

頂版に孔あきI形鋼を用いた複合構造の 付着および曲げ耐荷性能に関する研究

宇野 州彦¹・池野 勝哉²・篠田 佳男³・藤倉 修一⁴

¹ 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: kunihiko.uno@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: katsuya.ikeno@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 日本コンクリート技術株式会社 (〒130-0026 東京都墨田区両国 4-38-1)
E-mail: y-shinoda@jc-tech.co.jp

⁴ 正会員 宇都宮大学教授 地域デザイン科学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)
E-mail: shuichi.fujikura@cc.utsunomiya-u.ac.jp

著者らは、臨港道路橋脚を対象に頂版の鉄筋代替として、孔あきI形鋼により鋼材をユニット化する工法を提案する。本研究では、孔あきI形鋼を用いた複合コンクリート構造を対象に、コンクリートの充填性確認実験を行い、I形鋼のウェブ直下における充填不良の有無について確認を行った。また、引抜き実験および曲げ載荷実験を実施し、コンクリートとの付着性能および複合構造の曲げ耐荷性能の確認を行った。充填性確認実験では、孔を設けることでウェブ直下にコンクリートが充填されることを確認した。孔あきI形鋼は、引抜き実験よりスタッドを配置したI形鋼と同等の付着性能を有していることが示され、曲げ載荷実験ではスタッド付きI形鋼と同等の曲げ耐荷性能および変形性能を有していることが確認できた。

Key Words : *upper slab, perforated I-beam, composite structure, concrete fillability, adhesion performance, bending load capacity*

1. はじめに

近年、建設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求められており、鋼材量の多い鉄筋コンクリート構造物に対する効率的な施工方法が求められている。海上部において、鋼管矢板井筒基礎等により構築される臨港道路橋脚では、頂版の配筋量が多く、また頂版厚が数mとなることから施工時に鉄筋架台の設置が必要となるため、狭隘な作業空間での施工となり、作業効率の低下や安全性の面で懸念がある。

著者らはこれらの状況に対応するため、頂版の鉄筋代替としてI形鋼により鋼材をユニット化する工法を提案する(図-1)。頂版に用いるI形鋼は、かぶり確保の観点から弱軸に向けて水平配置するため、ウェブに孔を設けることでコンクリート打込み時の空気孔が確保され、ウェブ直下に想定されるコンクリートの充填不良を防ぐことができると考えられる。さらに、孔にコンクリートが充填されることにより、孔あき鋼板ジベル[®]としてコンクリートとの付着性能の向上が期待できる。

本研究では、孔あきI形鋼を用いた複合コンクリート構

造を対象に、まずコンクリートの充填性確認実験を行い、ウェブ直下における充填不良の有無について確認を行った。次に、引抜き実験および曲げ載荷実験を実施し、コンクリートとの付着性能および複合構造の曲げ耐荷性能の確認を行った。

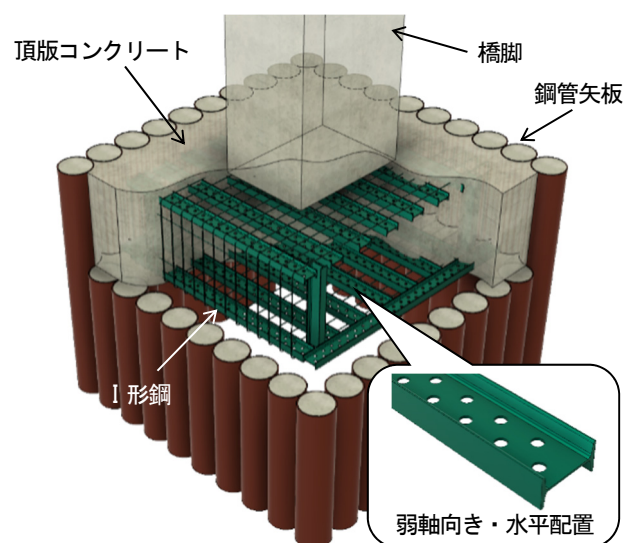


図-1 I形鋼によるユニット化のイメージ

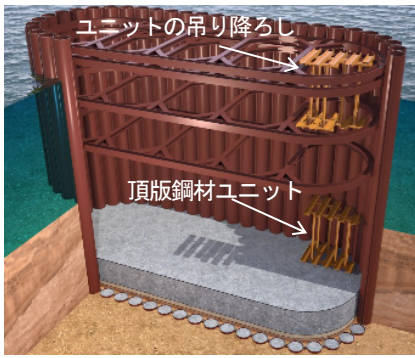


図-2 頂版鋼材ユニットの施工イメージ

ここで、頂版鋼材ユニットの施工イメージを図-2に示す。頂版鋼材は支保工の配置を考慮した上でユニットサイズを決定し、クレーン等の重機により吊り降ろして施工を行う。ユニット鋼材同士は、添接板等により接合することで一体化した頂版鋼材が完成する。

2. コンクリートの充填性確認実験

(1) 実験概要

I形鋼ウェブ直下におけるコンクリートの充填不良の有無について、充填性確認実験を行った。試験体の概要図を図-3に示す。試験体は、孔のない鋼材のみを配置した試験体(孔なし試験体)と、 $\phi 40\text{mm}$ の孔を240mmピッチで千鳥状に設けた試験体(孔あき試験体)の計2体とした。孔あき試験体のコンクリート打込み状況を写真-1に示す。孔を設けることで、鋼材の周囲に打ち込んだコンクリートが孔から出てきている様子が窺える。

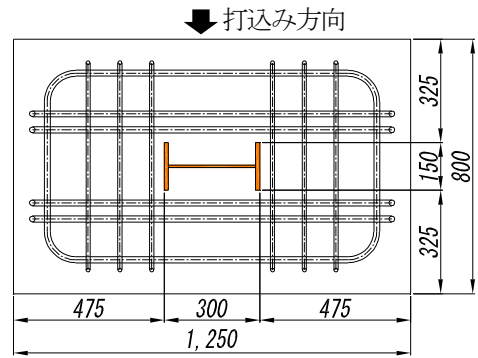


図-3 試験体概要図 (単位 : mm)



写真-1 孔あき試験体へのコンクリート打込み状況

(2) 実験結果

打設後に試験体を切断し、コンクリートの充填状況を確認した。孔なし試験体の切断後の断面図を写真-2に示す。写真より、ウェブ直下においてコンクリートの充填不良が生じていることが確認できる。切断は各試験体で3箇所行ったが、充填不良が確認されたのは、そのうち2箇所であった。2箇所の充填不良のうち、もう1箇所の充填不良については、ウェブとフランジの交点付近で生じていた。孔あき試験体については、3箇所ともに充填不良は見られず、孔をあけることでウェブ直下にもコンクリートが充填されることが確認できた。



写真-2 孔なし試験体の切断面

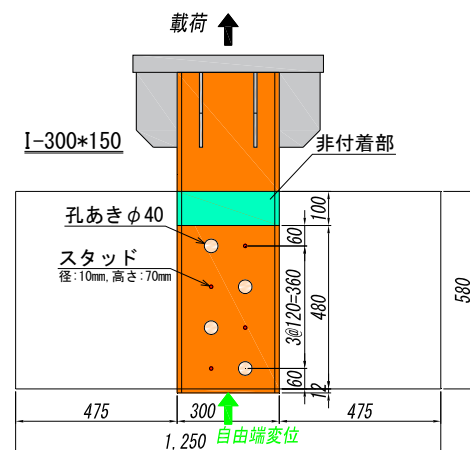


図-4 Case-P4の試験体概要図 (単位 : mm)

3. 孔あきI形鋼の引抜き実験

(1) 実験概要

著者らは、橋脚に用いる鋼材として、I形鋼のウェブに

スタッドを配置したものを過去に提案している²⁾⁴⁾が、頂版には孔を設けたものやスタッドと孔の両方を取り入れたものの適用が考えられるため、引抜き実験ではこれらの鋼材を対象とする。引抜き実験は、幅1,250mm×奥行き

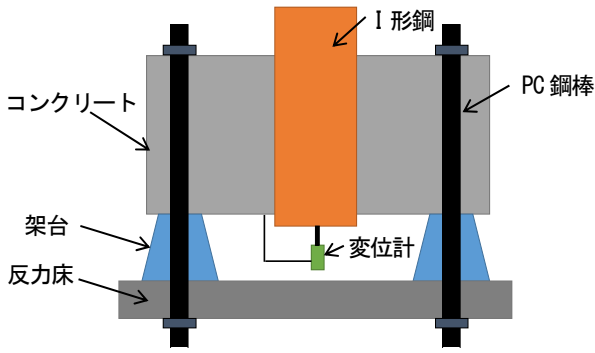


図-5 試験体設置イメージ

表-1 鋼材の機械的性質

| | 降伏点 N/mm ² | 引張強度 N/mm ² | 弾性係数 ×10 ³ N/mm ² | 規格 |
|------------|--------------------------|---------------------------|--|-------|
| I形鋼300×150 | 344.6 | 455.0 | 204.0 | SS400 |
| スタッド | 429.7 | 476.6 | — | SS400 |

表-2 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 |
|---------|---------------------------|-----------------------------|---|
| Case-P1 | 38.7 | 3.5 | 28.7 |
| Case-P2 | 43.0 | 3.3 | 30.4 |
| Case-P3 | 44.7 | 3.7 | 31.5 |
| Case-P4 | 37.9 | 2.8 | 28.5 |

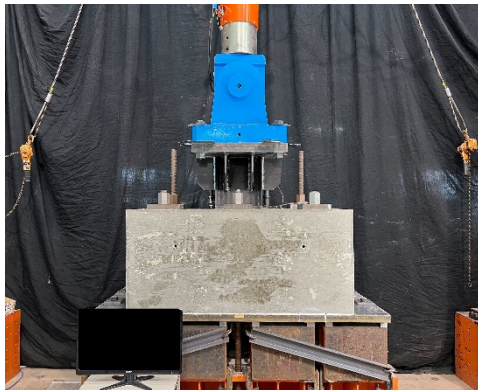


写真-3 試験体のセットアップ状況

800mm×高さ580mmのコンクリートにI-300×150×8×13のI形鋼を用い、Case-P1はI形鋼のみを配置したもの、Case-P2は軸径10mm、高さ70mmのスタッドを表裏計8本配置したもの、Case-P3はφ40mmの孔を4箇所設けたもの、Case-P4はスタッドと孔の両方を取り入れたものの計4ケースとした。Case-P4の試験体概要図を図-4に示す。なお、図-4から孔をなくしたものがCase-P2、スタッドをなくしたものがCase-P3となる。試験体は図-4に示すように長さ100mmの非付着部を設けるため、塩ビシートを鋼材に貼付した。本実験では各ケースにおける付着時および付着が切れた後の挙動を確認するため、鋼材が降伏に至る前に付着が切れるように付着区間を480mmと設定した。試験体は図-5に示すように設置し、反力床と試験体

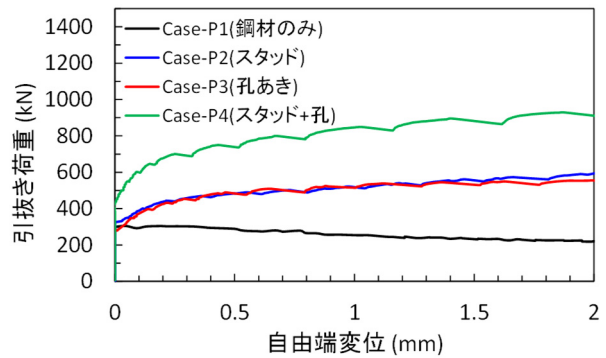


図-6 引抜き荷重—自由端変位関係

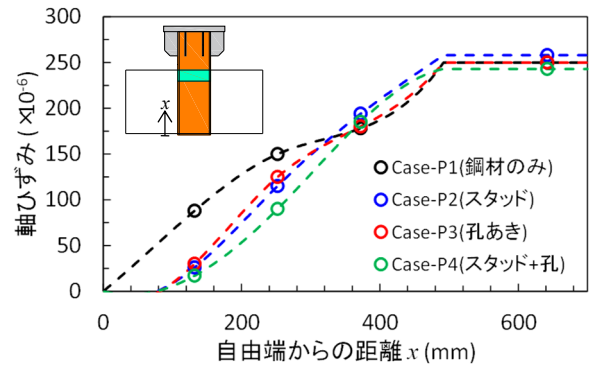


図-7 鋼材の軸ひずみ分布 (300kN時)

の間に架台を設けることで、試験体下端の自由端変位を測定できるようにしている。なお、試験体と架台、反力床をPC鋼棒により固定する。

孔およびスタッドの寸法およびピッチについては、複合構造標準示方書⁹⁾を参考に設定している。スタッドの寸法およびピッチの算定については既報²⁾にて示しているが、本実験では、スタッド2本のせん断耐力と孔1箇所のせん断耐力がほぼ同等となるように、孔およびスタッドの寸法を決定する。

鋼材の機械的性質およびコンクリートの材料特性を表-1、表-2に示す。コンクリートは引抜き実験日材齢における材料特性である。試験体のセットアップ状況を写真-3に示す。

(2) 実験結果および考察

引抜き実験により得られた引抜き荷重—自由端変位関係を図-6に示す。実験は自由端変位20mmまで実施しているが、本実験ではいずれのケースも鋼材は降伏強度に達していない。Case-P1は荷重305kNでピークを迎えたが、Case-P3は孔を設けたことによりコンクリートとの付着性能が向上し、スタッド配置したCase-P2とほぼ同等の500kNを超える引抜き抵抗力を發揮した。Case-P3に設けた孔4箇所とCase-P2に配置したスタッド8本のせん断耐力がほぼ同等となるように形状等を設定していたが、その妥当性が確認できた。なお、既報²⁾において鉄筋を用いた試験体とスタッドを配置したI形鋼の試験体の

両引き試験を実施し、同等の付着性能を有することを確認しており、今回の実験結果から、鉄筋の代替材料として孔あきI形鋼が活用できることが示された。Case-P4は、900kN以上の引抜き抵抗力となり、孔あき鋼板ジベルの効果とスタッドによるずれ止め効果の両方が発揮される結果となった。なおCase-P4の引抜き荷重は、Case-P2とCase-P3を累加した結果よりも大きくなる傾向を示しているが、この要因については今後検討を行いたい。

引抜き荷重 300kN 時の鋼材の軸ひずみ分布を図-7に示す。図では計測点同士をスプライン曲線で補間し、軸ひずみのおおよその傾向として表している。なお、自由端からの距離 492mm~592mm においては非付着部を設けていることから、この箇所は計測点ではないものの、自由端からの距離 642mm の計測点におけるひずみと同等のひずみが発生しているものと仮定し、新たに点をプロットした上でスプライン曲線を描いている。

図より、Case-P1は自由端に近いところまで100μ程度のひずみが発生しており、コンクリートと鋼材の見かけの付着力が低下していると思われる。一方、Case-P2、Case-P3は自由端から150mm程度まではひずみが小さくなっており、すべりが発生する前においては鋼材とコンクリートとの付着が確保できていると思われる。

4. 孔あきI形鋼を有する複合構造梁の曲げ 荷重実験

(1) 実験概要

曲げ荷重実験の概要図を図-8に示す。本実験は、過去に実施した曲げ荷重実験³⁾と同形状としており、全長3,200mm、幅250mm×高さ400mmの矩形断面を対象に、200mmピッチで軸径10mm、高さ40mmのスタッドを千鳥状に配置したものをCase-B1、同ピッチでφ30mmの孔を設けたものをCase-B2、スタッドと孔の両方を取り入れたものをCase-B3として静的2点曲げ荷重を行った。帯鉄筋にはSD345-D13を支点～荷重点間に100mm間隔

表-3 鋼材の機械的性質

| | 降伏点 N/mm ² | 引張強度 N/mm ² | 弾性係数 ×10 ³ N/mm ² | 規格 |
|-----------|--------------------------|---------------------------|--|-------|
| I形鋼150×75 | 377.6 | 474.2 | 205.3 | SS400 |
| 鉄筋D13 | 389.1 | 543.2 | 183.3 | SD345 |
| スタッド | 429.7 | 476.6 | — | SS400 |

表-4 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 |
|---------|---------------------------|-----------------------------|---|
| Case-B1 | 40.8 | 3.3 | 30.0 |
| Case-B2 | 39.6 | 3.5 | 31.0 |
| Case-B3 | 42.7 | 3.5 | 31.0 |

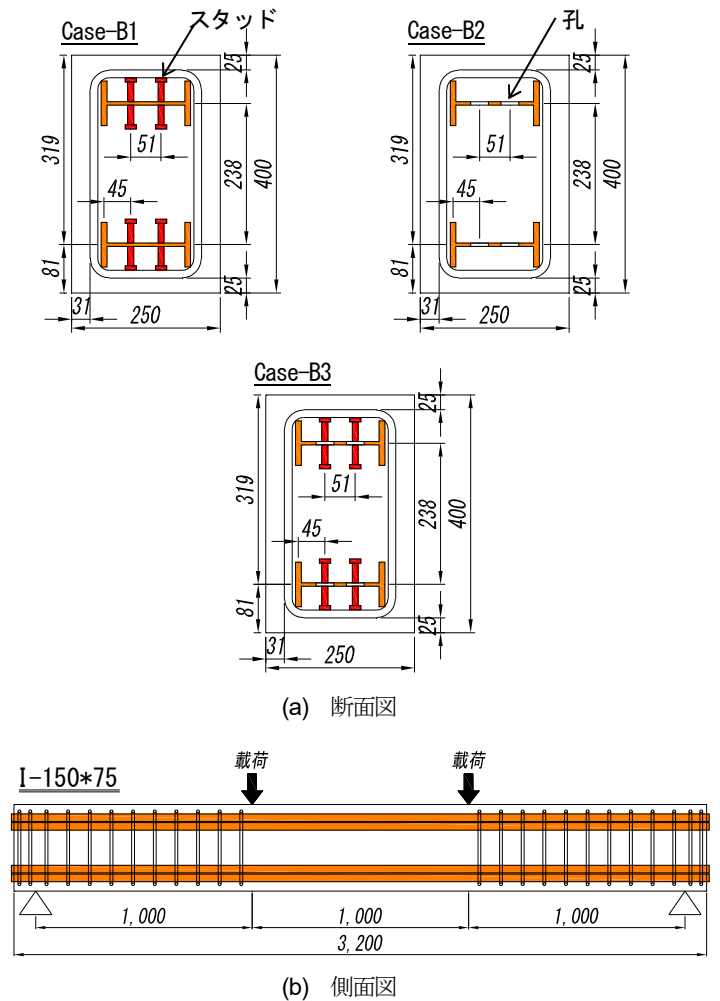


図-8 試験体概要図 (単位: mm)

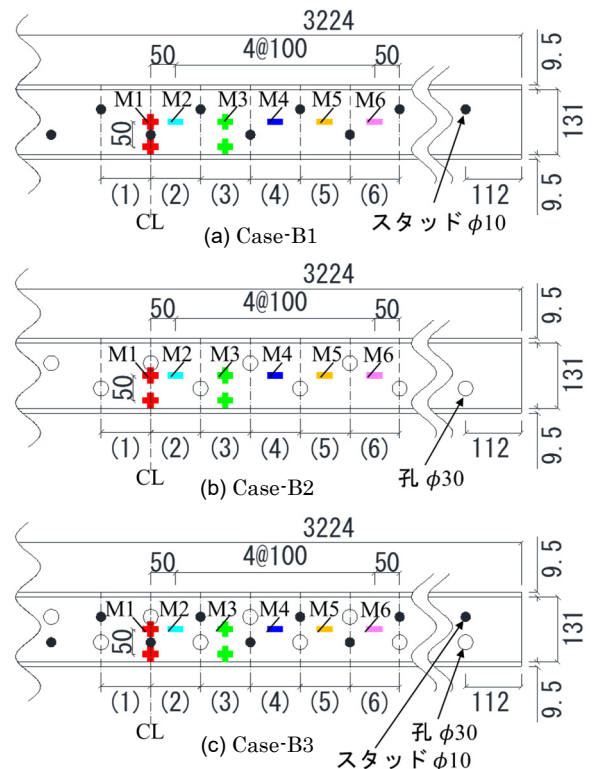


図-9 ひずみゲージ計測位置 (単位: mm)

で配置した。I形鋼のスタッドおよび孔の位置、ウェブに貼付するひずみゲージの位置を図-9に示す。M1からM6は軸方向に生じるウェブ中央のひずみ計測位置である。鋼材の機械的性質を表-3に、曲げ載荷実験日材齢におけるコンクリートの材料特性を表-4に示す。

(2) 実験結果および考察

a) 荷重-変位関係

曲げ載荷実験による曲げ載荷荷重-中央たわみ変位関係を図-10に示す。また、実験から得られたひび割れ発生荷重、主鋼材降伏荷重、最大荷重を表-5に示す。図-10には孔を設けていないI形鋼について、表-3、表-4に示す材料特性値より計算した降伏荷重および終局荷重を併記している。本実験では中央たわみ変位が約10mmでいずれのケースも鋼材が降伏したが、鋼材降伏までの曲げ剛性はいずれもほぼ同等であり、鋼材降伏後も荷重が低下することなく優れた変形性能を有していることが示された。また、実験終了時に計測した試験体端部におけるI形鋼とコンクリートの相対変位は、いずれの試験体においても最大で0.04mmであり、終局に至るまでスタッドおよび孔あきがずれ止めとして機能したことを示している。Case-B1と比べCase-B2、B3の降伏荷重や最大荷重がやや小さくなっており、これは孔による断面欠損が要因と考えられるが、実験では計算値を上回る降伏荷重、終局荷重となった。Case-B1は既往の載荷実験³⁾で示された曲げ耐荷性能や変形性能と同等であることから、本論文で示す孔あき試験体についても、鉄筋コンクリート構造(RC構造)の梁と同等の曲げ耐荷性能および変形性能を有しているものと考えられる。

b) ひび割れ性状

各ケースのひび割れの進展図を図-11に示す。青線は降伏荷重時、赤線は終局荷重時におけるひび割れ状況を示している。いずれの試験体においても、主鋼材降伏時には、等曲げ区間では曲げひび割れが生じており、せん断スパンにおいては、荷重位置に向かって斜めひび割れが生じている。主鋼材降伏以降は、いずれも降伏荷重時のひび割れが若干進展し、荷重点間の上面のコンクリートが圧壊する曲げ破壊形態を示して終局状態に至った。

Case-B1について、図-9に示す(1)から(6)の区間で計測されたひび割れ幅と中央変位20mmまでの関係を図-12に示す。図より、まず中央変位0.6mm時に区間(5)でひび割れが確認され、その後、区間(3)、(1)の順でひび割れが発生した。中央変位の増加に伴うひび割れ幅の変化は、区間(5)、(3)、(1)の順となり、荷重点付近でひび割れ幅が大きくなる傾向が確認された。終局荷重時における底面からのひび割れ発生本数は、Case-B1とCase-B3で11本、Case-B2で9本であり、スタッドを有する試験体の方がやや本数が多いものの、ひび割れ発生

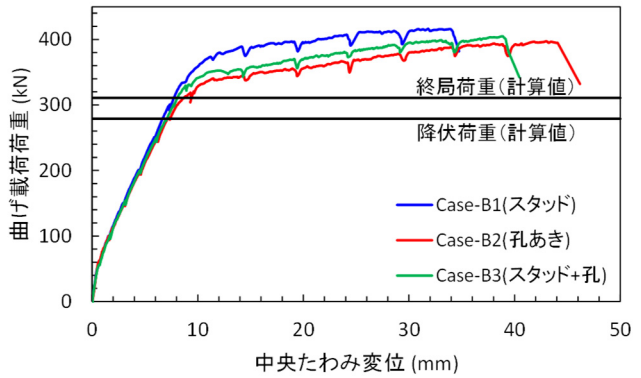


図-10 曲げ載荷荷重-中央たわみ変位関係

表-5 載荷荷重結果 (単位: kN)

| | Case-B1 | Case-B2 | Case-B3 |
|--------|---------|---------|---------|
| ひび割れ発生 | 51 | 60 | 56 |
| 降伏 | 373 | 332 | 344 |
| 最大 | 416 | 397 | 405 |

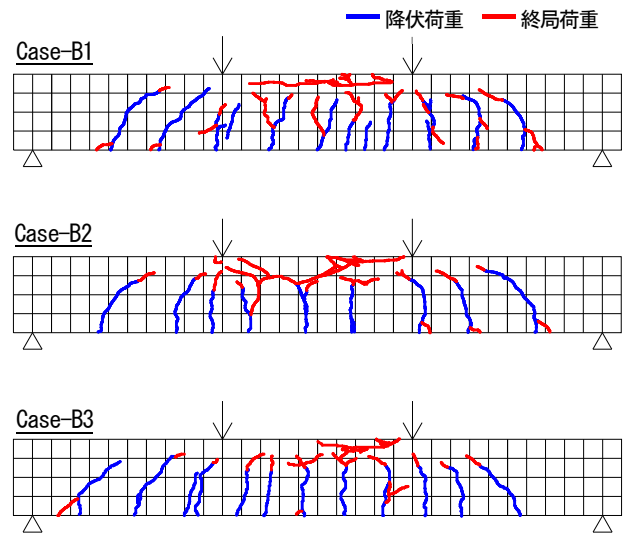


図-11 ひび割れ性状スケッチ

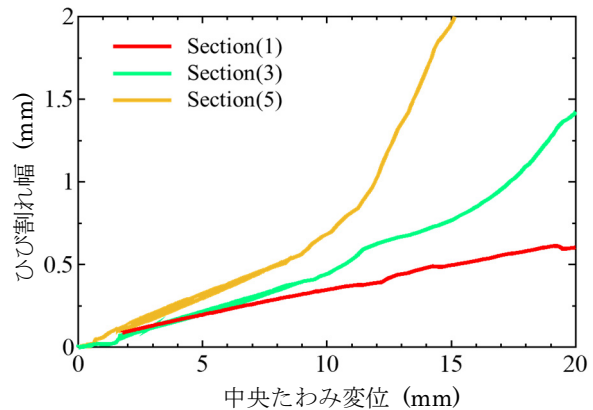


図-12 ひび割れ幅-中央変位関係 (Case-B1)

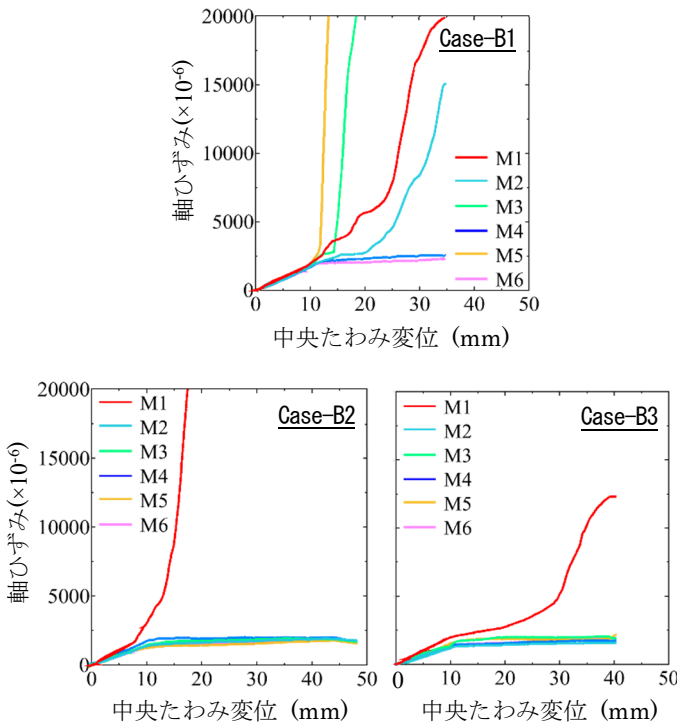


図-13 ウェブの軸ひずみー中央変位関係

範囲は同等であり、ひび割れ分散性としては概ね同等であることが確認できた。

c) I形鋼のウェブのひずみ

各試験体における引張側 I 形鋼ウェブの軸方向ひずみー中央変位関係を図-13 に示す。I 形鋼ウェブのひずみは図-9 に示した M1~M6 の 6 箇所の中央位置の軸方向ひずみである。中央変位の増加とともに、Case-B1 のひずみは M5, M3, M1, M2 の順に急増しており、ひび割れ発生状況で示したように、ひび割れ幅が増加した区間(5)、(3)、(1) の順とほぼ一致している。これは、鉄筋コンクリートと同様に、ひび割れの発生に伴い、曲げモーメントによる梁下側の引張応力を I 形鋼が負担したためである。一方、孔を配置した Case-B2 および孔とスタッドを配置した Case-B3 では、軸方向中央ひずみ M1 のみが急増している。ひび割れ発生状況では、M1 周辺以外にもひび割れが発生しており、Case-B1 とは違う傾向である。Case-B2 および Case-B3 では、孔と同断面位置のウェブに引張応力が集中したことで、孔と孔の間で計測した M2~M6 ではひずみが急増しなかった可能性がある。

5. まとめ

本研究では、臨港道路橋脚を対象に、従来の RC 構造に代わる新たな複合構造として、鉄筋の代わりに I 形鋼を用い、ずれ止めとしてウェブに孔をあけた複合構造を提案した。提案する構造に対し、コンクリートの充填性

の確認および付着性能と曲げ耐荷性能の確認を行った。本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) 頂版に適用する鉄筋の代替材料として、孔あき I 形鋼を用いユニット化して施工する方法を提案した。
- (2) I 形鋼のウェブに孔を設けることで、鋼材を水平に配置した場合においてもウェブ直下にコンクリートが充填されることを確認した。
- (3) 孔あき I 形鋼を用いることで、スタッドを配置した I 形鋼と同等の付着性能を有することが示された。これまでの知見から、孔あき I 形鋼は RC 構造と同等の付着性能およびひび割れ分散性を有するものと考えられる。
- (4) スタッド付き I 形鋼と孔あき I 形鋼の曲げ載荷実験より、両者は同等の曲げ耐荷性能および変形性能を有することを確認した。過去に実施した RC 梁およびスタッド付き I 形鋼を用いた梁の曲げ載荷実験より、本研究で提案する孔あき I 形鋼は、RC 梁と比較して同等の曲げ耐荷性能および変形性能を有していることが考えられる。

本研究における実験結果とこれまでの知見から、孔あき I 形鋼は鉄筋の代替材料として活用できるものと考えられる。一方で、孔付近でひずみが大きく発生することから、孔あき I 形鋼の適用に際しては、孔の寸法について留意する必要がある。

REFERENCES

- 1) 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. [Tanaka, T. and Sakai, J.: Study on mechanics of adhesion of steel-concrete structural member using perforated shear connector, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.31, No.2, pp. 1153-1158, 2009.]
- 2) 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. [Uno K., Ikeno K., Fujikura S. and Shinoda Y.: Bond characteristics of concrete to composite structure with studs placed on I-beam webs, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.43, No.2, pp. 937-942, 2021.]
- 3) 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. [Fujikura S., Yanagiya K., Uno K. and Shinoda Y.: Flexural behavior of new composite structure with I-beam, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.43, No.2, pp. 943-948, 2021.]
- 4) 宇野州彦, 池野勝哉, 藤倉修一, 篠田佳男: スタッド配置した I 形鋼を芯材とした複合構造橋脚の交番載荷実験, 構造工学論文集, Vol.68A, pp. 850-861, 2022.

[Uno K., Ikeno K., Fujikura S. and Shinoda Y.: Cyclic loading test on composite bridge pier with studs placed on I-beam webs, *Journal of structural Engineering*, Vol.68A, pp. 850-861, 2022.]

Specifications for Hybrid Structures 2014, Design, pp. 68-84, 2015.]

- 5) 土木学会：2014年制定 複合構造標準示方書〔設計編〕, pp. 68-84, 2015. [Japan Society of Civil Engineers: *Standard*

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

STUDY ON ADHESION AND BENDING LOAD CAPACITY OF COMPOSITE STRUCTURES WITH PERFORATED I-SHAPED STEEL IN THE UPPER SLAB

Kunihiko UNO, Katsuya IKENO, Yoshio SHINODA and Shuichi FUJIKURA

The authors propose a method of unitizing steel members by using perforated I-beams as a substitute for steel bars in the upper slab of port road piers. In this study, concrete filling tests were conducted on a composite concrete structure using perforated I-beams to confirm the presence of filling defects just below the web of the I-beam. In addition, pull-out and bending load tests were conducted to confirm the adhesion performance to concrete and the bending load capacity of the composite structure. In the filling test, it was confirmed that concrete filled the area directly under the web by the perforated I-beam. The perforated I-beams were shown to have adhesion performance equivalent to that of I-beams with studs in the pull-out tests, and bending load tests showed that the perforated I-beams had bending load capacity and deformation performance equivalent to that of I-beams with studs.