

論文 鉄骨コンクリート梁材の弾塑性変形状に関する実験的研究

田中 照久*¹・堺 純一*²

要旨: H形鋼のフランジ間にコンクリートを充填したSC梁を対象に、鋼とコンクリートの一体化を図ることを目的として、H形鋼のウェブに孔あきジベルを形成した新しいずれ止め方法を考案した。本研究では、鋼とコンクリートの付着性能及び梁材の弾塑性変形状を調べるために、実験変数にずれ止め要素の有無と種類を選び、押抜き試験と曲げせん断試験を実施した。押抜き試験の結果より、孔あきジベルの設ける位置や個数を変えることで、荷重変形関係は異なる挙動を示し、最大せん断耐力も変化することから付着性能の増大が見込まれる。曲げせん断試験の結果に関しては、実験変数に関係なく同等の耐力を示した。

キーワード: ずれ止め, 押抜き試験, 曲げせん断試験, 付着性能, 弾塑性変形状

1. はじめに

地震国である我が国においては優れた耐震性能を維持しながら、建築物の建設に伴う消費エネルギーの低減及び省人化・省力化された構造部材および骨組を開発することが望まれている。優れた耐震性能を保持する構造として鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと略記）構造が挙げられる。しかし、SRC構造は鉄骨の加工及び工事に加え、鉄筋の配筋、コンクリート打設のための型枠工事などが必要であり、鉄骨構造や鉄筋コンクリート構造に比べ工事作業量が多く、省人化・省力化、工期短縮などの点で解決すべき問題がある。その解決策の一つに鉄筋を省いた鉄骨コンクリート（以下SCと略記）構造が考えられる。本研究では、特にH形鋼フランジ間にコンクリートを充填したSC梁（図-1(a)の断面図参照）を対象として、鋼とコンクリートの付着特性の基礎データの収集とSC梁の弾塑性挙動を調べるために、付着実験と曲げせん断実験を行った。

鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準（以下SRC規準と略記）第一版¹⁾では、鉄骨とコンクリートの付着力は、丸鋼とコンクリートとの付着力よりも小さいことが指摘されている。また、SRC規準第三版²⁾では繰り返し曲げせん断力を受ける鉄骨とコンクリートとの付着力は早期に失われるので、せん断設計では、付着力を期待しない設計法が採用されている。鋼・コンクリート部材のせん断抵抗機構を考えるとSC部材においても、機械的なずれ止めが無ければ鉄骨とコンクリートを一体化させ、一般化累加強度理論を発揮させることは困難であると考えられる。一般的に、鋼・コンクリートのずれ止め要素としてスタッドジベル（以下スタッドと略記）を設けることが多い。本研究で提案するSC梁の形状では、鉄骨フランジの応力をコンクリートに伝えるため、スタッドを鉄骨フランジ内面に設けることを考えているが、施工機械の関係上、

スタッドの溶接が難しいことが問題の1つとなっている。そこで、H形鋼のウェブに孔をあけたジベル（以下孔あきジベルと略記）を提案する。なお、土木分野では孔あき鋼板ジベルが合成桁、複合構造橋梁の接合部などにおけるずれ止めとして有効であることが確認されている（例えば³⁾）。

本研究では建築分野において、従来のずれ止めとして使用しているスタッドとは別に、孔あきジベルと呼ぶ新しいずれ止め方法を採用したSC梁を考案し、実験変数にずれ止め要素の有無と種類を選び、これらが付着性能及び梁材の弾塑性変形状に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究では、二つのシリーズの実験を行った。シリーズ1, 2ともに、いずれの試験体もH形鋼のフランジ間にコンクリートを充填したものである。

シリーズ1の実験では、鋼・コンクリートの付着性能の基礎データを蓄積することを目的に押抜き試験を行った。図-1に試験体形状モデルを示す。

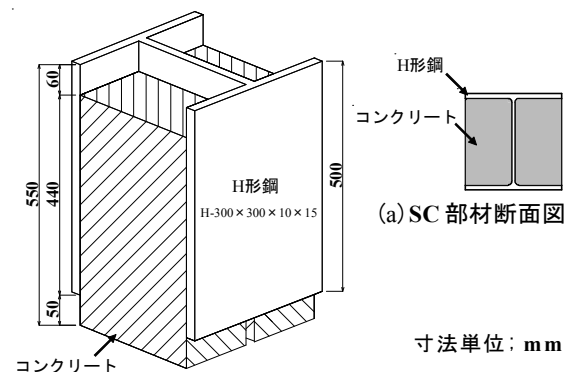


図-1 シリーズ1の試験体形状モデル

*1 福岡大学 工学部建築学科助手 学士（工学）（正会員）

*2 福岡大学 工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

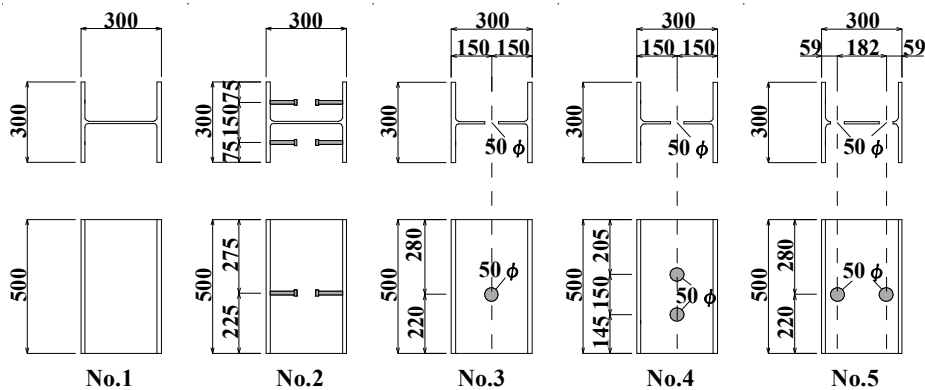
表－1 試験体一覧（実験条件）

シリーズ	試験体名	鉄骨形状 (mm)	コンクリート圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	パラメータ
1	No.1	H-300×300×10×15	28.2	基本形状（ずれ止めなし）
	No.2			スタッドジベル（4本）
	No.3			孔あきジベル（中央1個）
	No.4			孔あきジベル（材軸方向直列2個）
	No.5			孔あきジベル（材軸方向並列2個）
2	N-300	H-300×300×10×15	29.1	基本形状（ずれ止めなし）
	S-300			スタッドジベル
	H-300			孔あきジベル
	N-150	H-300×150×6.5×9	31.9	基本形状（ずれ止めなし）
	S-150			スタッドジベル
	H-150			孔あきジベル

表－2 使用材料の機械的性質

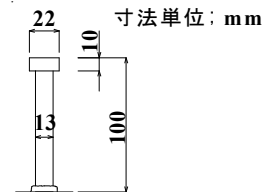
鋼材		t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	ε (%)	降伏比
H-300×300×10×15 (SS400)	フランジ	15	310	444	210	44.6	0.70
	ウェブ	10	382	475	209	32.0	0.80
H-300×150×6.5×9 (SS400)	フランジ	9	314	467	213	37.4	0.67
	ウェブ	6.5	336	482	217	37.1	0.70

t : 板厚 σ_y : 降伏点 σ_u : 引張強度 E : ヤング係数 ε : 伸び



図－2 シリーズ1の試験体形状

寸法単位: mm



図－3 スタッドの形状

試験体は、ずれ止め要素をつけない基準試験体と、一般的なずれ止め方法として利用するスタッドを設けたもの、さらに提案する孔あきジベルを設けた試験体で、計5体を製作した（表－1および図－2参照）。

シリーズ2の実験では、機械的なずれ止めの有無が梁材の弾塑性挙動に及ぼす影響を調べるために、梁の曲げせん断実験を行った。シリーズ2の試験体の識別記号をA-Bの2つの識別記号で表し、AはH形鋼とコンクリートとの一体化を図るためのずれ止め方法で、N: 基本形状（ずれ止めなし）、S: スタッド、H: 孔あきジベルの3種類とし、BはH形鋼のフランジ幅(300mmと150mm)の2種類の計6体とした（表－1および図－4参照）。またフランジ幅が300mmの試験体のずれ止め要素は、鉄骨の圧縮応力をコンクリートに伝達できるかどうかを調べるため

に、コンクリートが圧縮を受ける片側のみに設けている。一方、フランジ幅が150mmの試験体は、ずれ止めがコンクリートのひび割れ性状に及ぼす影響を調べるためにコンクリートが引張を受ける片側のみに、ずれ止め要素を設けている。シリーズ1, 2の試験体ともに、コンクリートの打設はたて打ちとしている。

表－1に各試験体のコンクリートの圧縮強度、表－2に鋼材の力学的性質を示す。試験体に使用した材料は、鋼材をSS400とし、コンクリートは早強セメントを使用し、最大粗骨材寸法を15mmとした。スタッドの形状（図－3参照）および孔径50mmは全試験体共通である。

シリーズ2では、鉄骨とコンクリート間の付着強度がないものと考え、SC断面の累加強度を発揮させるために鉄骨からコンクリートへ伝えるべき圧縮力を伝達させる

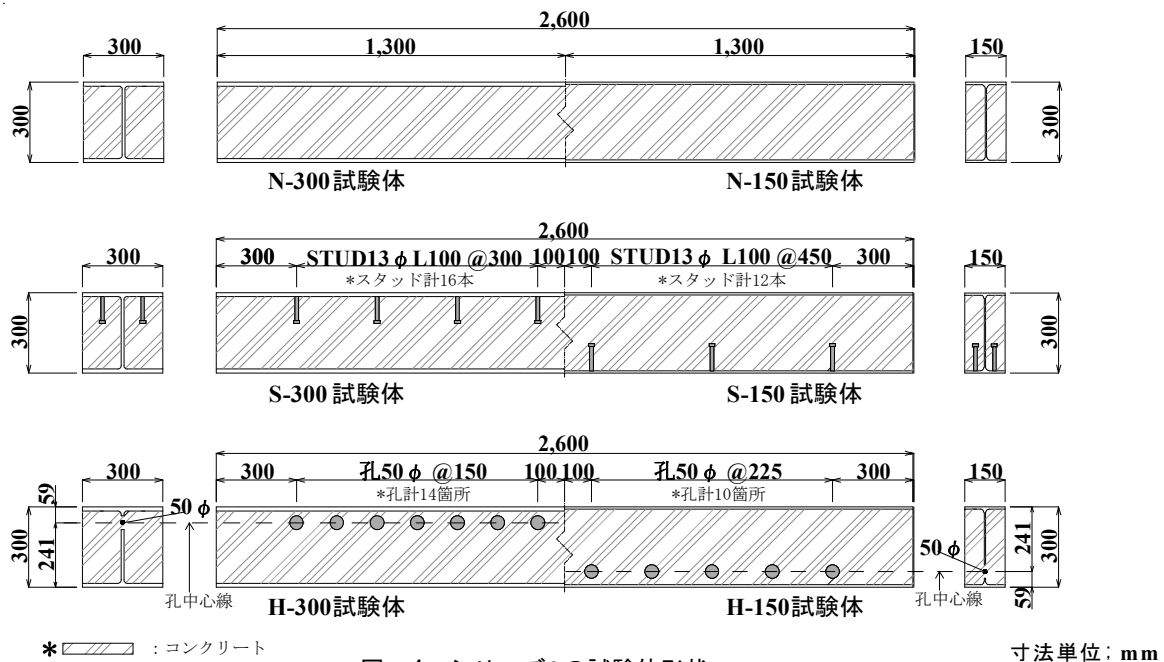


図-4 シリーズ2の試験体形状

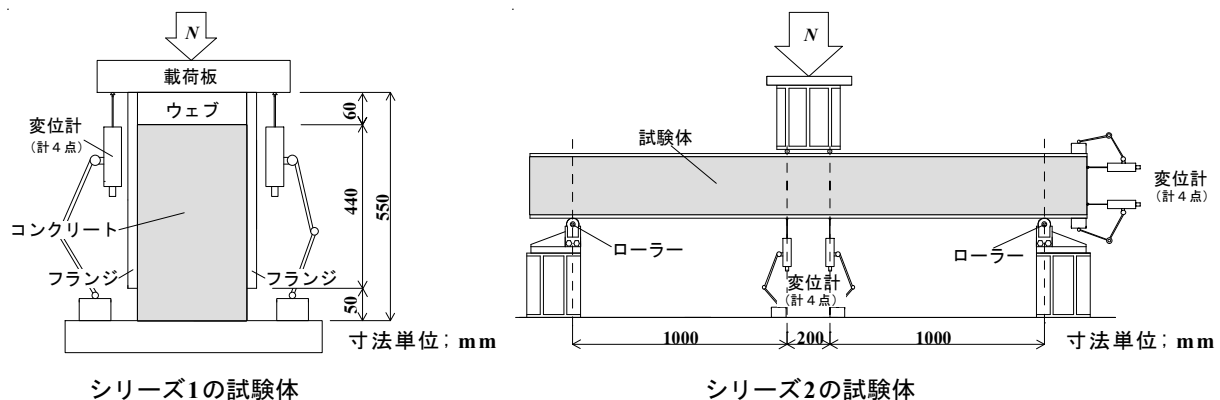


図-5 各シリーズの加力装置および測定装置

ことを考慮して設計した。各ずれ止め要素の設計は、以下のように行っている。

孔あきジベル試験体は、スタッド試験体との比較を行うために、「各種合成構造設計指針同解説」⁴⁾に規定されているスタッドの1本当たりのせん断耐力(式(1)を参照)と同程度となるように孔の径を50mmと設定し、孔の数を決定した。なお、孔あきジベルの耐力は、ドイツの Leonhardt⁵⁾らが提案している孔あき鋼板のずれ止めとしての設計式より算出した。この設計式は、実験から得られた結果を元に、コンクリートが破壊する場合と鋼材が破壊する場合に対しての設計式が提案されている。本研究では、コンクリートの破壊が先行する設計式(式(2)を参照)を用いた。

・スタッドコネクタの1本当たりのせん断耐力⁴⁾

$$q_s = 0.5 \cdot s_c a \cdot \sqrt{F_c \cdot E_c} \quad (1)$$

ここで、 q_s :スタッドコネクタのせん断耐力、 $s_c a$:スタッドコネクタの軸部断面積、 F_c :コンクリートの圧縮

強度、 E_c :コンクリートのヤング係数。

・孔あきジベルの1個当たりのせん断耐力⁵⁾

$$R_0 = 1.4 \cdot d_0^2 \times (\sigma_{CR} \times 1.16) / 2.1 \quad (2)$$

ここで、 R_0 :孔あきジベルのせん断耐力、 d_0 :孔径、 σ_{CR} :コンクリートの圧縮強度。

2.2 載荷方法および載荷プログラム

各シリーズの載荷方法及び測定方法を図-5に示す。シリーズ1,2ともに、荷重 N は5000kNアムスラー型試験機の計測器により測定した。

シリーズ1の試験体は、鉛直荷重による一方向単調増加押抜き試験を行った。鉛直方向変位 δ は、試験体の四隅にそれぞれ設置した4本の変位計で測定した値の平均値とした。シリーズ2の載荷方法は、両端をローラー支持し、等曲げ区間200mmを有する中央2点集中荷重でピンを介して載荷した。鉛直方向変位 δ は、梁試験体の中央部に設置した4本の変位計で測定した値の平均値とした。載荷は、中央部材角 R を0.5,1.0,1.5,2.0,3.0(%)とし各

部材角で2回繰返す漸増荷重プログラムとした曲げせん断試験を行った。部材角 R は、梁試験体の中央の荷重点の平均鉛直変位 δ を材長1000mmで除した値で制御した。コンクリートのずれ量を測定するために4本の変位計を梁端部に設置した。実験荷重中に各除荷点及び荷重が0となる時点毎にコンクリートのひび割れ幅を測定した。なお、ひび割れ幅はクラックスケールを用い、読み取り測定した。

3. シリーズ1の実験結果とその考察

3.1 荷重－変形関係

図－6に荷重 N と鉛直変位 δ (以下ずれ量 δ と表記)の関係を示す。また、表－3に各試験体の最大荷重と最大荷重時のずれ量を示すとともに、各試験体のずれ止め要素のせん断耐力の計算値(No.2は式(1),No.3,4,5は式(2)より、算出)を示す。最大荷重は、図中に示す▼をとった。なお、図－6に示しているNo.2の挙動は、孔1個当たりの耐力と比較するためにスタッド4本が負担した耐力を1本当たりで換算した結果であり、下記の式(3)により算出した。

$$N_{2-1}(\delta) = (N_2(\delta) - N_1(\delta)) / 4 + N_1(\delta) \quad (3)$$

ここで、 $N_{2-1}(\delta)$:各変形時におけるNo.2試験体(スタッド1本)が負担した耐力、 $N_1(\delta)$:各変形時におけるNo.1試験体(ずれ止めなし)が負担した耐力、 $N_2(\delta)$:各変形時におけるNo.2試験体(スタッド4本)が負担した耐力。

3.2 ウェブに孔を設けることによる付着特性の効果

表－3の実験結果より、中央に孔を1個設けたNo.3試験体は、No.1試験体(ずれ止めなし)の最大付着強度を下回っており、孔あきジベルはずれ止めとしての効果がない

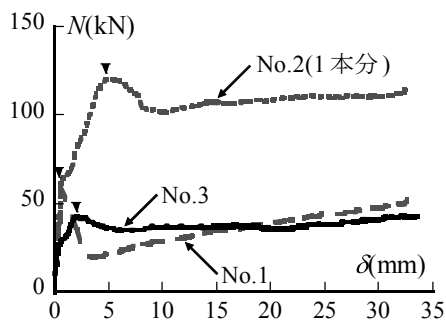
ように思われる。しかし、図－6(a)よりNo.1試験体は早期に最大耐力に達した後、急激な耐力低下が見られた。それに対してNo.3試験体は緩やかに低下し、変位約5mm以降は一定の耐力を維持したまま変形が進んだ。この結果から、基準試験体(ずれ止めなし)に比べ孔あきジベルを設けることにより大変形時での付着強度の保持を期待できるが、No.3試験体の最大荷重は式(2)より求めた計算値より低い結果であった。これは、試験体製作時の過程で型枠の脱型時に振動を与えているため、鉄骨とコンクリートの間の付着強度が喪失していることが考えられる。

実験終了時、No.3,4,5試験体(孔あきジベル)のコンクリート外面のひび割れは見られなかったが、ウェブ面とコンクリートの間に肌別れが生じていた。実験後、鉄骨とコンクリートを分離して確認したところ、ウェブに設けた孔付近でせん断破壊が確認された。

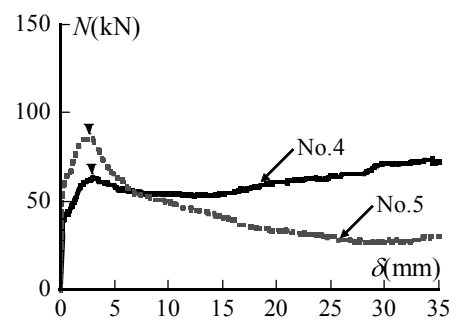
孔の個数による影響について表－3より、No.3試験体(中央に孔を1個)の最大耐力に比べ、No.4試験体(材軸方向に直列に孔を2個)は約1.5倍、No.5試験体(材軸方向に並列に孔を2個)は約2.0倍の耐力上昇が見られた。孔の個数が増えることで耐力が上昇した理由は以下のことによる。No.1試験体(ずれ止めなし)の付着機構は、鋼とコンクリートの表面接着力と摩擦抵抗の両者によるが、いったん滑りが生じてからは摩擦抵抗のみとなる。それに対してNo.3,4,5試験体(孔あきジベル)の付着機構は、接着力と摩擦力の他にウェブに孔を設けた切り欠き部から孔に詰ったコンクリートを押す支圧応力が付着抵

表－3 シリーズ1の実験結果

試験体名	ずれ止め要素	最大荷重 N_{max} (kN)	N_{max} 時 ずれ量(mm)	計算値(kN)
No.1	なし	60.8 (基準値)	0.53	-
No.2	スタッド	120.6 (1本分)	4.75	$q_s=56.8$ (1本分)
No.3	孔 (中央1個)	43.0	2.01	${}_1R_0=54.5$ (1個分)
No.4	孔 (直列2個)	63.3	2.95	${}_2R_0=109$ (2個分)
No.5	孔 (並列2個)	86.7	2.75	${}_2R_0=109$ (2個分)



(a) No.1,2,3試験体



(b) No.4,5試験体

図－6 シリーズ1 各試験体の荷重－変形関係

抗の大半を担っていることによるものと考えられる。

孔の位置による影響について図-6(b)より、No.4試験体(直列2個)とNo.5試験体(並列2個)にあけた孔の個数は同じであるが、孔を設ける位置の違いにより、荷重-変形関係は異なる挙動を示した。No.5試験体は初期に最大耐力を発揮した後、緩やかに耐力が低下し実験を終了した。それに対して、No.4試験体は最大荷重に達した後、一定の耐力を維持し、変位約15mmを越えたあたりから再び耐力が上昇する挙動が見られた。その後、変位約20mmで初期の最大荷重を上回り、実験終了時には、No.5試験体の最大耐力に近い値まで耐力は上昇した。孔の位置によって付着に対する効果に違いが生じた要因は、二点考えられる。一つは、材軸方向に直列に設けた2個の孔(No.4試験体)は、滑りの小さい範囲では片方の孔あきジベルのみ抵抗し、滑りが大きくなるにつれてもう一方の孔あきジベルも抵抗する。それに対して、並列に設けた2個の孔(No.5試験体)は、滑りが小さい範囲から両方の孔あきジベルで抵抗する。二つ目は、No.5試験体は早期にウェブ面とコンクリートの間に肌別れが生じ、付着面積が少なくなることにより、No.3,4試験体と違う挙動になったものと考えられる。No.5試験体のみ大きな隙間が生じた現象は未解明で、今後の検討課題である。

以上の結果から、孔の個数や位置をバランスよく設けることで更なる付着強度の増大が十分に期待できる。

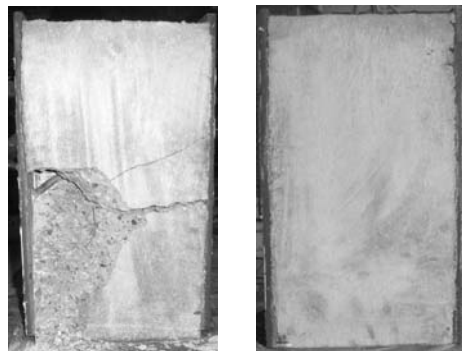


写真-1 コンクリートの破壊形状

3.3 スタッドを設けることによる付着特性の効果

No.2試験体のスタッドのずれ止め効果は、表-3と図-6(a)から見てわかるように他の試験体に比べて非常に耐力も高く、一度耐力が低下した後再び耐力が上昇していることから極めて性能が良いように思える。No.2試験体の最大荷重は、(1)式で算出したスタッド1本当たりのせん断耐力の計算値とNo.1試験体の最大荷重値を足し合わせた値に近い結果であった。しかし、No.2試験体は他の試験体に比べ、初期の段階から0.3mmを超えるコンクリートのひび割れが発生し、実験終了時にはコンクリートが剥落しスタッドが見える程の破壊状況であったことから使用性、耐久性に不安が残る結果となった。

実験終了時のコンクリートの破壊状況を、写真-1に示す。なお、No.2試験体を除く各試験体のコンクリートの破壊状況は、特に外面のひび割れはなく、ほとんど変わらないためNo.4試験体の写真を例として示す。

4. シリーズ2の実験結果とその考察

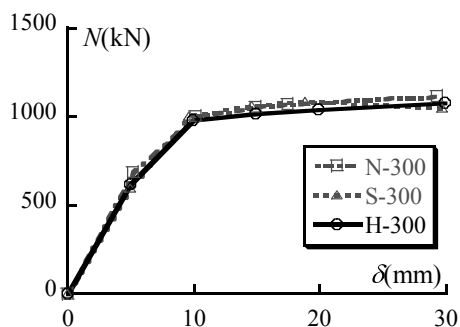
4.1 荷重変形関係

図-7に実験結果より得た各試験体の荷重変形履歴包絡曲線(但し、各部材角における繰り返し载荷の1回目の最大荷重を結んだ曲線とする)を示し、表-4に耐力の実験値及び計算値を示す。なお、計算値は曲げ応力の一番大きい加力点の危険断面で、断面が一般化累加強度を発揮するときの耐力とした。

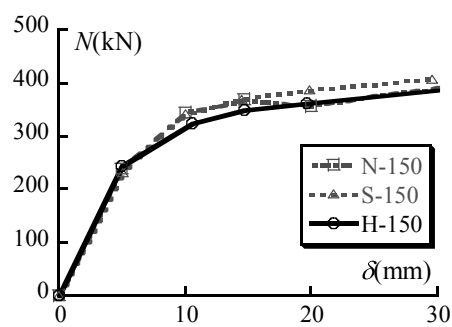
表-4 シリーズ2の実験結果

試験体名	ずれ止め要素	実験値(kN)	計算値(kN)	実験値/計算値
N-300	なし	1116.9	1007	1.10
S-300	スタッド	1084.0		1.08
H-300	孔	1080.1		1.08
N-150	なし	391.2	377	1.03
S-150	スタッド	407.3		1.08
H-150	孔	391.2		1.09

* H-300とH-150は、ウェブに開けた孔の断面欠損を考慮した計算値を示す。



(a) N,S,H-300試験体



(b) N,S,H-150試験体

図-7 シリーズ2 各試験体の荷重変形履歴包絡曲線

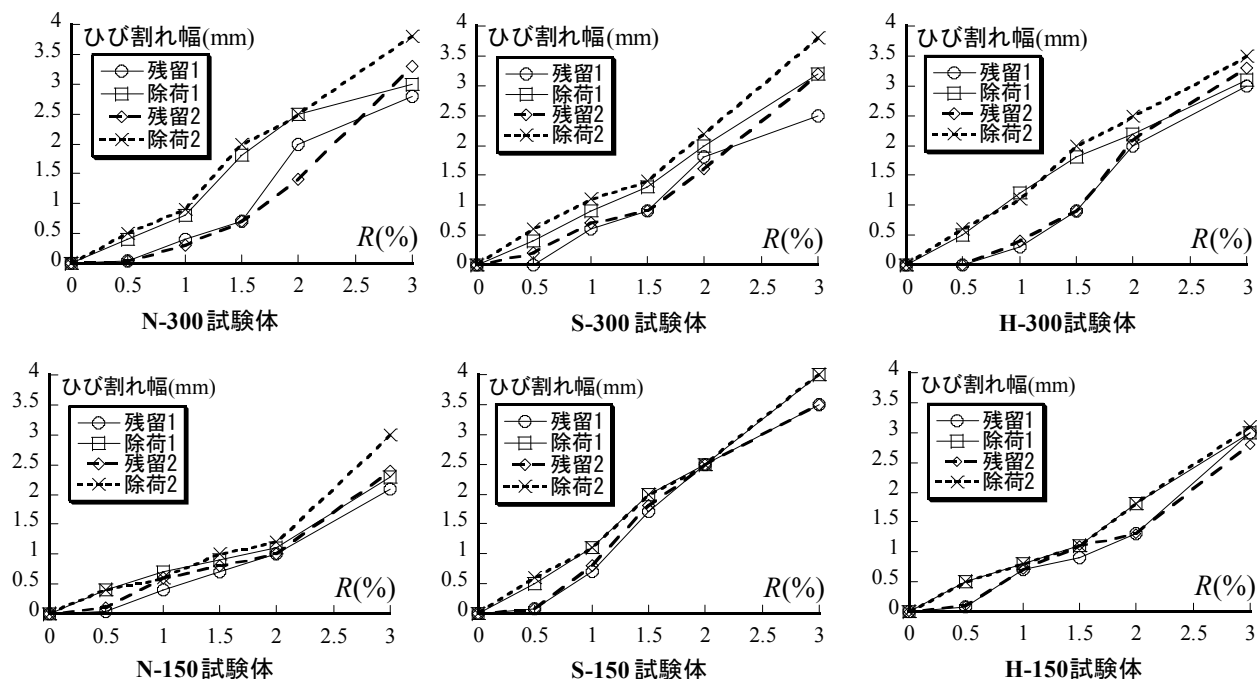


図-8 シリーズ2 各変形時の最大ひび割れ幅

4.2 曲げ性状の効果

表-4より試験体の最大耐力は、全ての試験体において計算耐力の1.1倍程度であった。実験結果より、機械的なずれ止めのないN-300, N150試験体が計算耐力を発揮していること、さらに図-7より、ずれ量 δ が10mm程度までの各剛性が等しいことから、本研究で計画した試験体は、ずれ止め要素の有無に関わらず鉄骨とコンクリートの一体化が図れていたと考えられる。

4.3 コンクリートの曲げひび割れ幅

図-8に各変形段階での除荷点および荷重が0の時のコンクリートのひび割れ幅を示す。それぞれ、除荷点ひび割れ幅および残留ひび割れ幅と称する。これらの値は試験体の左右の側面で測定した曲げひび割れ幅の最も大きなひび割れ幅とした。図-8中の凡例に示す1,2の数字は繰り返し载荷の1回目と2回目を示したものである。

フランジ幅が300mmの試験体に関して、部材角1%時の残留ひび割れ幅に注目するとS-300試験体のみがひび割れ幅0.5mmを越えているが、それ以降に大きな差異はなかった。フランジ幅が150mmの試験体はN,H-150に比べ、S-150は部材角0.5%を越えた辺りからひび割れ幅が急激に大きくなっていることが確認できる。以上のことから、シリーズ1の試験結果同様にスタッドは、孔あきジベルに比べコンクリートのひび割れに影響を与えたことが分かる。

5. まとめ

1) H形鋼フランジ間にコンクリートを充填したSC部材は、ウェブに孔あきジベルを形成することで、付着性能

の増大が見込まれる。

2) 付着実験より、孔あきジベルの効果は確認できるが、孔あけ位置、個数を含め、強度算定法について検討の余地がある。

3) 曲げせん断実験より、鉄骨フランジ間に挟まれたコンクリートの付着強度は大きく、本実験で行った試験体寸法では、ずれ止めが無くても十分付着強度が確保されていたものと考えられる。今後、せん断スパン比を実験変数にとり、さらに孔あきジベルを用いたSC梁の性状を調べていく。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1958.11 第1版
- 2) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1975.11 第3版
- 3) 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，vol19, No.2, pp1503-1508, 1997.6
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針同解説，1985.12
- 5) Leonhardt, F et al: Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, Heft Dec. 1987

謝辞

本研究は、平成19, 20年度科学研究費補助金（基盤研究（C）研究代表者：堺純一）及び、日本鉄鋼連盟「鋼とコンクリートの複合化WG」（主査：南宏一）の援助を受けた。