

(28) 孔あき鋼板ジベルの拘束条件がずれ耐力に及ぼす影響に関する実験

Bearing Capacities of Perfobond Rib Shear Connectors in the Concrete confined by Reinforcement or Steel Frame

西海 健二*, 松岡 和巳*

Kenji NISHIUMI, Kazumi MATSUOKA

*工修 新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

In this paper, the capacity of a perfobond rib shear connector under the two confinement conditions is examined. A perfobond rib is a steel plate with some openings and acts as a shear connector in the concrete by a dowel effect. It is realized that the capacity of the perfobond rib would be effected by confinement stress. In order to investigate the relation of capacity and confinement stress, 2 series push-out tests that concrete slab were confined by transverse reinforcement and by surrounding steel frame were carried out. Test results indicated that (1) the shear strength under low confinement stress was linearly increased by confinement stress and area of opening, (2) the shear strength under high confinement stress reached upper limit strength and (3) the shear strength confined by steel frame was equal to upper limit strength of the test confined by sufficient reinforcement.

Key Words: perforated plate, shear connector, hybrid structure

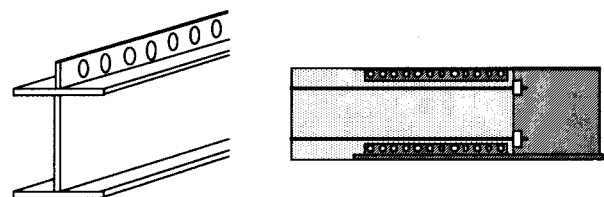
1. はじめに

鋼とコンクリートよりなる合成構造は、耐荷性能に優れるなどの特徴を有することから、様々な構造物を対象として研究開発が進められている。しかし合成構造としての優れた耐荷性能を発揮するためには、鋼とコンクリートを一体として機能させる必要があるため、鋼とコンクリートのずれ止めが重要な役割を果たす。近年、新しいずれ止めとして孔あき鋼板ジベルの研究が進められている¹⁾。孔あき鋼板ジベルは開口部を有する鋼板を鋼桁上に連続溶接にて配置し、コンクリート床版を打設することにより、開口部でのコンクリートのせん断力の伝達によりずれ止めとして機能するものである(図-1(a))。Leonhardtらは、孔あき鋼板ジベルの基礎的な実験を行った結果、開口間隔が小さい場合および開口径と比較して板厚が小さい場合には、開口間の鋼材のせん断降伏が生じるが、開口間隔が大きい場合には開口間のコンクリートのせん断破壊が支配的であることを指摘している²⁾。このとき、開口内部のコンクリートの破壊を拘束するために、開口と垂直方向の補強鉄筋の配置が重要である。また著者らは、開口部コンクリートの破壊を対象として補強鉄筋による拘束効果に着目した研究を実施し、補強鉄筋が小さい場合のずれ耐力は補強鉄筋に比例するが、ある程度以上の補強鉄筋を配置した場合のずれ耐力は開口径に依存することを報告した³⁾。しかし、開口数および開口間隔が孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす影

響は明確にされていない。

一方、鋼桁とコンクリート桁より構成される混合構造の接合部(図-1(b))において孔あき鋼板ジベルの適用性の検証を目的とした研究も行われている。孔あき鋼板ジベルが配置された領域が鋼殻で覆われた場合には、鉄筋補強が無くとも鋼殻の拘束力によりずれ耐力が飛躍的に改善されることが指摘されている^{4),5)}。ここで、孔あき鋼板ジベルが合成桁に適用された場合には桁と床版に作用する局所的なせん断力に抵抗するずれ止めの配置を検討すればよいが、異種部材同士をずれ止めで接合するためには、ずれ止め耐力の累加が成立するかが重要となるが、開口数の影響は明確にされていない。

そこで、孔あき鋼板ジベルの開口数および開口間隔がずれ耐力に及ぼす影響の確認を目的として、鉄筋補強した試験体による押し抜きせん断試験を実施した。さらに、鋼殻内に配置された孔あき鋼板ジベルの開口数および開口間隔がずれ耐力に及ぼす影響の確認を目的として、鋼殻補強した試験体による押し抜きせん断試験を実施した。



(a) 合成桁への適用

(b) 混合桁への適用

図-1 孔あき鋼板ジベルの適用

2. 鉄筋補強押し抜き試験

2.1 試験概要

孔あき鋼板ジベルの基本的なずれ止め特性の確認を目的として、通常の頭付きスタッドのずれ止め試験と同様の押し抜き試験を実施した。試験体は表-1 および図-2 に示す 8 体である。200x200x12x22 の H 形鋼の両フランジ部にコンクリートブロックを配置した押し抜き試験体であり、H 型鋼のフランジ部には 1 枚ずつ孔あき鋼板ジベルを配置している。孔あき鋼板ジベルの形状は鋼板高さ 100mm、板厚 12mm、開口径 60mm、開口間隔 150mm を標準とし、開口数が 1～3 個設けた試験体が MS-1～3 である。この時に開口部毎に D25 の鉄筋を配置した。MS-4,5 は開口間隔を小さくした場合であり、MS-6,7 は開口径の異なる試験体である。この時、開口径の変化に伴い破壊モードが大きく異ならないように板厚、開口間隔、補強鉄筋量なども変化させた。MS-8 は鉄筋補強のみ異なる試験体である。なお、孔あき鋼板ジベルの先端部での抵抗を除去するために空洞を設けた。また、鋼板表面付着の影響を極力除去するために H 型鋼フランジ面にグリースを塗布し油紙を配置した。

試験体に用いた鋼材は SS400、鉄筋は SD295 とし、コンクリートは粗骨材粒径 20mm の配合強度 30N/mm² とし、孔あき鋼板ジベルの開口部支圧面におけるブリージングの影響を除去するためにコンクリートは試験体下面より打設した。荷重方法は、試験体をテストベッドに設置し上部より鉛直荷重を単調荷重した。試験中は、荷重荷重、H 型鋼とコンクリートブロックの相対ずれ量および鉄筋、鋼板のひずみ量の計測を行った。

2.2 試験結果

(1) 荷重ずれ量関係

開口形状が等しく、開口数の異なる MS-1, 2, 3 の試験により得られた開口当りのせん断力とコンクリートと H 型鋼の相対ずれ量関係を図-3 に示す。開口当りのせん断力は荷重荷重を孔あき鋼板ジベル枚数と開口数の積で除した値とした。3 体の試験ともせん断力が 50kN に達した時からずれが生じはじめ、せん断力が約 150kN で開口内に配置した鉄筋が曲げ降伏に至った。それ以後はずれ量が大きくなり、せん断力が 180～220kN で最大荷重に達した。開口数の違いに着目すると、開口数が多いほど最大荷重は増大しており、MS-3 の最大せん断力は MS-1 のその 20% 高い結果となった。また、開口数が 3 個の場合のみ最大荷重以降徐々に荷重が低下したが開口数が少ない試験ではほとんど荷重低下が認められなかった。しかし、開口数によるずれ耐力の累加がほぼ成立すると考えられる。

開口間隔が 80, 120, 160mm の 3 種類の試験における開口当りせん断力と相対ずれ量関係を図-4 に示す。開口間隔が 80mm の MS-5 ではせん断力が 80kN で孔あき鋼板ジ

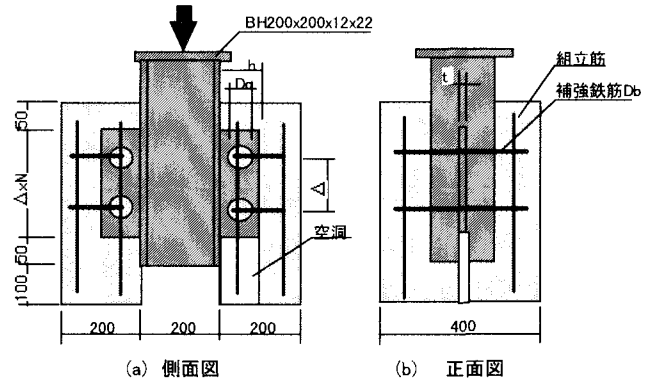


図-2 鉄筋補強試験体

表-1 鉄筋補強試験体緒元

	鋼板高さ h (mm)	鋼板厚 t (mm)	開口径 Do (mm)	開口間隔 Δ (mm)	開口数 N (mm)	補強鉄筋 Db (mm)
MS-1	100	12	60	150	1	25
MS-2	100	12	60	150	2	25
MS-3	100	12	60	150	3	25
MS-4	100	12	60	120	2	25
MS-5	100	12	60	80	2	25
MS-6	80	8	40	100	2	19
MS-7	120	24	80	160	2	32
MS-8	100	12	60	150	2	19

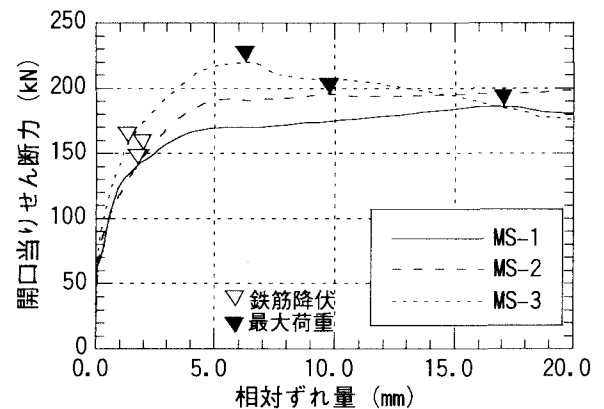


図-3 開口当りせん断力—相対ずれ量関係図 (開口数)

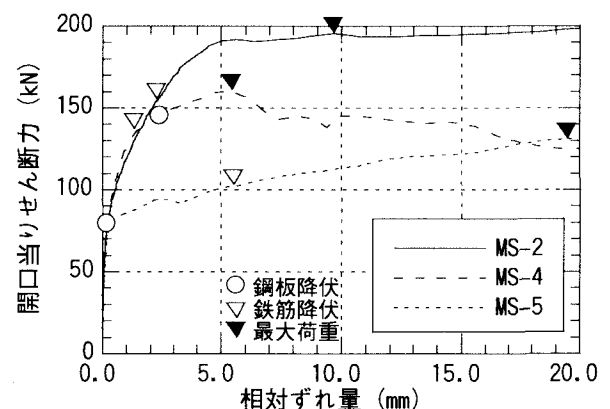


図-4 開口当りせん断力—相対ずれ量関係 (開口間隔)

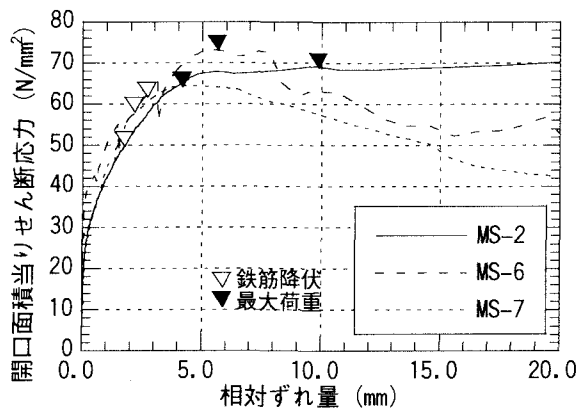


図-5 セン断応力—相対ずれ量関係（開口径）

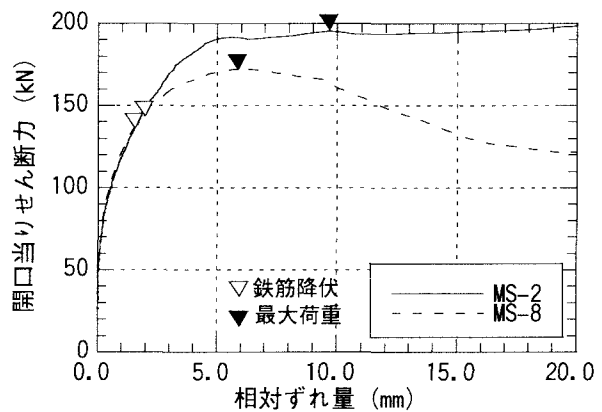


図-6 セン断力—相対ずれ量関係（補強鉄筋）

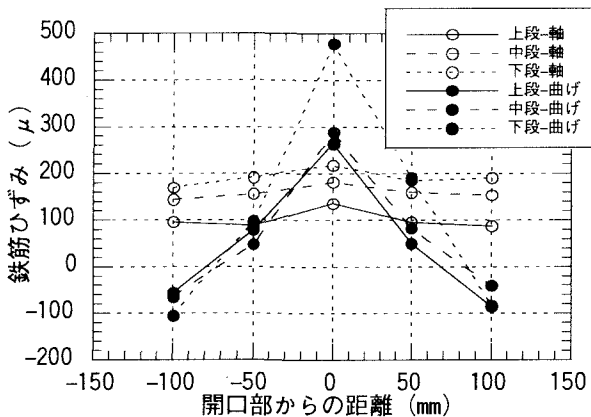


図-7 鉄筋ひずみ分布図

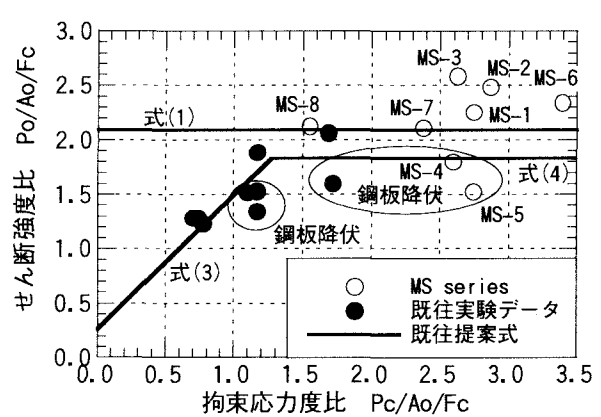


図-8 開口部ずれ耐力

ベルの開口間の鋼材がせん断降伏にいたり、ずれ量の増大が顕著になった。しかし、それ以後も鋼材の加工硬化によりせん断力が増大しつづけ相対ずれ量が20mmの時点で130kNに達したが明確な最大荷重には達していない。開口間隔が150mmのMS-2では前述のように鉄筋降伏後、コンクリートの破壊が生じており鋼材の降伏は認められていない。開口間隔が120mmのMS-4では鋼材降伏とコンクリートの破壊が混在した破壊モードになっている。最大せん断力で比較すると、開口間隔が大きい方が高い結果となった。

開口径が異なる3体の試験では、開口径が大きいほど最大耐力も大きくなったが、全て鉄筋の曲げ降伏後に開口部コンクリートのせん断破壊に至った。既往の研究では、開口部で破壊する場合のずれ耐力は開口面積に比例することが指摘されている^{2),3)}。そこで、開口当たりせん断力を開口面積で除した値を開口面積当りせん断応力とし、3つの試験より得られた開口面積当りせん断応力と相対ずれ量関係を図-5に示す。孔あき鋼板ジベルの形状および鉄筋補強量が異なるにもかかわらず、せん断応力度で整理することにより、最大せん断応力度はほぼ等しい結果となったことから、開口部コンクリートのせん断破壊耐力は開口面積に比例すると考えられる。

開口形状が等しく、開口内の補強鉄筋量の異なる2体の試験により得られた開口当りせん断力—相対ずれ量関係図を図-6に示す。補強鉄筋が大きい方が最大耐力が大きくなる。しかし、補強鉄筋量は1.7倍であるが最大耐

力の増加は1.13倍であった。

(2) 鉄筋のひずみ分布

開口数が3つのMS-3試験体の作用せん断力が150kN時に計測された3本の鉄筋の軸ひずみおよび曲げひずみ分布図を図-7に示す。鉄筋軸ひずみは鉄筋の上下のひずみの平均値であり、鉄筋曲げひずみは鉄筋の上下のひずみの差分の1/2（下側引張を正）とした。この図より開口部に垂直方向に配置した鉄筋には軸引張と曲げが作用しており、開口部で卓越していることが確認できる。また鉄筋の配置毎の比較を行うと、いずれも下段の鉄筋の負担が大きい結果となった。

(3) セン断耐力

Leonhardtらは、孔あき鋼板ジベルが開口部コンクリートで破壊する場合のせん断耐力(Pd)を式(1)で、開口間の鋼材で降伏する場合のせん断耐力(Ps)を式(2)で提案している²⁾。

$$Pd = 1.4d^2 \beta_w \quad (1)$$

ここで、d:開口径、 β_w :コンクリート立方体強度

$$Ps = 1.44 A_s \beta_s \quad (2)$$

ここで、 A_s :開口間鋼材面積、 β_s :鋼材降伏強度

一方、著者らは単一の開口に鉄筋補強を行った鋼板の押し抜き試験を実施し、実験で得られたせん断耐力(Pu)は開口部のコンクリートのせん断耐力(Po)と鉄筋の曲げ抵抗力(Pr)の累加であると考え、鉄筋の曲げ抵抗力を鉄

筋を弾性床上の梁として算定している。更に、開口部せん断耐力は開口面積および補強鉄筋量の影響を受けることから、式(3)、(4)を提案している³⁾。

$$P_o = 1.23P_c + 0.26A_o F_c \quad (P_c/A_o/F_c \leq 1.28) \quad (3)$$

$$P_o = 1.83A_o F_c \quad (1.28 \leq P_c/A_o/F_c) \quad (4)$$

ここで、 P_c :鉄筋拘束力(鉄筋面積 x 降伏強度)

A_o :開口面積、 F_c :コンクリート強度

試験結果からせん断強度比と拘束応力度比を算定した結果を図-8に示す。また図中には平らが行った孔あき鋼板ジベルの類似の実験結果^{4),5)}および式(1)、(3)、(4)をあわせて示す。この図より、開口部コンクリートで破壊した試験において拘束応力度比($P_c/A_o/F_c$)が2.0を上回る時のせん断強度比は提案式より高い値を示している。

一方、鋼板の降伏が先行した試験ではこの提案式を下回る値となっている。Leonhardtの提案する鋼材が降伏する場合のせん断耐力式(2)と比較すると、開口間が小さいMS-5はほぼ一致しているが、開口間隔が大きなMS-4では計算値の約50%の耐力しか発揮していない。

3. 鋼殻補強押し抜き試験

3.1 試験概要

断面形状 400x400mm の鋼殻内に孔あき鋼板ジベルを配置した試験体による押し抜き試験を実施した。試験体は表-2に示す5体である。厚さ12mmの鋼殻内のフランジ部に孔あき鋼板ジベルを1枚ずつ配置し、コンクリートを充填した試験体である。孔あき鋼板ジベルの形状は鉄筋補強試験体(MS-3)と同じ開口形状を有する試験体をMC-1とし、他の試験体は鋼板高さ80mm、鋼板厚8mm、開口径40mm、開口間隔100mmを標準タイプとした。開口数が1,3,5個と異なる試験体をMC-2,3,4とし、MC-5はMC-3と比較して開口間隔が80mmとした。また、鋼板表面の付着の影響を極力除去するためにH型鋼フランジ面にグリースを塗布した上に油紙を配置した。試験体に用いた鋼材はSS400とし、コンクリートは粗骨材粒径20mmの配合強度30N/mm²とし、孔あき鋼板ジベルの開口部支圧面におけるブリージングの影響を除去するためにコンクリートは試験体下面より打設した。また、鉄筋補強試験体と同様に先端部での抵抗を除去するために孔あき鋼板の先端に空洞を設けた。

試験方法は、試験体をテストベッドに設置し、上面より鉛直荷重を単調载荷した。試験中には、载荷荷重、鋼殻とコンクリートブロックの相対ずれ量および鋼板のひずみの計測を行った。

3.2 試験結果

(1) 荷重—ずれ量関係

開口形状が等しく拘束条件が鉄筋補強と鋼殻補強と異なる試験体の開口当りせん断力—相対ずれ量関係図を図-

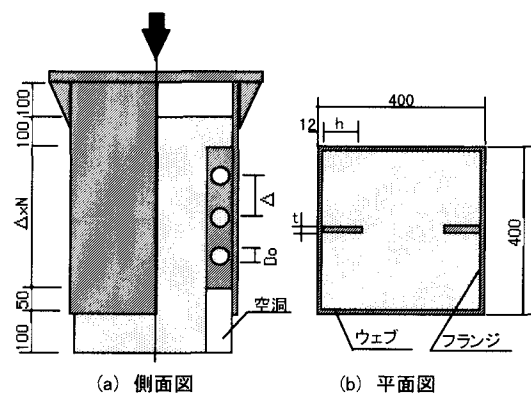


図-9 鋼殻補強試験体

表-2 鉄筋補強試験体緒元

	鋼板高さ h(mm)	鋼板厚 t(mm)	開口径 D _o (mm)	開口間隔 Δ(mm)	開口数 N(mm)
MC-1	100	12	60	150	3
MC-2	80	8	40	100	1
MC-3	80	8	40	100	3
MC-4	80	8	40	100	5
MC-5	80	8	40	80	3

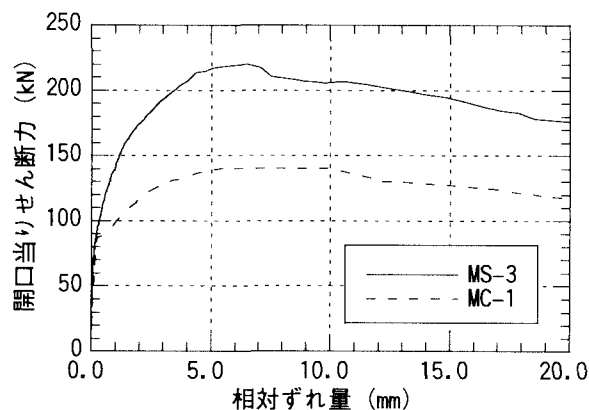


図-10 せん断力—相対ずれ量関係(拘束方法)

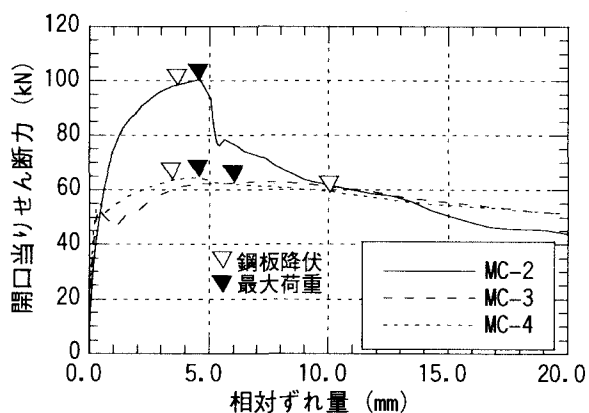


図-11 せん断力—相対ずれ量関係(開口数)

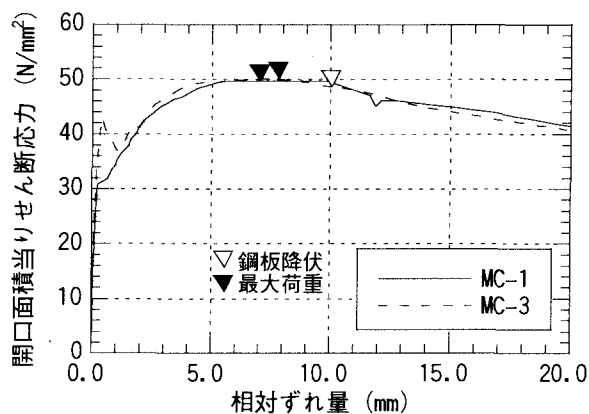


図-12 セン断応力度—ずれ量関係（開口径）

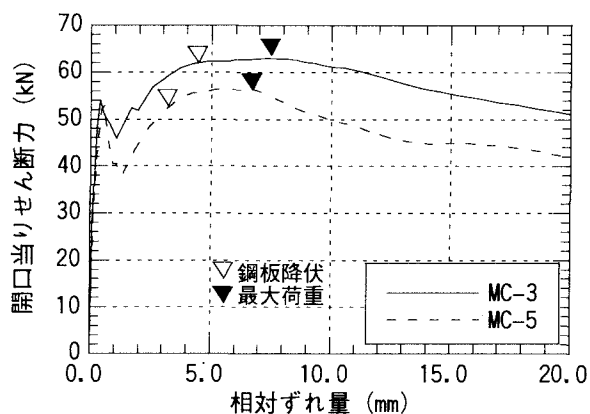


図-13 セン断力—ずれ量関係図（開口間隔）

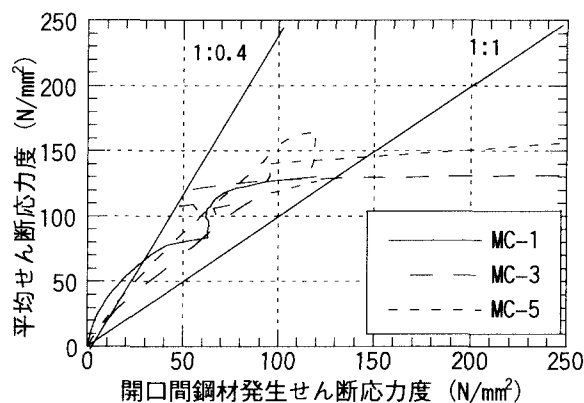


図-14 鋼板ひずみ分布図

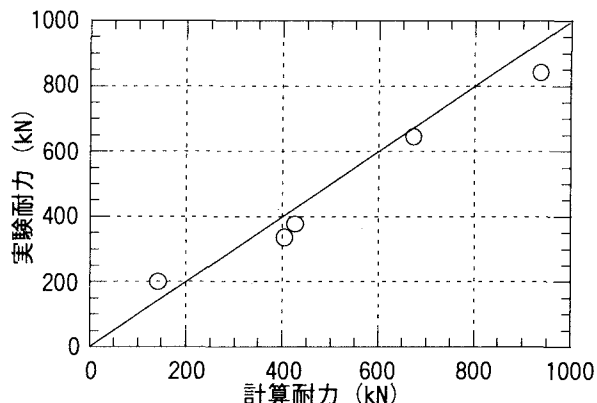


図-15 セン断耐力比較図

10 に示す。鉄筋補強を行った MS-3 のせん断耐力の方が鋼殻補強を行った試験より高い結果となった。しかし、この違いは拘束条件の違いと鉄筋の曲げ抵抗が含まれていることによる影響が大きいと考えられる。

開口形状が等しく、開口数が異なる試験体の開口当りせん断力—相対ずれ量関係を図-11 に示す。開口が1個の MC-2 では、せん断力 50kN に達した時よりずれが発生しはじめ、ずれ量が 5mm の時に最大せん断力 100kN に達した。開口数が 3, 5 個の MC-3, 4 試験体では、せん断力が 50kN の時に一旦荷重低下が認められたが、それ以後再度荷重が回復しずれ量が 5mm の時にせん断力 60kN で最大せん断力に達した。この初期の荷重低下時に、鋼殻フランジ部の孔あき鋼板ジベルを配置した上部に面外変形が生じていたことから、孔あき鋼板ジベルの開口部での支圧力とフランジ部の面内力との間における偏心曲げが生じ、開口部の局所的な破壊が生じたために、一時的な荷重低下が生じたと考えられる。従って、開口当りせん断力で比較した場合、MC-3, 4 はほぼ同等の最大せん断力を示すが、MC-2 のみ大きな値であった。また、試験後の孔あき鋼板ジベルの変状調査から、全ての試験体の破壊は開口部コンクリートのせん断破壊が支配的であると考えられるが、最大耐力とはほぼ同様な荷重レベルで開口間の鋼材がせん断降伏に至っていた。

開口径の異なる MC-1, 3 試験体では、開口径が大きい

MC-1 のせん断耐力が大きくなる。鉄筋補強試験体と同様に、開口面積当りせん断応力で整理すると、図-12 に示すように、せん断応力—ずれ量関係はほぼ同一のずれ特性を示した。このことから、鋼殻補強を行った場合でも開口部におけるせん断耐力は開口面積に比例すると考えられる。

開口間隔の異なる試験体より得られたせん断力—ずれ量関係図を図-13 に示す。両試験体ともせん断力が約 50kN の時に一旦荷重低下を生じたが、その後再度荷重が増大し、ずれ量が 5mm の時にせん断応力度最大耐力に至った。このときの最大耐力は開口間隔が小さい方が低い値であった。

(2) 鋼板ひずみ

孔あき鋼板ジベルの開口間の鋼材にはせん断応力が卓越して発生していた。作用せん断力を開口間の鋼材面積で除した値を平均せん断応力度とし、開口間のひずみゲージより計測された発生せん断応力度との比較図を図-14 に示す。Leonhardt らの提案する開口間の鋼材が降伏する場合の耐力式(2)は、作用せん断力の 40%が開口間に作用するとの仮定に基づいた式である。低荷重レベルではこの考えと同様のひずみが生じているが、荷重の増大に伴い鋼材間の発生せん断応力度が増大している。この現象により、本試験では最大せん断力近傍で開口間の鋼材がせん断降伏に至っている。

(3) セン断耐力

鋼殻拘束試験では、最大荷重時に開口間鋼材のせん断降伏が生じたが、開口部コンクリートのせん断破壊が支配的であった。そこで、十分な拘束が作用している場合の開口部コンクリートのせん断破壊耐力式(4)との比較図を図-15に示す。実験値は計算値とほぼ一致しているが、実験値は計算値よりわずかに小さい値を示している。この原因として、鋼材のせん断破壊が混在した破壊モードであったためと考えられるが、鋼殻により拘束された状態における孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は、開口間のコンクリートのせん断破壊により決定され、最大耐力は開口面積とコンクリート強度によりほぼ算定できると考えられる。

4. まとめ

孔あき鋼板ジベルの基本的ずれ止め特性の研究を目的として、拘束条件がずれ耐力に及ぼす影響に着目し、鉄筋補強および鋼殻補強の異なる拘束条件下での押し抜きせん断試験を実施した結果、以下の知見を得た。

鉄筋補強を行った押し抜きせん断試験では、

- (1) 十分な鉄筋補強がなされ、開口部コンクリートのせん断が生じる場合には、開口数の増加にともないずれ耐力はほぼ比例的に増大する。
- (2) 開口間隔が小さくなると開口部のコンクリートでの破壊から開口間の鋼材のせん断破壊へ移行し、ずれ耐力は低下する。
- (3) 十分な鉄筋補強がなされ、開口部コンクリートのせん断破壊が生じる場合には、せん断耐力は開口面積に比例する。

また、鋼殻補強を行った押し抜きせん断試験では、

- (4) 開口数が増えた場合には開口数の増加に伴いずれ耐力も増加するが、鋼殻の作用応力度が上昇することによる偏心曲げの影響により荷重低下する場合がある。
- (5) 開口間の鋼材に発生するせん断応力度は、せん断力の増大にともない、比率が増加する傾向にある。
- (6) 鋼殻補強された孔あき鋼板ジベルは、十分な鉄筋補強がされた場合とほぼ同等のずれ特性を発揮する。

謝辞：本論文のとりまとめにおいて、早稲田大学理工学部 依田照彦教授のご指導を得ました。ここの記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Zellner, W.: Recent designs of composite bridges and a new type of shear connector, Proc. of ASCE Conference on Composite Construction in Steel and Concrete, pp. 240-252, 1987.
- 2) Leonhardt, F., Andra, W., Andra, H. and Harre, W.: Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton-und Stahlbetonbau, 1987.
- 3) 西海, 沖本: 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 (投稿中)
- 4) 平, 古市, 山村, 富永: 孔あき鋼板ジベルの基本特性に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 859-864, 1998.
- 5) 西海, 富永, 室井, 古市: 拘束条件を考慮した孔あき鋼板ジベルのずれ止め特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 865-870, 1998.