

合成桁における孔あき鋼板ジベルのずれ挙動に関する研究

A study on slip behavior of perforated rib shear connector in composite girder

岩崎初美*, 藤井堅**, 豊田正***, 深田和宏****

Hatsumi Iwasaki, Katashi Fujii, Tadashi Toyota and Kazuhiro Hukada

*石川島播磨重工業株式会社橋梁事業部設計部 (〒737-8515 広島県呉市光町 5-17)

** 工博 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8731 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

***株式会社ピーエス三菱東京土木支店土木工事統括本部技術部設計グループ (〒104-8215 東京都中央区銀座 7-16-12)

****広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8731 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

For the purpose of applying perforated rib shear connector (PBL) to composite plate girders, the slip and collapse behavior of it in composite girders were investigated through bending tests. By using the same size of PBL in the composite girders, push-out and pull-out tests were also performed in order to compare with each slip strength. Since the slip strength of it will be influenced by the concrete confinements around PBL hole, during tests, we paid attention to the restraint of PBL hole by concrete covering and reinforcements. From the test results, the followings were obtained and concluded: ① Though the results of past experiments showed that a concrete crack parallel to PBL plate determines the girder strength, in this tests, that crack did not reach to the slab surface but came out indeed at near the PBL plate, by the reason of thick concrete covering which would be used in actual bridges. ② A reinforcing bar, which is placed perpendicular to PBL plate at the vicinity of PBL, could enhance the girder strength about 10 percent higher than that without them. This is originated from the enhancement of the slip strength caused by crack restraint due to the reinforcing bar.

Key Words: Perforated rib shear connector, PBL, Composite girder, Slip strength

孔あき鋼板ジベル, PBL, 合成桁, ずれ強度

1. まえがき

鋼・コンクリートの合成構造では、両材料間の応力伝達を行うために通常ずれ止めが用いられる。そして、昨今注目されているずれ止めとして孔あき鋼板ジベルが掲げられる。

現在、孔あき鋼板ジベルは、鉄道における連続合成桁の中間支点上のずれ止め、波形鋼板ウェブ橋の鋼ウェブと床版の定着部、上下部一体構造の剛結部に採用されているが、そのせん断耐力評価式や設計法はまだ十分には確立されておらず^{1)~7)}、合理的な設計法の提案が火急の工学課題となっている。

従来、孔あき鋼板ジベルのずれ挙動やずれ耐力に関する研究は数多く行われているが、その多くは押し抜き試験や引き抜き試験のような要素試験^{1)~7)}であり、合成桁における孔あき鋼板ジベルのずれ挙動やずれ耐力が合成桁の終局挙動に及ぼす影響の解明を試みた研究はあまりないようである。これまでの合成桁の研究については、Hosain⁸⁾、藤井⁹⁾の実験がある。Hosain は孔あき鋼板ジベルの孔数および孔内に配置された鉄筋（以下では、貫通鉄筋と呼ぶ）の効果に着目してずれ挙動の解明を試み

た。また、藤井は合成率の概念を導入して合成桁の弾性挙動を表現するとともに、桁の終局挙動におけるずれ力の分布や崩壊挙動を実験的に調べた。これらの研究で共通することは、合成桁の終局状態では、コンクリート床版に、ジベルプレートの上から床版の表面に至る橋軸方向の（ジベルプレートと平行の）コンクリートひび割れが発生し、この崩壊形式によって桁の強度が決まっていることである。これは、従来の実験では孔あき鋼板ジベルのコンクリートかぶり厚が薄く、せいぜい 25cm 程度までであることによると考えられる。

ところが、実際の合成桁橋梁におけるかぶり厚は、床版厚に加えてハンチ厚が加わるので 35cm 程度となる。特に最近注目されている少数主桁橋では、床版厚はさらに厚くなるから、孔あき鋼板ジベルを実橋に用いた場合の終局ずれ挙動と実験室レベルで行う薄い床版厚の場合のそれとは異なることが予想される。そこで本研究では、実橋で使用されるかぶり厚を有する床版を持つ合成桁に、孔あき鋼板ジベルを使用した場合の終局ずれ挙動を調べる。

このとき孔あき鋼板ジベルを用いた合成桁では、たとえば図-1 に示すように、孔内を貫通する鉄筋の他に、

床版内の上下に配置された主鉄筋がハンチの上側にあるのが普通である。

筆者らは、過去に行った孔あき鋼板ジベルの要素試験結果¹⁰⁾から、「ジベル孔内部のコンクリートがひび割れて他の部分と剥離すると、ずれにともなう孔周辺のコンクリートを押し広げる力が作用してジベルが破壊する」との考えに至っており、そこからジベル孔周辺のコンクリートのひびわれを拘束する力（以下では、単に拘束力と呼ぶ）が、孔あき鋼板ジベルのずれ耐力に大きく影響することを解明している。このことを考慮すると、上述の床版主鉄筋は、ジベル孔のひび割れが広がるのを防ぐという意味での拘束力を発揮することが予想され、この場合にはジベルのずれ耐力は、主鉄筋がない場合よりも大きくなるはずである。したがって、さらに本研究では、この床版内の主鉄筋の効果も調べるとともに、この軸ひずみを測定し、ジベルより上のかぶり内に発生する応力状態についても解明する。

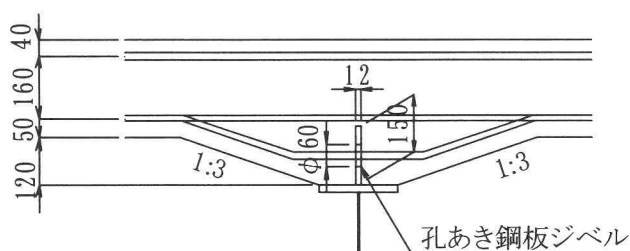


図-1 孔あき鋼板ジベルを用いた合成桁の断面

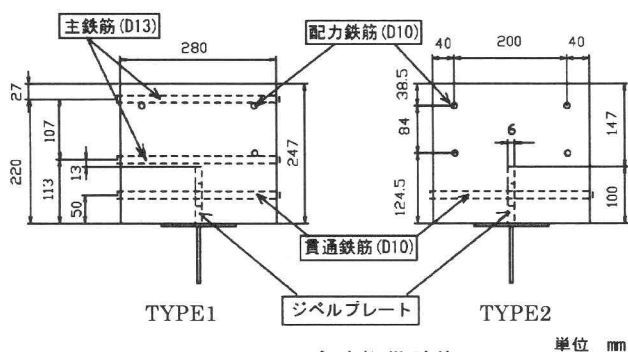


図-2 合成桁供試体

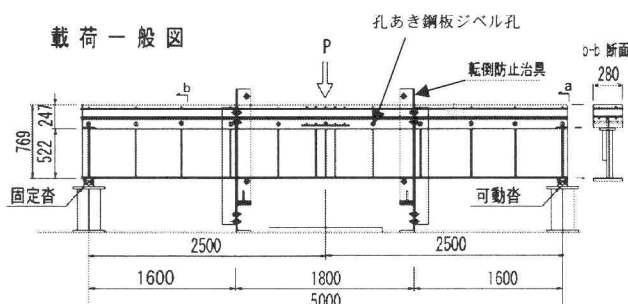


図-3 合成桁実験

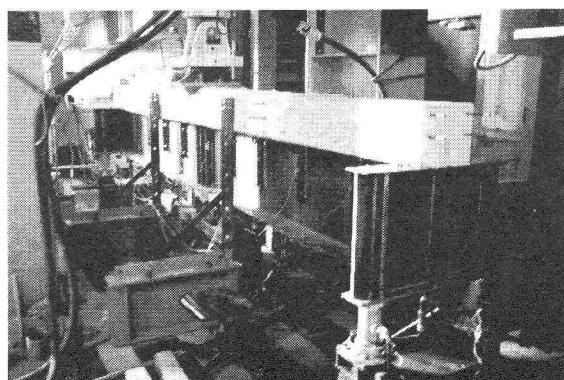


写真-1 載荷実験

2. 合成桁実験の概要

孔あき鋼板ジベルを使用した合成桁におけるジベルのずれ挙動および桁の終局挙動の把握を目的として、静的曲げ載荷実験を行った。合成桁供試体は、図-2 および図-3 に示すように、溶接 I 形鋼の上フランジのウェブ直上に孔あき鋼板ジベル板 1 枚を有し、そこにコンクリートを打設した TYPE 1 と TYPE 2 の 2 種類、2 体を作成した。合成桁供試体の断面寸法は、載荷装置の能力を勘案して実橋断面のおよそ 2/3 の断面とし、粗骨材径も実橋で使用している 20mm を 15mm とした。また、鋼桁及び孔あき鋼板ジベルの表面には剥離材を塗布しコンクリートとの付着を除去した。

なお、供試体のコンクリート部を表す図-2 に示すように、2 種類の合成桁供試体のうち、TYPE 1 は床版内に主鉄筋を配置した場合であり、TYPE 2 は床版の主鉄筋がない場合を示す。ただし、両供試体ともに孔内貫通鉄筋 (D10) を配置した。

合成桁供試体の設計にあたって、完全合成を仮定した場合に、中立軸が鋼桁ウェブ内に位置するようにウェブ高・板厚を決定し、床版コンクリートに引張応力が発生しないようにした。また、供試体のせん断スパン比は 5.0 とし、曲げ破壊となるように桁高を決めた。さらに、今回の実験の大きな特徴といえるが、孔あき板ジベルのずれ崩壊が桁の崩壊に先行して現れるように、ジベルの孔径 40mm、孔間隔 500mm とし、従来の孔間隔 125mm ~ 250mm より大きくしている。なお、孔内貫通鉄筋は D10 (SD345)、ジベル上の主鉄筋は D13 (SD345) を使用した。

図-3 及び写真-1 に載荷概要を示す。載荷には 50tf 油圧式ジャッキを使用し 2 点単純支持（実際は、写真-1 に示すように、両端ではそれぞれ横はりを溶接して合計 4 点で支持しており、ねじれ角を拘束している）中央 1 点載荷である。載荷は変位ステップ約 0.1mm の変位制御で行った。

計測は、図-4 に示すように、ジベル孔位置（垂直補剛材位置と対応する）で、クリップゲージにより鋼桁上

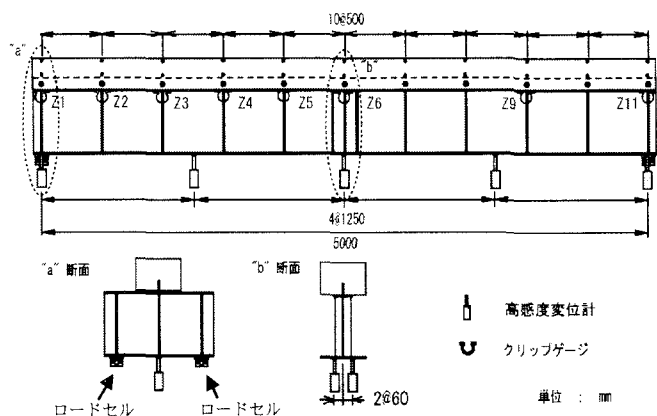


図-4 クリップゲージ・変位計取付け位置

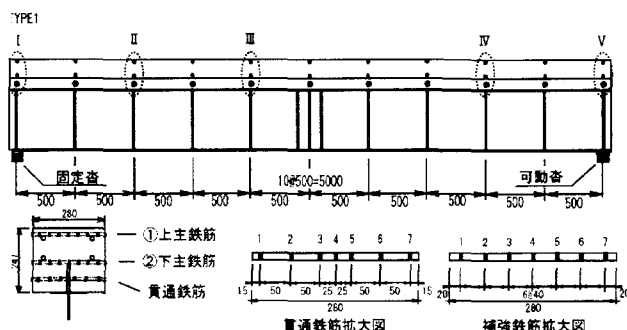


図-5 貫通鉄筋・主鉄筋ひずみゲージ取付け位置

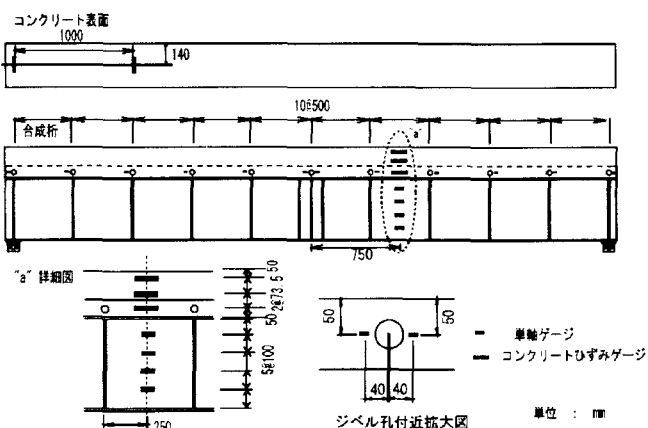


図-6 コンクリート・ジベルひずみゲージ取付け位置

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	配合強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)
48	15	50	5.6	27	12

表-2 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 (Mpa)	弾性係数 (Mpa)	ポアソン比	引張強度 (Mpa)
41.8	27685	0.26	3.25

表-3 鋼板・鉄筋の材料試験結果

板厚・径 (mm)	弾性係数 (Mpa)	降伏応力 (Mpa)	引張強度 (Mpa)	ポアソン比
T=6	203600	315.6	402.8	0.28
T=12	215100	277.0	407.4	0.32
T=16	203900	254.2	402.1	0.26
D10	179900	353.0	526.1	-----
D13	142300	276.0	422.6	-----

フランジと床版下面のずれを計測した。また、鋼桁下面ダイヤルゲージを設置して鋼桁のたわみを計測した。

一方、ひずみについては、図-5および図-6に示すように、孔内貫通鉄筋と主鉄筋の軸ひずみ、コンクリート床版の上面および側面の橋軸方向ひずみ、ジベル孔周辺のジベル板の橋軸方向ひずみを測定した。

なお、表-1にコンクリートの配合、表-2および表-3にそれぞれコンクリートおよび鋼材の材料特性試験結果を示す。

3. 要素実験の概要

合成桁供試体で用いた孔あき鋼板ジベルと同じ孔あき鋼板ジベルを用いて、押し抜き試験と引き抜き試験を実施した供試体を表-4に示す。そのうちのPL-220-R5-19引き抜き供試体を図-7、PS-147-R6-13押し抜き供試体を図-8に示す。

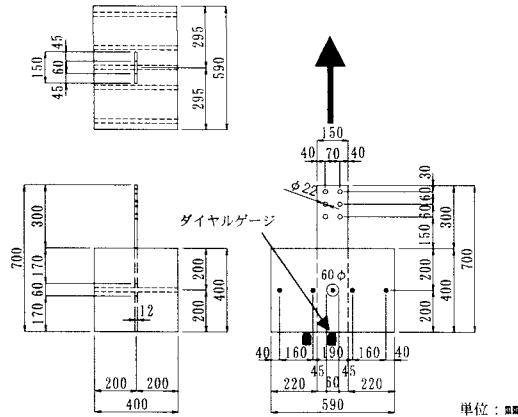
表-4に示すように、供試体名がPLではじまるものは、引き抜き試験用供試体（4体）であり、PSではじまるものは、押し抜き供試体（1体）である。かぶりと主鉄筋径およびその位置は合成桁供試体に対応させている。

引き抜きせん断試験は、図-7に示すように、コンクリート部を止めて50tf油圧式アクチュエーターにより矢印方向に鋼板を引き上げる実験である。このとき、図に示すように、供試体下面にダイヤルゲージを2箇所設置してずれを計測した。また、要素試験においても、図-5、図-6の合成桁実験と対応する位置のひずみを計測した。

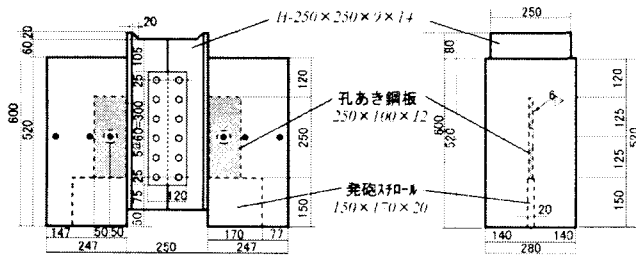
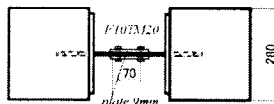
図-8に押し抜きせん断供試体、図-9に押し抜きせん断試験の载荷概要図を示す。押し抜き試験は、「日本鋼構造協会・頭付きスタッドの押し抜き試験方法（案）」に準じて行った。载荷には500tf耐圧試験機を使用し、荷重制御で約1tf毎に荷重を増加させた。図-9に示すように、供試体下面にはジェットセメントを敷き反力床面の不陸をなくするとともに、ジャッキ部では球座を設けて荷重が両側のコンクリート部に均等に载荷されるようにしている。

表－４ 要素試験供試体の種類

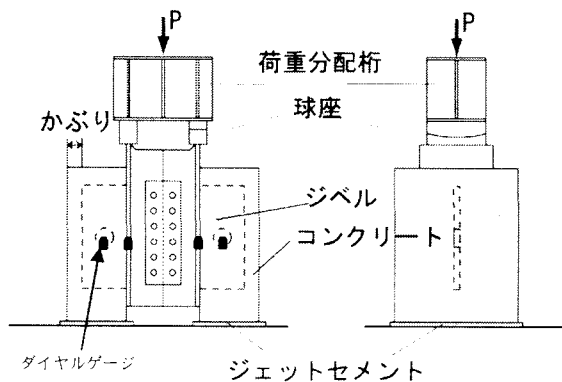
供試体名	孔径 (mm)	孔あき 鋼板幅 (mm)	貫通 鉄筋 D10	床版主 鉄筋径 (mm)	かぶり (mm)	粗竹 材径 (mm)
PL－147 －R5－13	40	100	有	13	147	15
PL－220 －R1	60	150	有	無	220	20
PL－220 －R5－10	60	150	有	10	220	20
PL－220 －R5－19	60	150	有	19	220	20
PS－147 －R6－13	40	150	有	13	147	15



図－７ 引き抜き供試体 PL-220-R5-19



図－８ 押し抜き供試体 PS-147-R6-13

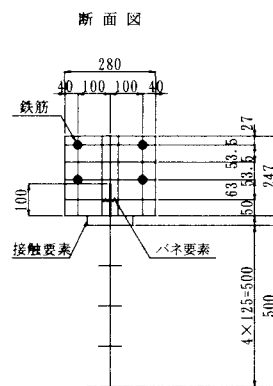
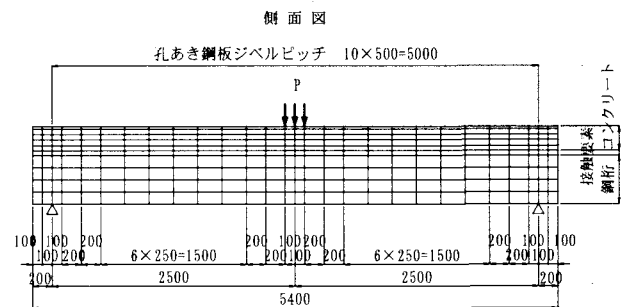


図－９ 押し抜きせん断試験

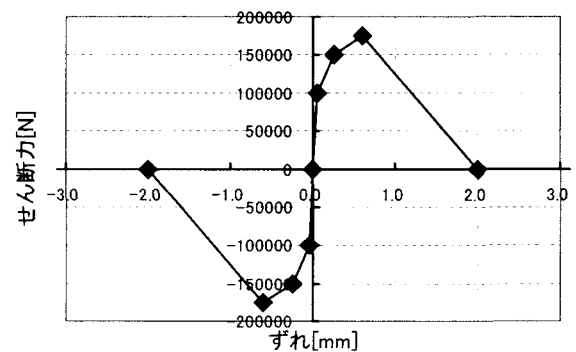
４． FEM解析の概要

図－１０に示すように、孔あき鋼板ジベルを用いた合成桁供試体（TYPE １）を３次元モデルでモデル化し、非線形FEM解析をおこなった。なお、解析にはABAQUSを使用し、鋼桁はシェル要素、床版コンクリートはソリッド要素、鉄筋はバー要素を使用した。

孔あき鋼板ジベルは、ジベルプレート上の孔中心位置と近接するコンクリートとの間を結ぶバネ要素を用いてモデル化した。今回のバネ値は引き抜き試験結果を模式化し作成し、せん断力ピーク値を180kNとし、ずれ量2.0mmでせん断力が0となる非線形バネを仮定した（図－１１）。また、上フランジと床版の間は接触要素を使用して連結した。



図－１０ 合成桁 FEM 解析モデル



図－１１ 孔あき鋼板ジベルのバネ要素

5. 孔あき鋼板ジベルを用いた合成桁の挙動

図-12に荷重-桁中央のたわみ関係を示す。図には、実験結果のほかに、FEM解析値、そして、弾性は理論による完全合成を仮定した場合と重ね梁とした場合のたわみもあわせて示す。

図-12の実験結果をみると、荷重が600kNまでは、TYPE1・TYPE2ともにほぼ直線的にたわみは増加し、両者ともにほとんど同じたわみが現れているのがわかる。また、両者とも完全合成はりと重ね梁はりの中間的な剛性を有しており、本実験結果は不完全合成桁であることもわかる。荷重が600kNを超えると、TYPE1のたわみとTYPE2のそれに差異が現れ始め、最大荷重はTYPE1の方がTYPE2よりも約1割大きい。これは、TYPE1では床版の主鉄筋が配置されているので、ジベル孔から発生したひび割れが表面に向かって進展するのを拘束するために、孔あき鋼板ジベルのずれ耐力が上昇したことに起因する。また、600kNまでは両者のたわみはほとんど同じであることは、主鉄筋のひび割れ拘束効果はジベル孔のひび割れが進展し始めるまでは期待できないことを示している。

一方、FEM解析結果では、600kNを超えると、曲線の勾配が若干緩やかになり、この荷重時にジベルに177kNのせん断力が発生していた。このせん断力は図-11をみるとジベルパネのピーク付近であることから、600kN付近で孔あき鋼板ジベルは最高荷重に達しているものと推察される。また、600kNより低い荷重では、実験値と解析値はよく一致しており、ジベル部にパネ要素を使用すれば合成桁のたわみ挙動を把握できることがわかる。しかし、FEM解析結果は、600kNを超えると実験値に比べ大きな差が生じているのが図からわかる。これは、今回のFEM解析ではコンクリートを弾性体としたことに起因する。

図-13に、載荷点から支間の約1/3の位置における橋軸方向ひずみ分布を示す。図で、縦軸は下フランジからの距離を示し、◆●▲は、荷重がそれぞれ97.51kN、211.19kN、341.92kNのときのひずみである。なお、荷重211.19kNは剛性が変化する点で、97.51kNはその約半分、341.92kNはその後の状態であり、データを抽出し比較した。

図-13から、荷重が97.51kNのときは、鋼桁と床版のひずみ分布はほぼ一つの直線上にあり、完全合成に近いが、荷重が大きくなると鋼桁と床版のひずみ分布は一つの直線上に分布しなくなり、重ね梁的な挙動を呈しているのがわかる。ここでの特徴は、3種類の荷重状態において、フランジ(床版)のひずみ分布の傾きと鋼桁の傾きが等しいことである。このことは、コンクリートフランジと鋼桁のたわみが等しく、はり理論の仮定が満たされていることを示している。

図-14に載荷後の床版に発生したひび割れの展開図を、写真-2に桁端部の状況を示す。写真-2の端部断面

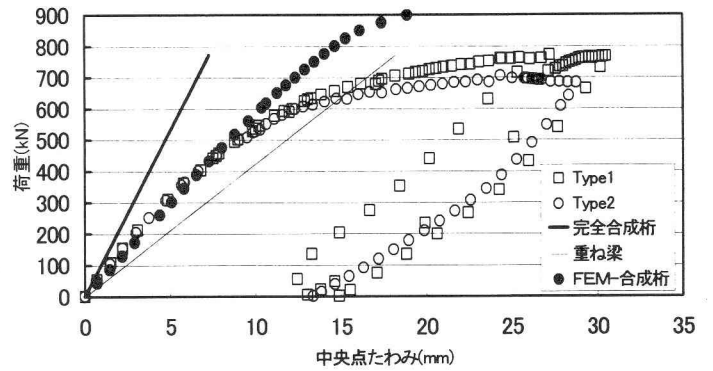


図-12 荷重-たわみ関係

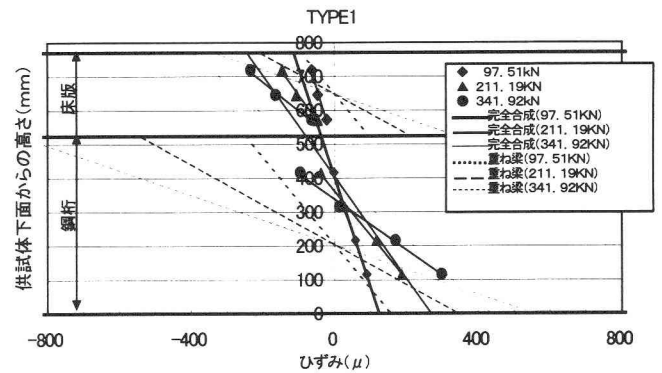


図-13 下フランジからの距離-ひずみ (TYPE1)

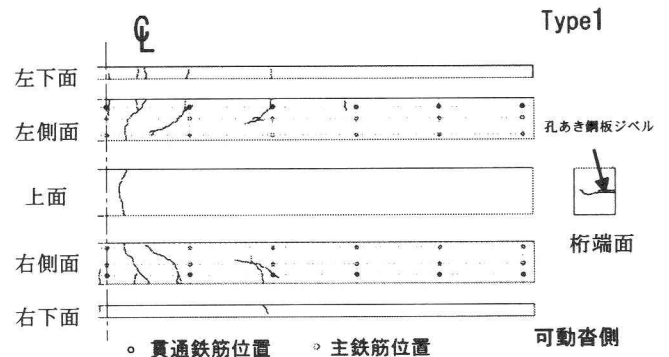


図-14 床版ひび割れ図

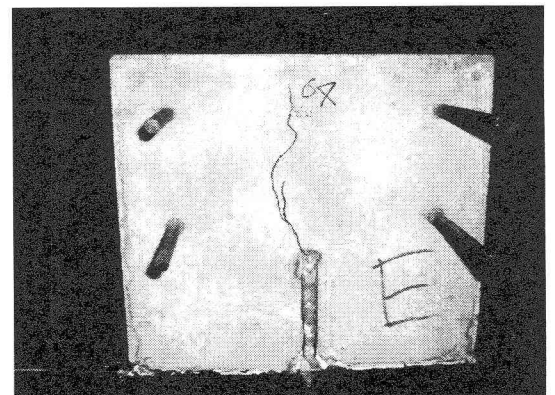


写真-2 床版端部の孔あき鋼板ジベルのずれ

では、荷重が 300kN でジベルプレートの上縁に初期ひび割れを確認した。その後ひび割れは床版表面に向かって進展した。また、最高荷重時には端面のコンクリート面とジベルプレートは紙面垂直方向に約 5mm 程度のずれが発生していた。

過去に行われた孔あき鋼板ジベルを用いた合成桁実験では、床版の上面まで貫通するひび割れが橋軸方向に発生して崩壊している⁹⁾。今回の実験では、確かにこのひび割れは発生しているものの、それは終局状態においても床版上面までは達していないことが、これらの図・写真からわかる。そして、このことは明らかにコンクリートのかぶり厚が厚いことに起因しており、実橋程度の床版厚とハンチ高がある場合には床版に貫通ひび割れは発生しないと予想される。図-14に示す床版のひび割れは、曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れと考えられ、スタッドジベルを使用した従来の合成桁の挙動に近いようにみえる。

6. 孔あき鋼板ジベルの特性

6.1 ずれ特性

図-15に、それぞれの計測位置における床版と鋼桁のずれを載荷荷重とともに示す。図中、PS-147-R6-13 及び PL-147-R5-13 は、押し抜き試験結果及び引き抜き試験結果である。それぞれを使用して、要素試験でのせん断力（ずれ力）を梁理論に基づいて合成桁の荷重に直して表したものである。図中、Z1～Z6 の位置は図-4に示している。図-15から、TYPE1、TYPE2とも Z6 点（載荷位置）のずれはわずかであるが、他の計測点では桁端に近づくほど大きなずれ量となっているのがわかる。図からわかるように、合成桁実験の最大荷重は約 800 kN であるが、要素実験での対応する荷重は約 800～1000kN であり合成桁実験よりも大きい耐力となった。図-16は、載荷点からの距離と床版と鋼桁のずれを示しており、97.51kN から 598.68kN と荷重が大きくなるにつれてずれも大きくなっている。図-17は、藤井ら⁹⁾が提案し合成率を実験結果を用いて算出したものである。なお、合成率は、次式で与えられる。

$$E \cdot I = \alpha \cdot E_c \cdot I_c + (1 - \alpha) \cdot E_d \cdot I_d \quad (1)$$

ここに、 α ：合成率、 $E \cdot I$ ：曲げ剛性、 $E_c \cdot I_c$ ：完全合成桁の曲げ剛性、 $E_d \cdot I_d$ ：重ね梁の曲げ剛性である。図-17から、荷重増加とともに合成率は徐々に低下し、荷重が 600kN 付近から急に低下し、その後はほぼ一定となっているのがわかる。これは、前述のように、ジベルが 600kN 付近で崩壊し、その後の荷重増加に対してはジベルがせん断力を伝達しなくなるためと考えられる。

以上をまとめると、今回の実験では荷重 600kN でジベ

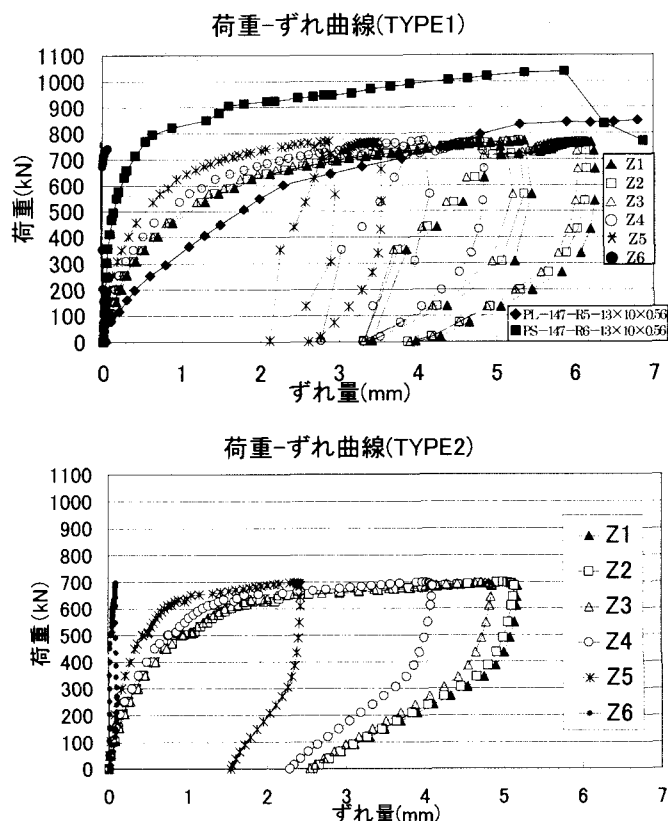


図-15 各ジベル位置における荷重-ずれ

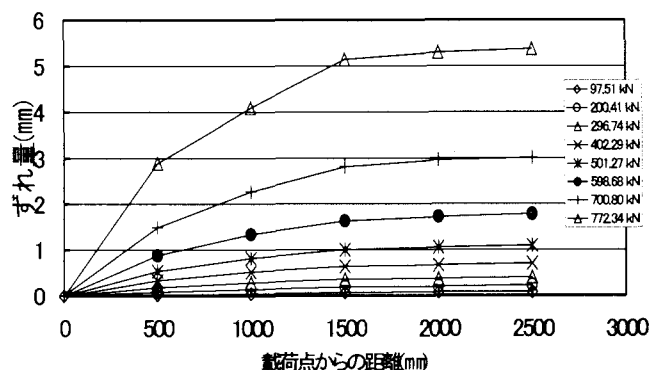


図-16 載荷点から距離-ずれ (TYPE1)

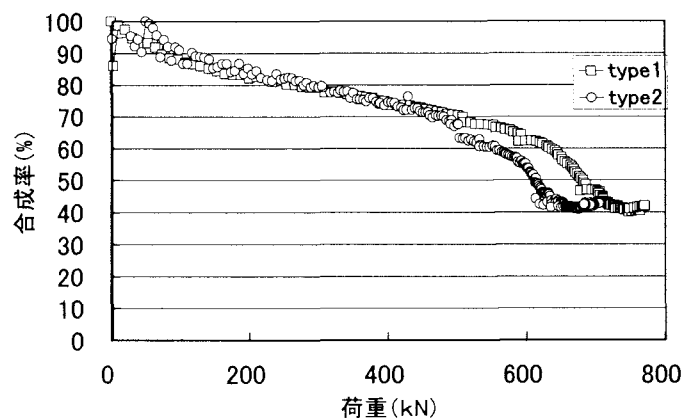


図-17 合成率

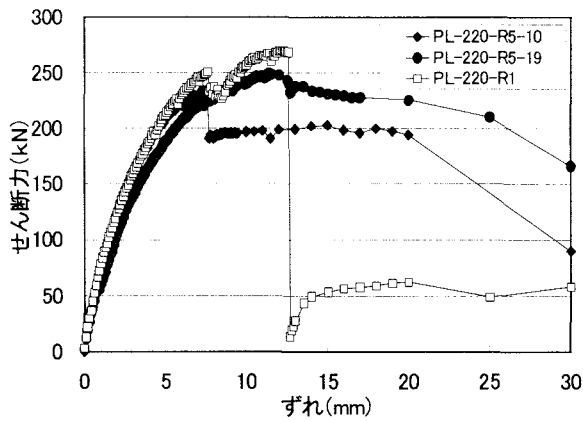


図-18 要素実験せん断力-ずれ

ル耐力がほぼ一定となっているが、ジベルが伝達するせん断力に見合う合成桁としての抵抗曲げモーメントがまだあり、その後の荷重増加に対しては重ね梁としての抵抗曲げモーメントが加わった形で、桁の抵抗曲げモーメントが決定されたと推察できる。

また、図-18に主鉄筋の影響に着目した要素実験のせん断力-ずれ関係を示す。すべての供試体において最高荷重まではよく似た挙動を示しているが、主鉄筋のない供試体 PL-220-R1 は最高荷重を過ぎると急激な耐力低下を起こしている。これに比べ、主鉄筋のある供試体 PL-220-R5-10 および PL-220-R5-19 は最大値を過ぎても一定のせん断力を確保している。このことから主鉄筋をジベル孔近傍に設けると、かぶり部のひび割れを抑制し高いずれ性能を維持できることがわかる。

6.2 孔周辺を押し広げる力

図-19および図-20は、図-2に示す TYPE1 供試体に配置された上主鉄筋と下主鉄筋のひずみ分布を示したものである。図の横軸は孔中心からの距離である。この孔中心での主鉄筋のひずみとコンクリート表面のひずみをもとに、ジベルから上のかぶり部分についてひずみ分布を示せば図-21のようになる。また、引き抜き試験でも同様にひずみ分布を示せば図-22が得られる。これらの図から、ジベルのすぐ上に位置する主鉄筋には大きな引張ひずみが発生しており、コンクリート表面に近づくにつれてひずみが減少しているのがわかる。このことは、かぶりコンクリート部分にジベル孔が広げられるような曲げが作用していることを示すが、この現象は次のように説明できる。すなわち、ジベル孔部のコンクリートにひび割れが発生すると、ジベルはずれようとするが、孔部内のコンクリートと周辺のコンクリートには凹凸があるために噛み合い、孔部のコンクリートが周辺のコンクリートを押し広げるために上記の曲げモーメントが発生すると考えられる。

孔部のコンクリートが周辺のコンクリートを押し広げる力をここでは押し広げ力と呼ぶことにするが、押し広

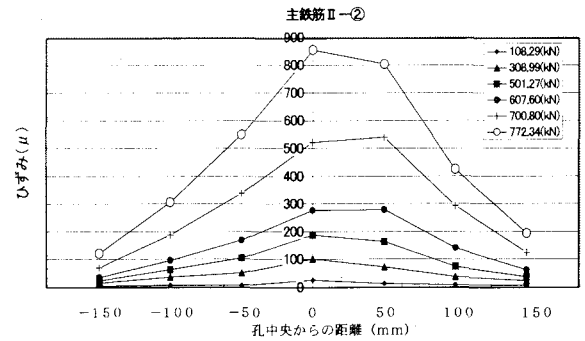


図-19 下主鉄筋のひずみ

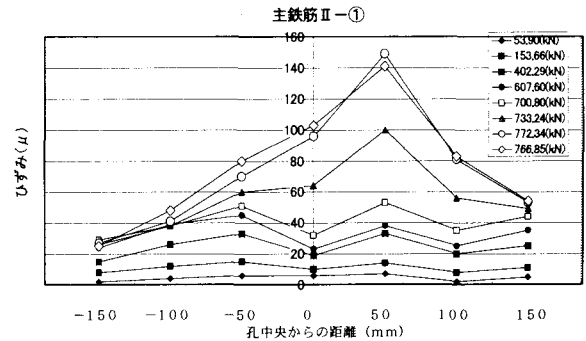


図-20 上主鉄筋のひずみ

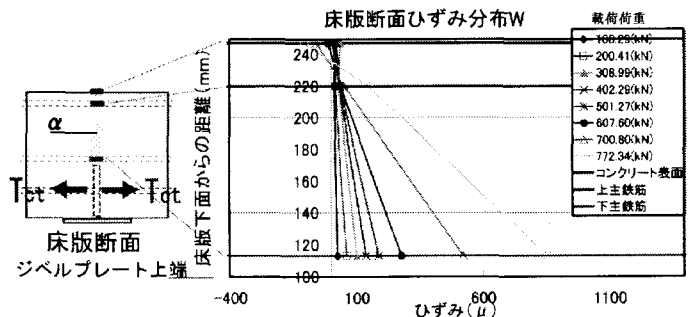


図-21 合成桁実験 かぶりコンクリートひずみ分布

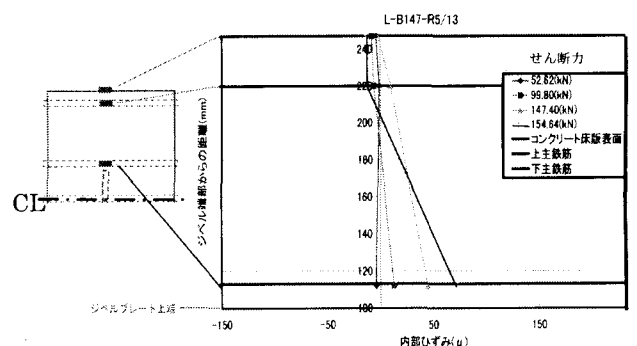


図-22 要素実験 かぶりコンクリートひずみ分布 (PL-147-R5-13)

げ力に抵抗する要因（たとえば、孔内貫通鉄筋や上記の主鉄筋のほかにコンクリートのかぶりなどが考えられる）があれば、対応するずれ抵抗が期待できよう¹¹⁾¹²⁾。しかし、ひび割れがある程度以上大きくなるとずれ耐力は増加しなくなると考えられる。この押し広げ力

は、図-22に示す要素実験のひずみ分布においても確認できる。

図-23にジベルのせん断力（ずれ力）と押し広げ力の関係を示す。縦軸のずれ力は、まず実験結果を式（1）に代入して合成率を求めると、それから合成桁として抵抗する曲げモーメントが得られるので、はり理論により床版と鋼桁界面のせん断応力が求まる。この結果を用いてジベル孔1つのせん断力が計算できる。一方、横軸の押し広げ力は、図-21のかぶり部のひずみ分布を用いて、かぶり部を弾性体と仮定して求めた孔位置の値である。但し、最高荷重後の範囲については、かぶり部を弾性体と仮定したことから適用外と考える。また、図-23には、引き抜きせん断試験および押し抜きせん断試験結果を用いて押し広げ力を求めた結果も合わせて示す。

図-23から、

$$V = 2.5 \cdot T \quad (2)$$

とおくと、押し広げ力を安全側に評価できる。¹³⁾ ここに、 V は孔周辺の拘束力によるせん断力、 T は押し広げ力を示す。ここでは、ジベル孔面にできるひび割れ面の凹凸を乗り越えることにより、まわりのコンクリートを押し広げようとし、その押し広げ力に対して周辺のコンクリートや鉄筋が抵抗することにより拘束力が発生すると考えている。

図-23より、押し広げ力-せん断力関係は、合成桁実験と引き抜き試験 PL-147-R5-13 で近い値となっている。また、押し抜き試験 PS-147-R6-13 は比較的小さい値となっているが、3つの実験とも同じ傾向を示している。ここでは、安全側の評価をおこないせん断力の下限値より式（2）を提案した。

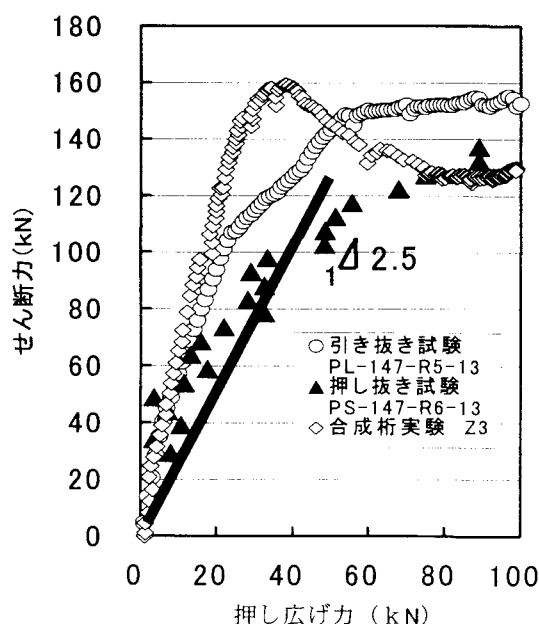


図-23 押し広げ力-せん断力

7. まとめ

本研究では、実橋梁の合成桁における床版のような比較的厚いかぶりを有する場合について、孔あき鋼板ジベルのずれ挙動と終局耐力を実験的に明らかにした。また、孔あき鋼板ジベルのずれ挙動に着目しつつ、孔内のコンクリートにひび割れが発生した後のジベル周辺のコンクリートの挙動について解明した。本研究で得られた知見をまとめると以下になる。

（1）実橋程度の厚いかぶりを有する場合の孔あき鋼板ジベルの崩壊は、薄いかぶりと同様にジベルプレートの上縁からひび割れが発生し進展するものの、床版上面までは達しなかった。このことから、かぶりがある程度以上に厚くない場合、かぶりによるずれ耐力の上昇は望めなくなる。すなわち、ひび割れ幅がある程度まで大きくなると、その後のずれ耐力は上昇しなくなると予想される。

（2）実橋梁のようにコンクリート床版に主鉄筋が配置される場合には、ジベル付近の鉄筋がひび割れを拘束するためにずれ耐力が上昇する。今回の合成桁実験では、このことに起因して床版の主鉄筋がある場合にはない場合よりも合成桁の最大荷重が約1割増加した。

（3）主鉄筋がある場合とない場合の桁のたわみは、載荷荷重 600 kN 付近までは同じ挙動を呈した。このことから、主鉄筋のひび割れ拘束効果は、ジベル周辺のコンクリートにひび割れが発生し進展しはじめてから現れることがわかった。

（4）孔あき鋼板ジベルのかぶり部のコンクリートには、ジベル孔周辺のコンクリートを押し広げるような力が作用することがわかった。このことから、ひび割れが発生した後に孔内コンクリートと周辺コンクリートの噛み合いによって周辺のコンクリートを押し広げる力が発生すると推察される。そして、押し広げ力に抵抗する孔内貫通鉄筋などの要因があれば、さらにずれ耐力は上昇する。

（5）押し広げ力とせん断力の関係は、式（2）を用いて評価できる。

（6）孔あき鋼板ジベルを非線形バネ要素とし、上フランジと床版間に接触要素を使用して3次元非線形FEM解析をおこなった結果、600 kN 付近まで実験値と一致しており実験結果をよく推定できることがわかった。しかし、それ以降はコンクリートを弾性体としたため最高荷重まで追跡できなかった。今後、継続的に研究をおこない終局状態を推定できるモデルを考案したい。

参考文献

- 1) 平陽兵, 天野玲子, 大塚一雄: 孔あき鋼板ジベルの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997 年.
- 2) Fritz Leonhardt, et al: Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, *Beton-und Stahlbetonbau*, pp325-331, Dec. 1987.
- 3) Hans - Peter Andra: Economical Shear Connectors with High Fatigue Strength, IABSE SYMPOSIUM, 1990.
- 4) 緒方紀夫, 村山陽, 沖本真之, 今西直人: 鋼製エレメントとコンクリートとの付着性能に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp1165-1170, 1994 年.
- 5) Dieter Kraus, Otto Wurzer: Bearing Capacity of Concrete Dowels, Composite Construction-Conventional and innovative, pp133-138, 1997.
- 6) 新谷英司, 蛭名貴之, 上平謙二, 柳下文夫: 波形鋼板とコンクリート床版の結合方法に関する実験的研究, 第9回シンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp91-96, 1999 年.
- 7) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 渡辺, 澁: 孔あき鋼板ジベルにおける耐力評価式の一考察, 土木学会第55回年次学術講演会 I - A261, 2001 年 9 月.
- 8) E.C.Oguejiofor, M.U.Hosain: Test of full-size composite beams with perfobond rib connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 80-92, 1995.
- 9) 藤井堅, 有吉孝文, 藤村伸智: 孔あき鋼板ジベルを用いた合成桁の曲げ挙動, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp1381-1390, 2001 年
- 10) Katashi FUJII, Hatsumi IWASAKI, Nobutoshi FUJIMURA: Ultimate Shear Strength of Perforated Rib Shear Connector, *Advances in Structures Steel Concrete Composite and Aluminum '03, Volume2*, pp771-pp776, 2003.
- 11) 岩崎初美, 藤井堅, 豊田正, 藤村伸智: 孔あき鋼板ジベルのせん断強度試験に関する一考察, 応用力学論文集, Vol. 6, pp487-pp492, 2003 年
- 12) 西海健二, 沖本真之: 拘束力を考慮した有孔鋼板のずれ止め特性に関する研究, 土木学会論文集 No. 633/i-49, pp193-pp203, 1999 年
- 13) 豊田正: 修士論文 拘束効果に着目した孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式の精緻化, 2004 年.

(2004 年 9 月 17 日受付)