

両者の性状の差異を明確にするために、まず、各試験から得られた最大せん断耐力を表-1に示す。最大せん断耐力とは、スタッド破断時のせん断耐力である。表-1の片振り試験および両振り試験それぞれの最大せん断耐力の平均値を比較すると、両振り試験の値は片振り試験の値の約75%の大きさとなった。しかし、両振り試験において、最大せん断耐力を両振幅で考えると、その値は片振幅で考えた値の約2倍となるので、逆に、両振り試験の最大せん断耐力の方が片振り試験の最大せん断耐力に比べ、1.5倍ほど大きい結果となる。

次に、各試験から得られたせん断力-ずれ変位関係から、ずれ剛性と降伏せん断耐力を求めた。

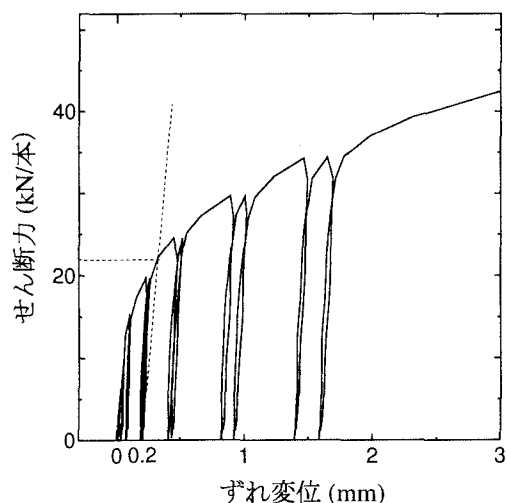


図-2 静的片振り試験のせん断力-ずれ変位関係

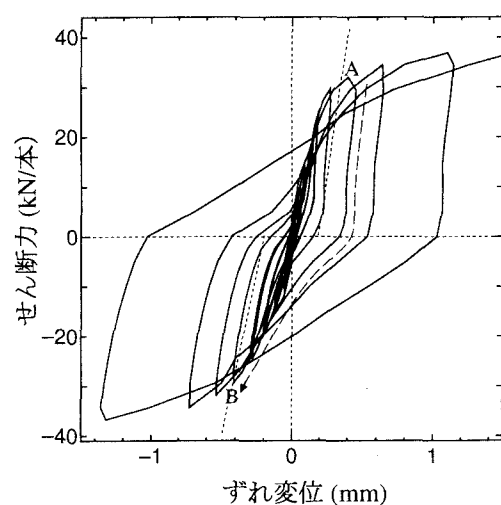


図-3 静的両振り試験のせん断力-ずれ変位関係

ここで、ずれ剛性とは、各試験のせん断力-ずれ変位関係における、最大せん断耐荷力の1/3荷重点に対応する初期割線剛性のことである。片振り試験ではそのままずれ剛性を求めることができるが、両振り試験ではせん断力が正の領域と負の領域において、それぞれずれ剛性を定義することができる。そこで、せん断力が正側と負側の範囲で、それぞれずれ剛性を求め、それを平均したものを両振り試験でのずれ剛性とした。その結果を表-2に示す。

一方、降伏せん断耐荷力については、頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)¹⁾にもとづき、ずれ変位0.2mmのオフセット位置から最大せん断耐荷力の1/3荷重点の初期割線勾配をもつ直線を引き、せん断力-ずれ変位曲線と交わる点でのせん断力を降伏せん断耐荷力とした。なお、両振り試験ではずれ剛性を求めるときと同様に、せん断力が正の領域と負の領域の両方で最大せん断耐荷力の1/3点の初期割線勾配が求められるので、正側と負側の両方で求めた降伏せん断耐荷力の平均値とした。その結果を表-3に示す。

表-2、表-3より、両振り試験のほうがずれ剛性およ

表-2 ずれ剛性

試験体名	ずれ剛性	平均値
静的片振り試験 No.1	122.0kN/mm	131.8 kN/mm
静的片振り試験 No.2	141.7kN/mm	
静的両振り試験 No.1	181.2kN/mm	182.0 kN/mm
静的両振り試験 No.2	182.7kN/mm	

表-3 降伏せん断耐荷力

試験体名	降伏せん断耐荷力	平均値
静的片振り試験 No.1	23.4kN	27.5kN
静的片振り試験 No.2	31.6kN	
静的両振り試験 No.1	29.5kN	29.5kN
静的両振り試験 No.2	29.5kN	

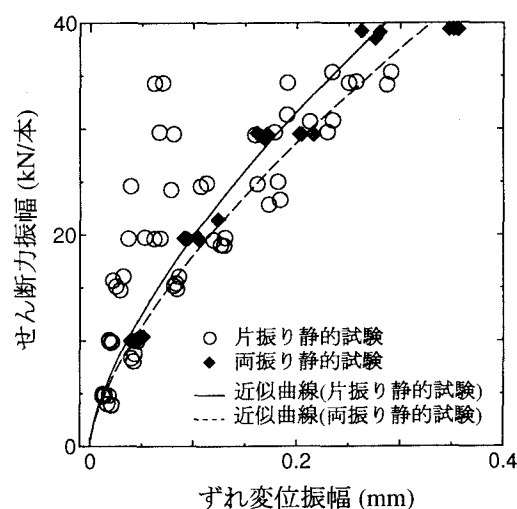


図-4 せん断力振幅-変位振幅関係

び降伏せん断耐荷力ともに大きい結果となった。片振り試験および両振り試験ともに荷重振幅の小さい範囲では、せん断力-ずれ変位関係に大きな違いはない。しかし、片振り試験に対し両振り試験の方が最大せん断耐荷力が小さいので、両振り試験の最大せん断耐荷力の1/3荷重点に対応する初期割線剛性は、片振り試験の初期割線剛性よりも大きくなるものと考えられる。

次に、片振り試験、両振り試験のせん断力-ずれ変位関係より得られた、せん断力振幅-ずれ変位振幅関係を図-4に示す。縦軸のせん断力振幅の定め方は、片振り試験ではあるピーク荷重から最小荷重までをせん断力振幅とし、両振り試験ではあるピーク荷重から反対側のピーク荷重までをせん断力振幅とした。横軸はそれぞれのせん断力振幅に対応するずれ変位振幅とした。なお、ずれ変位振幅には、ずれ変位計測点4ヶ所のずれ変位振幅の平均値を用いた。なお、図中に実線と破線で示す片振り試験および両振り試験の近似曲線は、 $S = C\delta^{2/3}$ として求めたものである。ここで S は、せん断力振幅、 δ はずれ変位振幅、 C は定数である。片振り試験および両振り試験から得られた近似曲線より、同じせん断

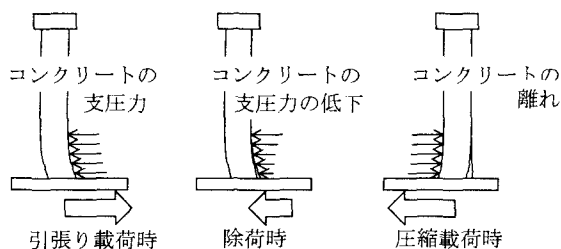


図-5 ずれ変位発生概念図

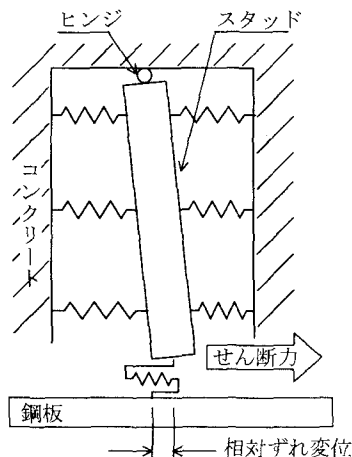


図-6 解析モデル

力振幅に対するずれ変位振幅は、両振り試験のずれ変位振幅の方が片振り試験よりも値よりも大きいといえる。しかし、せん断力振幅が小さいほどその差は小さいことがわかる。

ところで、図-3の静的両振り試験で得られたせん断力-相対ずれ変位関係に着目してみる。図-3において、ピーク荷重A点から破線に沿って除荷を始めると、せん断力がゼロ付近を境にずれ剛性が低下し、その後、逆側のピーク荷重B点近くまで載荷を続けると、ずれ剛性が再び回復するという現象がみられる。この現象を図-5に示す概念図を用いて説明する。

荷重載荷時には、せん断力に抵抗する要素として、スタッド自身とコンクリートの支圧力が存在する。スタッドに作用するせん断力が大きくなるにつれて、支圧力を受けるコンクリート部分が非線形挙動を示すために、荷重除荷時において支圧力を受けるコンクリート部分に残留変位が生じるようになる。したがって、スタッドに作用するせん断力がゼロ付近において、スタッドの基部周辺のコンクリート部分とスタッド自身との間に離れが生じ、せん断力に抵抗する要素はスタッド自身のみとなり、ずれ剛性が低下すると考えられる。引き続き、逆側への載荷をはじめると、スタッドは先ほどとは反対方向からのコンクリートの支圧力を受けはじめ、せん断力に抵抗する要素として、スタッド自身にコンクリートの支圧力が加わることとなる。したがって、ずれ剛性が回復すると考えられる。

このような概念を確かめるために、ここではスタッドとその周囲のコンクリートを単純なモデルで表した簡

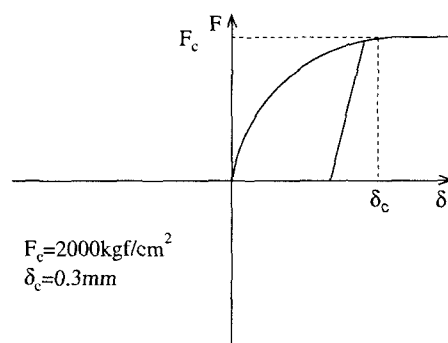


図-7 コンクリート支圧力のばね特性

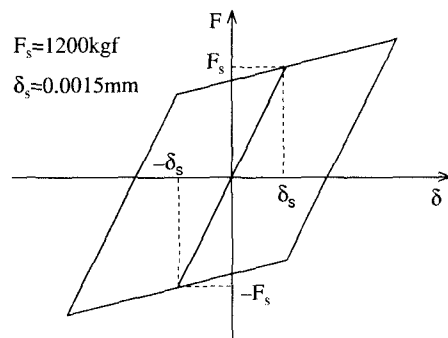


図-8 スタッド基部のばね特性

易解析モデルを用いて、静的片振り試験および静的両振り試験時のスタッドのせん断力-ずれ変位関係を検討した。解析に用いた簡易モデルを図-6に示す。スタッドは剛棒と考え、棒の先端にヒンジ、棒の下端にせん断ばねを設けることにより、スタッドのせん断変形特性を表した。また、スタッドの載荷方向後面に軸ばねを3本配置することにより、コンクリートの支圧力を表現した。せん断力はスタッド基部に集中荷重として作用するものと仮定した。

コンクリートの支圧力のばね特性は、コンクリート標準示方書³⁾に記載されているコンクリートの応力-ひずみ関係にもとづいて、図-7のような力-変位関係とした。また、スタッド基部のせん断ばね特性は、図-8のようなバイリニア型の力-変位関係とした。

解析における荷重載荷は、実際の静的試験と同様にピーク荷重を19.6kNずつ増加させ、載荷と除荷を繰り返す方法で行なった。

以上の解析から得られた静的片振り試験のせん断力-ずれ変位関係を図-9に示す。スタッドに作用するせん断力がしだいに大きくなると、スタッド基部のばねが降伏変位に達し、荷重除荷時に生じる残留変位が大きくなり始める。また、荷重除荷時にせん断力が小さくなってくると、図中の破線のようにせん断力-ずれ変位曲線の勾配が小さくなる現象が認められる。この現象は、それまではスタッドに作用するせん断力に対し、スタッド基部のせん断ばねとコンクリートの支圧力のばねにより抵抗していたものが、コンクリートの支圧力のばねの抵抗がなくなり、スタッド基部のせん断ばねのみでせん断力を受け持つようになったためである。

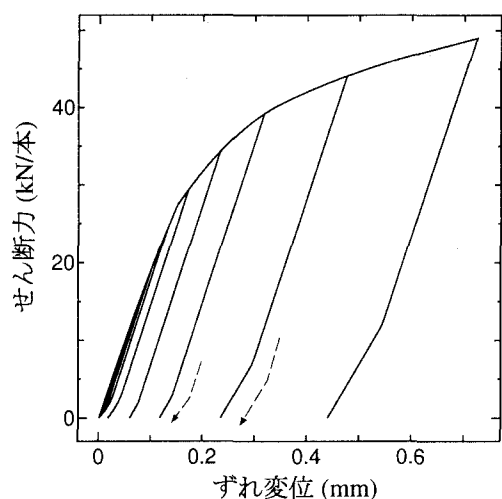


図-9 解析による静的片振り試験のせん断力-ずれ変位関係

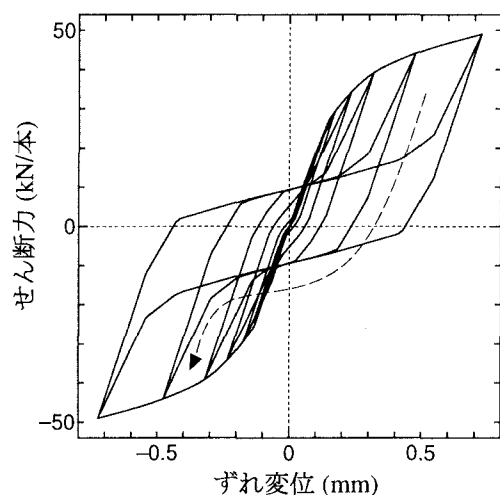


図-10 解析による静的両振り試験のせん断力-ずれ変位関係

一方、解析から得られた静的両振り試験のせん断力-ずれ変位関係を図-10に示す。除荷時において、スタッドに作用するせん断力の大きさがゼロ付近を境にして、図中の破線のようにせん断力-ずれ変位曲線の勾配が一旦は小さくなり、その後再びせん断力-ずれ変位曲線の勾配が回復する。これらの現象は、スタッドに作用するせん断力が小さい範囲ではスタッド基部のせん断ばねのみでせん断力を受け持つようになり、スタッドに作用するせん断力が反対側に大きくなり始めると、再びコンクリートの支圧力が回復し、スタッド基部とコンクリートの支圧力のばねによりせん断力を受け持つためである。これらの静的片振り試験と静的両振り試験の簡易モデルによる解析の結果は、図-5に示した概念に合致するものである。また、静的片振り試験の解析結果である図-9と静的両振り試験の解析結果である図-10とを、それぞれの試験結果である図-2、図-3と比べてみると、定性的には現象を捉えていると言える。

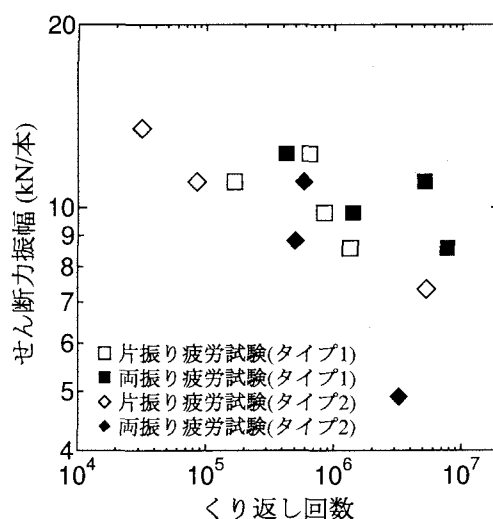


図-11 せん断力範囲-くり返し回数関係

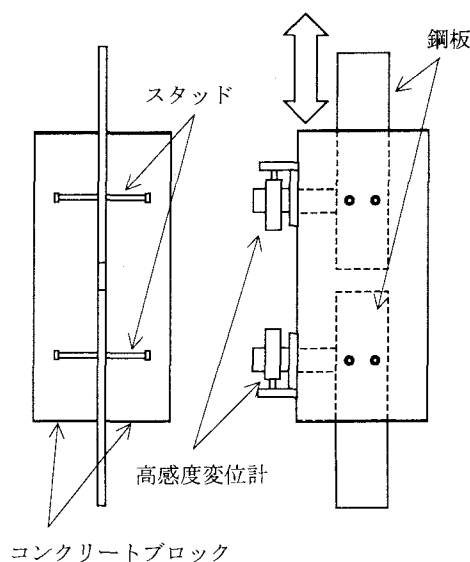


図-12 試験体 (タイプ 2)

5. 疲労試験の試験結果および考察

疲労試験から得られたせん断力振幅-くり返し回数関係を図-11にまとめる。縦軸は疲労試験において载荷した荷重振幅を、試験体のスタッド本数で除したスタッド1本あたりに作用するせん断力振幅である。横軸はスタッドが破断するまでの荷重くり返し回数である。なお、図中の試験体タイプ1は図-1に示す試験体のものであり、試験体タイプ2は図-12に示す別形状の試験体のものである。この試験体タイプ2は、図-1の試験体タイプ1に先立って行われた両振り試験用の試験体である。ただし、スタッドの側方からのコンクリート打設、製作に困難を伴うなどの問題点を有していた試験体である。なお、試験体タイプ2に用いられたスタッドは、試験体タイプ1のスタッドと同一寸法のものであり、コンクリートの圧縮強度に関しては、試験体タイプ1の強度の70%程度である約 34N/mm^2 であった。

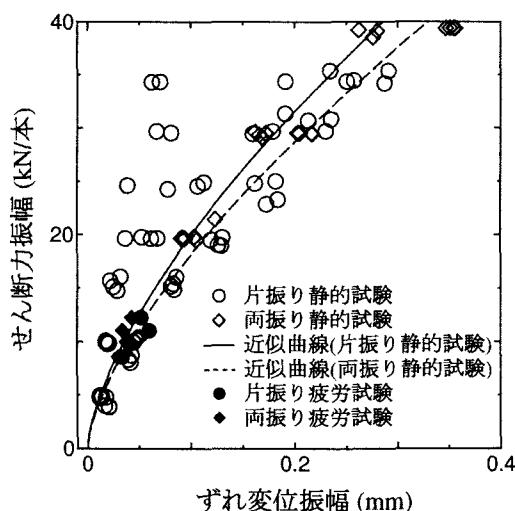


図-13 せん断力振幅-変位振幅関係

図-11より、片振り試験と両振り試験とでスタッドの疲労強度に明確な差異は認められない。これは、先ほど図-4に示した静的試験のせん断力振幅-ずれ変位振幅関係のグラフに、疲労試験でのせん断力振幅-ずれ変位振幅関係を付け加えた図-13により説明することができる。なお、疲労試験におけるずれ変位振幅は疲労試験の初期の段階において、振動数1Hzで荷重を数百回載荷した際に求めたものである。図-13より、疲労試験におけるせん断力振幅は最大でも13.5kNであり、静的試験時の最大せん断耐力の35%以下である。今回の疲労試験時のせん断力振幅の大きさは、片振り試験と両振り試験とでずれ変位にあまり違いのない領域の大きさであった。したがって、片振り試験と両振り試験とで生じるずれ変位振幅に大きな違いがなかったため、疲労強度に明確な差異が表れなかったと考えられる。また、試験体タイプ1とタイプ2での形状の違いによる疲労強度のそれほどの差異は認められなかった。

一方、図-14には、スタッドのひずみ振幅-くり返し回数関係を示す。縦軸のひずみ振幅は、疲労試験の初期の段階にずれ変位振幅とともに計測したものである。なお、ひずみ振幅には、スタッドに貼付した全てのひずみゲージの計測値を平均したものを用いた。図-14より、ひずみ振幅-くり返し回数関係においても疲労片振り試験と疲労両振り試験に明確な差異は認められなかった。また、図-14のひずみ振幅の大きさは、図-11のくり返し回数の大小とに相関があるといえる。

6. おわりに

簡易にスタッドの両振り載荷が可能な押抜き試験体を考案し、この試験体を用いて片振り載荷試験と両振り載荷試験を行ない、スタッドの静的強度および疲労強度について比較検討した結果、以下の結論を得た。

1. 一方方向の最大せん断耐力に着目すると、両振り試験のほうが弱い結果となったが、せん断力を両振幅で考えると、逆に両振り試験のほうが強い結

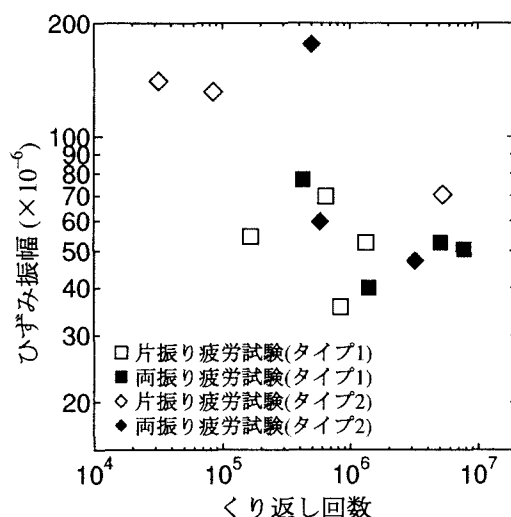


図-14 ひずみ振幅-くり返し回数関係

果となった。

2. 簡易モデルを用いた解析により、スタッドの静的せん断力-ずれ変位挙動を定性的に捉えることができた。
3. 疲労試験では、スタッドに作用したせん断力範囲が小さく、片振り載荷と両振り載荷において、疲労強度に明確な差異は認められなかった。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)，JSSCテクニカルレポートNo.35，1997.11.
- 2) 山野辺宏治，矢部喜堂，和田章：頭付きスタッドの力学モデルの提案および合成梁の弾塑性解析，鋼構造年次論文報告集第5巻，1997.11.
- 3) 土木学会：コンクリート示方書 設計編 平成8年度版
- 4) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物(平成9年度版)，pp163-166，1997. 9.
- 5) 平城弘一，栗田章光，赤尾親助：スタッドの押抜き挙動に及ぼす影響因子に関する基礎的研究，合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp81-89，1986.9.
- 6) 田島二郎，町田篤彦，大友健：スタッドシャーコネクターによる鋼・コンクリート部材接合部の強度変形状に関する基礎的研究，合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp137-144，1986.9.
- 7) 平城弘一，松井繁之，福本秀士：頭付きスタッドの強度評価式の誘導-静的強度評価式-，構造工学論文集 Vol.35 A，pp1221-1232，1989.3.
- 8) 平城弘一，松井繁之，福本秀士：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.35 A，pp1233-1244，1989.3.
- 9) 松井繁之，平城弘一，三好英二：スタッドの疲労強度向上に関する実験的研究，合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp91-98，1986.9.