

# コンクリート補剛蝶型鋼板ウェブのせん断耐力に関する実験的研究

## Experimental Study on the Shear Strength of Butterfly Shaped Steel Webs Stiffened with Concrete

高木 康宏 YASUHIRO TAKAKI

浅井 洋 HIROSHI ASAI

PC 設計部 中積 健一 KEN-ICHI NAKATSUMI

PC 設計部 片 健一 KEN-ICHI KATA

蝶型鋼板をウェブに用いるバタフライウェブ橋の実用化に向けて、ウェブ切り出しモデルによるせん断実験を行った。その結果、圧縮力を負担する部分をコンクリートで補剛することにより座屈が抑制され、耐力が向上することを検証した。また、そのせん断耐力を非線形 FEM 解析により評価できることを示した。

キーワード：PC 鋼複合構造橋，蝶型鋼板ウェブ，コンクリート補剛，せん断耐力，座屈

The authors are promoting the development of a new type of PC-Steel composite bridge with the steel plate webs in a butterfly shape. In order to confirm the effect on the stiffness of the web reinforced with concrete, a number of shear experiments on large-scale web models were carried out. These experiments confirmed that the concrete cast in the compression zone of the steel web shared the compression stress, there was a reduction in the tendency of the plate to buckle, and the shear strength of the web was improved. Furthermore, it was confirmed that the shear properties of the webs could be evaluated with a nonlinear FEM analysis.

**Key Words** : PC-Steel Composite Bridge, Butterfly Shaped Steel Web, Stiffening Concrete, Shear Strength, Buckling

### 1. はじめに

近年、PC 橋分野において、鋼とコンクリートの異種材料を組み合わせた複合構造橋梁の施工実績が増大している。複合構造とすることにより、各材料の利点を活かすことができ、軽量化といったより合理的な構造形式となることから、より経済的な橋梁建設を可能としている<sup>1)</sup>。特に、施工実績が多い複合構造橋梁としては、新開橋<sup>2)</sup>をはじめとする波形鋼板ウェブを使用した PC 箱桁橋が挙げられる。

複合構造の製作、施工上の課題として、鋼板加工技術や架設時の溶接などが挙げられるが、これらに関して、製作の簡略化および施工の省力化を行うことによって、さらなる建設費の削減が可能になると考えられる。そこで、建設費の削減を図るため、鋼板加工の簡略化および施工の省力化に着目して、蝶型鋼板をウェブに用いる「バタフライウェブ橋」が考案された<sup>3)</sup>。本橋は、鋼板の加工を極力低減し、架設時の鋼板溶接を不要とした新しい鋼コンクリート複合構造である。

今回考案されたような鋼板をウェブに用いる構造の場合、設計上の課題の一つとして鋼板のせん断座屈耐力が挙げられる。これは、本構造においても実用化に向けて

解決すべき課題であるため、せん断実験によってその破壊形態、耐力およびその耐力の評価方法を検討しておく必要がある。そこで、本稿では、まず、「バタフライウェブ橋」の構造およびその実用化に向けての課題を整理し、次に蝶型鋼板ウェブ切り出しモデルを用いたせん断耐力

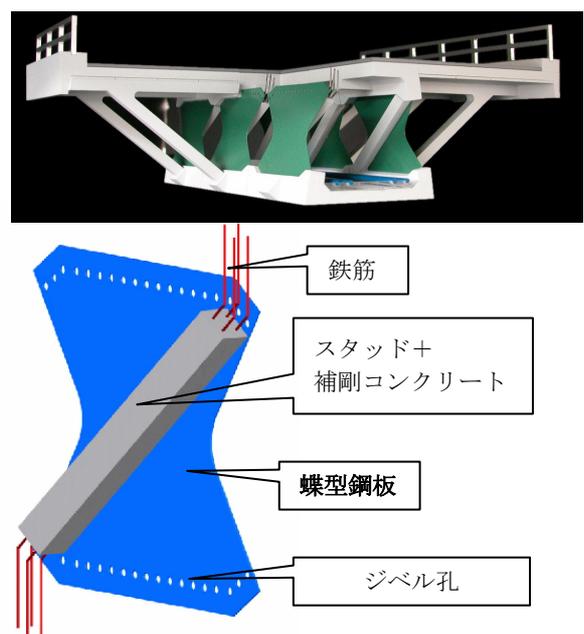


図-1 バタフライウェブ橋の構造

確認実験および非線形 FEM 解析によって確認した破壊形態とそのせん断耐力について報告するものである。

## 2. バタフライウェブ橋の構造および課題

図-1 に示すように、バタフライウェブは蝶型に切断した鋼板と斜め方向の補剛コンクリートを一体化させた構造である。以下にその構造について整理する。

- ① ウェブ部材となる鋼板を連続化せずにパネルごとに独立させる。
- ② せん断力により鋼板面内に発生する圧縮力と引張力の方向を限定させ、ダブルワーレントラス構造に類似した挙動を示す。両者の作用力に対して負担が少ない部分を切断することにより、鋼板形状を蝶型としている。
- ③ 圧縮力作用方向にスタッドを配置してコンクリート斜材と一体化させ補剛することにより、座屈などによる鋼板の面外変形を抑制し、耐力を向上させる。床版と補剛コンクリートは鉄筋によって一体化させる。
- ④ 鋼板の折り曲げ加工および架設時の溶接作業が不要となる。また、バタフライウェブと床版との接合は、パーフォボンドリブとし、鋼板上下縁に孔を設けるのみであり、作業が簡略化される。鋼板加工の簡素化および形状の単純化はその後の製作精度管理の簡素化にもつながる。

一方、本構造には実用化に向けて、以下のような解決すべき設計上の課題があると考えられる。

- ① 鋼板と補剛コンクリートの一体性の確保およびせん断耐力：バタフライウェブ自体の設計手法を確

立するために、鋼板と補剛コンクリートの一体性、補剛によるせん断耐力の向上を確認するとともに、そのせん断耐力の算定方法を確立する必要がある。

- ② 各パネル間の接合部における床版コンクリートせん断耐力：ウェブ部材が不連続であるため、各パネル間のコンクリート床版のみがせん断力を負担することになる。特に、補剛コンクリートがウェブ片面配置のため、補剛コンクリートからの圧縮力が床版に偏心して作用することで複雑な応力状態となるうえに、終局荷重作用時には圧縮側の床版のみがせん断力を負担することになる。

以上のように、二つの設計上の課題が挙げられるが、今回、課題①の鋼板と補剛コンクリートの一体性の確保およびせん断耐力を確認する目的で、ウェブ切り出しモデルを用いた要素実験を実施した。

## 3. 実験概要

### (1) 実験対象

供試体の計画を行うに当たり、まず、図-2 に示すように蝶型鋼板ウェブを用いた支間長 40m 程度の PC 箱桁橋を想定した。実験では、実橋規模モデルの中で最大せん断力が作用するバタフライウェブ部の断面を検討断面とした。実橋における鋼板の鋼種は SM490、厚さは 16mm とした。

### (2) 供試体

図-3 に示すように鋼板 1 パネル分を供試体とした。供試体は想定橋梁の 1/2 縮尺モデルである。本実験では、補剛コンクリート（斜材）の有無および方向による比較

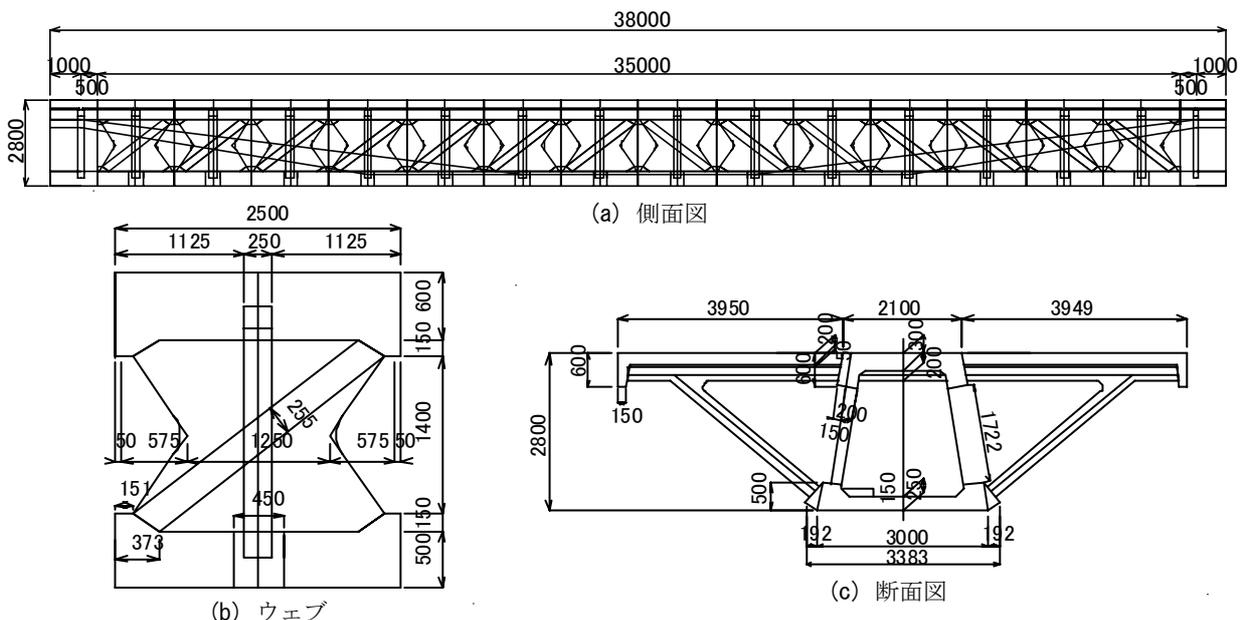


図-2 実験対象とした実橋モデル

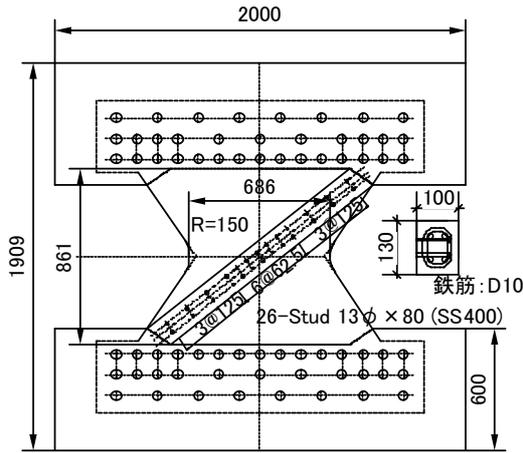


図-3 供試体寸法 (case2)

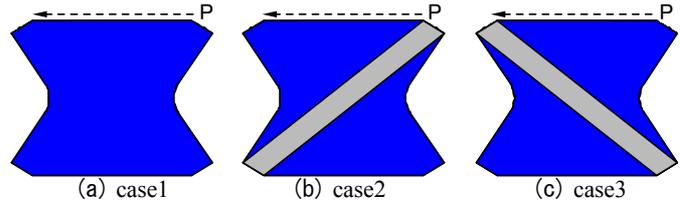


図-4 供試体

表-1 コンクリートの材料試験結果

| case | 斜材方向        | 部位 | 圧縮強度<br>N/mm <sup>2</sup> | 引張強度<br>N/mm <sup>2</sup> | 弾性係数<br>kN/mm <sup>2</sup> |
|------|-------------|----|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1    | なし          | 床版 | 56.9                      | 2.95                      | 31.0                       |
| 2    | 圧縮力<br>作用方向 | 床版 | 50.7                      | 2.78                      | 28.9                       |
|      |             | 斜材 | 75.8                      | 3.31                      | 33.9                       |
| 3    | 引張力<br>作用方向 | 床版 | 58.2                      | 3.25                      | 32.9                       |
|      |             | 斜材 | 80.4                      | 3.60                      | 35.9                       |

表-2 鋼材の材料試験結果

|      | 鋼種<br>記号 | 厚・径<br>mm | 降伏強度<br>N/mm <sup>2</sup> | 引張強度<br>N/mm <sup>2</sup> | 弾性係数<br>kN/mm <sup>2</sup> |
|------|----------|-----------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 蝶型鋼板 | SS400    | 8         | 285                       | 449                       | 213                        |
| 斜材鉄筋 | SD345    | 10        | 387                       | 529                       | 188                        |
| 床版鉄筋 | SD345    | 16        | 398                       | 588                       | 189                        |
|      | SD345    | 19        | 391                       | 550                       | 186                        |

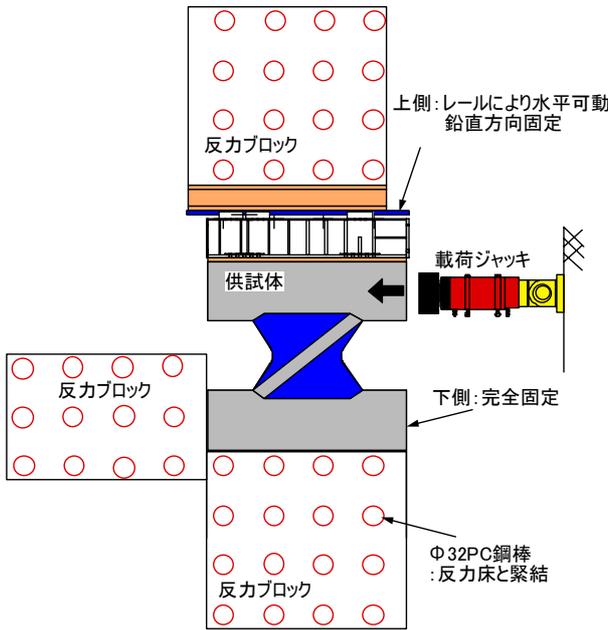


図-5 実験方法

実験を行い、補剛コンクリートのせん断耐力の向上と座屈等の面外変形抑制に対する効果について確認することを目的とした。

図-4 に示すように、供試体は case1 として鋼板のみの供試体、case2 として斜材方向を圧縮力作用方向とした供試体、case3 として斜材方向を引張力作用方向とした試験体である。蝶型形状の加工に関して、FEM 解析により中央部縁端に発生する局部応力をできるだけ小さくするように決定し、鋼板中央部の縦横比  $b/h$  を  $686/861=0.80$  とした。斜材断面を  $130\text{mm} \times 100\text{mm}$  とし、スタッドは斜材上下 1/4 区間で 1.6%、中央部で 2.9% とした。また、斜材軸方向鉄筋比を 2.2%、帯鉄筋比を斜材上下 1/4 で 0.15%、中央部で 0.20% 配置した。また、図-5 に示すように供試体の周辺に反カブロックを設置し、供試体上下端とも面外方向および鉛直方向を固定した。上側床版にはレールにより橋軸方向のみ可動とした。荷重ジャッキを用いて

供試体上側床版を水平に荷重した。

本実験では鋼板の挙動について確認するため、床版が鋼板破壊時まで剛体として挙動するように対象実橋より剛性を大きく設定した。表-1 にコンクリートの材料試験結果を、表-2 に鋼材の材料試験結果を示す。

#### 4. 実験結果

図-5 に荷重-水平変位の関係、図-6 に面外方向変位、図-7 に鋼板ひずみを示す。面外方向変位は供試体のうち最大となる点を、鋼板ひずみは面外変形最大点と面内せん断力が最大となる鋼板中央の値である。鋼板降伏ひずみは  $1,460\mu$  である。

鋼板のみの case1 では、約 800kN から荷重一定のまま水平変位のみが増大した。面外方向変位に関して、300kN ~ 400kN で勾配が変化し始め、400kN ~ 600kN において①位置では写真-1 で下側に、②位置ではその反対側に急激に変形しており、座屈が生じていると考えられる。また、図-8 より①位置では約 600kN で、その後約 800kN で③位置が降伏に至った。そのため、それ以降の荷重の増大はなく、変位のみ増大したと言える。このように、斜材を配置しない場合には、①および②位置において座

屈が生じ、鋼板の降伏は鋼板中央より①、②位置が先行していると考えられる。最終的に case1 の最大荷重は 866kN であった。

case2 では、圧縮力作用方向に斜材を有することにより、載荷方向の水平変位が抑制されていることが確認される。また、面外変位に関して case1 とは大きく異なり、最大荷重に至るまで微小なままであった。さらに、鋼板の降伏順序も case1 と異なり、③位置が約 1,000kN 時に、その後、①位置が約 1,400kN 時であった。最終的に、鋼板が降伏することにより、水平変位に非線形挙動が確認されはじめ、1,657kN 時に斜材の一部が圧縮破壊することで荷重が低下した。最大荷重は case1 と比較して約 1.9 倍にまで達した。この時点において、補剛コンクリートは鋼板から剥離していなかった。以上のことから、圧縮力作用方向に一体性が確保された補剛コンクリートを配置することにより、鋼板の面外変位および座屈を抑制し、耐力を向上させることが可能であることが確認された。

引張力作用方向に斜材を有する case3 の水平変位は、case1 とほぼ同等であり、変位の抑制効果はわずかであった。また、面外方向変位は、600~800kN まで微小であったが、①と③位置が約 800kN で同時に降伏することによ

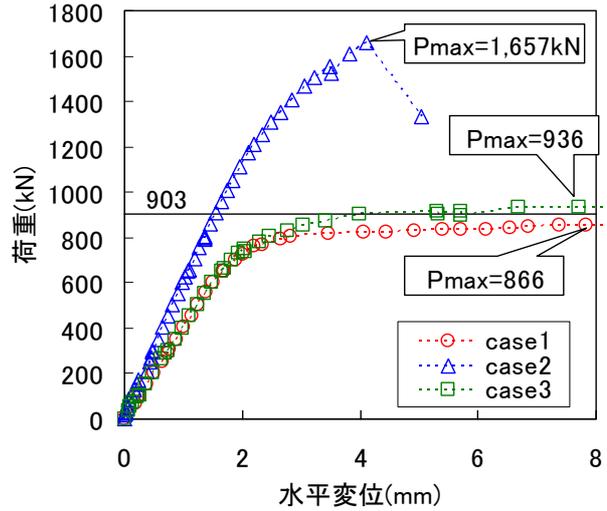


図-6 荷重-水平変位関係

り急激に増大し、case1 と同様に座屈に至った。最終的に最大荷重は 936kN に達し、case2 と比較して補剛効果は小さかったものの、case1 の最大荷重に対する増加率は 1.08 倍とわずかながら増大した。

ここで、座屈が生じなければ、鋼材のせん断降伏強度  $\tau_y$  は鋼材の降伏強度  $\sigma_y$  から式(1)<sup>4)</sup>のように表される。

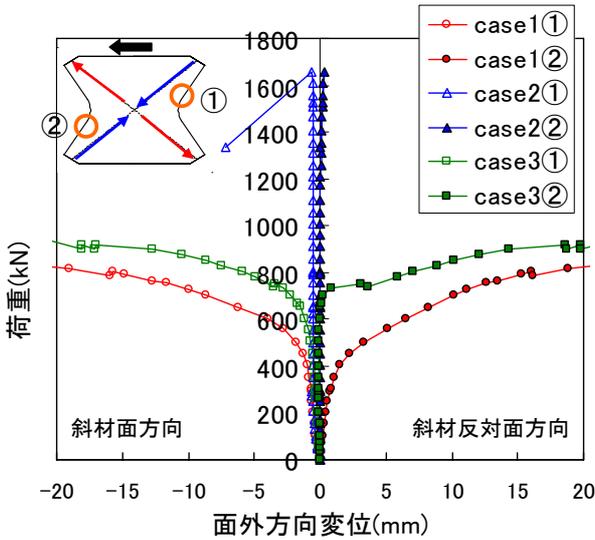


図-7 荷重-面外方向変位関係

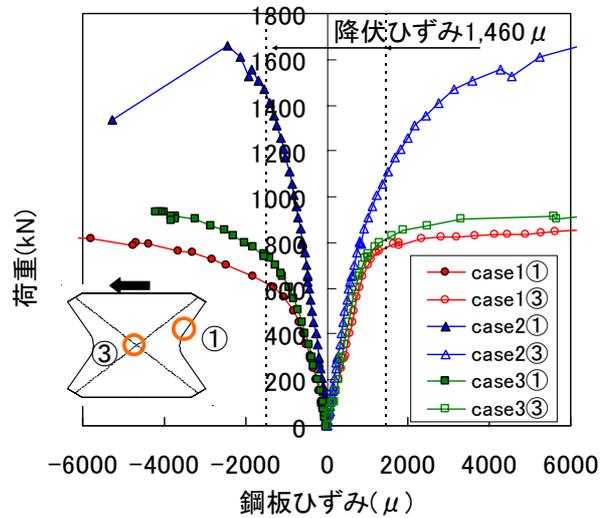


図-8 荷重-鋼板ひずみ関係

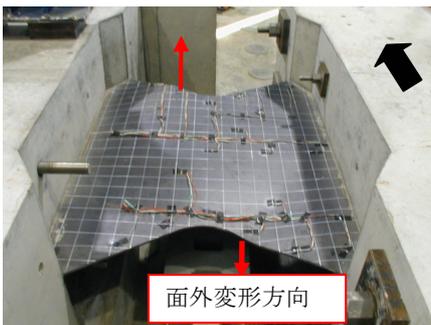


写真-1 case1 終局時状況

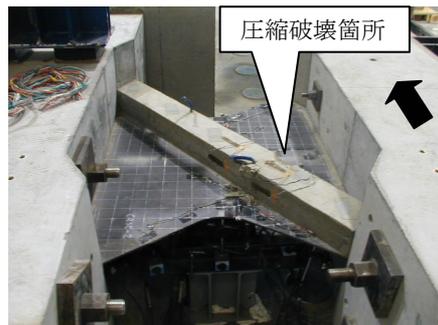


写真-2 case2 終局時状況

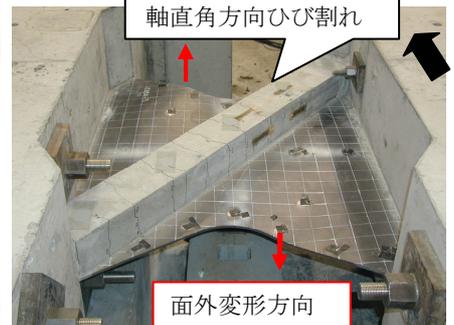


写真-3 case3 終局時状況

$$\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3} \quad (1)$$

また、その時の荷重は板厚  $t$ 、鋼板中央部の最小幅  $w$  を用いて次式で表される。

$$P_y = \tau_y \cdot t \cdot w \quad (2)$$

よって、本鋼板がせん断降伏に達する時の荷重は、 $285(\text{N}/\text{mm}^2) / \sqrt{3} \times 8\text{mm} \times 686\text{mm} = 903\text{kN}$  と算出される。実験結果より、case1 は座屈が生じているためこの値を下回ったものと考えられる。一方、case2 では 903kN 時には鋼板の降伏が生じておらず、鋼板が幅方向全域にわたり降伏する荷重はこの値を上回った。補剛コンクリートによって面外方向変位を抑制し、また、圧縮側の抵抗断面が大きくなることで、鋼板の座屈が抑制され、この値を大きく上回っていると判断できる。また、case3 では、座屈を完全に抑制することができなかったものの、斜材軸方向鉄筋が引張力に対して抵抗し、また、補剛コンクリートによる変形の拘束により、わずかであるが荷重が増大してせん断降伏耐力の計算値を上回っている。

以上より、圧縮力作用方向をコンクリートで補剛された蝶型鋼板は、鋼板端部の降伏が中央部に先行して生じることなく、せん断応力が最も大きくなる鋼板中央部から降伏が進行し、せん断耐力の向上を図ることが可能であることが確認された。また、引張力作用方向においても、せん断耐力の向上は確認され、その耐力は座屈による影響を考慮せず鋼板の最小幅部の寸法と降伏応力度を用いて算出した値 ( $\sigma_y / \sqrt{3} \times$  厚さ  $\times$  最小幅  $= 903\text{kN}$ ) を多少上回ることが確認された。

## 5. 解析概要

### (1) 解析モデル

図-9 に解析モデル、図-10, 11 にコンクリートおよび鋼材の材料構成則を示す。解析モデルは、鋼板と補剛コンクリートのみモデル化し、上縁は水平方向を可動、下縁は完全固定とした。鋼板を曲面シェル要素、コンクリートはソリッド要素、斜材軸方向鉄筋はトラス要素でモデル化した。コンクリートと鋼板は完全剛結とした。初期不整を初期変形量として面外方向に与え、その値は道路橋示方書 II<sup>5)</sup>に基づき、部材精度の許容誤差である  $h/250 = 861/250 = 3\text{mm}$  とした。コンクリート材料のモデル化には材料試験結果を使用した。コンクリートの一軸圧縮モデルは圧縮強度到達時のひずみを -0.003、それ以降は -0.008 まで直線軟化とした。一軸引張モデルは引張強度まで直線的に増加させ、ひび割れ発生後は指数関数的に軟化する曲線を使用した。鋼板および鉄筋は、完全弾塑性モデルとした。本解析では DIANA (Ver.8.1)<sup>6)</sup> を使

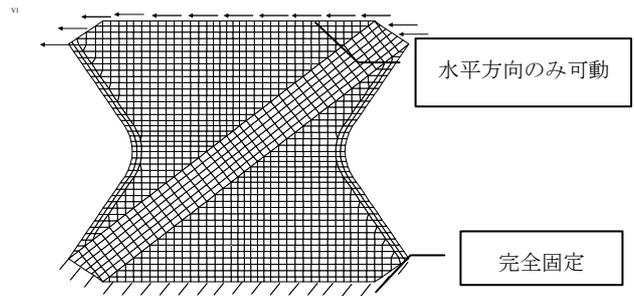


図-9 非線形解析モデル

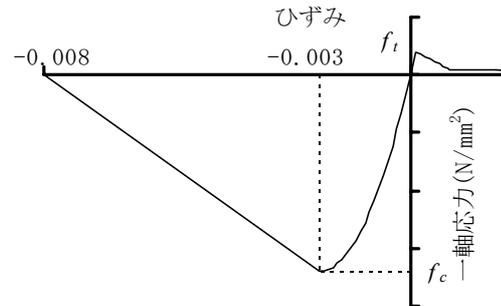


図-10 コンクリートの応力-ひずみ関係

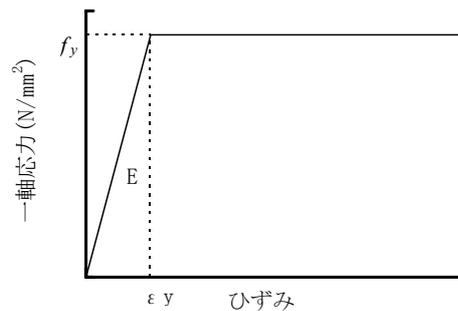


図-11 鋼材の応力-ひずみ関係

用した。

### (2) 解析結果

図-12 に荷重-水平変位比較、また、代表例として図-13 に case2 の最大荷重時における変形図を示す。変形図では実際の変形量の 50 倍としている。解析値は初期勾配が実験値と比較して大きいものの、最大荷重の実験値/解析値については case1 が  $866\text{kN}/848\text{kN} = 1.02$ 、case2 が  $1657\text{kN}/1631\text{kN} = 1.01$ 、case3 が  $936\text{kN}/983\text{kN} = 0.95$  と良く一致する結果となった。変形挙動に関しては、最大荷重時近傍については評価できているものの、初期勾配が実験値より大きくなっていった。水平変位が異なるのは、解析モデルの拘束条件が水平変位以外を固定していたのに対し、実験では 2 本のレールにてこれを再現したが、この部分での回転発生など、拘束状態に差異が生じたためと考えられる。

ここで、表-3 に示すように、case2 の破壊形態および

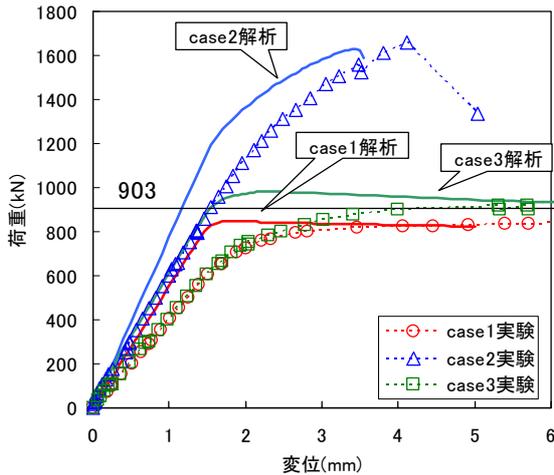


図-12 荷重-水平変位比較

表-3 case2 解析

| No. | 圧縮強度<br>N/mm <sup>2</sup> | 最大荷重<br>kN | No.1 最大<br>荷重比 | 備考    |
|-----|---------------------------|------------|----------------|-------|
| 1   | 75.8                      | 1632       | 1.00           | 材料試験値 |
| 2   | 50                        | 1434       | 0.88           | —     |
| 3   | 30                        | 1255       | 0.77           | —     |

補剛コンクリートの圧縮強度が耐力に与える影響を確認するため、その圧縮強度をパラメーターとした追加解析を行った。図-14 に荷重-水平変位関係を示す。これより、圧縮強度が小さくなるほど、最大荷重が顕著に低下することから、最終破壊形態は補剛コンクリートの圧縮破壊であることが類推される。

以上より、本実験で検討した蝶型鋼板の耐力は非線形 FEM 解析により評価可能であると考えられる。また、設計断面力に応じて補剛コンクリートの部材寸法や設計基準強度、鋼板厚を適切に設定することにより、鋼板の降伏後にコンクリートの圧縮破壊が生じて終局となるように設計することが可能であると考えられる。

## 6. まとめ

本実験より、コンクリートで補剛された蝶型鋼板に関して得られた知見を以下に示す。

- ①斜材を配置しない鋼板のみの場合は、鋼板中央部の降伏に先んじて、鋼板中心付近縁端が面外方向に大きく変位し、座屈により破壊に至った。
- ②圧縮力作用方向をコンクリートで補剛することにより座屈が抑制され、耐力が向上する。そのせん断耐力は、鋼板の降伏応力度、最小幅、厚みを用いて算出した値 ( $\sigma_y/\sqrt{3} \times \text{厚さ} \times \text{最小幅}$ ) を上回る。

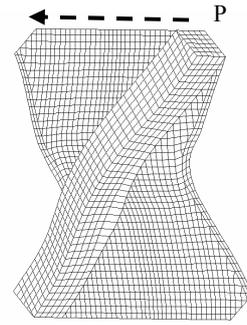


図-13 変形図 (case2)

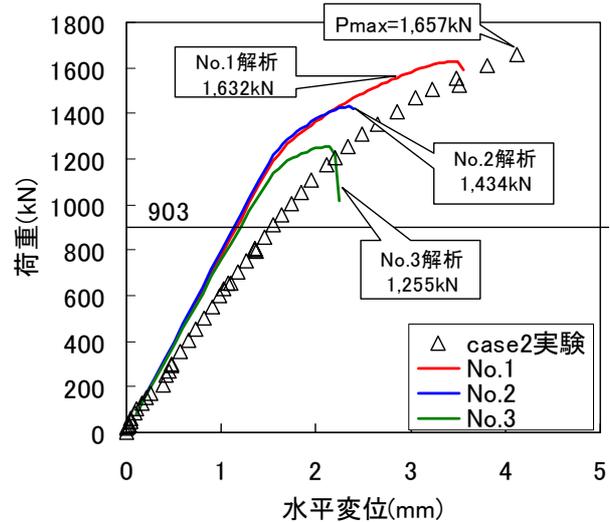


図-14 荷重-水平変位比較

- ③本実験で検討した蝶型鋼板の耐荷挙動は、非線形 FEM 解析を実施することにより評価可能である。
- ④設計断面力に応じて補剛コンクリートの部材寸法や設計基準強度、鋼板厚を適切に設定することにより、鋼板の降伏後にコンクリートの圧縮破壊が生じて終局となるように設計することが可能である。

## 参考文献

- 1)プレストレストコンクリート技術協会：複合橋設計施工基準 (案), 1999.12
- 2)吉田茂他：新開橋の設計方法, 土木学会第 47 回年次学術講演概要集, 第 5 部, pp778-779, 1992
- 3)片健一他：新しいウェブ形式を有する複合橋に関する研究, 第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.413-416, 2004.10
- 4)土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計, 1999
- 5)日本道路協会：道路橋示方書Ⅱ鋼橋編, 2002.3
- 6)TNO Building and Construction Research : DIANA Ver.8.1