

論文 I 形鋼を用いた新たな複合構造の付着特性に着目した引抜き試験

藤倉 修一*1・馬場 翔太郎*2・宇野 州彦*3・篠田 佳男*4

要旨: 著者らは、従来の RC 構造に代わる新たな複合構造として、ウェブにスタッドを溶植した I 形鋼を有する SC 構造を提案している。本研究では、提案構造における I 形鋼の付着特性やポアソン効果による影響を明らかにするために、I または H 形鋼を有する SC 構造に対して引抜き試験を実施した。引抜き試験から、コンクリート中に埋め込まれた形鋼のウェブおよびフランジは、断面においてほぼ一様に荷重を分担していることを確認し、ポアソン効果に起因する形鋼とコンクリートとの間の付着抵抗が作用していることを明らかにした。また、ポアソン効果による形鋼とフランジ間のコンクリートに作用する圧縮応力について検証した。

キーワード: 複合構造, 付着特性, ポアソン効果, 引抜き試験

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震によって多くの構造物に甚大な被害が生じたことから、構造物により大きな耐震性能が求められるようになった¹⁾。また、高速道路建設においては、用地の制約に伴って山岳部への橋梁建設が増えており、高橋脚化が求められている²⁾。そのため、鉄筋コンクリート橋脚における従来の設計方法では太径の鉄筋を多段配置する必要があり、さらに帯鉄筋や中間帯鉄筋を密に配筋する過密配筋となっている。また、昨今の建設現場においては、熟練工などの人員が不足しており、構造物の施工では、現場における省力化等の一層の合理化が求められている。

これらの課題を解決するために、主鉄筋の一部または全てを鋼材に置き換えた鉄骨鉄筋コンクリート構造（以下、SRC 構造）や鉄骨コンクリート構造（以下、SC 構造）が用いられる場合がある^{3)~7)}。これらの構造は、従来の鉄筋コンクリート構造（以下、RC 構造）と比べて耐力と変形性能に優れ、また配置する鋼材数を減らすことができるため施工の合理化が期待できる。しかしながら、鋼材とコンクリートとの付着性能は RC 構造における異形鉄筋とコンクリートとの付着性能に比べて劣るため、鋼材とコンクリートとの付着性能を改善するために頭付きスタッドや孔あき鋼板ジベルが多く用いられ^{8)~10)}、また H 形鋼のフランジに突起を設けた突起付き H 形鋼を用いた構造⁹⁾も開発されている。

著者らは、これまでに主鉄筋を I 形鋼に置き換え、I 形鋼のウェブにスタッドを溶植した新たな複合構造を提案し、この提案構造を用いた梁試験体の静的 2 点曲げ試験および両引き試験を実施した^{11), 12)}。その結果、提案構造は RC 構造と同様にじん性のある変形性能を有していることが明らかになった。また、I 形鋼ウェブの軸方向に引

張力が作用することによるポアソン効果によって、ウェブの軸直角方向に圧縮力が生じることを確認し、コンクリートとの付着性能の向上が期待できることを指摘している。しかしながら、実際にフランジ間のコンクリートに圧縮力が作用し、コンクリートと I 形鋼との付着性能が向上するかどうかは検証されていない。

そこで、本研究では、提案構造における I 形鋼とコンクリート間の付着特性に着目し、I または H 形鋼を有する SC 構造に対して引抜き試験を実施した。試験結果から、形鋼の引張挙動や、ポアソン効果による形鋼とフランジ間のコンクリートに作用する圧縮応力について調べ、形鋼とコンクリート間の付着特性について検証した。

2. 引抜き試験概要

2.1 試験体概要

引抜き試験体の断面図を図-1 に、側面図を図-2 に示す。図-2 には、各計測位置も同時に示す。試験体は全てのケースにおいて、全長 668mm、I 形鋼の長さは 632mm、コンクリートブロックの高さは 320mm で、コンクリートブロックの断面は 300×400mm である。図-1 に示すように、コンクリートブロックの四隅には、かぶり 30mm とした試験体固定用の孔 (φ40) を設けている。また、コンクリートブロック上端の形鋼には、20mm の非付着部を設けている¹²⁾。

試験体ケース一覧を表-1 に示す。本試験では、スタッドを有する I 形鋼の付着特性について検討をするため、スタッドの有無や形鋼の寸法の差異について調べた。I 形鋼に I-150×75×5.5×9.5 を用いて、頭付きスタッドをウェブの両面に上下 2 本ずつ溶植した試験体を Case1 とし、Case1 からスタッドを除いた試験体を Case2 とした。さらに、形鋼の違いによる影響を調べるために、Case3 と

*1 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)

*2 宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科 修士課程

*3 五洋建設 (株) 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*4 日本コンクリート技術 (株) 博士 (工学) (フェロー会員)

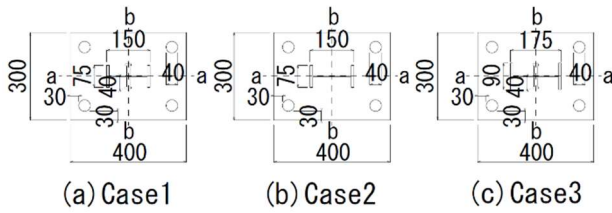


図-1 試験体断面図(単位: mm)

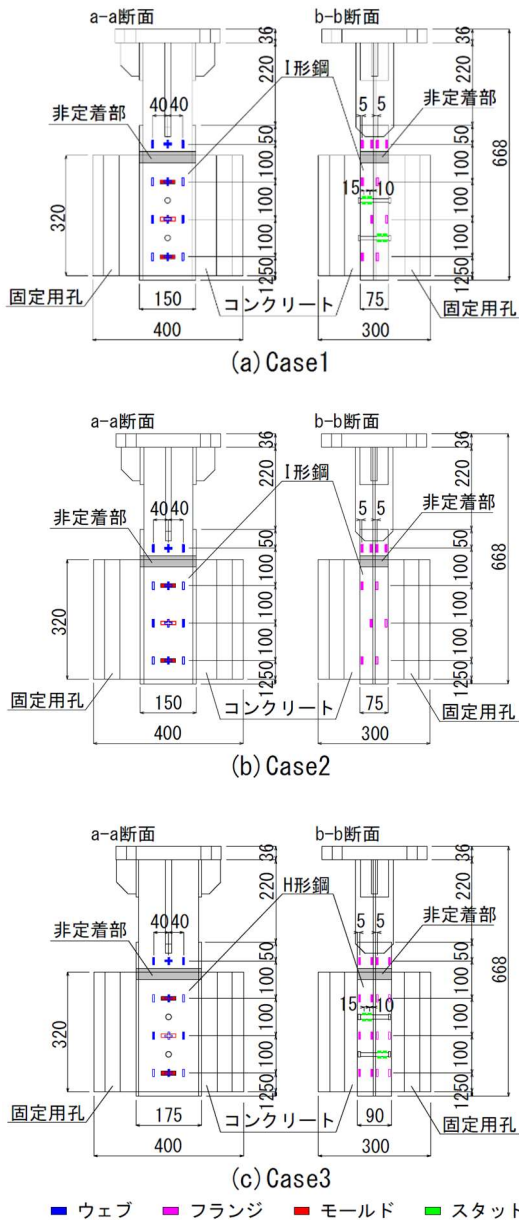


図-2 試験体側面図(単位: mm)

して、Case1 に用いた I 形鋼と断面積がほぼ等価で、フランジとウェブの寸法が異なる H-175×90×5×8 の H 形鋼を用いた試験体を製作した。提案構造では、ウェブにスタッドを配置しているため、スタッドを介してウェブから引張力が作用する。この現象を再現するために、形鋼上側のフランジを一部切断するとともに、ジャッキを取

表-1 試験体ケース一覧

試験体名	鋼材種別	スタッド
Case1	I-150×75×5.5×9.5	有り
Case2		無し
Case3	H-175×90×6×8	有り

表-2 鋼材の機械的性質

部材	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
I 形鋼	385.6	461.2	203.3
H 形鋼	394.1	471.8	203.0
頭付きスタッド	430.0	489.7	-

表-3 コンクリートの材料特性

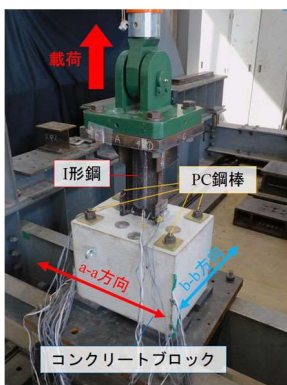
試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
Case1	31.1	3.0	30.4
Case2	31.3	3.2	29.8
Case3	35.8	3.6	27.3

り付ける上鋼板とウェブを補剛材によって繋いでいる。著者らの既往研究¹¹⁾と同様にスタッドは軸径 10mm、高さ 40mm であり、スタッド間隔は 100mm とした。全てのケースにおいて、それぞれ 2 体ずつ試験体を製作した。鋼材の機械的性質とコンクリートの材料特性をそれぞれ表-2 および表-3 に示す。I 形鋼、H 形鋼、頭付きスタッドには鋼種 SS400 を用いた。また、コンクリートの材料特性は、試験日材齢におけるものである。全ての試験体については、同一日にコンクリートの打設を行い、スランプは 10.0cm、空気量は 4.3% であった。

2.2 載荷方法および計測項目

試験体の載荷状況を、図-3 に示す。試験体コンクリートブロックの四隅を載荷フレームに固定し、形鋼上部に溶接した厚さ 36mm の鋼板とクレビスをボルトで接続して、押し引き 300kN の油圧ジャッキにより鉛直方向に載荷した。載荷については、荷重が 50, 100, 150, 200kN に達した時点で一度除荷する引張一方向の繰り返し載荷とし、大幅な荷重の低下または試験体の破壊状況を確認して載荷を終了した。各載荷サイクルにおける載荷回数は 1 回とした。

計測項目として、図-2 に形鋼の軸ひずみ、コンクリートのモールドゲージの計測位置を示す。また、頭付きスタッドを有する試験体では、スタッドの軸ひずみも計測している。図-2 における青い四角はウェブのひずみ、ピンクの四角はフランジ外側のひずみ、赤い四角はコンクリートのモールドゲージ、黄緑の四角はスタッドの軸



(a) Case1 (2体目)

(b) Case2 (2体目)

(c) Case3 (1体目)

図-3 試験体載荷状況

図-4 破壊状況

表-4 最大荷重と残留荷重

試験体	最大荷重 (kN)	
	1体目	2体目
Case1	191.0	231.6
Case2	200.9	200.1
Case3	202.5	207.0

ひずみの計測位置を示す。なお、ウェブについては、四角の塗りつぶしは手前側、白抜きは裏側での計測を示す。フランジについては、四角の塗りつぶしは手前のフランジ外側、白抜きは奥のフランジ外側における計測を示す。

3. 試験結果

3.1 破壊状況

図-4に、各試験体の破壊状況を示し、表-4には各試験体の最大荷重を示す。全ての試験体で最大荷重は200kN前後であり、最大荷重到達後に荷重が急落して試験を終了している。

図-4に示すように、スタッドを有しているCase1, Case3では、スタッドが破断する前にコンクリートブロックを貫通するひび割れが生じ、コンクリートブロックのせん断破壊によって終局に至った。図-4(a), (c)から、Case1とCase3では、コンクリートブロック2面でのせん断破壊を示した。Case1における1体目では、コンクリートブロック1面でのせん断破壊を示し、2体目との最大荷重の違いは、破壊形態の違いによるものと考えられる。一方、図-4(b)に示すように、スタッドの無いCase2ではコンクリート部の損傷はほとんど確認されず、形鋼がコンクリートから抜け出して終局に至った。

3.2 応力の伝達状況

(1) 同一高さにおけるフランジとウェブのひずみ分布

図-5に、荷重100kN, 200kN時の同一高さにおけるフランジとウェブのひずみ分布をCase1について示す。ここで、横軸はウェブ中央から両フランジ方向への距離

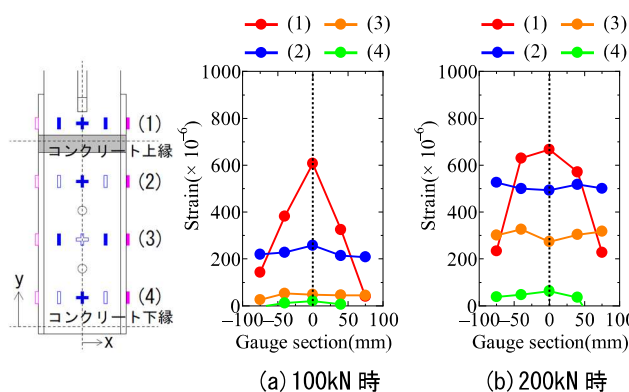


図-5 フランジ・ウェブひずみ (同一高さ比較, Case1)

(=x)を示し、縦軸は鉛直方向に生じた軸ひずみを示している。(1)~(4)はコンクリート下縁からの高さ(=y)であり、それぞれ350mm, 250mm, 150mm, 50mmである。

図-5から、前述したようにウェブから引張力を作用させているので、コンクリート部よりも上側の高さ(1)において、ウェブのひずみがフランジのひずみに比べて大きい。一方で、コンクリート内部では、ウェブとフランジに発生するひずみはほとんど等しく、ウェブに作用した荷重に対して、コンクリート内部では一様な応力が生じていることが確認された。Case2およびCase3においても同様の結果であった。

(2) 高さ方向のひずみ分布

図-6および図-7に、それぞれCase1およびCase2における、フランジおよびウェブの高さ方向のひずみ分布を50kN~200kNについて示す。横軸には鉛直方向の軸ひずみを、縦軸にはコンクリートブロック下縁からの距離を示す。各高さのひずみは平均値を用いている。荷重ごとに結果を色分けして示し、縦の点線は各荷重を断面積および弾性係数で割って求めた鋼材ひずみの平均値である。また、黒い実線はコンクリート上縁の位置を示している。

全体の傾向としてCase1およびCase2ともに、コンク

リート内部において、フランジおよびウェブのひずみ分布では、コンクリート上縁から下縁に向かって軸ひずみの大きさが小さくなっている。これは、コンクリートと形鋼との間に働く付着抵抗によるものである。しかし、**図-7**に示す Case2 の 200kN 時において、高さ 150mm と 250mm でのフランジおよびウェブひずみにほとんど差がない。このことは、高さ 150mm と 250mm の区間でコンクリートと形鋼との間に作用する付着が切れていると考えられる。

3.3 付着応力

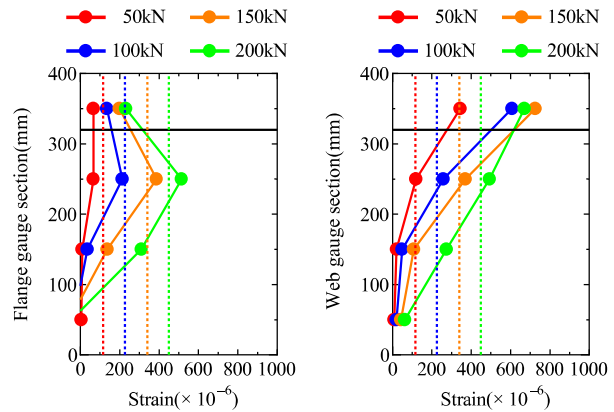
図-6 および **図-7** のひずみ分布より、ある高さ方向の区間における鋼材とコンクリート間の付着力を、軸ひずみを用いて式(1)より算定した。

$$f = (\varepsilon_m - \varepsilon_n) \times E \times A_s \quad (1)$$

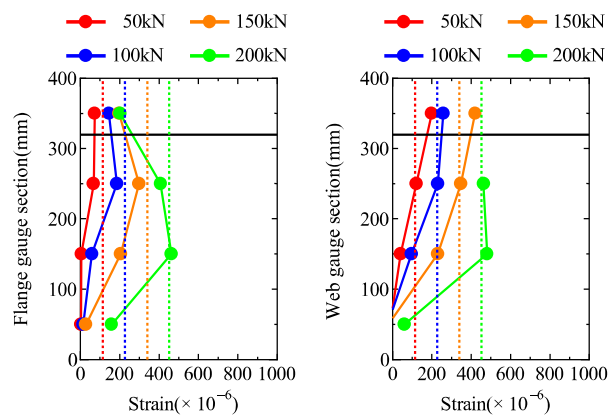
ここで、 ε_m 、 ε_n は対象区間における上端および下端の鉛直方向軸ひずみ、 E は鋼材の弾性係数、 A_s は鋼材の断面積である。

付着力はフランジとウェブでそれぞれ算定し、付着力を、対象区間におけるフランジおよびウェブとコンクリートとの接触面積で除すことで付着応力 τ を求めた。ここで接触面積とは、形鋼断面の外周長さに対象区間長さを乗じた面積であり、I形鋼、H形鋼ともに部材厚さと長さより接触面積を算定し、隅角部における r の影響は考慮していない。荷重～付着応力関係を、除荷再載荷分を除いた包絡線として**図-8**に示す。横軸は付着応力を、縦軸は荷重を示し、 τ の添え字は付着応力を算定した区間を示しており、**図-5**の高さ(1)～(4)に対応している。

図-8より、Case1～Case3では、それぞれ荷重が170kN、140kN、125kN程度までは、区間23、区間34ともに荷重の増加とともに付着応力が大きくなる傾向であり、区間23の方が区間34よりも付着応力は大きい。それ以降から、荷重とともに区間23での付着応力が減少し始め、区間34での付着応力が増加する。このことは、それぞれのCaseで荷重が170kN、140kN、125kN程度までは区間23の付着で主に抵抗していたが、それらの荷重前後から、区間23での付着が切れ始め、代わりに区間34の付着で抵抗していることを示している。また、Case2では、区間23において140kN程度からフランジおよびウェブともに付着応力が急激に低下し始めるのに対して、Case1とCase3の区間23では、それぞれ170kN、125kN程度から、フランジの付着応力は急激に低下し始めるものの、ウェブの付着応力はフランジ程低下してはいない。これは、Case1とCase3では、これらの荷重からウェブに配置したスタッドがずれに抵抗し始めたためである。また、スタッドのないCase2のフランジとウェブの付着応力を比較すると、区間23において、フランジの付着応力の方が大きい傾向にある。付着応力を求める際に、式(1)より算



(a) フランジひずみ分布 (b) ウェブひずみ分布
図-6 高さ方向ひずみ分布 (Case1)



(a) フランジひずみ分布 (b) ウェブひずみ分布
図-7 高さ方向ひずみ分布 (Case2)

定した付着力に対して単純に対象区間におけるコンクリートとの接触面積で除しているが、ウェブに引張力が作用した場合、ポアソン効果によってフランジ間のコンクリートが圧縮され、フランジとコンクリート間の付着応力が大きくなったと考えられる。

3.4 スタッドの曲げひずみ

図-9にCase1における荷重～スタッドの曲げひずみ関係を、除荷再載荷分を除いた包絡線として示す。横軸はスタッドの曲げひずみ、縦軸は荷重である。ここで、Tはスタッド頭側のひずみを、Bは根本側のひずみを示し、数字の1、2はそれぞれ上側および下側のスタッドを示す。なお、Case1のT2は、ゲージの不具合により計測できなかった。

図-9より、Case1の上側スタッドにおけるT1およびB1では荷重150kN程度までは曲げひずみがほとんど発生せず、この荷重までは、形鋼とコンクリートとの間の付着が保たれていると考えられる。Case1下側スタッドのB2では、荷重200kN程度から、付着が切れてスタッドにせん断力が作用し始めている。これらは、**図-8(a)**に示したウェブにおける付着応力の挙動を裏付けている。

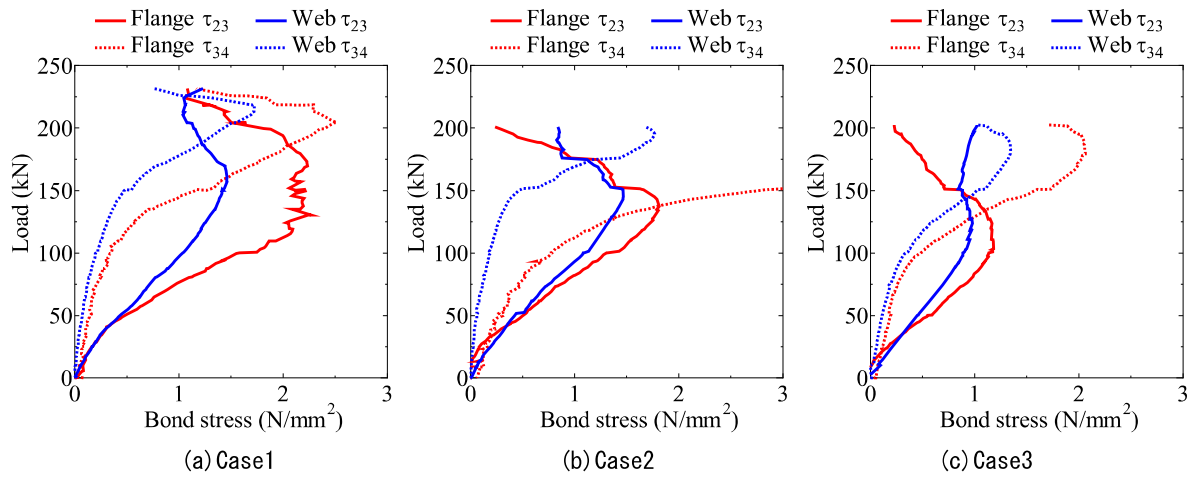


図-8 荷重～付着応力関係

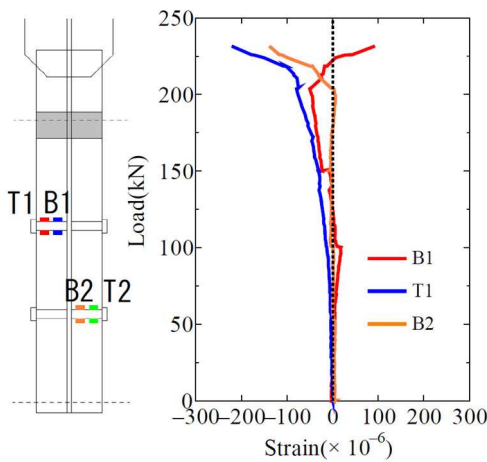


図-9 荷重～スタッド曲げひずみ (Case1)

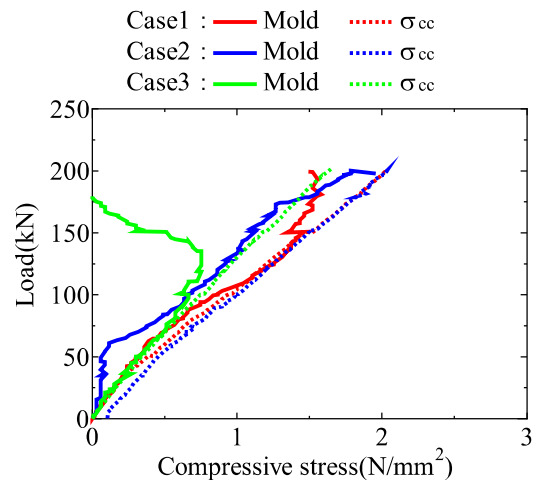


図-10 荷重～圧縮応力関係

以上から、提案構造では、引抜き力に対して、まず形鋼とコンクリート間の付着によって抵抗し、引抜き力がその抵抗力よりも大きくなり始めた時に、ウェブに配置したスタッドが抵抗することが確認された。

3.5 ポアソン効果に関する検討

ポアソン効果については、ウェブの軸方向に生じる引張応力 σ_{wt} に対応して、形鋼のポアソン比 ν によってウェブ直角方向に圧縮応力 σ_{wc} が発生し、フランジ間のコンクリートに圧縮応力 σ_{cc} が作用すると考えられる。 σ_{wt} 、 σ_{wc} および σ_{cc} は、以下の式より算定される。

$$\sigma_{wt} = E \times \varepsilon_t \quad (2)$$

$$\sigma_{wc} = \nu \cdot \sigma_{wt} \quad (3)$$

$$\sigma_{cc} = \sigma_{wc} \cdot \frac{t_w}{2 \cdot B} \quad (4)$$

ここで、 E は形鋼の弾性係数、 ε_t は形鋼ウェブに発生する引張ひずみ、 t_w は形鋼ウェブ厚さ、 B は片側のフランジ高さである。

コンクリートに作用する圧縮応力の比較を、図-5の位置(2)について、図-10に荷重～圧縮応力関係として除荷再載荷分を除いた包絡線で示す。横軸は圧縮応力、縦

軸は荷重である。実線はモールドゲージの圧縮ひずみから求めた圧縮応力、点線はウェブのひずみ計測値から式(4)により算定した結果である。

ここで、ポアソン比 ν については、両引き試験¹²⁾から0.25とした。図-10から、Case3のようにモールドゲージによる圧縮応力は荷重の増加とともに減少する部分もあるが、全ケースにおいて、ウェブの引張力から算定したフランジ間のコンクリートへのポアソン効果による圧縮応力は、試験結果を比較的良好に評価できている。今後は、ポアソン効果によるフランジ間のコンクリートへの圧縮応力と付着応力の関係を定量的に検証する必要がある。

4. まとめ

本研究では、IまたはH形鋼を有するSC構造の引抜き試験を行い、応力の伝達状態やコンクリートと形鋼間の付着特性、ポアソン効果に関する検証を行った。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) スタッドを有する試験体では、スタッドの破断よりも前にコンクリート部分でのせん断破壊が生じ、ス

タッドの無い試験体では形鋼の抜け出しによって終局に至った。

- (2) コンクリート部上側のウェブから作用させた引張力は、コンクリート内部では、スタッドの有無や形鋼の寸法にかかわらず形鋼の断面に対してほぼ一様なひずみが発生しており、フランジとウェブの応力分担は同程度である。
- (3) コンクリートと形鋼の間の付着応力は、ウェブに比べてフランジの方が大きく、フランジ間のコンクリートが圧縮されることによるポアソン効果の影響による。
- (4) 提案構造では、引抜き力に対して、まず形鋼とコンクリート間の付着によって抵抗し、引抜き力がその抵抗力よりも大きくなり始めた時に、ウェブに配置したスタッドが抵抗する。
- (5) ウェブの引張り力から算定したフランジ間のコンクリートへのポアソン効果による圧縮応力は、試験結果を比較的良好に評価できた。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017.
- 2) 前田良文，篠田佳男：技術最前線/鉄筋コンクリート複合構造による橋脚の新工法-北海道縦貫自動車大岸橋，土木学会誌，第八十一巻第三号，pp.14-17，1996.3.
- 3) 山縣敬二，市川博康，大内一，小島克朗：鋼管・コンクリート複合構造高橋脚模型の水平加力試験，土木学会論文集，No.520/V-28，pp.183-193，1995.8.
- 4) 跡部俊郎，田村多佳志，岡本隆，水谷慎吾：プレキャストセグメントと鋼管からなる合成構造橋脚の力学特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，第6巻第2号，

pp.107-116，1995.7.

- 5) 原夏生，河野一徳，篠田佳男，横沢和夫，町田篤彦：突起付きH形鋼とプレキャスト型枠を用いた鉄骨コンクリート複合構造橋脚の構造性能に関する研究，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.149-168，2000.11.
- 6) 大野一昭，芦達拓哉，井上正巳，篠田佳男：中間帯鉄筋に変えてスパイラル筋を用いた SRC 構造の柱圧縮試験，第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.139-142，1998.1.
- 7) 東州和，福井次郎，橋本万多良，長澤保紀，原夏生：スパイラル筋を用いた SRC 橋脚構造の耐震性能，第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.193-196，1998.12.
- 8) 阿部英彦，中島章典：SRC はりの力学性状に及ぼすずれ止め位置の影響，構造工学論文集，Vol.33A，pp.307-316，1987.3.
- 9) 中島章典，桑原伸太郎，Nguyen Minh Hai，藤倉修一，溝江慶久：限界状態を満足するずれ止めの合成効果を考慮した非合成桁の可能性，構造工学論文集，Vol.65A，pp.698-711，2019.3.
- 10) 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集，Vol.31，No.2，pp.1153-1158，2009.7.
- 11) 藤倉修一，柳谷一輝，宇野州彦，篠田佳男：I形鋼を用いた新たな複合構造の曲げ耐荷性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，pp.943-948，2021.7.
- 12) 宇野州彦，池野勝哉，藤倉修一，篠田佳男：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，pp.937-942，2021.7.