

論文 I形鋼のウェブにスタッド配置した複合構造のコンクリート付着特性

宇野 州彦*1・池野 勝哉*1・藤倉 修一*2・篠田 佳男*3

要旨: 本研究では、従来の鉄筋コンクリート構造 (RC 構造) に代わるものとして、ウェブにスタッドを配置した I 形鋼を用いた複合構造を提案し、コンクリートとの付着特性を明らかにすることを目的に両引き試験を行った。実験より、鋼材のポアソン効果やスタッドの配置により、提案構造の軸剛性やコンクリートとの付着性能は RC 構造と同等であり、降伏後のひび割れ分散性にも優れていることが示された。また、提案構造に用いるスタッドの設計法を提示し、実験からその設計法の妥当性や設計に必要となる鋼材のフランジ有効幅や有効定着長について提案した。

キーワード: 複合構造, スタッド, ポアソン効果, 付着特性, 両引き試験

1. はじめに

近年発生している地震は巨大化しており、今後の発生が懸念される首都直下地震や南海トラフ連動型巨大地震にも対応できるよう、鉄筋コンクリート構造 (以下、RC 構造) に要求される耐震性能の向上が求められている^{例え}ばり)。そのため、RC 構造の鉄筋量が増加し、過密配筋によるコンクリートの充填性の低下や作業効率の低下が懸念されている。一方、近年は現場の人員不足を背景に生産性向上に関する取り組みが急務であり、鋼材量の多い構造物に対する効率的な施工方法が求められている。

著者らはこれらの状況に対応するために、RC 構造に代わる新たな複合構造として、I 形鋼のウェブにスタッドを配置した鋼材を用いた複合構造を提案する (以下、提案構造)。本構造は、軸方向引張力が作用した際の I 形鋼のポアソン効果およびスタッド配置によるコンクリートとの付着力を向上させており、複数の鉄筋を単一の I 形鋼に置き換えることが可能なことから、施工の効率化に繋がるものと期待される。

本論文では、RC 構造の付着特性を把握する方法として一般に行われる両引き試験²⁾³⁾を実施し、提案構造の軸剛性やコンクリートとの付着特性を確認した。

2. I形鋼に配置するスタッドの検討

2.1 提案構造の概要

I 形鋼のウェブにスタッドを配置した状況を写真-1 に示す。スタッドは一般に鋼材とコンクリートで構成される複合部材としての要求性能を満足するために、鋼材とコンクリート間のずれ止めとして利用される⁴⁾⁵⁾。提案構造においては、写真に示すように I 形鋼のウェブ部にスタッドを配置し鋼材周囲のコンクリートとの一体化を図ることとしている。



写真-1 ウェブにスタッドを配置したI形鋼

提案構造では鋼材の軸方向引張力に対する設計を行うことになるが、軸方向引張力が作用するとポアソン効果によって軸直角方向に圧縮力が作用する。これによりウェブ両端に位置するフランジ間の距離が狭まりフランジとコンクリートとの摩擦力が増大することから、フランジ間のコンクリートとの一体性が増すことが期待される。ポアソン効果にスタッドのずれ止め効果が加わることにより、鋼材とコンクリートとの付着性能が向上するものと考えられる。

なお、スタッドは一般に頭付きのものが使用されるが、本研究では頭の有無やスタッドのピッチによる付着特性に着目した両引き試験を実施した。

2.2 I形鋼のポアソン効果とスタッドの設計法

スタッドを配置した I 形鋼に軸方向引張力が作用した際の鋼材およびスタッドの荷重負担について検討する (図-1)。I 形鋼の軸方向に発生するウェブの引張降伏力 T_y は、式(1)のように求められる。

$$T_y = f_y \times A_w = E \times \varepsilon_y \times A_w \quad (1)$$

*1 五洋建設 (株) 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科准教授 Ph.D. (正会員)

*3 日本コンクリート技術 (株) 博士 (工学) (フェロー会員)

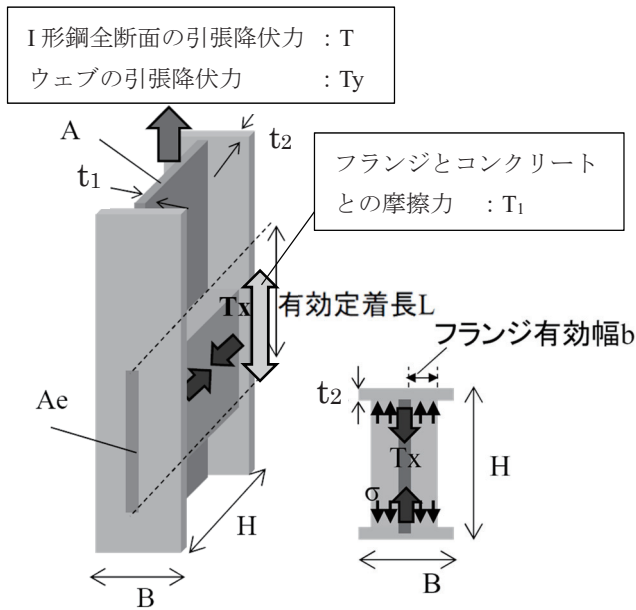


図-1 軸方向引張力が作用した際のポアソン効果

ここで、 T_y : I形鋼ウェブの引張降伏力
 f_y : I形鋼の引張降伏強度
 A_w : I形鋼ウェブの断面積
 E : I形鋼のヤング係数
 ϵ_y : I形鋼ウェブの降伏ひずみ

ウェブに式(1)に示す引張降伏力 T_y が作用すると、ポアソン比 ν によってウェブ軸直角方向に圧縮力が作用する。これによりウェブ両端にあるフランジとその間にあるコンクリートとの間に圧縮力が作用することとなる。この圧縮力 T_x は式(2)で表される。

$$T_x = E \times \nu \times \epsilon_y \times A_e = T_y \times \nu \times A_e / A_w \quad (2)$$

ここで、 A_e : 有効定着面積

なお、ウェブとコンクリートとの有効定着面積 A_e は、有効定着長 $L \times t_1$ (t_1 : ウェブ厚さ) で表される。ここで有効定着長とは、I形鋼とコンクリートとの付着が連続的に確保できるための必要長さである。有効定着長 L については、両引き試験から考察する。

フランジとコンクリートとの間に作用する圧縮応力 σ は、フランジ幅 B のうちコンクリートの圧縮に寄与する片側の有効幅を b とすると式(3)となる。

$$\sigma = T_x / (b \times L \times 2) \quad (3)$$

コンクリートの圧縮に寄与できるフランジの有効幅 b は、フランジ厚さによって変わるものと推察される。この有効フランジ幅についても、両引き試験より考察する。

フランジとコンクリートとの間の摩擦応力 τ は、式(3)

で求めた圧縮応力 σ と摩擦係数 μ の積で求められる。フランジとコンクリートとの間の摩擦力 T_1 は式(4)となり、I形鋼の全断面積で負担する全引張降伏力 T に対して T_1 を引いた荷重 $(T - T_1)$ がスタッドで負担するせん断力となる。

$$T_1 = \tau \times 2b \times L \times 2 \quad (4)$$

スタッドの本数は、複合構造標準示方書⁶⁾に従い算定することとする。スタッド1本あたりの設計せん断耐力は式(5)あるいは式(6)によって計算される値の小さい方とする。

$$V_{ssud} = (31A_{ss} \sqrt{(h_{ss}/d_{ss})f'_{cd}} + 10000) / \gamma_b \quad (5)$$

$$V_{ssud} = A_{ss} f_{ssud} / \gamma_b \quad (6)$$

ここで、 V_{ssud} : スタッドの設計せん断耐力

A_{ss} : スタッドの断面積

d_{ss} : スタッドの軸径

h_{ss} : スタッドの高さ

f_{ssud} : スタッドの設計引張強度

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度

γ_b : 部材係数(=1.3)

スタッドが負担する荷重を式(5)あるいは式(6)により求めたスタッド1本あたりの設計せん断耐力で除すことにより、スタッドの必要本数が求められる。

3. 両引き試験の概要

3.1 試験体概要と実験ケース

両引き試験の試験体断面図を図-2、側面図および平面図を図-3に示す。試験体は全てのケースにおいて、両端の掴み部を除いた鋼材全長を1500mm、コンクリート部の長さを1100mmとしている。なお、コンクリート部の両端には非付着部をそれぞれ50mmずつ設けている^{7,8)}。本試験の目的は、提案構造の付着特性の把握、前章で示した設計法の妥当性確認、スタッドの頭の有無やスタッドピッチによる付着性能の違いを確認することである。RC構造と提案構造の付着特性の比較を行うため、D25の鉄筋を4本配しその周囲にコンクリートを打設したRC試験体(Case1)を用意し、Case1の鉄筋総断面積とほぼ等価な断面積としてI-150×75×5.5×9.5(SS400)のI形鋼を提案構造の芯材として使用することとした。スタッドの有無による付着性能の違いを確認するために、スタッドのないI形鋼のみを芯材とした試験体(Case2)と、軸径10mm、全高40mmのスタッドを溶接した試験体を4ケース(Case3~Case6)用意した。実験ケースの一覧を

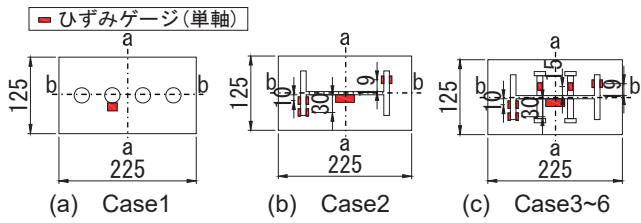
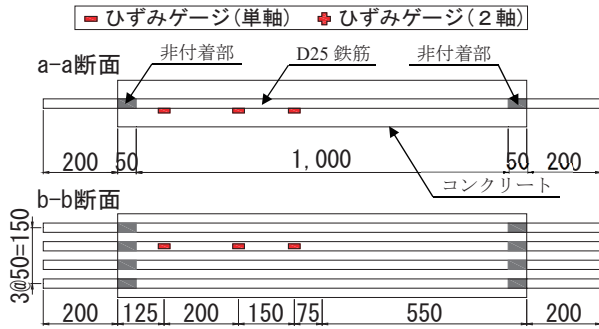
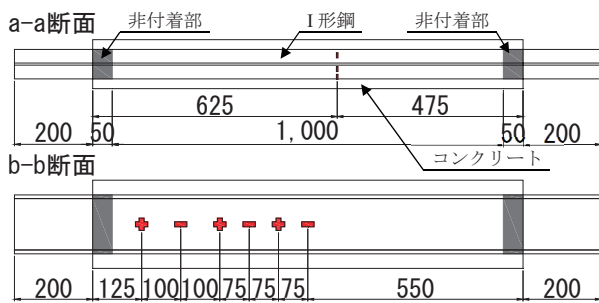


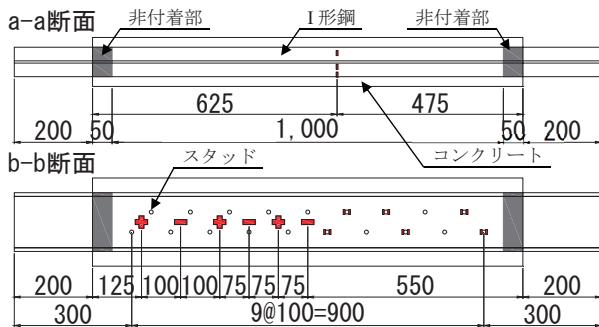
図-2 試験体断面図 (単位: mm)



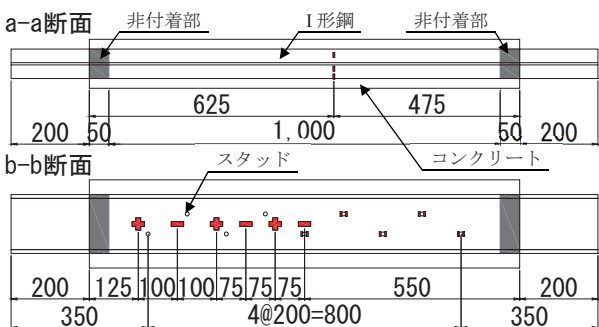
(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3 および Case4



(d) Case5 および Case6

図-3 試験体側面図および平面図 (単位: mm)

表-1 に示す。スタッドの頭 (頭径 19mm, 頭高 7mm) の有無やピッチにより Case3~Case6 を設定しているが、試験体長さに対するスタッドの本数、つまりスタッドピッチについては前章の設計法に基づく 200mm である。ただし、実験に用いるスタッドの寸法は式(5),(6)の適用範囲外であるため、あくまで準用した結果である。本研究では、設計法により求めた 200mm と、スタッド本数を増やしピッチを 100mm としたケースを設定した。

鋼材の機械的性質およびコンクリートの材料特性を表-2 および表-3 にそれぞれ示す。コンクリートは両引き試験日材齢における材料特性である。

表-1 実験ケースの一覧

ケース名	鋼材種別	スタッドの頭	スタッドピッチ
Case1	鉄筋	—	—
Case2	I形鋼	—	—
Case3		有り	100 mm
Case4		無し	
Case5		有り	200 mm
Case6		無し	

表-2 鋼材の機械的性質

	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 ×10 ³ N/mm ²	規格
鉄筋D25	407	558	177.6	SD345
I形鋼150×75	366	469	207.7	SS400
頭無しスタッド	458	497	—	SS400
頭有りスタッド	430	490	—	SS400

表-3 コンクリートの材料特性

	圧縮強度 N/mm ²	割裂引張強度 N/mm ²	ヤング係数 ×10 ³ N/mm ²
Case1	54.8	3.9	30.0
Case2	43.5	3.7	28.8
Case3	53.0	3.5	34.5
Case4	50.6	3.4	29.5
Case5	44.7	3.8	29.6
Case6	51.5	4.0	29.1

RC 構造

提案構造

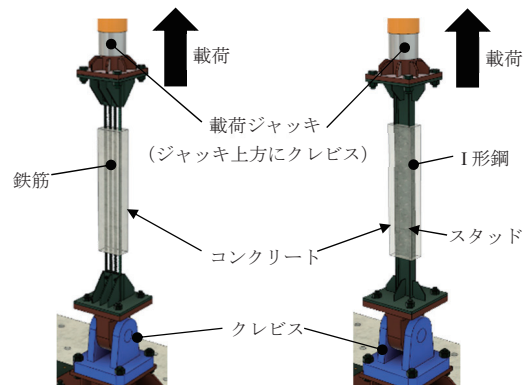


図-4 試験体のセットアップイメージ

3.2 荷重方法と測定項目

両引き試験は、試験体の軸方向が鉛直方向となるように試験体を配置し、両端部にクレビスを設け、下端側は反力床に固定、上端側を荷重ジャッキにより鉛直上向きに荷重を作用させた（図-4）。荷重方法は、設計ひび割れ荷重まで荷重を行い、その後除荷するサイクルを3回繰り返し、鉄筋あるいは鋼材が降伏したときの変位までの荷重および除荷のサイクルを同様に3回繰り返す。その後はコンクリートのはく落が著しくなる軸方向変位120mmまでの荷重を行った。ただしCase2においては安全上の問題から軸方向変位37.8mmで荷重を終了した。ひび割れ荷重および降伏変位までの荷重、除荷の繰り返しによる耐荷力の変化はほとんど見られなかったことから、本論文では繰り返し荷重に関する考察は割愛する。

測定項目は、引張荷重および試験体の軸方向変位量、鋼材のコンクリートからの抜け出し変位量、鋼材およびスタッドのひずみ、ひび割れ性状である。鉄筋に貼付しているひずみゲージは鉄筋軸方向、I形鋼にはウェブは軸方向および軸直角方向、フランジはフランジ幅方向、スタッドはスタッド軸方向にそれぞれひずみゲージを貼付している。フランジおよびスタッドは曲げひずみ、曲げモーメントが算出できるように、各鋼材の両面にひずみゲージを貼付している。

4. 実験結果および考察

4.1 荷重比－変位関係

実験で得られた荷重比－変位関係を図-5に示す。図に示す荷重比は、対象とした鉄筋およびI形鋼の機械的性質が異なるため（表-2）、計測された引張荷重値を各鋼材の断面積および降伏点で除すことで無次元化している。また軸方向変位は試験体両端部間の変位である。

荷重直後の初期剛性については、いずれのケースもほぼ同等であるが、Case2については荷重比0.4程度で剛性の低下がみられる。この要因については次節の鋼材抜け出し量の結果も踏まえて考察する。その他のケースについては、降伏に至る荷重比およびその後の挙動についても概ね一致していることから、提案構造がRC構造と同等の軸剛性を有していること、またスタッドの頭の有無やピッチによる影響がないことから、2章で示したスタッドの設計法は概ね妥当なものとなっていることが推察される。

4.2 鋼材の抜け出し量

鋼材とコンクリートとの付着特性を確認するために、荷重によって鋼材がコンクリートから抜け出した量に着目する。荷重比と鋼材の抜け出し量の関係について整理したものを図-6に示す。鋼材の抜け出し量については、コンクリートで覆われていない鋼材端部の荷重時におけ

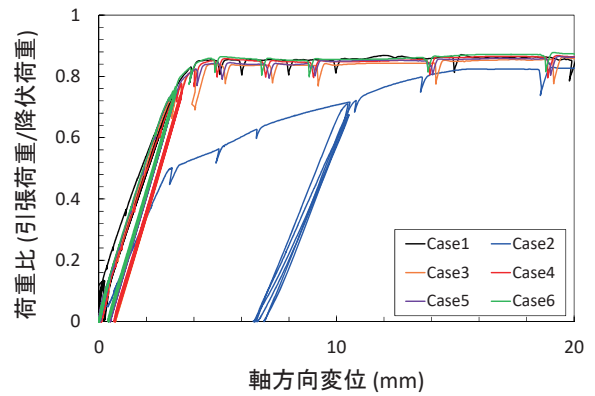
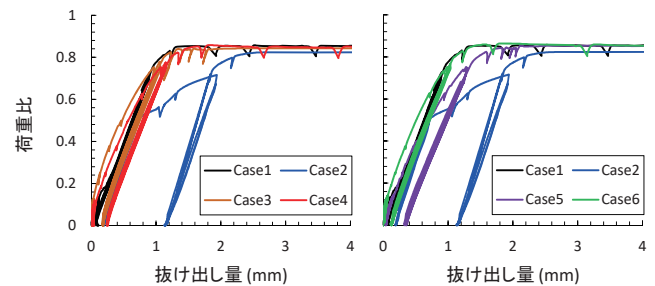
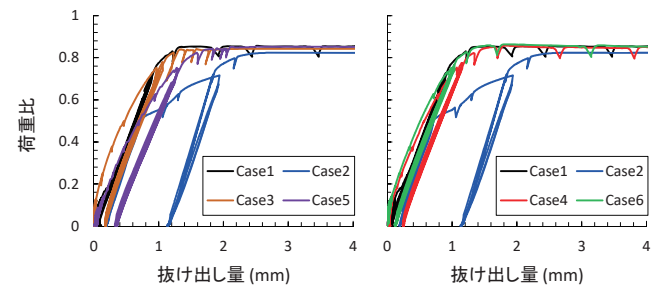


図-5 荷重比－変位関係



(a) スタッドピッチ 100mm (左図) と 200mm (右図)



(b) スタッド頭有り (左図) と頭無し (右図)

図-6 鋼材の抜け出し量と荷重比の関係

る変位量からひずみゲージで計測した鋼材単独の伸び量を引いたものを抜け出し量とした。図はスタッドの頭の有無やスタッドピッチの違いによって整理している。スタッドのないCase2では降伏荷重に至る前に抜け出し量が増大していることが分かる。つまり、図-5に示した荷重比－変位関係においてCase2の剛性が低下したのは、鋼材とコンクリートとの付着力が低下したことが要因であると考えられる。

提案構造であるCase3～Case6を比較すると、Case5において降伏時の抜け出し量が若干多いものの、概ね同等の結果となっている。前章の設計法に基づいてスタッドのピッチを設定すれば、RC構造と同等の付着性能を発揮でき、それ以上にピッチを細かくしても付着性能にはほとんど違いがないこと、またスタッドの頭の有無による違いがないことも分かった。

4.3 ひび割れの分散性

鋼材の荷重比 0.1 時、降伏荷重時および軸方向変位 40mm におけるコンクリート表面のひび割れ本数と最大ひび割れ幅を図-7 に示す。ひび割れ本数は表裏両面に発生したひび割れの平均本数、最大ひび割れ幅は表裏両面のひび割れ幅の最大値である。ひび割れ本数は試験体幅の 8 割以上の長さに至っているものをカウントしてい

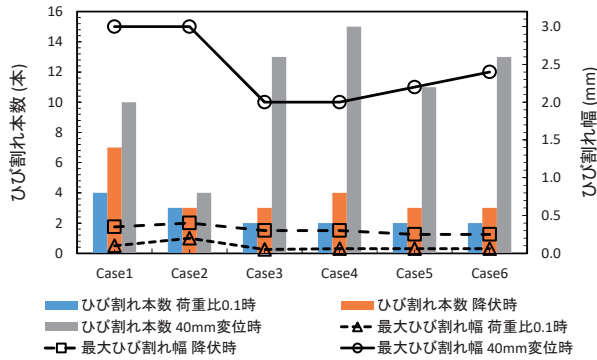
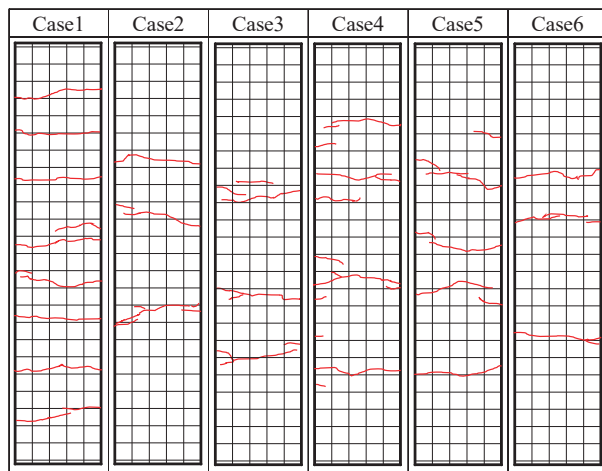
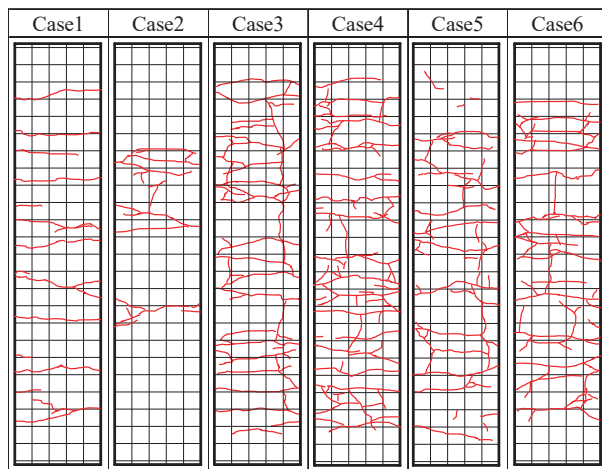


図-7 コンクリートのひび割れ本数と最大ひび割れ幅



(a) 降伏荷重時



(b) 軸方向変位 40mm 時

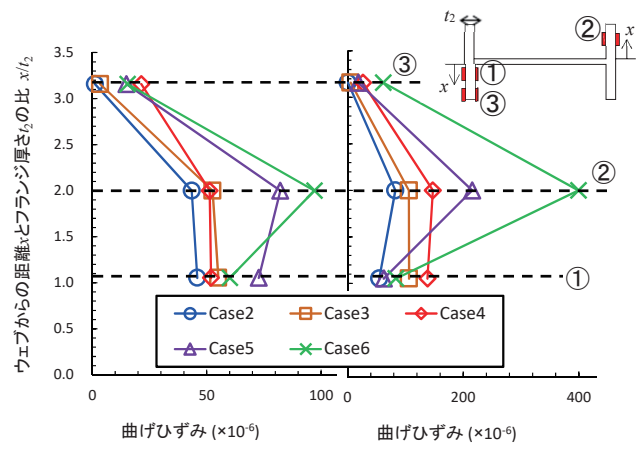
図-8 コンクリートのひび割れスケッチ

る。なお Case2 は軸方向変位 40mm に到達する前に実験が終了しているため、最終変位時 (37.8mm) における結果を示している。また降伏荷重時および軸方向変位 40mm におけるひび割れスケッチを図-8 に示す。弾性範囲内におけるひび割れ本数は Case1 が 4 本、Case3~6 が 2 本と提案構造のひび割れ分散性は若干劣る結果となった。降伏荷重時においても Case1 のひび割れ本数が多いものの、最大ひび割れ幅はいずれも同等である。軸方向変位 40mm になると、Case2 ではほとんどひび割れ本数が増えず、それ以外のケースではひび割れ本数が増加している。提案構造は、RC 構造やスタッドのない Case2 に比べひび割れ本数が多くなり、一方で最大ひび割れ幅は Case1, Case2 よりも小さくなっており、ひび割れがより分散していることが分かる。このことは図-8 のひび割れ状況からも確認できる。提案構造はスタッドを配置することで、付着性能を向上させるだけでなく、降伏後に優れたひび割れ分散性を発揮することが分かる。

4.4 フランジの有効幅

ここでは、2 章に示したスタッドの設計法におけるフランジの有効幅を確認する。I 形鋼の軸方向変位 2mm 時および降伏荷重時におけるフランジに発生する曲げひずみの分布図を図-9 に示す。ウェブ接合部からフランジ幅方向への距離を x とすると、ひずみゲージは $x=10\text{mm}$, 19mm , 30mm の位置に貼付しており、フランジ厚さ t_f との比 (x/t_f) をとるとそれぞれ 1.1, 2.0, 3.2 となり、これを図の縦軸としている。フランジの曲げひずみは、フランジの両面に貼付したひずみゲージから算出した。

図より、弾性範囲内である軸方向変位 2mm 時において、ウェブ接合部から 10mm, 19mm の位置で曲げひずみが大きく発生している。これは鋼材のポアソン効果によりフランジがフランジ間のコンクリートに圧縮力を作用させる際にコンクリートから受ける抵抗力により生じた



(a) 軸方向変位 2mm 時

(b) 降伏荷重時

図-9 フランジ幅方向の曲げひずみ分布

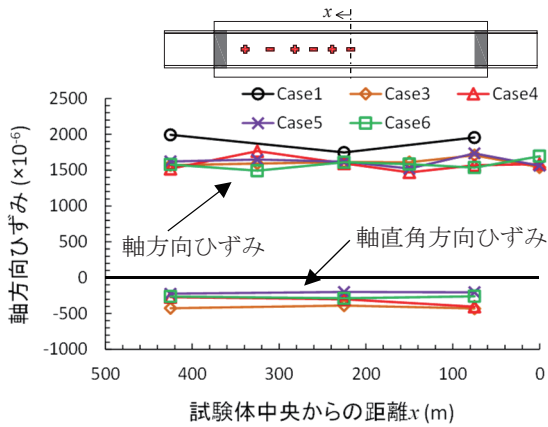


図-10 I形鋼ウェブのひずみ分布

ものと考えられる。一方で、フランジ幅の端部に近い30mmの位置では曲げひずみがほとんど発生しておらず、フランジ端部はフランジ間のコンクリートからの抵抗力を受けていないと思われる。また、降伏荷重時ではCase5、Case6においてウェブ接合部からの高さ19mmの位置においてより大きな曲げひずみが発生している。これはフランジ間のコンクリートからの抵抗力が大きくなり、フランジ中央部付近で曲げが生じた可能性が考えられる。

以上のことから、ウェブ接合部から19mmの位置、つまりフランジ厚さ9.5mmの2倍程度までは少なくとも有効幅とみなすことができると考えられる。

4.5 鋼材とコンクリートの有効定着長

両引き試験体において、鋼材とコンクリートの定着長が確保されていたのかを確認するために、鉄筋軸方向とI形鋼ウェブの軸方向および軸直角方向に貼付したひずみゲージに着目する。図-10に鉄筋およびI形鋼の降伏荷重時における鉄筋軸方向とI形鋼ウェブ軸方向および軸直角方向のひずみ分布を示す。発生ひずみは引張を正值、圧縮を負値としている。軸直角方向の分布に着目すると、概ね均等に圧縮ひずみが発生しており軸方向のひずみに対して約0.25~0.3程度であることから、鋼材のポアソン効果によるものと考えられる。また、軸方向の分布を見ると、いずれのケースにおいても概ね均等にひずみが発生していることが分かる。なお、本試験体においては非付着部を除いた定着長を1000mmとしておりウェブ高さ150mmに対して約6.7倍程度である。よって、有効定着長としては、ウェブ高さの概ね6倍程度以上確保できていればよいと思われる。なお、合理的な定着長さについては、今後定着長を変化させたケースを実験または解析により検討していくことが必要となる。

また紙面の都合で図示を割愛するが、I形鋼の降伏荷重時においてスタッドに発生した曲げモーメントは、降伏モーメントに対して概ね2~3割程度であった。2章の設計法に基づいてスタッドを配置することで、スタッドが塑性化することなく、効果を発揮することが分かった。

5. まとめ

本研究では、I形鋼のウェブにスタッドを配置した複合構造に対して両引き試験を実施し、コンクリートとの付着特性の把握を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 提案構造に作用するポアソン効果と、それに基づいたスタッドの設計法を提示し、両引き試験から設計法の妥当性を示した。
- (2) 提案構造はRC構造と同等の軸剛性を有しており、スタッドを配置することにより付着性能が高まること、提案構造はRC構造に比べ降伏荷重に至るまではひび割れ分散性に劣るものの降伏荷重以降はひび割れ分散性に優れることを示した。
- (3) 本実験条件において、提案構造のフランジ有効幅はフランジ厚さの概ね2倍程度であることが分かった。
- (4) 提案構造が有効に機能するために必要な定着長は、本実験条件ではウェブ高さの概ね6倍以上あればよいと思われる。

なお、フランジ有効幅および有効定着長については、今後FEM解析等を実施して妥当性や定量的な評価について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017。
- 2) 村田二郎，河合紘茲：両引き試験による鉄筋コンクリートのひび割れ分散性に関する研究，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.107-115，1987。
- 3) 菅満宣，中村光，檜貝勇，斎藤成彦：RCはりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.295-300，2001。
- 4) 島弘，渡部誠二：頭付きスタッドのせん断力一ずれ関係の定式化，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.935-947，2008。
- 5) 大城壮司，上條崇，奥井義昭，長井正嗣：プレキャスト床版連続合成桁のずれ止めに関する実験および解析，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.68，No.2，pp.331-346，2012。
- 6) (公社)土木学会：2014年制定 複合構造標準示方書 [設計編]，pp.68-73，2015。
- 7) 佐藤淳一，堺孝司，松家武樹：鉄筋の付着挙動に及ぼす供試体寸法および非付着部の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.667-672，2008。
- 8) 碓本大，荒木弘祐，山本貴士，服部篤史，宮川豊章：両引き試験による鉄筋腐食と付着強度の関係に関する研究，第60回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.341-342，2005。