

論文 高強度モルタルを用いた孔あき鋼板ジベルの力学特性に関する実験的研究

田中 照久*1・堺 純一*2

要旨:孔あき鋼板ジベルを乾式組立梁材とコンクリートスラブで構成された合成梁におけるずれ止めとして用いることを試みた。本研究では、鋼板の厚さ6mmに直径50mmの孔を設けた孔あき鋼板ジベルの力学特性を把握するため、実験変数に円柱形の高強度モルタルを孔に通した場合と通していない場合、孔数および孔間隔をとり、押抜き試験を実施した。その結果、孔に円柱形の高強度モルタルを通すことで、ジベルの破壊状態に影響を与え、最大せん断耐力とずれ剛性が增大することがわかり、ずれ止め機能として有効であることを明らかとした。

キーワード:孔あき鋼板ジベル, 高強度モルタル, 押抜き試験, 乾式組立, 合成梁

1. はじめに

近年、高強度780N/mm²鋼材は、経済合理性と長寿命、リユース・リサイクル性を追求した鋼材として注目され建築構造用部材として開発が進められている。その研究開発の1つに、溶接性が考慮されていない鋼材(H-SA700A)を対象とし、2つの山形鋼にウェブプレートを含んで、高強度ボルトにより摩擦接合で組み立てられた乾式組立梁材が提案されている¹⁾。通常、鉄骨梁はスタッドを介してコンクリートスラブと一体化させ、合成效果を期待する。しかし、H-SA700A鋼材を用いた乾式組立梁に適用することは施工上溶接性の問題が生じる。したがって、溶接を必要としない簡素な連結方法により鋼とコンクリートの一体化を図ることができれば、リユース・リサイクル性を考慮した合理的な構造形式になると考えられる。

筆者らは、Leonhardt²⁾によって提唱されている孔あき鋼板ジベル(以下、PBLと略記)に着目し、対象とする合成梁において、組立梁材に使用するウェブプレートをスラブ位置まで伸ばし、その鋼板部分にあげた孔に充填されたコンクリートがPBLの機能を果たす、溶接を必要としない構造形式を提案する。図-1に本合成梁材の構成を示す。

PBLの効果は、これまでに数多くの研究より、スタッドに比してせん断耐力および剛性に優れる剛なずれ止めとの報告がなされ、土木分野においては適用事例が多数ある³⁾。しかし、これまでのPBLの研究において、孔

中のコンクリートがせん断破壊することを前提とした実験的研究は数多くある⁴⁾が、支圧破壊が先行してしまうような実験的検証^{2),5)}は少ない。すなわち、薄い鋼板に比較的大きな孔を設けたPBLの研究はいまだ無いように思われる。また、筆者らは部分的にせん断耐力の増大を図る方法として、孔に鉄筋ではなく円柱形の高強度モルタル(以下、円柱形モルタルと略記)を通すことを提案し、押抜き試験よりその効果は確認している⁶⁾が実験データは少なく、十分な検証は行なわれていない。

本研究の目的は、薄い鋼板(板厚6mm)に直径50mmの孔を設けたPBLを対象とし、円柱形モルタルを孔に通したもの(写真-1参照)および孔数・孔間隔を実験変数とした押抜き試験を実施し、力学的特性(最大ずれ耐力、ずれ挙動、ずれ定数および最終破壊状況等)を把握することである。また、本合成梁材の曲げせん断試験におけるPBLのずれ挙動と比較するための基礎的データを収集する。本論文では、その実験概要と結果について述べる。さらに、現在までに提案されている代表的なPBLの耐力算定式の計算値と実験値の比較について述べる。

2. 実験計画

2.1 押抜き試験体

試験体の形状寸法を、図-2に示す。試験体の共通事項は以下のとおりである。PBLを形成するための孔径は50mmである。試験体に用いる山形鋼はL-75x75x9(SS400

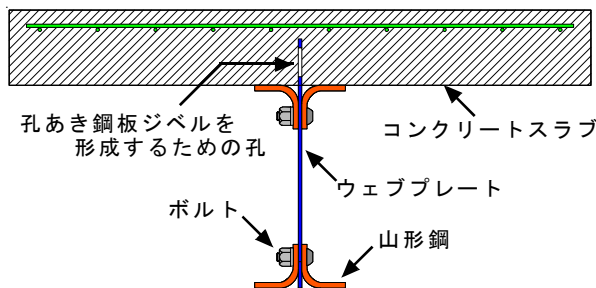


図-1 本合成梁材の構成

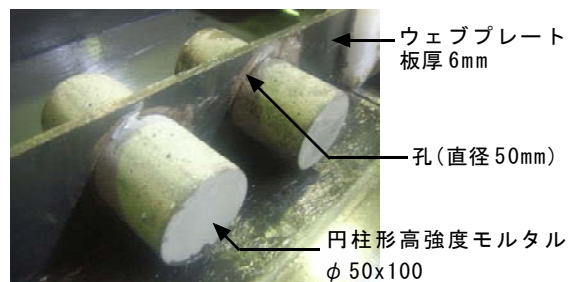


写真-1 孔に円柱形高強度モルタルを通した様子

*1 福岡大学 工学部建築学科助手 (正会員)

*2 福岡大学 工学部建築学科教授 博士(工) (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	N	Hc-1	Hc-2-60	Hm-1	Hm-2-90	Hm-2-180
孔数	0	1	2	1	2	2
孔間隔 (mm)	-	-	60	-	90	180
円柱体の有無 (高強度モルタル)	無	無	無	有	有	有
孔あき鋼板 詳細図						

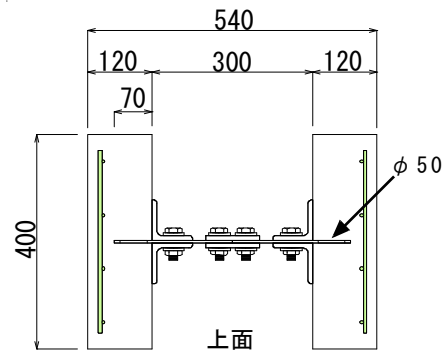
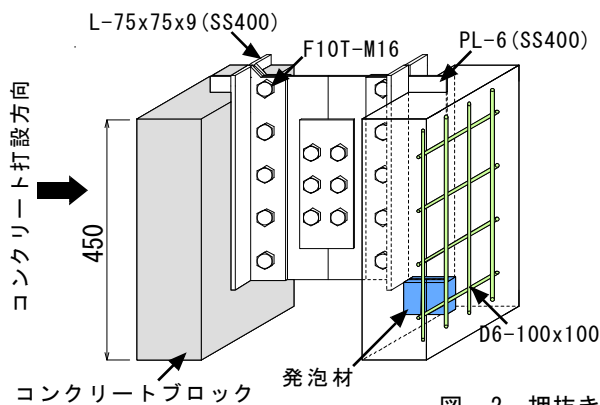


図-2 押抜き試験体の形状・寸法

寸法単位：mm

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材	規格	厚さ (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比
山形鋼	SS400	9	304	432	0.70
鋼板	SS400	6	272	424	0.64

表-3 コンクリート・モルタルの材料強度

材料	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
コンクリート	40	34.8	3.78
モルタル	155	97.5	8.03

材)であり、鋼板(SS400材)の厚さは6mmである。なお、山形鋼と鋼板は高力ボルトによる摩擦接合とし、両者間でのすべりは認めない設計としている。鋼板にあげた孔に通す円柱形モルタルの寸法は、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ である。円柱形モルタルの鋼板への固定方法は、孔に通しているだけで、隙間の処理は行なっていない。施工性の観点から、円柱体と孔とのクリアランスは必要と考えるが、本試験体はできる限り隙間がない理想状態としている(写真-1参照)。本実験は、孔のみのずれ特性を把握することを目的としているため、鋼板の下端部に発泡材を配置し、支圧抵抗の影響を無くしている。また、コンクリートと接触する山形鋼のフランジ面と鋼板面には、コンクリートの付着を排除するためにグリースを塗付している。合成梁の施工条件と合わせるため、図-2に示す方向からコンクリートを打設している。コンクリートブロックのひび割れを防止するため、溶接金網(D6-100×100)を配置している。

2.2 実験変数

表-1に試験体一覧を示す。実験変数には、1)円柱形

モルタルの有無、2)孔の個数・間隔を選んだ。試験体は全部で6体である。1)の円柱形モルタルは実験データの蓄積と力学的特性およびその効果を調べるために準備した。2)は、孔数0個、1個および2個を変数に選んだ。孔数2個の間隔は、曲げせん断試験で計画している鉄骨梁とコンクリートスラブが完全合成梁(合成率100%)となる条件より決定した⁷⁾。さらに、円柱形モルタルを通した試験体は、孔間隔の影響を調べるために、孔間隔が2倍となる試験体も別に準備した。すなわち、これは不完全合成梁(合成率50%)に相当する条件である。なお、本合成梁の設計におけるPBL1個あたりのせん断耐力の算定は、著者らが検討している実験式を用いた⁹⁾。鋼材の機械的性質を表-2に示す。コンクリートは粗骨材の最大寸法が13mmで標準スランプが18cmの普通コンクリートである。コンクリートとモルタルの材料強度を表-3に示す。なお、引張強度は割裂試験より調べた結果である。

2.3 載荷方法及び測定方法

図-3に載荷方法および測定位置を示す。試験は

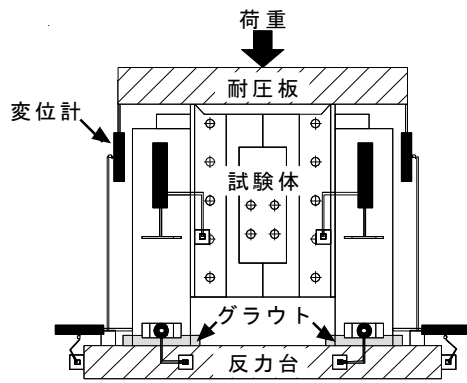


図-3 荷重方法と測定位置

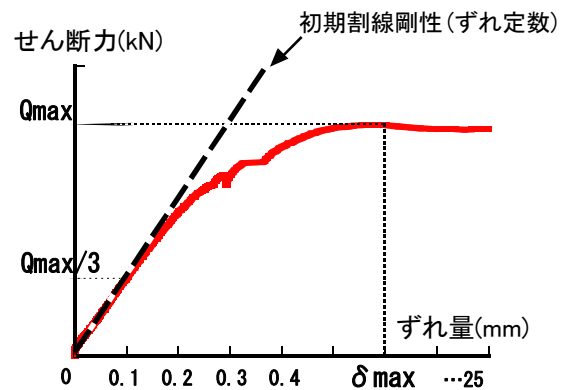


図-4 せん断耐力-相対ずれ量の関係

表-4 実験結果

試験体名	最大せん断耐力 Q_{max} (kN)		最大ずれ量 δ_{max} (mm)	ずれ定数 K (kN/mm) 鋼板1枚あたり
	鋼板1枚あたり	孔1個あたり		
N	4.41	-	0.25	-
Hc-1	82.7	82.7	3.11	394
Hc-2-60	100	50.0	2.22	476
Hm-1	99.4	99.4	0.62	1103
Hm-2-90	162	81.2	1.24	900
Hm-2-180	149	74.6	2.29	994

5000kNアムスラー載荷試験機を使用した。コンクリートの下面を反力台に接地させ、載荷部は球座になっており上面の山形鋼に耐圧板を介して荷重を単調に載荷し25mm沈下した時点で終了とした。なお、試験体をセットする際は、コンクリートブロックの下にグラウトを敷き左右への傾きを無くし、かつ、コンクリートブロックの全底面を試験機に密着させ、水平を保持できるようにした。測定変位は孔あき鋼板ジベルの中心位置における山形鋼とコンクリートの相対ずれ変形（左右ブロックの4箇所）と全長の軸変形（4箇所）、鋼とコンクリートの肌離れによる面外変形（4箇所）を測定した。

3. 実験結果とその考察

最終破壊状況、最大せん断耐力、ずれ定数およびずれ挙動を比較した結果について以下に述べる。実験結果を表-4に示す。表中における各数値は、文献8)に示された方法より算出している。図-4のように最大せん断耐力は、ずれ量25mmまでにおける最大荷重点 Q_{max} （本試験は、コンクリートブロックが2つあるため、載荷荷重の1/2で評価する）とした。最大ずれ量 δ_{max} は、最大荷重 Q_{max} に対応するずれ量である。また、ずれ定数(K)は、 $Q_{max}/3$ 荷重点の初期割線の傾きとした。各試験体の荷重-ずれ関係の比較を図-5に示す。

3.1 最終破壊状況

3.1.1 コンクリートブロックの破壊状況

一般的に、コンクリートブロックの破壊に起因する

PBLの押抜き試験の破壊形式は、コンクリート外面のジベルに沿ったひび割れによる⁹⁾が、本実験では、外面と側面のひび割れは観察されず、上面と下面および内面下端部のひび割れと上端部の鋼板とコンクリート間に隙間が生じていた。外面にひび割れが生じなかった要因は、かぶりが十分にとれていたこと、ひび割れ防止筋がコンクリートを十分に拘束していたことが考えられる。

3.1.2 孔近辺の破壊状況

全ての試験体において、鋼板にあげた孔が楕円状に変形した様子もなく鋼板のせん断破壊は確認されなかった。Hc試験体は、写真-2(a)に示すように孔中のコンクリートが粉状に圧壊している。要因は、図-6(a)に示すように孔径50mmに対して板厚(6mm)が薄いため圧縮領域が小さく、力が集中して作用したためと考える⁹⁾。最大耐力は、孔内のコンクリートの支圧破壊に起因したものと推測される。一方、Hm試験体の円柱形モルタルはハンマーで砕かれたような破壊が観察された。一部、写真-2(b)に示すようにせん断破壊も確認された。これは、図-6(b)に示すように円柱形モルタルにより圧縮領域が大きく分散し、コンクリートに力が伝達されていると考える⁹⁾。最大耐力は、支圧破壊と一部せん断破壊に起因したものと推測される。この結果から、円の孔径と鋼板の板厚およびコンクリートブロックの圧縮強度が同一条件であっても、円柱形モルタルを孔に通すことで破壊状態が異なることがわかった。

3.2 孔あき鋼板ジベルの効果

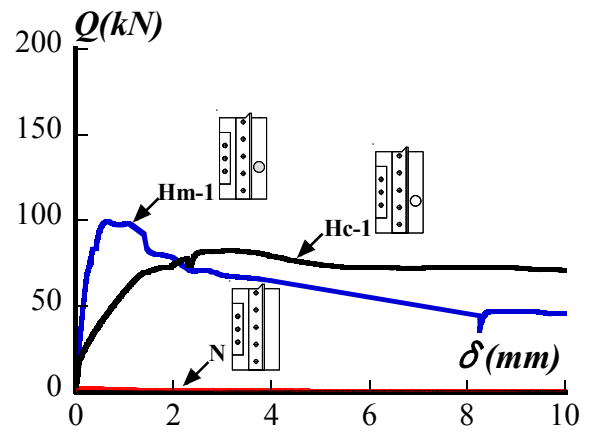
孔の有無による相対ずれ量の違いを比較した結果を図-5(a)に示す。図-5(a)および表-4から分かるようにN試験体(孔が無いグリース塗付の鋼板)はせん断に全く抵抗できないことが明らかである。このことから、鋼とコンクリート間の摩擦抵抗は非常に小さいので、他の試験体においても最大耐力に及ぼす摩擦抵抗の影響は小さいと考える。一方、Hc試験体とHm試験体は、鋼とコンクリートのずれ抵抗に対して、PBLが十分に効果を発揮していることがわかる。さらに、孔に円柱形モルタルを通すことによって、最大せん断耐力が向上していることが確認できる。また、ずれ定数は、2倍から3倍程度高くなることが確認できる。この結果から、コンクリートブロックの圧縮強度よりも高い圧縮強度をもつ円柱形モルタルは、孔に適切な個数が挿入されていれば、部分的にせん断耐力とずれ剛性を増大させる方法の一つとして有効であると考えられる。しかしながら、コンクリートブロックと円柱形モルタルの圧縮強度の関係がPBLの力学的特性に及ぼす影響については、未解明であるため今後の検討課題とする。

3.3 孔数の影響

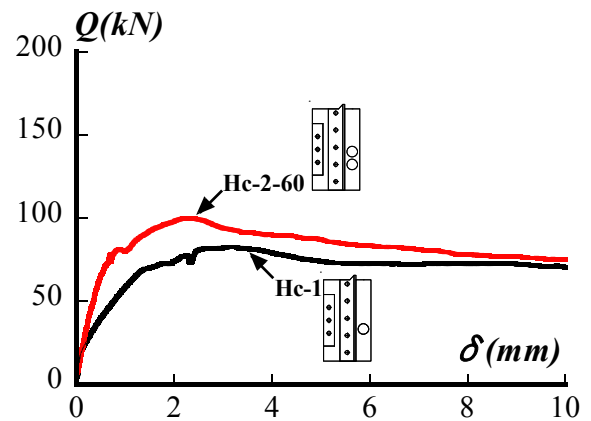
図-5(b), (c)と表-4よりHc試験体とHm試験体に関わらず、孔数が増えることにより最大耐力は増大するが、PBL1個当たりが負担するせん断耐力は小さくなる結果であった。特に、Hc試験体の方がHm試験体に比べ、その低下率は大きい。一方、ずれ定数は表-4から分かるように、Hc試験体は孔数が増えるとずれ定数が大きくなるが、Hm試験体は僅かに小さくなる結果であった。

3.4 孔間隔の影響

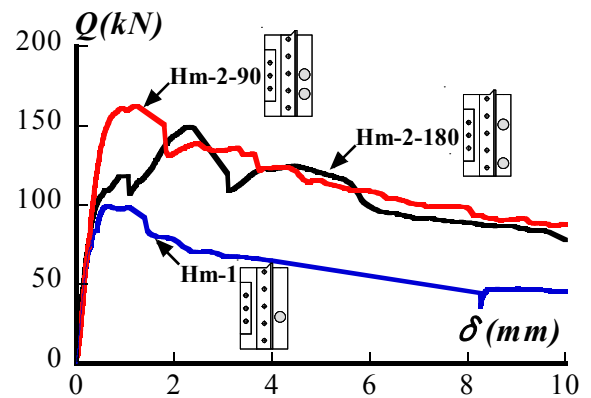
Hc試験体は、円孔の中心間距離が60mmと極端に狭くても鋼板のせん断破壊は確認されなかった。Leonhardtが提案している強度算定式²⁾で評価した場合、鋼板のせん断破壊で決まる計算となるが、結果は孔内のコンクリートの支圧破壊であった。これは、一部に鋼版断面積が小さい部分ができても、その他の断面積が大きい部分で十分な抵抗力を発揮するためと推測される¹⁰⁾。Hm試験体は、孔間隔90mmと180mmの両者を比較すると、図-5(c)と表-4か



(a) 孔の有無による比較 (N・Hc・Hm)



(b) 孔数の比較 (Hc試験体)



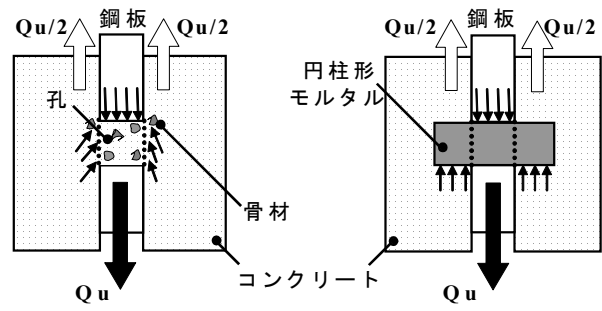
(c) 孔数と孔間隔の比較 (Hm試験体)

図-5 荷重-ずれ関係



(a) Hc試験体 (b) Hm試験体

写真-2 孔近辺の破壊状況



(a) Hc試験体 (b) Hm試験体

図-6 孔あき鋼板ジベルの抵抗機構

ら明らかのように、せん断耐力は孔間隔90mmの方が僅かに大きいことが分かる。既往の研究よれば、孔間隔を十分にとっていれば、ずれ耐力は孔数に比例するという結果を得ている¹¹⁾。一方、ずれ耐力は必ずしも孔数に比例しないという結果も報告されている¹²⁾。したがって、PBLのせん断耐力により孔間隔を決定する場合には、最終破壊に起因する孔径、鋼板の厚さ以外に、孔を配置できる鋼板長さに対して適切な間隔を考慮して設計する必要がある。

3.5 孔に通した高強度モルタルの効果

PBLを形成する孔に円柱形モルタルを通す方法は、鋼とコンクリート間の応力伝達能力を高める効果がある。したがって、この方法は、合成構造に使用するコンクリート設計基準強度の影響を受けることなく、PBLの設計を可能とする。設計上有利な点を以下に列挙する。1) 鋼板にあける孔数を減らすことが可能である。また、限られた長さの鋼板に必要な孔数を設けることができない場合にも有効である。2) 鋼とコンクリートのずれ剛性を確保したい場合に有効である。

4. 既往の耐力算定式と実験結果の比較

現在までに提案されているPBLの耐力式と実験結果を比較検討する。各式に入力する値を表-5に示す。これは、本実験条件に合わせた値である。

Leonhardtら²⁾は、コンクリートの2面せん断によるせん断強度式(1)、円孔内にあるコンクリートの支圧破壊によるせん断強度式(2)、および隣接する円孔間の鋼板のせん断破壊によるせん断強度式を提案している。ここでは前述の最終破壊状況から、鋼板のせん断破壊は確認されていないのでコンクリートの破壊に関する式(1)と式(2)を比較の対象とする。

$$Q_u = 1.08 f'_c \times 2 \times (\pi D^2 / 4) \quad (1)$$

$$Q_u = 7.2 f'_c \times D t \quad (2)$$

ここに、 Q_u はコンクリートの2面せん断によるせん断耐力(N)、 Q_u は円孔内のコンクリートの支圧破壊によるせん断耐力(N)、 f'_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 D は孔径(mm)、 t は鋼板の厚さ(mm)を示す。

保坂ら⁵⁾は、貫通鉄筋の有無によって分類したせん断強度式を提案している。本研究は、貫通鉄筋がない式(3)を比較の対象とする。また、この式はコンクリートのせん断破壊と支圧破壊のどちらも再現されている。但し、適用範囲はあるが、本実験条件はその範囲内である。

$$Q_u = 3.38 d^2 (t/d)^{1/2} \times f_{cu} - 39.0 \times 10^3 \quad (3)$$

$$22.0 \times 10^3 < d^2 (t/d)^{1/2} \times f_{cu} < 194.0 \times 10^3$$

ここに、 Q_u はPBLのせん断耐力(N)、 f_{cu} はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 d は孔径(mm)、 t は鋼板の厚さ(mm)を示す。

著者ら⁶⁾は、Leonhardtの式(1)の考えに基づき実験式を検討している。しかしながら、本実験結果の最終破壊形状、せん断耐力値および文献(6)の実験結果から妥当でないと判断し、改めて文献(6)の実験データを用いてLeonhardtが提案しているコンクリートの支圧破壊によるせん断強度式(2)の考えに基づき再検討した。ここでは、その再検討した式(4)、式(5)と比較する。なお、式(5)は孔に円柱形モルタルを通した効果を考慮している。ここで示す係数より、式(5)は式(4)よりも小さい。この要因として、材料の影響やコンクリート(モルタル)の圧縮強度の影響などが考えられるが、現在解明中であるため本論に続いて報告する予定である。

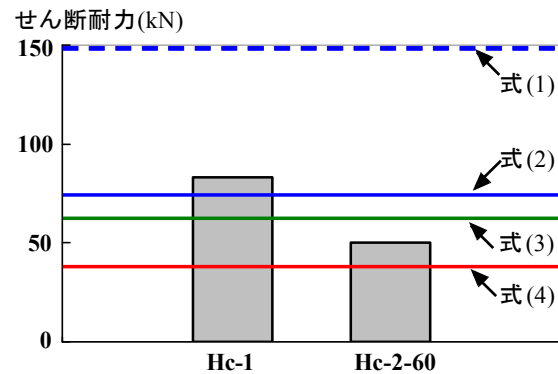
$$Q_u = 3.6 f'_c \times D t \quad (4)$$

$$Q_u = 2.5 f'_m \times D t \quad (5)$$

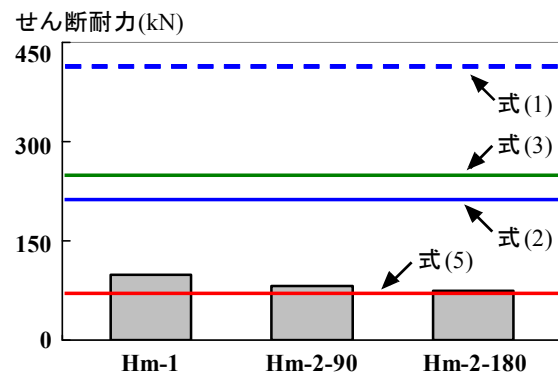
ここに、 Q_u は円孔内のコンクリート(モルタル)の支圧破壊によるせん断耐力(N)、 f'_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 f'_m はモルタルの圧縮強度(N/mm²)、 D は孔径(mm)、 t は鋼板の厚さ(mm)を示す。

表-5 計算入力値

入力値	Hc試験体 コンクリート	Hm試験体 円柱形モルタル
圧縮強度 (N/mm ²)	34.8	97.5
孔径 (mm)	50	
鋼板の厚さ (mm)	6	



(a) Hc 試験体



(b) Hm 試験体

図-7 実験値と計算値の比較

4.1 計算結果と考察

図-7に実験値と各算定式の計算結果の比較を示す。Hc試験体は、Leonhardtのせん断破壊による式(1)を除く残りの算定式によって評価できると考えられる。したがって、破壊状態からも確認できるように、鋼板の厚さ6mmに孔径50mmを設けたPBLのせん断耐力は、円孔内にあるコンクリートの支圧破壊によって決定される。Hm試験体の実験値は、Leonhardt式(1)、式(2)および保坂式(3)の計算値を大きく下回っている。したがって、鋼板に開けた孔に円柱形モルタルを通したPBLのせん断耐力は、土木分野で提案されている耐力式をそのまま適用することは難しい。一方、著者が検討している実験式(5)は、多少の差はあるが近い値を示している。実験値と計算値の差は、鋼板の厚さとコンクリートブロックの拘束条件による2つの要因が考えられる。鋼板の厚さについては、孔径との組み合わせが関係している。Leonhardtの式(1)と式(2)の関係からPBLのせん断耐力は鋼板厚と孔径に依存していることが分かる。仮に、コンクリートの2面直接せん断破壊形式で最大耐力を発揮する条件をLeonhardt式で考えると、孔径50mmを採用した場合、板厚は最低12mm必要な計算となる。逆に、板厚6mmを採用した場合、直径25mmより小さい孔を選択しなければならない計算となる。また園田ら¹³⁾は、3軸圧縮応力下でのコンクリートを完全塑性体にモデル化し極限解析法の下界定理を用いて、PBLの押し抜きせん断耐力を理論的に検討し、PBLのせん断耐力は孔径と板厚の比に依存し、孔径が約50mm以上では、その比が大きくなるにつれて低下するとある。したがって本研究では、孔径50mmと鋼板の厚さ6mmを採用していることから、この影響は大きいと考えられる。しかしながら、50mm以上の孔径と板厚の関係を変数にとった実験例が少ないため断定はできない。

5. まとめ

試験体数は限られているが、その範囲で以下の結論が得られた。

- (1) 鋼板の厚さ6mmと孔径50mmの条件によるPBLのせん断耐力は、円孔内にあるコンクリートの支圧強度によって決定される。Leonhardtの式よりせん断耐力および破壊形式の予測は可能である。
- (2) 孔に円柱形モルタルを通すことで、最大せん断耐力、ずれ定数の増大が期待できる。また、PBLの破壊形態にも影響を及ぼすことがわかった。
- (3) 孔に円柱形モルタルを通したPBLのせん断耐力は、土木分野で提案されている耐力式では、危険側での評価となる。今後、耐力算定法の確立が課題である。また、コンクリートブロックと円柱形モルタルの圧縮強度の関係がPBLの力学特性に及ぼす影響については、未解明であ

るため今後の検討課題とする。

謝辞

本研究は、平成20年度日本鋼構造協会研究助成(研究代表者:田中照久)の援助を受けた。実験準備にあたり、福岡大学工学部建築学科助教(材料)本田悟先生、技術員の平國久雄氏、堺研究室の山崎菜美氏、山下裕樹氏他には多大なご協力を頂いた。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鈴木悠介, 藤沢一善, 一戸康生: 800N/mm²級高強度鋼を用いた乾式組立梁の曲げ試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.583-584, 2008
- 2) Leonhardt, F et al: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, pp.325-331, Dec. 1987
- 3) 平陽兵: 鋼とコンクリートを一体化する孔あき鋼板ジベルの耐力評価式に関する最近の研究, コンクリート工学, Vol. 42, No.3, pp.61-67, 2004
- 4) 平陽兵, 古市耕輔, 山村正人, 富永知徳: 孔あき鋼板ジベルの基本特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No.3, pp.859-864, 1998
- 5) 保阪鐵矢ほか: 孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1593-1604, 2000
- 6) 田中照久, 堺純一: 孔あき鋼板ジベルを用いたSC部材の付着抵抗機構に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp.1153-1158, 2009
- 7) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針同解説, 1985
- 8) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押し抜き試験方法(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, 1996
- 9) 藤井堅, 岩崎初美, 深田和宏, 豊田正, 藤村伸智: 孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動とコンクリート拘束因子, 土木学会論文集A, vol.64 No.2, pp.502-512, 2008
- 10) 園田佳巨, 手嶋康博: 3次元弾塑性FEMによる孔あき鋼板ジベルの設計式に関する基礎的考察, 応用力学論文集, vol.11, pp.283-290, 2008
- 11) 藤井堅ほか: 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, pp.1381-1390, 2001
- 12) 藤井堅, 西土隆幸, 有吉孝文: 押し抜きせん断試験による孔あき鋼板ジベルのずれ特性, 鋼構造年次論文報告集, 第7巻, p.225-233, 1999
- 13) 園田恵一郎ほか: パーフォンドリブにおけるコンクリートのせん断強度特性に関する極限解析理論による考察, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.213-218, 2005