

押抜きおよび桁試験によるスラブ止めの 水平せん断ずれ性状と疲労強度の検討

INVESTIGATION OF HORIZONTAL SHEAR BEHAVIOR AND FATIGUE STRENGTH OF SLAB CLAMP BY PUSH-OUT AND GIRDER TEST

中島章典¹・溝江慶久²・廣田 篤³・吉原知佳⁴・西園広之⁵・大江浩一⁶

Akinori NAKAJIMA, Yoshihisa MIZOE, Atsushi HIROTA, Tomoyoshi YOSHIWARA,
Hiroyuki NISHIZONO and Hirokazu OOE

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 宇都宮市石井町 2753)

²正会員 工修 川田工業 技術開発本部技術研究室 (〒114 東京都北区滝野川 1-3-11)

³正会員 東洋建設 大阪営業所 (〒550 大阪市西区立売堀 1-3-13)

⁴正会員 鹿島建設 土木設計本部 (〒107 東京都港区赤坂 6-5-30)

⁵正会員 トビー工業鹿沼製作所 鉄構工場工場長 (〒322 鹿沼市さつき町 13-1)

⁶正会員 トビー工業鹿沼製作所 技術課 (〒322 鹿沼市さつき町 13-1)

Through recent research, it has been pointed out that slab clamps generally used in a plate girder bridge transmit a horizontal shearing force. Therefore, it is required to clarify a relation between static horizontal shear and a slip of a slab clamp, and its fatigue strength. In the past author's research, the horizontal shear transmitted by the slab clamp in static girder tests and the cycles up to the fatigue fracture of the slab clamp in fatigue tests were not caught adequately. Then, in this paper, the push-out test and the girder test under sagging moment and hogging moment are carried out on improving above described situation, and the static horizontal shear behavior and fatigue characteristics of the slab clamp are investigated.

Key Words : slab clamp, plate girder bridge, fatigue strength, horizontal shear behavior, fatigue fracture monitoring instrument

1. はじめに

非合成桁橋に通常用いられるスラブ止めは、実際にはかなり剛なずれ止めであり、上載荷重による桁の曲げせん断に伴ってスラブ止めも水平せん断力を伝達していることが予想されてきた。このような観点から、著者らは、実寸大スラブ止めを取り付けた押抜き試験体を用いて、スラブ止めの静的水平せん断ずれ性状および疲労強度特性を検討するとともに、車両走行時にスラブ止めに作用する繰り返しのせん断力が、スラブ止めの疲労強度に及ぼす影響を検討した¹⁾。しかし、押抜き試験を通して得られるずれ止めの水平せん断ずれ性状や疲労強度特性は、必ずしも桁内のずれ止めのそれらに一致するとは限らないことが指摘されている²⁾。

さらに、スラブ止めがある程度剛なずれ止めであるとすれば、連続非合成桁橋では、中間支点付近の負曲げによりコンクリート床版にひび割れが生じる可能性もあるため、負曲げ領域にあるスラブ止めの水平せん断ずれ性状などを検討しておくことも必要である。

そこで、著者らは径 10mm の丸鋼のスラブ止めを取り付けた桁試験体と押抜き試験体を用いて、静的載荷試験および疲労試験を行い、スラブ止めの静的水平せん断ずれ性状および疲労強度を調べた³⁾。しかしながら、その実験研究では、桁試験、特に負曲げ桁試験体

内のスラブ止めに作用する静的水平せん断力をうまく算定できないこと、また、桁試験体の疲労試験時においてスラブ止めの疲労破壊までの繰り返し回数が明確に把握できないことなどの問題点があった。

本研究では、上述の問題点を改善して、スラブ止めの静的水平せん断ずれ性状および疲労強度特性を再検討するために、スラブ止め前後の鋼桁のひずみを詳細に計測し、また、スラブ止めの疲労破断感知装置を新たに考案して、押抜き試験体および正、負曲げ桁試験体の静的載荷試験および疲労試験を改めて実施した。さらに、その結果に基づいて、スラブ止めの静的水平せん断ずれ性状および疲労強度を試験体のタイプごとに相互に比較検討した。

2. 実験方法

2.1 概要

静的載荷試験および疲労試験に用いた押抜き試験体および正、負曲げ桁試験体を図-1～図-3 に示す。ただし、図-2 および図-3 の桁試験体では全長の 1/2 部分のみを示している。スラブ止めは径 10mm の丸鋼鉄筋とし、いずれもフランジの長手方向に 30° の角度で溶接により取り付け、その後 45° の角度で曲げ上げて形を整えた。

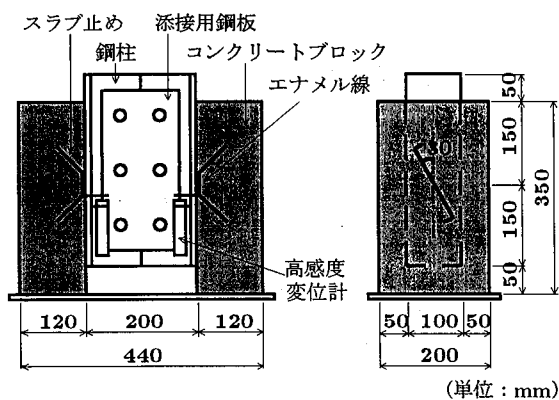


図-1 押抜き試験体

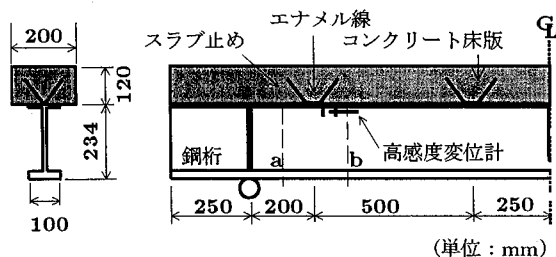


図-2 正曲げ桁試験体

押抜き試験体は、図-1のように鋼柱の高さを350mmとし、フランジ(100×9mm)およびウェブ(90×9mm)を溶接により組み立てスラブ止め1本を取り付けたT形鋼2体一組からなる。桁試験体と同じ状態でコンクリートブロック(200×120mm)を打設できるように、フランジ面を上にして左右のコンクリートブロックを同時に打設し、コンクリート打設後28日以降に、分割していた2つのT形部材を図-1のように添接板とボルトを用いて1つの押抜き試験体に組み立てた⁴⁾。

正曲げ桁試験体は図-2のように上フランジ(100×9mm)、下フランジ(100×25mm)およびウェブ(200×9mm)の鋼板を溶接により組み立てた、全長2400mm、スパン1900mmの試験体であり、1つの試験体に50cm間隔でスラブ止めを4本取り付けた。コンクリート床版の断面は、押抜き試験体のコンクリートブロックと同じく幅200mm、高さ120mmとし、その内部にD10鉄筋を2段で合計6本長手方向に配置し、橋軸直角方向にはD6鉄筋を50～135mm間隔で配置した。

負曲げ桁試験体は図-3のように上フランジ(コンクリート床版側、100×15mm)、下フランジ(100×25mm)およびウェブ(300×9mm)の鋼板を溶接により組み立てた試験体で、コンクリート床版内にはD13鉄筋を2段で合計6本配置した。他の条件については正曲げ桁試験体と同じである。

いずれの試験体も、鋼フランジとコンクリートブロックあるいは床版との間の摩擦や付着がスラブ止めの水平せん断伝達性状に及ぼす影響を極力小さくするため

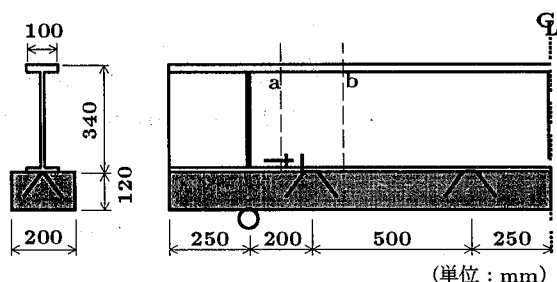


図-3 負曲げ桁試験体

表-1 材料特性

材料	降伏応力度 or 圧縮強度	弾性係数
9mm 鋼板	305 MPa	202 GPa
15mm 鋼板	265 MPa	205 GPa
25mm 鋼板	229 MPa	204 GPa
D6 鉄筋	255 MPa	180 GPa
D10 鉄筋	335 MPa	181 GPa
D13 鉄筋	335 MPa	183 GPa
スラブ止め(φ10 丸鋼)	398 MPa	195 GPa
コンクリート (28 日標準)	36.6 MPa	37.8 GPa
(試験時平均)	42.6 MPa	36.3 GPa

に、鋼フランジ表面にクラフトテープを丁寧に貼り、その上にグリースを塗布した。各試験体とも静的載荷試験用として2体、疲労試験用として3体製作した。

表-1にコンクリート、鋼板、スラブ止めおよび鉄筋の材料特性をまとめる。

2.2 静的載荷試験

疲労試験に先立って、スラブ止めの静的水平せん断ずれ性状を把握するために、静的押抜き試験および桁試験を行った。桁試験については1点集中荷重をスパン中央に載荷した。桁載荷試験においてコンクリート床版に大きな変状が生じない範囲内で、正曲げ試験では、50, 100, 150, 200kNを、負曲げ桁試験では、50, 90, 120, 150, 180, 240を1つの荷重サイクルの最大荷重として、それぞれ2回の載荷除荷を繰り返した後、桁が破壊するまで荷重を載荷した。ただし、負曲げ桁試験体では、図-3のように鋼桁とコンクリート床版を正曲げ桁試験体と上下逆にして荷重を載荷した。また桁試験では、より大きい水平せん断力が生じると考えられる支点側スラブ止めの前後10cmの鋼桁断面(図中のa, b断面)のみに着目し、1断面に20枚のひずみゲージを貼付して鋼桁のひずみを計測した(図-7参照)。

コンクリート床版と鋼桁との相対ずれ変位を計測するため、押抜き試験体ではスラブ止めの中心高さ4箇所(図-1)に、桁試験体では外側スラブ止め取り付け

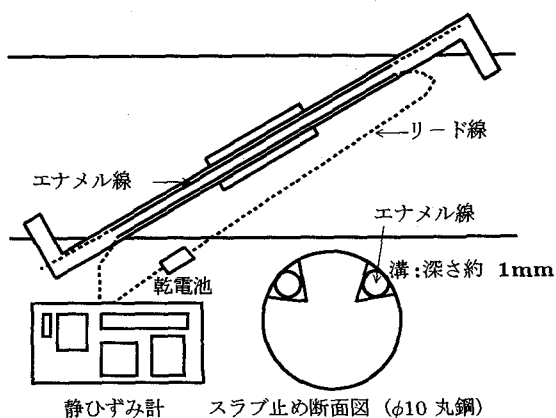


図-4 疲労破断感知装置

位置の両側 2 個所で合計 4 個所（図-2 および図-3）に高感度変位計を設置した。さらに桁試験では、荷重載荷点と支点位置にダイヤルゲージを設置してたわみを計測した。

以後、静的載荷試験に用いた押抜き試験体を PS3, PS4, 正曲げ桁試験体を SS3, SS4, 負曲げ桁試験体を HS3, HS4 と呼ぶ。

2.3 疲労試験

疲労試験に用いた試験体は、どのタイプも静的載荷試験に用いた試験体と同じプロポーションであり、荷重も同じ位置に載荷した。また、疲労試験に際しても静的載荷試験と同じ位置で、スラブ止め位置の鋼フランジとコンクリートブロックあるいは床版との相対ずれ変位を計測するために高感度変位計を取り付けた。

著者らのスラブ止めの疲労強度を把握するための既往の研究では、スラブ止めがコンクリート床版に埋め込まれた状態で疲労試験を実施しているため、スラブ止めの疲労破壊までの繰返し回数を明確に把握することができなかった³⁾。そこで本研究では、スラブ止めの疲労破壊までの繰返し回数を明確に把握するために、エナメル線を用いた疲労破断感知装置を新たに考案して用いた。この疲労破断感知装置の設置状況および計測器接続状況を図-4 に示す。この疲労破断感知装置によるスラブ止めの疲労破断の感知は以下のような手順によって行う。

1. 乾電池によって電圧を与えた径 0.26mm のエナメル線をスラブ止めの着目位置に接着しておく。ただし、エナメル線がスラブ止めより剥離するのを防ぐため、スラブ止めの長さ方向に深さ約 1mm の溝を彫り、接着剤を用いて溝の中にエナメル線を貼付した。
2. 静ひずみ計を用いて、疲労試験中に 1000～3000 回ごとの一定間隔でエナメル線の電圧を計測する。
3. スラブ止めの疲労破断と同時にエナメル線が切断され、計測した電圧が著しく変化することでスラ

表-2 疲労試験の荷重範囲（下限荷重 9.8kN）

試験体の タイプ	試験体名	上限荷重	せん断力 範囲
押抜き 試験体	PF4	98.0kN	44.1kN
	PF5	78.4kN	34.3kN
	PF6	68.6kN	29.4kN
正曲げ桁 試験体	SF4	107.8kN	30.0kN
	SF5	88.2kN	23.4kN
	SF6	68.6kN	20.5kN
負曲げ桁 試験体	HF4	147.0kN	40.0kN
	HF5	205.8kN	48.1kN
	HF6	225.4kN	52.5kN

ブ止めの破断を感知する。

この疲労破断感知装置を押抜き試験体では両側のスラブ止めに、桁試験体では両支点側スラブ止めに對し、それぞれ 2 本ずつ取り付けた。

疲労試験中の荷重の載荷方法は、荷重波形を正弦波、繰返し速度 5Hz, 下限荷重 9.8kN の部分片振り圧縮とし、表-2 に示すように上限荷重を各試験体ごとに 3 段階に変えて行った。特に桁試験の上限荷重は、スラブ止めの疲労破壊までの繰返し回数がある幅を持って得られるように、静的載荷試験で求められた荷重とスラブ止めに作用する水平せん断力の関係に着目して決定した。

疲労試験に用いた押抜き試験体を PF4, PF5, PF6, 正曲げ桁試験体を SF4, SF5, SF6, 負曲げ桁試験体を HF4, HF5, HF6 と呼ぶ。

3. 実験結果と考察

3.1 桁試験体の荷重-たわみ関係およびひび割れ状況

まず、静的載荷試験時に計測したスパン中央部のたわみと荷重の関係を図-5 に示す。また、同図には参考のために完全合成理論値および非合成理論値も示している。図-5-a は正曲げ桁試験の結果であり、図-5-b は負曲げ桁試験の結果である。本研究では、スラブ止めにできるだけ大きいせん断力が作用するように桁試験体のプロポーションやスラブ止めの本数を決定したので、比較的荷重が小さい範囲の荷重たわみ関係はかなり非合成理論値に近いことがわかる。

一方、桁試験体の終局状態におけるコンクリート床版のひび割れ状況を、正曲げ試験体 SS3 および負曲げ試験体 HS3 について図-6 に示す。正曲げ試験体では、鋼桁下フランジが塑性化した後コンクリート床版下縁にもひび割れが生じて、最終的にはスパン中央部のコンクリート床版上縁が圧壊してたわみが急激に増加した。これに対して、負曲げ試験体では、荷重の増加に伴

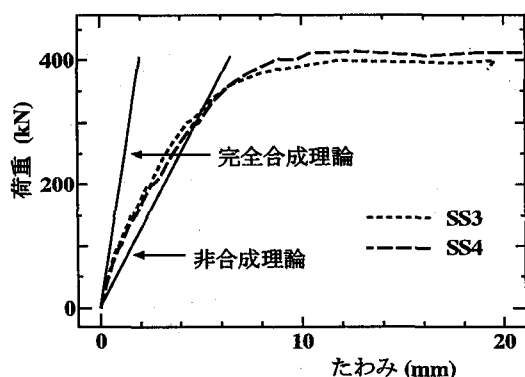


図-5-a 正曲げ桁試験

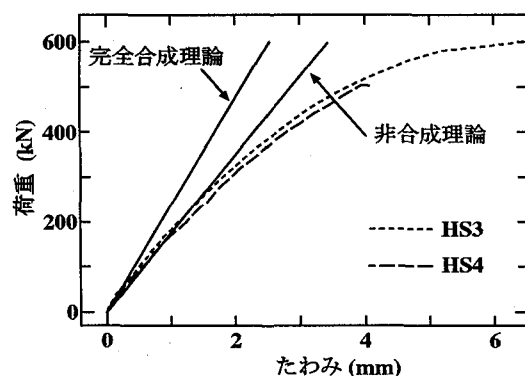


図-5-b 負曲げ桁試験

図-5 正曲げ桁試験体鋼桁断面のたわみ

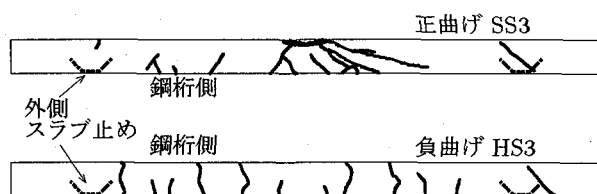


図-6 コンクリート床版のひび割れ状況

なってコンクリート床版にひび割れが生じ、最終的にはスラブ止め前後のコンクリートの破壊によって、コンクリート床版と鋼桁との合成が失われて終局状態に至った。ただし、以下でスラブ止めの水平せん断力とずれ変位の関係を整理した荷重範囲では、着目した支点側スラブ止め付近のコンクリート床版には、ほとんどひび割れが発生していなかったことを付記する。

3.2 桁試験におけるスラブ止めの伝達せん断力の算定法

図-7は正曲げ桁試験体 SS3 および負曲げ桁試験体 HS3 について、1つの支点側スラブ止め前後に貼付したひずみゲージで計測された鋼桁の桁高方向ひずみ分布の例を示す。この図では、縦軸が断面の高さ方向の位置を、横軸がひずみを表しており、ひずみ分布に対応する断面はそれぞれ図-2、図-3の断面 a、b である。このとき、ひずみゲージはそれぞれ図-7-a および図-7-b の左のように貼付している。正曲げ桁試験体 SS3 の断

面 b におけるひずみ分布においては、比較的平面保持の仮定に近い分布となっているが、その他については、載荷荷重が小さくひずみも小さい場合においても平面保持の仮定が成立していないことがわかる。

そこで、鋼桁断面の軸力を正確に算定するために、平面保持を仮定せずに上述のひずみ分布に基づいて軸力を算定した。このようにして得られた軸力と載荷荷重との関係を図-8に示す。縦軸は載荷荷重、横軸はひずみ分布に基づいて得られた軸力であり、載荷荷重が、正曲げでは 200kN まで (図-8-a)、負曲げでは 240kN まで (図-8-b) の範囲を示している。図中の断面 a、b は前述のように 1つの支点側スラブ止めの支点側と載荷点側断面の軸力に対応している。断面 a は本来軸力が生じない断面であるので、荷重の変化に伴う軸力の変化は小さく、断面 b の軸力の方が載荷荷重に伴う軸力の変化量は大きい。しかし、どちらの断面においても、1つの荷重サイクルの最大荷重から除荷を行い荷重をゼロに戻した際に、それぞれの断面の軸力がゼロにならず、特に負曲げ桁試験体 HS3 では、複雑な挙動を示していることがわかる。この理由は、ここでひずみを計測した断面が複雑な応力状態を示す支点付近にあり、多軸応力の作用により断面の一部が非弾性挙動を示した影響であると考えられる。

ところで、スラブ止めが伝達する水平せん断力は図-9に示すように、断面 b の軸力から断面 a の軸力を差し引いた値で算定されることが考えられる。そこで、このようにして求めた水平せん断力と荷重の関係を図-10に示す。縦軸は荷重を、横軸は上述のように軸力差として算定した水平せん断力である。図-10-a は正曲げ桁試験体 SS3 の関係であり、図-10-b は負曲げ桁試験体 HS3 の関係である。これらの図から、特に負曲げ桁試験体の関係において、荷重をゼロに戻した場合に水平せん断力の値がゼロになっていないことがわかる。この理由は、上述のように荷重をゼロに戻した場合に軸力がそれぞれの断面でゼロとならないためであり、スラブ止めの疲労強度を検討する立場から、一般的なせん断力-ずれ変位関係における任意のせん断力の大きさからの除荷・載荷の割線の関係を求めるためには、これを補正する必要があると考えられる。

そこで、この荷重と水平せん断力の関係において、最大荷重-ゼロ-最大荷重の 1つの荷重サイクルに対して、各最大荷重を起点として形成されるループ全体を、荷重ゼロ時に残留する水平せん断力がゼロになるような補正を行う。このようにして得られたスラブ止めの水平せん断力と荷重の関係を図-11に示す。図-11-b の負曲げ桁試験体 HS3 の結果では、荷重をゼロに戻した場合に、スラブ止めが伝達する水平せん断力もゼロに補正されたことがわかる。以上の整理によって、桁試験においてスラブ止めが伝達する水平せん断力と載荷荷重の関係が求められた。

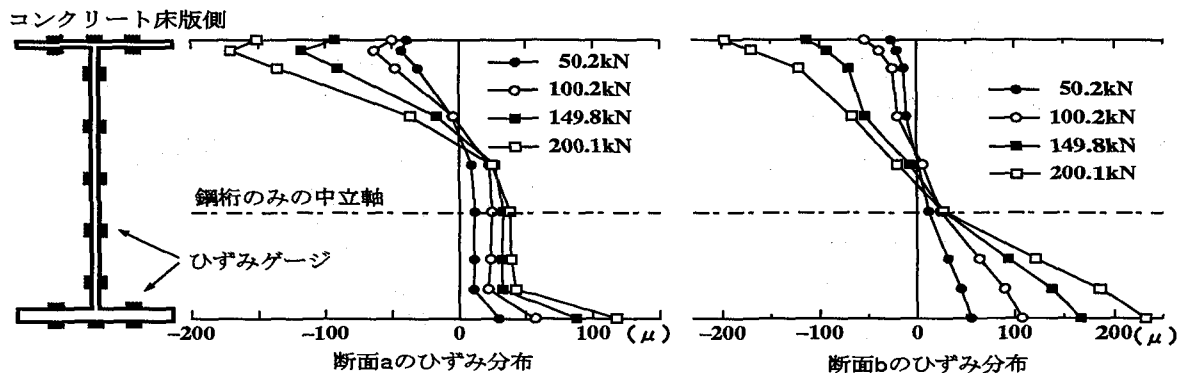


図-7-a 正曲げ桁試験 SS3

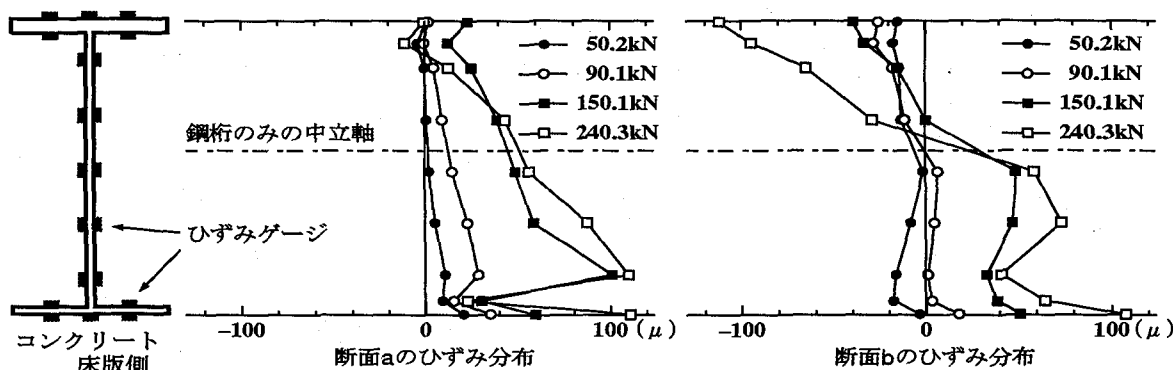


図-7-b 負曲げ桁試験 HS3

図-7 正曲げ桁試験体鋼筋断面の桁高方向ひずみ分布

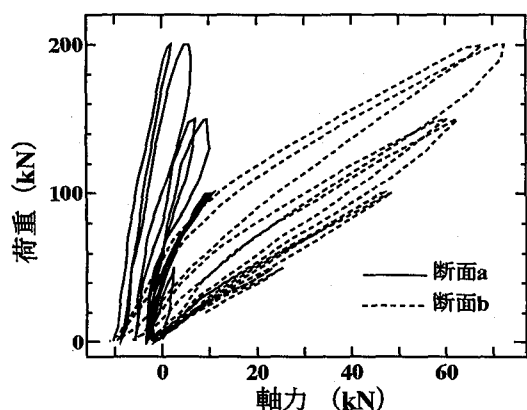


図-8-a 正曲げ桁試験体 SS3

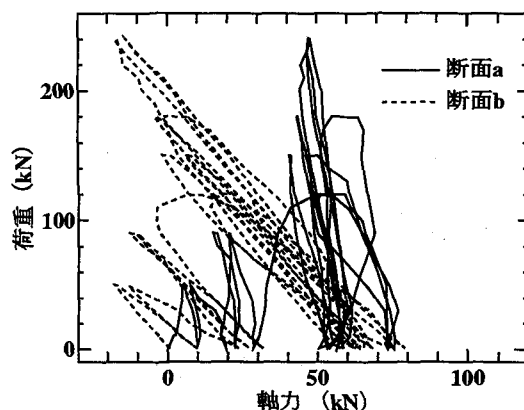


図-8-b 負曲げ桁試験体 HS3

図-8 荷重と軸力の関係

一方、同じ桁試験体の同位置のスラブ止めに対して計測された図-12のような荷重とずれ変位の関係を、図-11の荷重と水平せん断力との関係に関連付けることによって、桁試験におけるスラブ止めの水平せん断力とずれ変位の関係が求められる。このようにして求めた着目スラブ止めの水平せん断力とずれ変位の関係の例が図-13である。縦軸は水平せん断力を表し、横軸はずれ変位を表しているが、横軸のずれ変位についても荷重をゼロに戻した時に残留するずれ変位をゼロにする補正を行っている。この図は、桁試験の各荷重サイクルで載荷除荷を繰り返した場合に対応する水平

せん断力範囲におけるスラブ止めの水平せん断力とずれ変位の関係を表している。

このようにして得られた図の各荷重サイクルごとの水平せん断力とずれ変位との関係のA～Dの各頂点を結ぶことによって、桁試験におけるスラブ止めの水平せん断力とずれ変位の一般的な関係（包絡線）が得られる。したがって、任意の水平せん断力の大きさに除荷載荷を行った場合のスラブ止めの水平せん断力とずれ変位の関係は、原点とその水平せん断力の間の割線で与えられることになる。そこで以下では、正曲げおよび負曲げ桁試験におけるスラブ止めのこのような水平

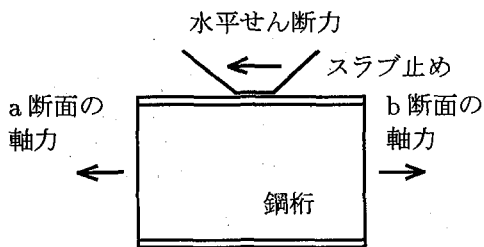


図-9 スラブ止めの水平伝達せん断力の算定

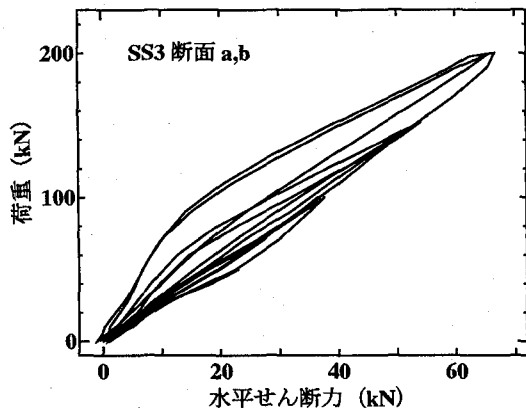


図-10-a 正曲げ桁試験体 SS3

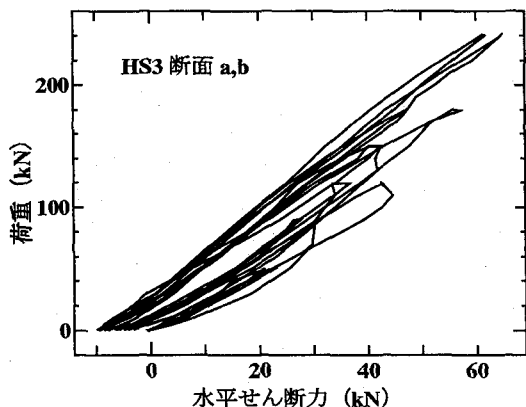


図-10-b 負曲げ桁試験体 HS3

図-10 桁試験における荷重と水平せん断力の関係 (補正なし)

せん断力とずれ変位の関係に着目して結果を整理する。

3.3 スラブ止めの静的水平せん断ずれ性状

前節のようにして求められた正曲げ桁試験におけるスラブ止めの水平せん断力とずれ変位の関係を図-14-aに、負曲げ桁試験の関係を図-14-bに、それぞれ押抜き試験の結果とともに示す。

ここで、両図の縦軸はスラブ止めに作用する水平せん断力を表し、横軸はコンクリート床版と鋼桁とのずれ変位を表す。押抜き試験のせん断力とずれ変位の関係においても桁試験の場合と同様、各荷重サイクルごとに除荷時の残留ずれ変位をゼロにする補正を行った。これらの図では、正、負曲げ桁試験とも、2つの試験体について、両支点側で求めた結果をNo.1, No.2とし

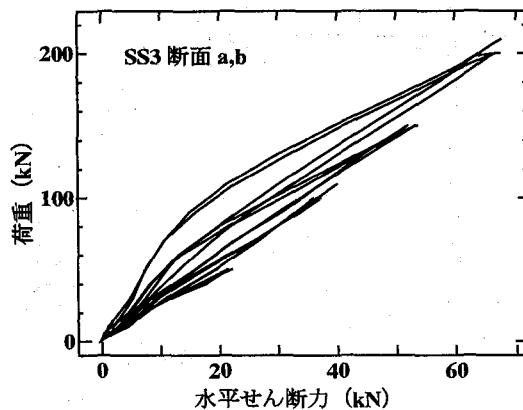


図-11-a 正曲げ桁試験体 SS3

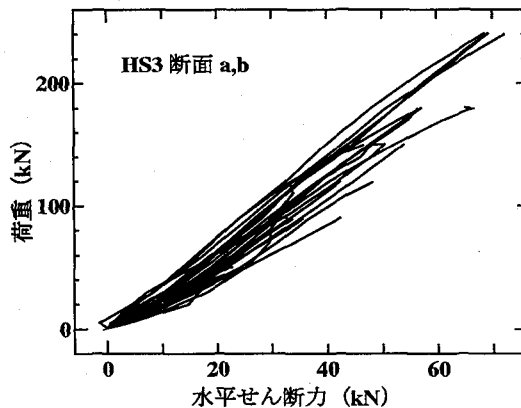


図-11-b 負曲げ桁試験体 HS3

図-11 桁試験における荷重と水平せん断力の関係 (補正あり)

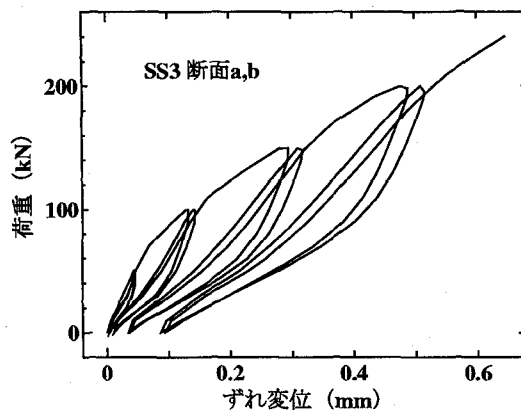


図-12 桁試験における荷重とずれ変位の関係

て表している。また同図には、著者らが以前に実施した径13mm、全高70mmのスタッドを有する押抜き試験によって得られた水平せん断力とずれ変位の関係⁵⁾に対して、同様の補正を施したスタッド2本分の水平せん断力とずれ変位の関係も比較のために示した。

これらの図より、正曲げ桁試験から得られた水平せん断力とずれ変位の関係は、押抜き試験の結果とほぼ一致しているが、負曲げ桁試験から得られた結果は、同じずれ変位に着目した場合、押抜き試験の結果よりも水平せん断力の値が大きくなっていることがわかる。ま

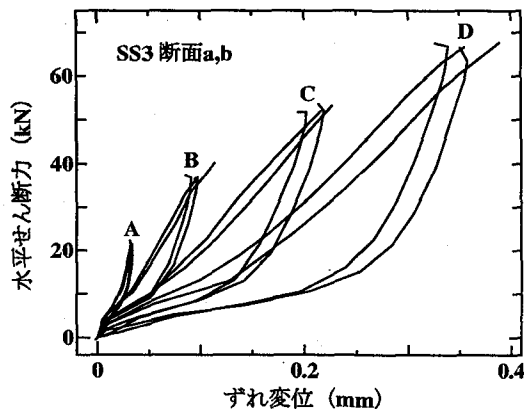


図-13 桁試験における水平せん断力とずれ変位の関係

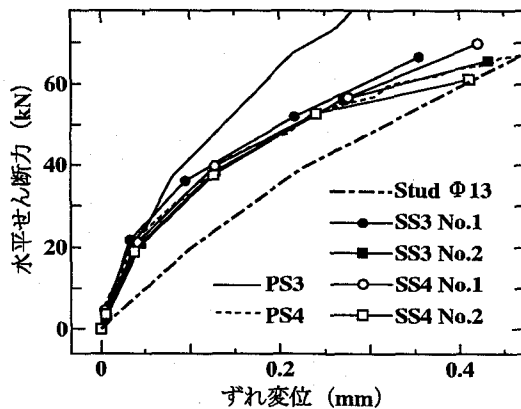


図-14-a 正曲げ桁試験

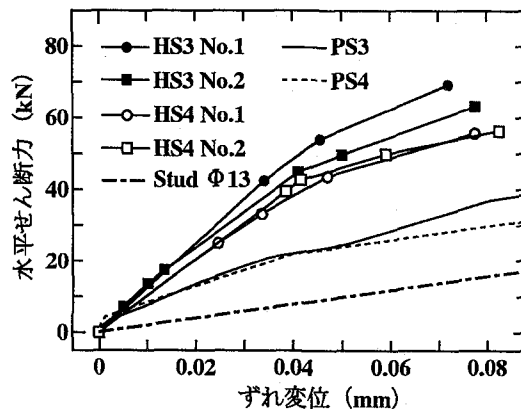


図-14-b 負曲げ桁試験

図-14 スラブ止めの水平せん断力とずれ変位の関係

た、同じ大きさの水平せん断力に着目した場合、負曲げ桁試験における結果に対して、正曲げ桁試験における結果のほうがずれ変位が大きく、スラブ止めのずれ止め剛度は正曲げ桁試験の場合よりも負曲げ桁試験の場合のほうが大きいことがわかる。これは、負曲げ桁試験体内のスラブ止めに対して算定した水平せん断力には、図-15に示すようにコンクリート床版と鋼桁間の支圧により生じた摩擦力が含まれているためであると考えられる。しかし、スパン中央側のスラブ止めのように、支圧が小さくコンクリート床版がひび割れてい

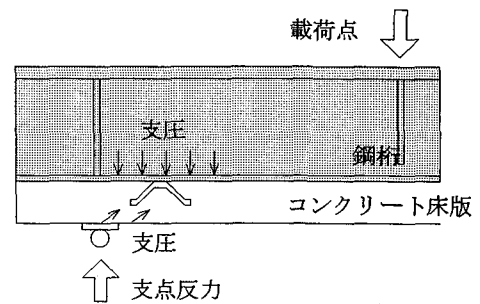


図-15 負曲げ試験体のスラブ止めに作用する支圧の影響

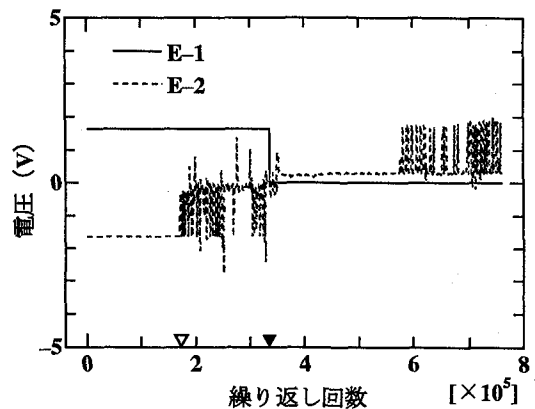


図-16 電圧-繰返し回数曲線 (PF4)

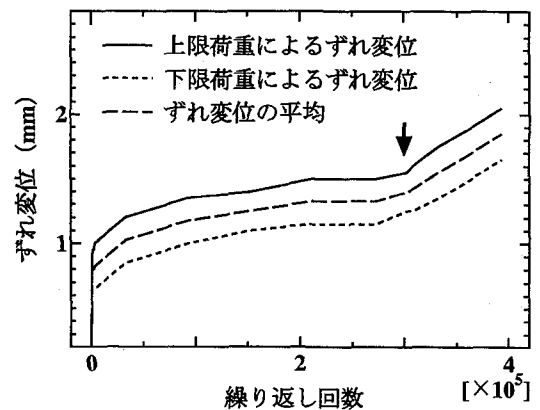


図-17 ずれ変位-繰返し回数曲線 (PF4)

る領域のスラブ止めのずれ止め剛度は、支点側のスラブ止めのずれ止め剛度よりも小さくなることが予想される。さらに、径13mmのスタッド2本分のずれ止め剛度は、水平せん断力の小さい範囲ではここで用いた各タイプのスラブ止めの値よりも小さいことがわかる。

3.4 疲労試験中におけるスラブ止めの応答性状

疲労破断感知装置として取り付けしたエナメル線の応答性状の例として、図-16には、押抜き試験体PF4の疲労試験時に計測したエナメル線の電圧と繰返し回数の関係を示している。縦軸は電圧を、横軸は繰返し回数であり、1つのスラブ止めに取り付けした2本の

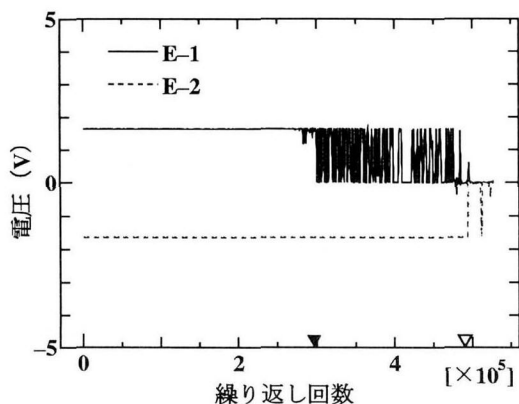


図-18 電圧－繰返し回数曲線 (SF5)

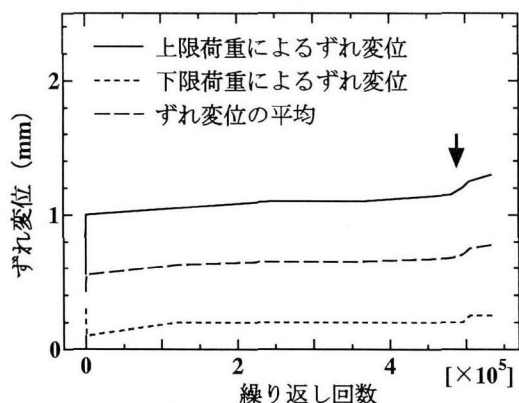


図-19 ずれ変位－繰返し回数曲線 (SF5)

エナメル線の電圧変化をそれぞれ E-1, E-2 として示している。ただし、E-2 は図を見やすくするためにマイナス側に示している。この図から、いずれもはじめは 1.5V 程度で一定値を示していた電圧がある繰返し回数以降急激に変化していることがわかる。つまり、この時点において、スラブ止めに疲労亀裂が生じたのに伴ってエナメル線が切断されたことを表している。ただし、図中の横軸上の逆三角形マークの位置が示すように、1つのスラブ止めに付けた2本のエナメル線は必ずしも同じ繰返し回数において切断されていない。これは、スラブ止めの疲労亀裂が徐々に進行するためであると考えられ、このことは、本実験で用いたスラブ止めの疲労破断感知装置の感度が非常に良いことを表していると言える。

さらに図-17には、同じ疲労試験中の着目スラブ止め取り付け位置におけるずれ変位と繰返し回数の関係を示している。縦軸は、疲労試験中の上限荷重、下限荷重時のずれ変位とその中立位置におけるずれ変位を示しており、横軸は繰返し回数である。1つの押抜き試験体に取り付けた4本のエナメル線のうち、最も遅くエナメル線の電圧が変化した繰返し回数に達すると、図中の矢印が示すようにずれ変位にも有意な変化が現れる傾向が認められた。そこで本研究では、押

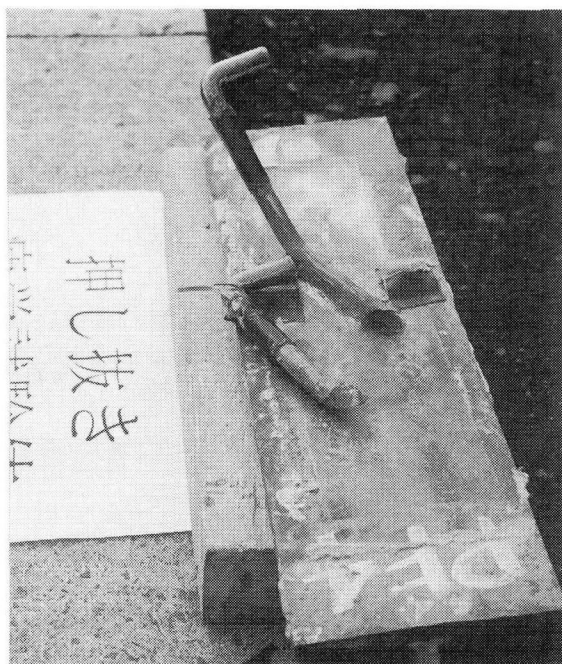


写真-1 押抜き試験体スラブ止めの疲労破壊

抜き試験におけるスラブ止めの疲労破壊を、試験体に取り付けた4本のエナメル線のうち、4本目のエナメル線の電圧の挙動に変化が生じた場合と定義する。

この場合、4本すべてのエナメル線の電圧が変化しても、押抜き試験体には外見上大きな変化は見られず、疲労試験の実施上は、繰返し荷重をさらに载荷することが可能であったことを付記しておく。

一方、桁試験におけるエナメル線の電圧およびずれ変位と繰返し回数の関係を、正曲げ桁試験体 SF5 の場合を例として図-18 および図-19 に示す。図-18 に示すように桁試験時においても、押抜き試験時と同様に、1つのスラブ止めに付けた2本のエナメル線の電圧は異なった繰返し回数において急激に変化しており、この繰返し回数においてスラブ止めには、それぞれのエナメル線の位置に疲労亀裂が生じたものと考えられる。

本研究では、両支点側の2つのスラブ止めに付けた4本のエナメル線すべての電圧の挙動に変化が生じた繰返し回数を、桁試験におけるスラブ止めの疲労破壊までの繰返し回数と定義し、以下に示す S-N 図を描くときの繰返し回数とした。このように定義した理由も、図-19 中の矢印が示すようにその時点においてずれ変位にも有意な変化が認められたからである。

ただし、3体の負曲げ桁試験体のうち2体では、疲労試験時にエナメル線の一部の電圧の挙動は変化した、4本のエナメル線すべての電圧の挙動に変化が認められないうちに、鋼桁自身に大きな疲労亀裂が生じて、疲労試験の継続が困難になった。

上述のスラブ止めの疲労破壊までの繰返し回数の

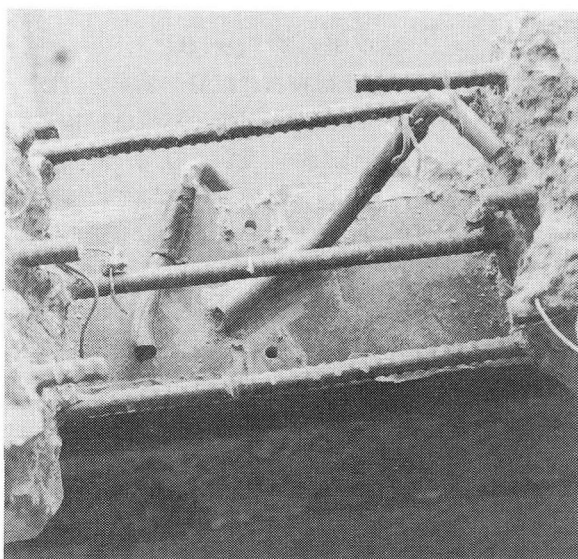


写真-2 正曲げ桁試験体スラブ止めの疲労破壊

定義の妥当性については、実験終了後に押抜き試験体および桁試験体のコンクリート床版を取り除いてスラブ止めの状態を確認したところ、実際にスラブ止めが疲労破断していたことから確認できた。写真-1 および写真-2 は押抜き試験および正曲げ桁試験におけるスラブ止めの疲労破断の状況を示している。

3.5 スラブ止めの S-N 線図

図-20 に各タイプの試験体の疲労試験により得られたスラブ止めの S-N 線図を示す。縦軸はせん断力範囲を示し、横軸は前述の定義に従った疲労破壊までの繰返し回数を示す。押抜き試験のスラブ止めのせん断力範囲は上載荷重の 1/2 で算定できるが、桁試験においては、静的載荷試験における図-11 のような荷重と水平せん断力の関係に対応させて、疲労試験時の荷重振幅に相当するせん断力範囲を算定した。つまり、上限荷重に対するせん断力と下限荷重に対するせん断力の差をせん断力範囲とした。各試験体ごとのせん断力範囲を表-2 に示している。負曲げ桁試験においては、4 本のエナメル線すべてが切断するよりも先に鋼桁が破壊したために、その時点で実験を中止した試験体があった(図-20 中の矢印付きの結果)。

この S-N 線図より、正曲げ桁試験におけるスラブ止めの疲労強度は押抜き試験の結果に比べて低く、負曲げ桁試験におけるスラブ止めの疲労強度は押抜き試験に比べて高いことがわかる。これは、静的水平せん断ずれ性状の節でも述べたように、負曲げ桁試験におけるスラブ止めの水平伝達せん断力には、鋼桁とコンクリート床版との摩擦力の影響が含まれるためであると考えられる。また逆に、正曲げ桁試験における支点側のスラブ止め位置では、荷重の増加に伴って鋼桁からコンクリート床版が浮き上がるような挙動を示すために、両者の間の摩擦力の影響が非常に小さいためであ

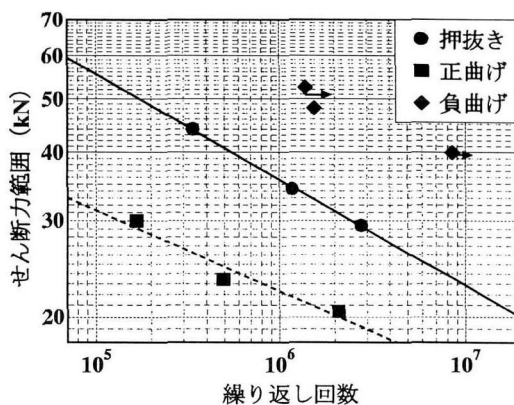


図-20 スラブ止めの S-N 線図 (せん断力)

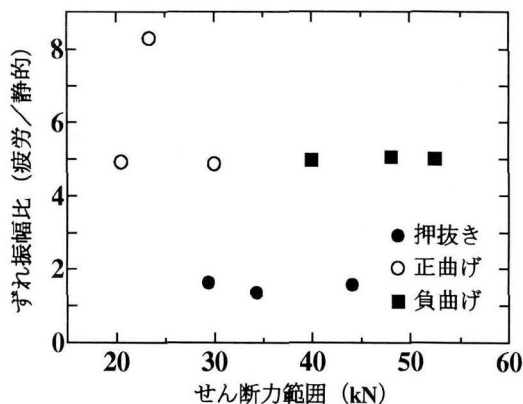


図-21 静的載荷試験および疲労試験時のずれ変位の比較

り、押抜き試験では、摩擦力の影響が正曲げ桁試験と負曲げ桁試験の中間的な程度であるためと考えられる。

ところで、図-21 は各タイプの試験体について、同じせん断力範囲に対応する疲労試験時のずれ変位と静的試験時のずれ変位の比を表している。縦軸はずれ変位の比を、横軸はせん断力範囲を表している。この図から、押抜き試験では、静的試験時と疲労試験時のずれ変位には大きな差異はないが、桁試験では、疲労試験時のずれ変位は静的試験時のずれ変位の 5 倍以上にも達していることがわかる。つまり、このことは静的桁試験時に比較して疲労桁試験時のスラブ止めのずれ止め剛度が 1/5 以下であることを意味していると言える。これは、静的試験時に比較して疲労試験時の方が、繰返し回数の著しい増加にともなって、鋼桁とコンクリート床版の間の付着の影響が小さくなるためであると考えられる。しかし、一般に不完全合成桁においてずれ止め剛度が比較的大きい場合には、ずれ止め剛度の変化に対応してずれ変位は顕著に変化するが、ずれ止めが伝達する水平せん断力の大きさは顕著に変化しない(結果的に、軸力の大きさが変化しない)ことが知られている⁶⁾。したがって、疲労試験時と静的試験時のずれ変位の大きさが 5 倍程度異なっても、上述のように桁試験体の疲労試験時におけるスラブ止め

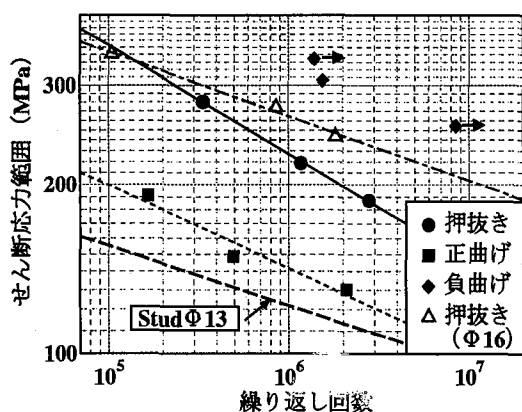


図-22 スラブ止めの S-N 線図 (せん断応力)

の伝達せん断力の大きさを、静的試験時との対応関係から求めることは妥当であると言える。

一方、図-22 には、せん断応力範囲で示したスラブ止めの S-N 線図を示す。縦軸には、図-20 のせん断力範囲をスラブ止め丸鋼の断面積の 2 倍で除して得られるせん断応力範囲を取った。本実験の範囲では、スラブ止めの疲労破壊がスラブ止め溶接部から曲げ上がる部分のスラブ止め丸鋼自身に生じていたことから、せん断応力範囲として上述のような値を用いた。また同図には、径 16mm の実寸大スラブ止めの押抜き疲労試験結果¹⁾ および松井、平城らが提案したスタッドの疲労強度評価式⁷⁾、に著者らの実施した径 13mm、全高 70mm のスタッドの静的強度 Q_u を当てはめて得られるせん断応力範囲での S-N 線図も参考のために破線で示している⁵⁾。この図から、上述のようなせん断応力に着目した S-N 線図では、径 10mm と 16mm の押抜き試験におけるスラブ止めの疲労強度は同程度であることがわかる。ただし、径 13mm のスタッドの静的強度を用いた松井、平城らの疲労強度評価式はスラブ止め S-N 線図よりも下側に位置する結果となった。

4. おわりに

本研究では、非合成桁橋に使用されるスラブ止めの静的水平せん断ずれ性状および疲労強度を明らかにするため、桁試験においてスラブ止めが伝達する水平せん断力をできる限り正確に把握し、また、スラブ止めの疲労破壊を正確に感知することを目指して、押抜き試験体および正曲げ、負曲げ桁試験体の静的載荷試験および疲労試験を行った。

本研究の実験を通して得られたおもな結果を以下にまとめる。

1. スラブ止め前後の鋼桁断面に貼付したひずみゲージのひずみ値に基づいて求めた各荷重サイクルごとの鋼桁断面の軸力に着目し、その差を取ることによって桁試験におけるスラブ止めの伝達せん断

力をモニターした。

2. スラブ止めの静的せん断ずれ性状に着目すると、正曲げ桁試験の結果は押抜き試験の結果とほぼ一致した。しかし、負曲げ桁試験の結果は押抜き試験の結果よりもずれ止め剛度およびせん断強度が大きくなった。これは、負曲げ桁試験では支点側のスラブ止めが支点反力と鋼桁からの支圧の影響を大きく受けたためである。
3. 本研究で考案した疲労破断感知装置によって、スラブ止めの疲労破壊までの繰り返し回数を精度よく把握することができた。
4. 正曲げ桁試験におけるスラブ止めの疲労強度は押抜き試験の結果より小さくなり、逆に、負曲げ桁試験におけるスラブ止めの疲労強度は押抜き試験の結果より大きくなった。これは、正曲げ桁試験における鋼桁とコンクリート床版との支圧の影響が最も小さく、押抜き試験、負曲げ桁試験の順に鋼桁とコンクリート床版との支圧の影響が大きくなるためであると考えられる。

連続桁の実橋においても、中間支点付近では鋼桁とコンクリート床版の間に支圧を受けることが予想される。しかし、正曲げ区間では、死荷重あるいは活荷重による支圧の影響もあることを考慮すれば、本研究の正曲げ桁試験によるスラブ止めの疲労強度はかなり危険側の結果を示していると考えられる。

謝辞： 本研究を実施するに当たり、スラブ止め疲労破断感知装置のための丸鋼鉄筋の溝の加工に際しては、宇都宮大学工学部機械工場技官の金沢 勇 係長に大変お世話になった。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中島章典、池川真也、土橋健治、阿部英彦：非合成桁橋スラブ止めの動的水平せん断伝達性状と疲労強度、鋼構造年次論文報告集、第 2 巻、pp.683-690、1994.11.
- 2) 阿部英彦：鉄道用合成桁のずれ止めに関する研究、鉄道技術研究報告、No.961、1975.3.
- 3) 大西竜浩、中島章典、溝江慶久、小滝 功、西園広之、大江浩一：スラブ止めの押し抜きおよび桁試験の静的荷重ずれ性状と疲労強度、第 51 回年次学術講演会講演概要集、第 1 部 (A)、pp.876-877、1996.9.
- 4) 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、日本鋼構造協会、1996.11.
- 5) 中島章典、池川真也、山田俊行、阿部英彦：ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析、土木学会論文集、No.537/I-35、pp.97-106、1996.4.
- 6) Newmark, N.M, Siess, C.P. and Viest, I.M. : Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction, *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, Vol.9, No.1, pp.75-92, 1951.
- 7) 松井繁之、平城弘一、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.35A、pp.1233-1244、1989.3.

(1997 年 9 月 26 日 受付)