

## コンクリート充填細幅鋼箱桁の静的曲げ耐荷力に関する実験的研究

Experimental study on ultimate bending strength of concrete-filled narrow-width steel box girder

森下泰光\*, 中村俊一\*\*, 有馬博人\*, 広野正彦\*, 安田修\*\*\*

Hiromitsu Morishita, Shun-ichi Nakamura, Hiroto Arima, Masahiko Hirono, Osamu Yasuda

\*高田機工(株), 技術研究所 (〒649-0111 和歌山県海草郡下津町方1375-1)

\*\*Ph.D., 東海大学教授, 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

\*\*\*博(工), 高田機工(株), 技術研究所 (〒649-0111 和歌山県海草郡下津町方1375-1)

We carried out static bending loading tests of the concrete-filled narrow-width steel box girder to develop composite structures without shear connectors at an interface of steel and concrete. Experiments show that, F1 specimen that was designed with current design method and filled up with concrete had sufficient ultimate strength and significant ductility. P1 specimen that was half filled with concrete had the ultimate strength 10% smaller than F1 specimen. P2 specimen with no web stiffener had the ultimate strength almost the same as ultimate strength of P1 specimen.

*Key Words: narrow-width steel box girder, composite structure, concrete-filled structure, bending strength*

キーワード: 鋼細幅箱桁, 複合構造, コンクリート充填, 曲げ耐荷力

## 1. はじめに

近年, 鋼桁とRC橋脚とを剛結するラーメン構造が採用されるようになり, 剛結部の設計手法も種々提案され, 実施されている<sup>1)</sup>. また, ラーメン橋もしくは連続鋼桁橋の中間支点部の合理化のために, ダブル合成構造(鋼桁の圧縮側下フランジに下床版を設置する構造)が提案され<sup>2)</sup>, 実橋への適用事例もある. この場合, 下フランジ部にスタッド等ずれ止めを多数配置する必要があり, 合理化に逆行する面もある.

建築分野では, 鋼管もしくは角形鋼管の内部にコンクリートを充填したCFT構造を柱部材に採用しており, 鋼管もしくは角形鋼管の内部にずれ止めを配置することなく, 高耐荷力と高変形性能を実現している<sup>3)</sup>. しかし, 建築分野では, 梁にCFT構造を使用する事例がほとんどないこと, 角形鋼管の検討事例はあるが鋼箱桁橋のような薄肉補剛ビルドアップ断面に対する検討事例がないなどから, 鋼箱桁橋の設計に参照できるような資料はほとんどない. ただし, 鋼管CFT構造をそのまま主桁に用いた構造には, 鉄道橋で施工事例<sup>4)</sup>がある.

本研究では, 角形鋼管CFT構造と同様の補剛効果が, コンクリートを充填した鋼箱桁でも発揮できるものと考え, ずれ止めを用いない新たな複合構造としてコンクリート充填細幅箱桁構造を提案し, その補剛性能, 耐荷力特性を確認することを目的とする. 細幅箱桁とは, 腹板高に対して腹板間隔が小さい長方形断面を有する鋼箱桁であり, 既存鋼箱桁を合理化できる構造として近年注目されている構造である.

コンクリート充填細幅箱桁構造は, 負曲げ領域においては, ずれ止めを配置していない箱桁内にコンクリートを充填するこ

とにより, 圧縮フランジおよび腹板の局部座屈を抑制でき, 終局耐荷力が向上すると期待される. また, 細幅箱桁であるため充填するコンクリート量を少なくできる. 連続桁の中間支点部など負曲げ領域で有効な構造と考えられる.

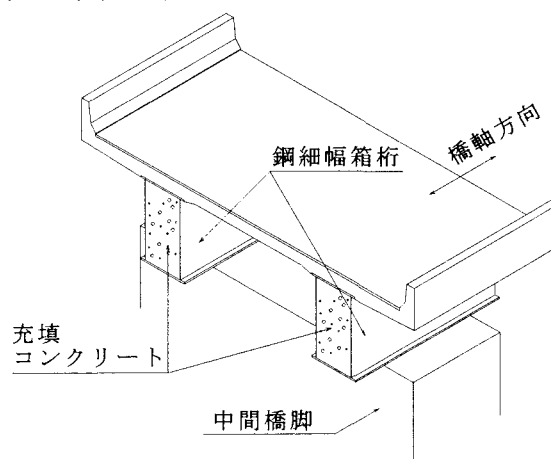


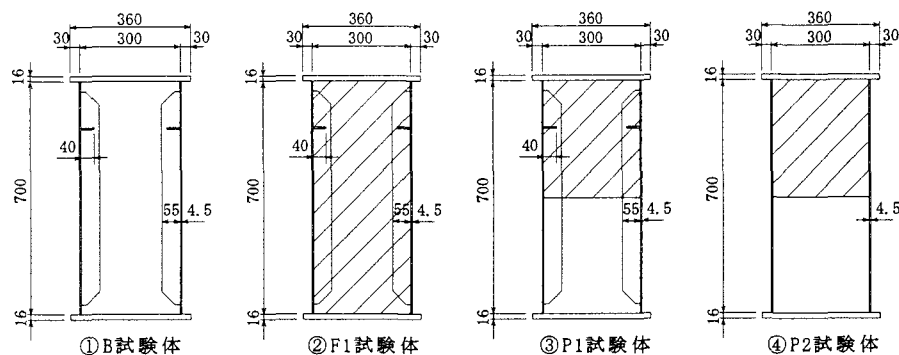
図-1 コンクリート充填細幅箱桁橋のイメージ

本構造を連続桁橋に適用した場合, 細幅箱桁とすることで, 既存の鋼箱桁と比較して少補剛構造となりコストダウンが図れる. さらに, コンクリート充填細幅箱桁として, RC橋脚と鋼上部工を剛結しラーメン橋とすることにより, より合理的な隅角構造となり, 更なるコストダウンを図ることができるものと期待している.

コンクリートを充填した細幅箱桁の基本性能を確認するため, 本研究では, 純曲げ時の耐荷性能に着目する. 単調漸増載荷による静的曲げ試験を実施し, 基本的な耐荷性能の確認を行う.

表-1 試験体一覧

| 試験体名   | 断 面                     | 確 認 内 容                       |
|--------|-------------------------|-------------------------------|
| B 試験体  | 鋼箱桁 (補剛材あり) のみ          | 細幅箱桁の基本耐荷力確認                  |
| F1 試験体 | 鋼箱桁 (補剛材あり) +コンクリート全充填  | コンクリート充填による耐荷力の増加割合確認         |
| P1 試験体 | 鋼箱桁 (補剛材あり) +コンクリート部分充填 | 圧縮側のみコンクリートを充填した場合の耐荷力確認      |
| P2 試験体 | 鋼箱桁 (補剛材なし) +コンクリート部分充填 | P1 試験体で補剛材を省略した場合の補剛効果及び耐荷力確認 |



注) 斜線部は充填コンクリートを示す。

図-2 試験体断面

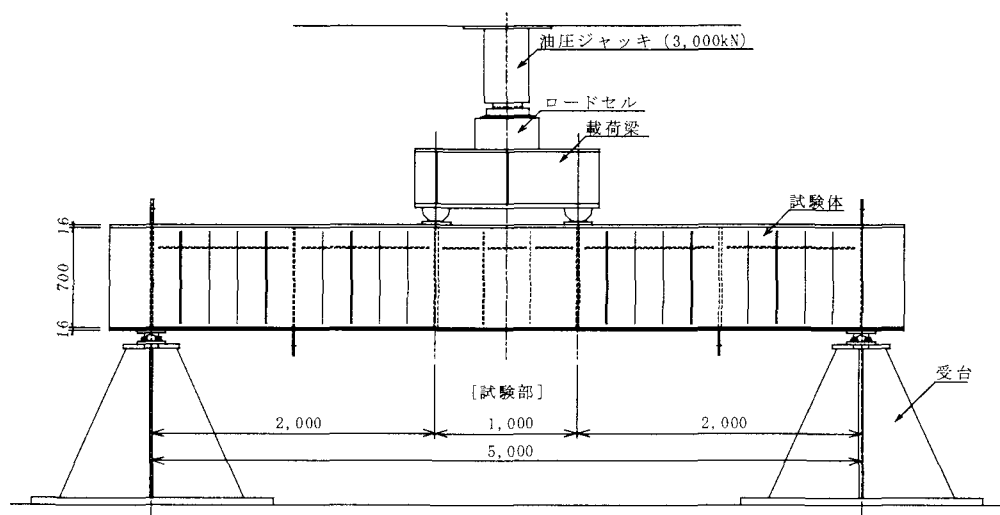


図-3 載荷状況

## 2. 静的曲げ載荷試験

### 2.1 試験体

試験体一覧を表-1に、断面形状を図-2に、示す。図中、上側フランジが圧縮側となるように試験では載荷される。なお、充填コンクリートは、実橋と打設方向を合わせるため、載荷時とは天地を逆に試験体を仮置き、載荷時引張フランジ側に設けた打設孔から打設する。

試験体は、道路橋示方書<sup>9)</sup> (以下、道示) により設計した基本鋼断面試験体 (B)、充填コンクリートの効果を確認するために基本断面にコンクリートを全断面充填した試験体 (F1)、コンクリートの充填量の効果を確認するために基本断面にコンクリートを腹板高さの圧縮側1/2だけ充填した試験体 (P1)、腹板補剛材の効果を確認するためにP1試験体の腹板補剛材を省略した試験体 (P2) の計4体を計画する。試験体の形状は、実構造物の1/4程度の縮尺を想定し、腹板間隔300mm、腹板高さ700mmとする。

載荷状況を図-3に示す。支間長5.0mの単純支持状態の試験体に、載荷点間隔1.0mの静的2点載荷を行う。なお、以下では、支間中央部の等曲げ区間 (区間長1.0m) を「試験部」と呼ぶ。載荷パターンは、単調漸増載荷を荷重制御にて行い、最大荷重を確認した後、試験体の状況が許す時点まで載荷を継続するものとする。B、F1、P1試験体の図面を図-4に示す。P2試験体は、試験部腹板の補剛材を省略した構造である。

試験体に充填するコンクリートについては、骨材寸法の耐荷力特性に与える影響が不明であり、かつ1/4縮尺の試験体に対する十分な充填性を確保するため、コンクリートではなくモルタルを充填する。なお、モルタルの設計基準強度は30N/mm<sup>2</sup>とする。

すべての試験体は、圧縮側および引張側ともフランジ全幅360mm、腹板高700mm、腹板厚4.5mmであり、腹板間隔は300mmである。鋼材は、すべてSM490Y材を使用している。圧縮および引張フランジは、板厚16mmである。B、F1、P1試験体は、道示に従って補剛材を配置している。なお、垂直補剛材

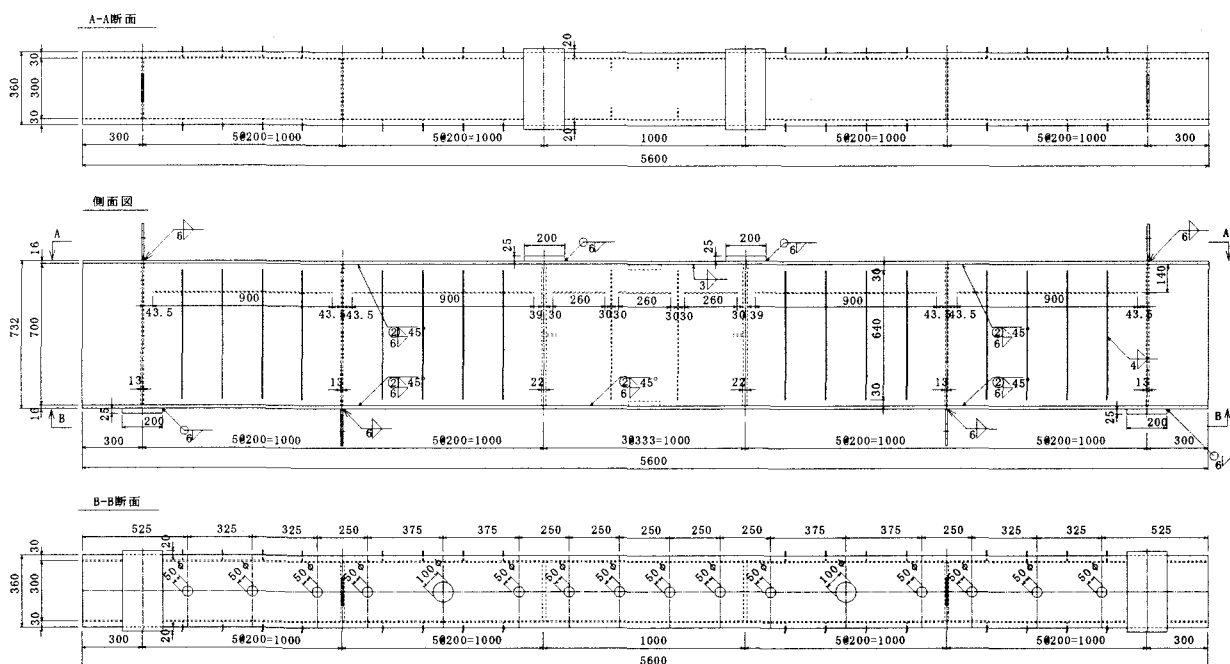
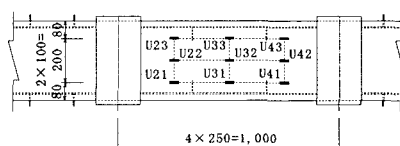
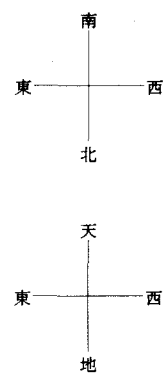
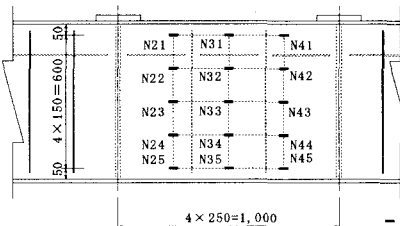


図-4 試験体図 (B, F1, P1試験体)

鋼材ゲージ、上面(U)



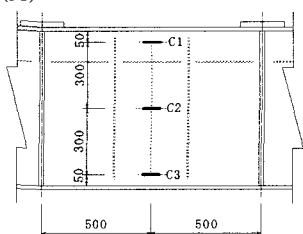
鋼材ゲージ、北面(N)



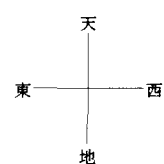
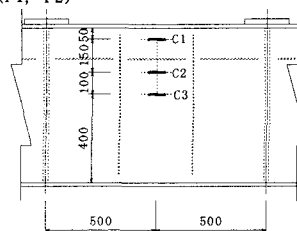
— 印は、1軸ひずみゲージを示す。

コンクリート埋込みゲージ

(側面) (F1)



(P1, P2)



— 印は、コンクリート埋込みひずみゲージを示す。

図-5 ひずみゲージ位置図

は、試験部ではせん断力が作用しないので道示の照査式では必要ないが、実構造物での応力状態に配慮し、ダイアフラム間隔の3等分位置に配置する。

P2試験体は、腹板の補剛材を省略した試験体であり、充填されたモルタルの効果を無視すると、腹板の純曲げによる弾性座屈が発生する。充填されたモルタルによる補剛効果がどの程度あるのかに着目している。なお、すべての試験体でモルタル充填による腹板の面外変形については計測していない。

載荷中の試験体の状態は、ひずみゲージおよび変位計により計測する。ひずみゲージは、試験部の上下フランジおよび腹板

に貼付する。また、支間中央部にはモルタル埋め込みゲージも配置する。ひずみゲージ配置の一部を、図-5に示す。変位計は、載荷点位置および支間中央位置の引張フランジ下面に配置する。なお、図に示すように、支間方向を東西、支間直角方向を南北に設定し、載荷点、腹板など区別が必要な場合に西側載荷点、北面腹板のように呼称する。

## 2.2 材料試験結果

モルタルの圧縮強度試験および割裂強度試験の結果を表-2(a)に示す。また、P1, P2試験体のモルタル充填状況を、図-

表-2 材料試験結果

| (a) モルタル |                           |      |      |      |                           |      |      |      |    | (b) 鋼材 |        |        |        |                          |      |         |                           |
|----------|---------------------------|------|------|------|---------------------------|------|------|------|----|--------|--------|--------|--------|--------------------------|------|---------|---------------------------|
| 材令       | 圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ] |      |      |      | 割裂強度 [N/mm <sup>2</sup> ] |      |      |      | 備考 | 試験片    | 鋼種     | 厚 [mm] | 幅 [mm] | 実測値 [N/mm <sup>2</sup> ] |      | 実測値 [%] | 弾性係数 [N/mm <sup>2</sup> ] |
|          | No.1                      | No.2 | No.3 | 平均値  | No.1                      | No.2 | No.3 | 平均値  |    |        |        |        |        | 下降伏点                     | 引張強さ |         |                           |
| 7        | 22.2                      | 21.5 | 23.6 | 22.4 |                           |      |      |      |    | A1     | SM490Y | 4.51   | 25.05  | 416                      | 538  | 28.8    | 206,147                   |
| 14       | 27.0                      | 26.7 | 27.4 | 27.0 |                           |      |      |      |    | A2     | SM490Y | 4.51   | 25.04  | 414                      | 541  | 32.9    | 207,836                   |
| 28       | 29.4                      | 29.5 | 30.2 | 29.7 | 2.35                      | 2.61 | 2.46 | 2.47 | F1 | A3     | SM490Y | 4.50   | 25.01  | 411                      | 539  | 29.4    | 204,689                   |
| 7        | 20.6                      | 21.1 | 21.0 | 20.9 |                           |      |      |      |    | 平均     |        | 4.51   | 25.03  | 414                      | 539  | 30.4    | 206,224                   |
| 14       | 26.1                      | 27.1 | 26.5 | 26.6 |                           |      |      |      |    | D1     | SM490Y | 15.93  | 25.06  | 413                      | 534  | 40.2    | 217,001                   |
| 28       | 33.1                      | 34.0 | 33.4 | 33.5 | 2.37                      | 2.80 | 2.57 | 2.58 | P1 | D2     | SM490Y | 16.06  | 25.06  | 406                      | 533  | 39.8    | 215,572                   |
| 63       | 35.4                      | 34.5 | 35.1 | 35.0 | 2.80                      | 2.60 | 2.71 | 2.70 | P2 | D3     | SM490Y | 16.08  | 25.06  | 448                      | 557  | 38.4    | 219,936                   |
|          |                           |      |      |      |                           |      |      |      |    | 平均     |        | 16.02  | 25.06  | 422                      | 541  | 39.5    | 217,503                   |

表-3 試験体諸元 (材料試験結果を反映)

| 項目                                | B試験体  | F1試験体 | P1試験体     | P2試験体    |
|-----------------------------------|-------|-------|-----------|----------|
| 断面諸元                              |       |       |           |          |
| 圧縮フランジ厚(mm)                       |       |       | 16        |          |
| 圧縮フランジ幅(mm)                       |       |       | 360       |          |
| 引張フランジ厚(mm)                       |       |       | 16        |          |
| 引張フランジ幅(mm)                       |       |       | 310       |          |
| ウェブ厚(mm)                          |       |       | 4.5       |          |
| ウェブ高(mm)                          |       |       | 700       |          |
| 断面積(mm <sup>2</sup> )             |       |       | 17,020    |          |
| 断面2次モーメント(mm <sup>4</sup> )       |       |       | 1.627E+09 |          |
| 耐力特性(充填モルタルの効果を無視)                |       |       |           |          |
| フランジの座屈応力度(N/mm <sup>2</sup> )    | -     | -     | -         | -        |
| 腹板の座屈応力度(N/mm <sup>2</sup> )      | -     | -     | -         | 184      |
| 腹板座屈時曲げモーメント(kN・m)                | -     | -     | -         | 899      |
| 腹板座屈時曲率(1/m)                      | -     | -     | -         | 0.002679 |
| 降伏曲げモーメント M <sub>y</sub> (kN・m)   |       |       | 1,793     |          |
| 降伏時曲率 φ <sub>y</sub> (1/m)        |       |       | 0.005068  |          |
| 全塑性曲げモーメント M <sub>p</sub> (kN・m)  |       |       | 2,068     |          |
| 耐力特性(充填モルタルの効果を考慮)                |       |       |           |          |
| 全塑性曲げモーメント M <sub>pc</sub> (kN・m) | 2,068 | 2,241 | 2,252     | 2,256    |

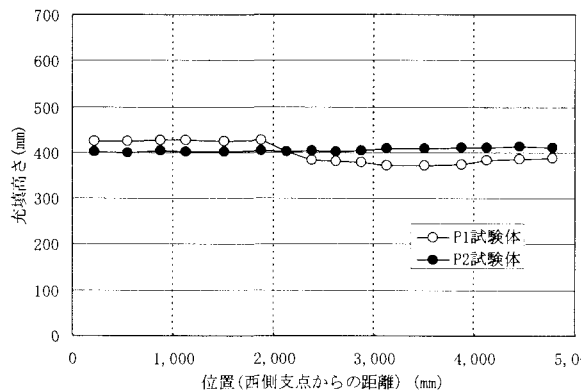


図-6 モルタル充填高さ状況 (P1, P2 試験体)

6に示す。図中の「充填高さ」は圧縮フランジ内面からモルタル表面までの高さを示しており、充填高さ 350mmが設計値である。また、「位置 (西側支点からの距離)」で、2,000mm～3,000mm区間が試験対象区間である。実際の充填作業では、モルタル表面のレイタンス除去ができないことなどから表面部は密実なモルタルが得られない可能性が高いため、十分な充填高さが得られるように配慮した。図より、充填高さは、最小値でも 373mm (P1試験体)、平均で約 400mmとなり、試験実施において問題がないことを確認した。

試験体に使用した鋼材の引張試験結果を、表-2 (b) に示す。これらの材料試験結果を用いて、試験体諸元の算出を行った。鋼材については、板厚および構造寸法については、公称値もし

くは設計値を用いた。降伏点および弾性係数は、材料試験結果の各板厚別の平均値を用いた。なお、降伏点は、鋼材引張試験結果の下降伏点を用いた。充填モルタルについては、各試験体の載荷日に実施した材料試験結果を用いた。試験体諸元および耐力特性値を、表-3に示す。表中の「引張フランジ幅」は、本来 360mmであるが試験部に配置されたモルタル充填時の空気抜き孔 (φ 50mm) を考慮した等価幅として 310mmとして以下の計算を行っている。また、「座屈応力度」は道示に示された弾性座屈応力度を示し、算出結果が降伏点以下となった場合のみ数値を示している。

### 3. 試験結果

#### 3.1 載荷概要

B試験体の載荷では、最大曲げモーメント 1,829kN・m、そのときの試験部曲率は 0.02100 1/m、支間中央変位 32.5mmとなった。載荷は、最大荷重を迎えた後、支間中央部の圧縮フランジおよび圧縮側腹板に大きな面外変形が発生した。荷重が減少しながらも曲率は増大を続け、支間中央変位が 195mmに達した時点で計測限界に達し、除荷し載荷を終了した。除荷時には相当な面外変形が発生していたにもかかわらず、鋼板および溶接部に割れは全く見られなかった (写真-1)。

F1 試験体の載荷では、最大曲げモーメント 2,567kN・m、そのときの試験部曲率 0.1670 1/m、支間中央変位 222.4mm に達

表-4 試験結果一覧

|       | 鋼材降伏時             |                |                     |                      | 最大荷重時             |                |                     |                      |
|-------|-------------------|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|----------------|---------------------|----------------------|
|       | 作用曲げモーメント         |                | 曲率                  |                      | 作用曲げモーメント         |                | 曲率                  |                      |
|       | $M_{\max}$ (kN・m) | $M_{\max}/M_Y$ | $\phi_{\max}$ (1/m) | $\phi_{\max}/\phi_Y$ | $M_{\max}$ (kN・m) | $M_{\max}/M_Y$ | $\phi_{\max}$ (1/m) | $\phi_{\max}/\phi_Y$ |
| B試験体  | 1532.8            | 0.85           | 0.0061              | 1.20                 | 1828.8            | 1.02           | 0.0210              | 4.14                 |
| F1試験体 | 1561.2            | 0.87           | 0.0052              | 1.03                 | 2566.8            | 1.43           | 0.1700              | 33.54                |
| P1試験体 | 1682.8            | 0.94           | 0.0053              | 1.04                 | 2291.1            | 1.28           | 0.1371              | 27.04                |
| P2試験体 | 1581.5            | 0.88           | 0.0051              | 1.00                 | 2234.3            | 1.25           | 0.0754              | 14.89                |

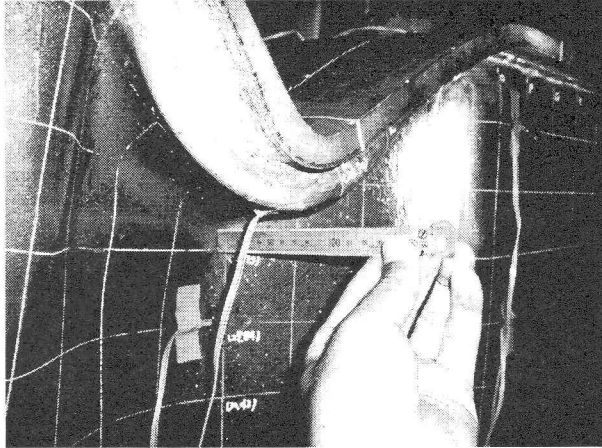


写真-1 試験終了時北面腹板 (B試験体)

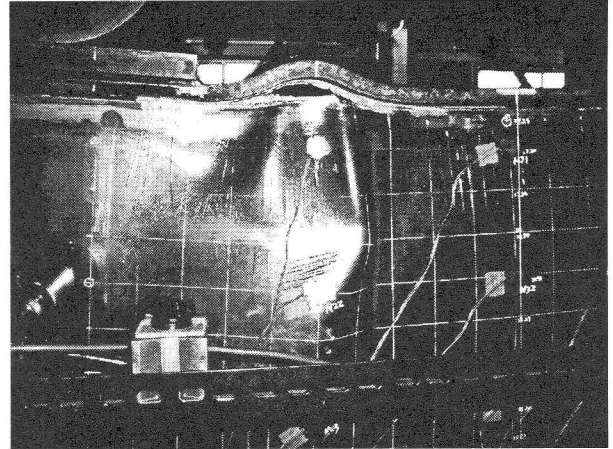


写真-2 試験終了時北面腹板 (P1試験体)

した。この後、支間中央変位で約 4mm 載荷変位を増大させた時点で、載荷装置のストロークが限界に達し、そのままでの載荷継続が不可能となったため、試験を終了した。なお、載荷終了時点での載荷曲げモーメントは 2,555kN・m であった。

P1試験体の載荷では、最大曲げモーメント 2,291kN・m、そのときの試験部曲率 0.1371 1/m、支間中央変位 130.6mm に達した後、荷重が緩やかに減少しながらも曲率は増大を続け、支間中央変位が 155mm に達した後さらに載荷を進めたところ、試験部中央部の圧縮フランジと腹板の溶接が破断し荷重が急激に低下し、試験を終了した。試験終了時のき裂長さは、南面は 200mm 程度、北面は 150mm 程度であった (写真-2)。

P2試験体の載荷では、最大曲げモーメント 2,234kN・m、そのときの試験部曲率 0.0754 1/m、支間中央変位 113.9mm に達した後、支間中央変位が 120mm に達した後さらに載荷を進めたところ、試験部中央部の圧縮フランジと腹板の溶接が破断し荷重が急激に低下し、試験を終了した。試験終了時のき裂長さは、南面は 180mm 程度、北面は破断なしであった。なお、作用曲げモーメント 2,101kN・m、支間中央変位 57.79mm、試験部曲率 0.05593 1/m 付近で、突然大きな音を立てて北面腹板に面外変形が発生した。載荷により鋼コンクリート間の付着が小さくなっていたために、鋼板単独の座屈現象が発生したものと考えられる。これまでの試験体では、徐々に面外変形が発生しており、他の試験体にはない現象であった。

### 3.2 作用曲げモーメント-曲率関係

計測された最大作用曲げモーメントとそのときの曲率の一覧を表-4に示す。表中の $M_Y$ 、 $\phi_Y$ は、表-3に示した、B試験体の材料試験結果を用いて算出した降伏曲げモーメントおよび降伏時曲率を示す。また、作用曲げモーメント-曲率関係を図-7に示す。図中、一点鎖線で示しているのは、表-3で示した、B試験体の材料試験結果を用いて算出した全塑性曲げモーメント

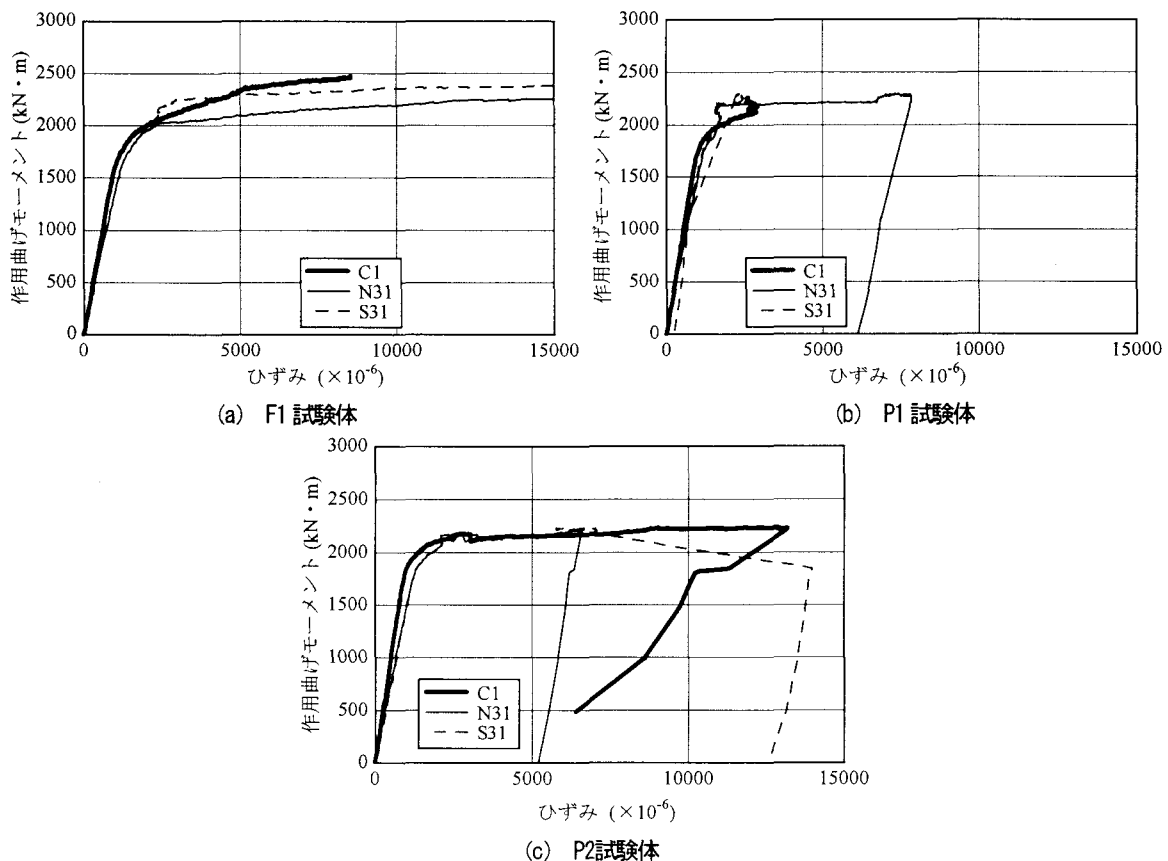
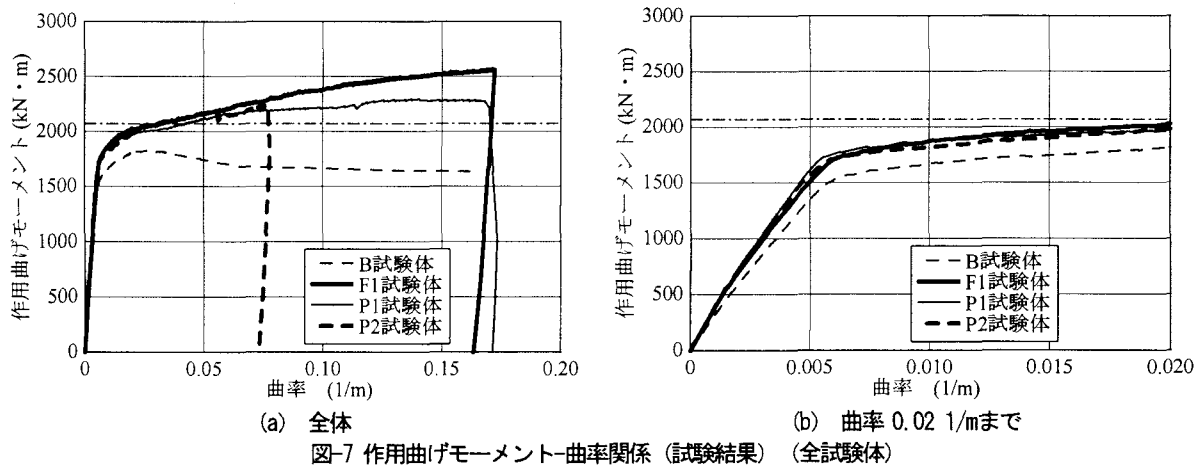
( $M_p=2,068\text{kN}\cdot\text{m}$ ) である。

図および表より、以下のことが言える。F1試験体は、B試験体と比較して、最大曲げモーメントが40%程度増加し、最大曲げモーメント時曲率は約8倍となり、耐荷性能、面外曲げ変形性能が大幅に増加している。

P1試験体は、初期勾配についてはF1試験体とほぼ同様の挙動を示し、鋼断面のみを考慮した場合の全塑性曲げモーメント程度以降ではF1試験体ほどの耐力増加は見られないが安定した挙動を示す。このことから、圧縮側のみモルタルを充填することにより、鋼材面外変形抑制効果は期待できるものの、充填モルタルの拘束が十分でないため耐力増加は限定されたものとなると考えられる。

P2試験体は、概ねP1試験体と同様の挙動を示し、最大曲げモーメントもほとんど変わらない。しかし、最大曲げモーメント時曲率は、P1試験体の約55%となっており、補鋼材省略の影響が大きいと考えられる。また、P2試験体は、腹板の面外変形が音を立てて急激に進展した。これらのことから、補鋼材を省略することにより、耐荷性能に対する影響は少ないが、面外曲げ変形性能に対する影響は大きいと考えられる。しかし、P2試験体の最大曲げモーメント時曲率はB試験体の3倍程度もあり、本構造を上部工に適用することを考慮すると、十分な面内曲げ変形性能であると考えられる。

モルタルを充填した試験体の、モルタル埋め込みゲージ (支間中央、圧縮フランジより50mm) と同じ位置の鋼板腹板外面に貼付したひずみゲージとの比較を図-8に示す。図中、「C1」がモルタル埋め込みゲージ、「N31」、「S31」がそれぞれ腹板北面および南面の鋼材表面ゲージを示す。図より、すべての試験体で、作用曲げモーメントが2,000kN・m程度、計測ひずみで1,800~2,000  $\mu$  程度までは鋼板ひずみゲージと埋め込みゲージがほぼ同じ挙動を示しており、圧縮縁近傍では合成断面として挙動していることがわかる。また、F1、P2試験体では、鋼



材降伏および面外変形発生以降にも圧縮ひずみが増加しており、モルタルと鋼板の付着だけでなく、ダイヤフラム等による拘束によっても応力が伝達されていると考えられる。P1試験体は、面外変形発生頃でモルタル埋め込みゲージのひずみ増加が止まっている。この原因は種々想定できるが、特定できていない。

#### 4. 断面分割法を用いた解析による試験体耐力の評価

##### 4.1 解析条件

試験体の曲げ挙動を、試験体の断面性能をM- $\phi$ 関係として断面分割法により解析する。M- $\phi$ 関係を算出するための断面の分割数は、上下フランジをそれぞれ10分割とし、腹板を160分割とした。解析に使用する応力-ひずみ関係は以下の2通りを

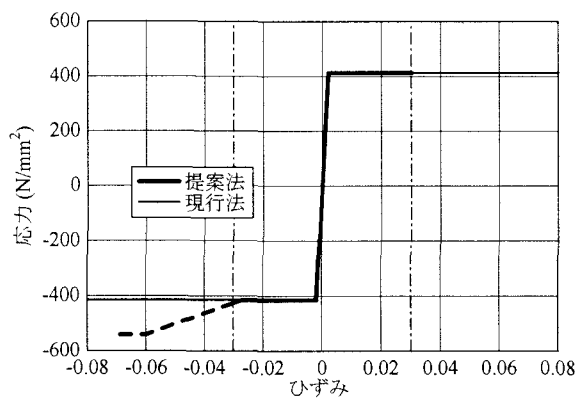
考えた。なお、解析では圧縮側を正としている。

- 1) 現行手法として文献6)に準拠したもの(現行法)  
鋼材の応力-ひずみ関係

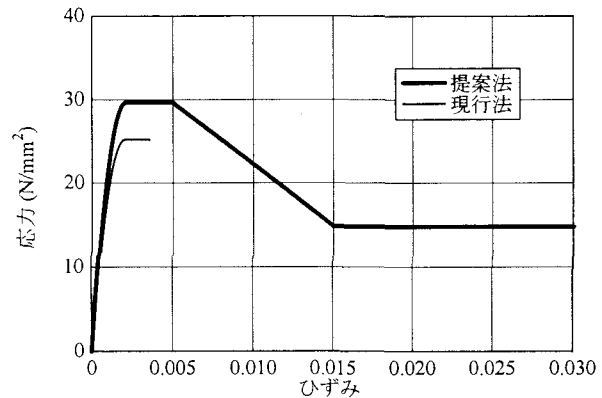
$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_y & : \sigma_y / E < \varepsilon \\ E\varepsilon & : -\sigma_y / E \leq \varepsilon \leq \sigma_y / E \\ -\sigma_y & : \varepsilon < -\sigma_y / E \end{cases} \quad (1)$$

コンクリートの応力-ひずみ関係

$$f_c = \begin{cases} k_1 f'_{ck} \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \left( 2 - \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \right) & : 0 \leq \varepsilon'_c \leq 0.002 \\ k_1 f'_{ck} & : 0.002 < \varepsilon'_c \leq \varepsilon'_{cu} \end{cases} \quad (2)$$



(a) 鋼材



(b) コンクリート

図-9 応力-ひずみ関係 (現行法および提案法)

表-5 試験および解析結果一覧

|           | 鋼材降伏時            |               |                    |                     | 最大荷重時            |               |                    |                     |
|-----------|------------------|---------------|--------------------|---------------------|------------------|---------------|--------------------|---------------------|
|           | 作用曲げモーメント        |               | 曲率                 |                     | 作用曲げモーメント        |               | 曲率                 |                     |
|           | $M_{max}$ (kN・m) | $M_{max}/M_Y$ | $\phi_{max}$ (1/m) | $\phi_{max}/\phi_Y$ | $M_{max}$ (kN・m) | $M_{max}/M_Y$ | $\phi_{max}$ (1/m) | $\phi_{max}/\phi_Y$ |
| B試験体      | 1532.8           | 0.85          | 0.0061             | 1.20                | 1828.8           | 1.02          | 0.0210             | 4.14                |
| F1試験体     | 1561.2           | 0.87          | 0.0052             | 1.03                | 2566.8           | 1.43          | 0.1700             | 33.54               |
| P1試験体     | 1682.8           | 0.94          | 0.0053             | 1.04                | 2291.1           | 1.28          | 0.1371             | 27.04               |
| P2試験体     | 1581.5           | 0.88          | 0.0051             | 1.00                | 2234.3           | 1.25          | 0.0754             | 14.89               |
| Fiber(B)  | 1780.4           | 0.99          | 0.0051             | 1.00                | 2070.8           | 1.15          | 0.0711             | 14.03               |
| Fiber(F1) | 1766.2           | 0.99          | 0.0043             | 0.85                | 2559.6           | 1.43          | 0.1315             | 25.94               |
| Fiber(C)  | 1764.7           | 0.98          | 0.0044             | 0.86                | 2226.0           | 1.24          | 0.0208             | 4.10                |

ここで,  $k_1 = 1 - 0.003 f'_{ck} \leq 0.85$

$$\epsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30,000} \quad 0.0025 \leq \epsilon'_{cu} \leq 0.0035$$

- 2) 文献3) を参考に今回新たに設定したもの (提案法)  
鋼材の応力-ひずみ関係

$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_Y & : \sigma_Y / E < \epsilon \\ E\epsilon & : -\sigma_Y / E \leq \epsilon \leq \sigma_Y / E \\ -\sigma_Y & : -\epsilon_{YE} \leq \epsilon < -\sigma_Y / E \\ -\sigma_Y - \frac{\sigma_U - \sigma_Y}{\epsilon_U - \epsilon_{YE}} (-\epsilon - \epsilon_{YE}) & : -\epsilon_U < \epsilon < -\epsilon_{YE} \\ -\sigma_U & : \epsilon \leq -\epsilon_U \end{cases} \quad (3)$$

コンクリートの応力-ひずみ関係

$$f_c = \begin{cases} f'_{ck} \frac{\epsilon}{0.002} \left( 2 - \frac{\epsilon}{0.002} \right) & : 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{B1} \\ f'_{ck} & : \epsilon_{B1} < \epsilon < \epsilon_{B2} \\ f'_{ck} - \frac{0.5 f'_{ck}}{(\epsilon_{B3} - \epsilon_{B2})} (\epsilon - \epsilon_{B2}) & : \epsilon_{B2} \leq \epsilon \leq \epsilon_{B3} \\ 0.5 f'_{ck} & : \epsilon_{B3} < \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

ここで,  $\epsilon_{B1} = 0.00012 \sqrt{f'_{ck}} \times 10$

$$\epsilon_{B2} = 0.005$$

$$\epsilon_{B3} = 0.015$$

応力-ひずみ関係の材料特性値は, 鋼板およびモルタルの材料試験結果より, 試験体毎に決定した. 提案法の鋼材とコンクリートの応力-ひずみ関係には, 限界ひずみが存在しない. そこで, 終局状態の判定は, 実験結果と合わせるように試算し,

コンクリートの圧縮ひずみが限界ひずみ 0.03に達した時点とした. また, 鋼断面のみの場合は, コンクリートの限界ひずみと同程度として, 鋼材の降伏ひずみの 15倍を終局ひずみとした. 一例として, F1試験体の応力-ひずみ関係 (鋼材は板厚 4.5mmのみ) を図化すると, 図-9のようになる. (a) 鋼材の図中の一点鎖線は, 提案法での限界ひずみ ( $\pm 15 \epsilon_Y$ ,  $\epsilon_Y$ : 降伏ひずみ) を示す.

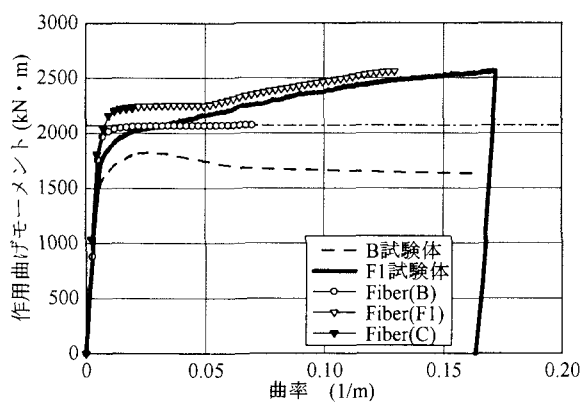
なお, 水平補剛材および垂直補剛材は鋼有効断面に考慮していない. また, コンクリートの引張応力は考慮していないので, 解析上は, F1試験体, P1試験体, P2試験体はまったく同じ計算モデルとなり, 充填モルタルの材料特性のみが異なる. 解析結果にほとんど差がなかったため, 本報告では, F1, P1, P2試験体を代表し, F1試験体の解析結果を用いることとした.

#### 4.2 解析結果と試験結果の比較

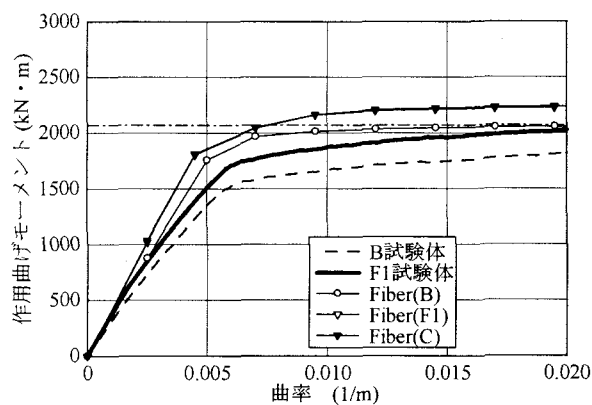
試験および解析結果での最大曲げモーメントおよび最大曲げモーメント作用時の曲率の一覧を表-5に示す. また, 曲げモーメント-曲率関係を図-10および図-11に示す.

図中および表中の「Fiber (B)」は提案法を用いたB試験体の解析結果を, 「Fiber (F1)」は提案法を用いたF1試験体の解析結果をそれぞれ示す. また, 「Fiber (C)」は現行法によるF1試験体の解析結果を示す. なお, 表中の「 $M_Y$ 」, 「 $\phi_Y$ 」は, 表-3に示した, B試験体の材料試験結果を用いて算出した降伏曲げモーメントおよび降伏時曲率を示す.

図および表より, 鋼製B試験体の終局時は局部座屈が支配的であり, 解析モデルではこれを考慮していないため, 解析値が実験値を上回る. コンクリート充填F1試験体では, 鋼材降伏後に差異が見られるが, 大変形時の挙動はよく一致している. また, 提案法による解析と現行法による解析は, 曲げモーメン

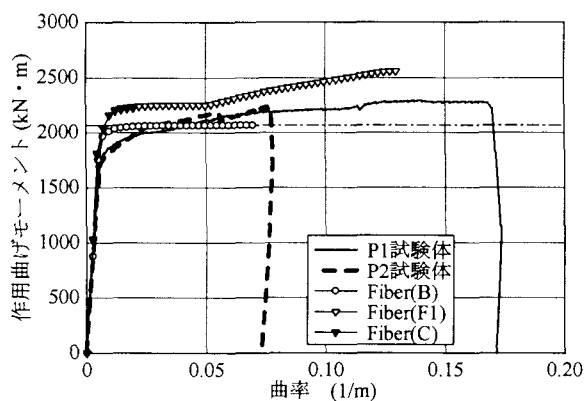


(a) 全体

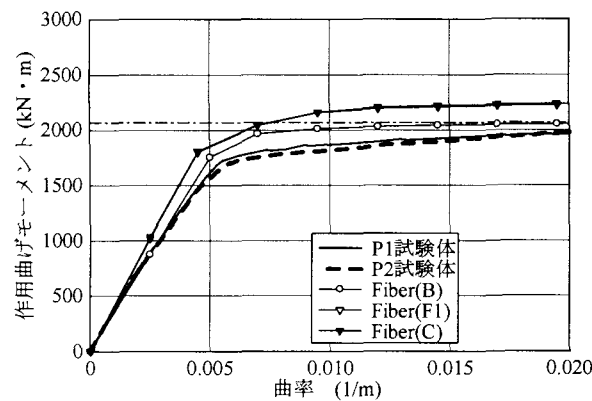


(b) 曲率 0.02 1/mまで

図-10 曲げモーメント-曲率関係 (B, F1試験体と解析結果の比較)



(a) 全体



(b) 曲率 0.02 1/mまで

図-11 曲げモーメント-曲率関係 (P1, P2試験体と解析結果の比較)

ト-曲率関係の経路はほとんど同じで、大変形時の挙動と終局の判定に差があるのみである。P1, P2試験体の試験結果と現行法による解析結果は、終局時曲率は合わないが、最大荷重は良く合う。

以上より、今回実施したF1, P1, P2試験体については、現行法を用いて曲げ耐荷力を評価することは可能である。しかし、面内曲げ変形性能については、現行法で評価することは難しく、提案法が優っている。

## 5. まとめ

コンクリートを充填した鋼細鋼管桁を提案し、その曲げ耐荷特性を確認するために、単調静的曲げ載荷試験を実施した。試験結果より以下のことが言える。

- 1) 鋼細鋼管桁にモルタルを充填することにより、充填しない場合に比べて最大曲げモーメントは40%程度増加した。また、最大荷重時曲率は、8倍程度にもなった。
- 2) 充填高さを腹板高さの1/2とすることにより、腹板高さまで充填した場合に比べて最大曲げモーメントは10%程度低下した。また、最大荷重時曲率は、20%程度減少した。
- 3) 充填高さを腹板高さの1/2の試験体で、腹板補剛材を省略すると、腹板補剛材を省略しない場合に比べて最大曲げモーメントはほとんど変わらないが、最大荷重時曲率が45%

程度低下した。

- 4) 充填高さ、腹板補剛材の有無に関わらず、圧縮縁近傍では充填モルタルに有効に力が伝達されていた。
- 5) 今回設定した応力-ひずみ関係を用いた断面分割法による解析により、試験での最大荷重までの挙動をシミュレートすることができた。

## [参考文献]

- 1) 新しい鋼橋の設計編集委員会：新しい鋼橋の設計，山海堂，2002.12
- 2) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計（2）応用編設計編，丸善，1999.4，pp.22
- 3) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，1997.10，pp.59-61
- 4) 保坂鐵矢，加藤順，小林素一：コンクリート充填鋼管連続合成・複合橋梁の研究とその実用化 北陸新幹線・北陸道架道橋の例，橋梁と基礎，2002.1
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編，2002.3
- 6) 土木学会：複合構造物の性能照査指針（案），丸善，2002.2

(2004年9月17日受付)