

新しいウェブ形式を有する複合橋に関する研究

三井住友建設(株)	土木事業本部	PC設計部	正会員	〇片 健一
三井住友建設(株)	土木事業本部	技術研究所	正会員	高木 康宏
三井住友建設(株)	土木事業本部	PC設計部	正会員	中積 健一
三井住友建設(株)	土木事業本部	PC設計部	正会員	春日 昭夫

1. はじめに

道路整備の拡充を図る上で、橋梁建設費のコスト構造改革が大きな課題となっている。PC橋梁分野では主桁の軽量化を目的に、波形鋼板や鋼トラス材をウェブに用いる複合化が進んでいるが、これらの複合橋梁は、鋼製部材の製作工程や現場溶接あるいはコンクリートとの接合構造等に、まだ省力化できる余地を残していると思われる。蝶型のウェブである「バタフライウェブ」は、これらの課題を克服するため考案されたもので、鋼板の加工を極力低減しながら、施工現場で鋼板の溶接を不要とした新しい鋼コンクリート複合部材である。本稿は、「バタフライウェブ」の構造的特性、その特性を確認するために実施した耐力試験に関して報告するものである。

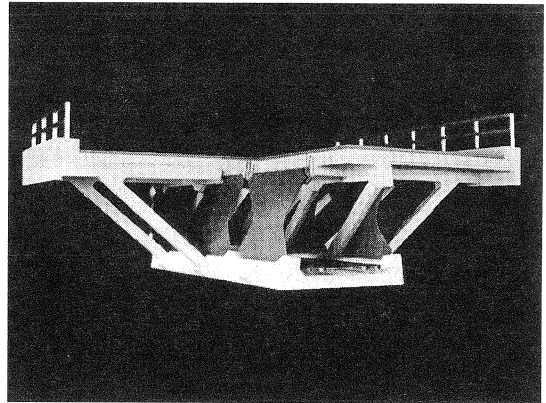


図-1 バタフライウェブ橋

2. バタフライウェブの特徴

バタフライウェブは図-1、2のような、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。ウェブ部材となる鋼板を連続化せずにパネル毎に独立させ、蝶型形状にすることによって、せん断力により鋼板面に発生する圧縮力と引張力の方向を限定させることができる。これは鋼板内の力の流れが、ダブルワーレントラス構造に類似した挙動となると言える。この圧縮をうける部分にスタッドを配置してコンクリートと一体化させることにより、圧縮力に対して合成断面で抵抗させると共に鋼板の面外変形が抑制され、耐力を向上させることができる。バタフライウェブと床版との接合は、鋼板上下縁に孔を設けることでコンクリートジベルを形成させ、補剛コンクリートは鉄筋によって一体化させる。また、溶接のない一枚鋼板の状態でも床版と接合するために、フランジを溶接する構造に比べて、活荷重によって床版に生じる横方向曲げモーメントに対する疲労強度が大きいと言える。

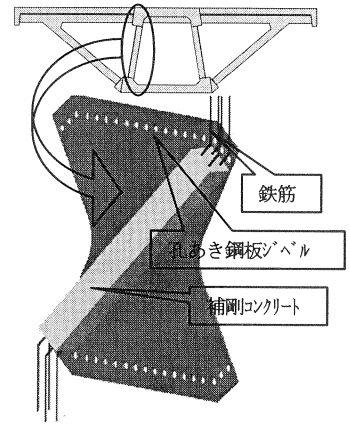


図-2 バタフライウェブの構造

既存の複合橋梁に代表される波形ウェブ構造や鋼トラス構造は、優れた構造特性を有している一方で鋼部材の加工や溶接、あるいは接合部構造の精度が要求される。一方、バタフライウェブは、鋼板の加工が平板の蝶型切断、孔あき鋼板ジベルの孔あけおよびスタッドの溶接のみであり簡素な加工で済む。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と言える。また、前述のようにバタフライウェブ鋼板と床版との接合は孔あき鋼板ジベルによって接合するため、現場では鉄筋の差し込みと床版コンクリートの打設のみとなり、作業の簡素化が図られる。加えて、本構造では鋼板が連続していないために主桁をプレキャスト化することも可能となり、工場製プレキャストにも対応できる。

3. 実用化に向けた取り組み —せん断耐力試験—

バタフライウェブの実用化にあたっては構造的に、①鋼板と補剛コンクリートの一体化による構造特性および挙動の把握と②バタフライウェブ間のコンクリートのみの部分のせん断耐力と安全性の確認が必要である。これらの課題のうち、①課題に対してせん断耐力試験を行った。以下にその試験概要と結果を示す。

(1) 試験目的

1) 補剛コンクリートによる効果：コンクリート斜材の有無による比較試験を行い、この補剛コンクリートが耐力の向上と座屈等の面外変形抑制に対して効果があることを確認する。

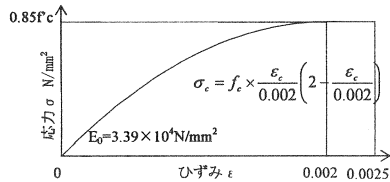
2) 解析手法と試験の整合性：非線形FEMによる耐力、変形、ひずみ等を試験結果と比較し、挙動が非線形FEM解析により検証できることを確認する。

(2) 試験対象および試験方法

本試験の解析モデルを図-3、供試体を図-4に示す。供試体は支間40m程度の実橋規模に対して1/2の縮小モデルである。鋼板1パネル分を供試体として水平力を载荷し、载荷方向のみに変形するように上下端とも面外方向および鉛直方向を固定した。なお、解析は材料非線形と幾何非線形を考慮し、初期不整として面外方向変位3mmを後述の座屈モードが出現するように与えた。また解析に用いた材料特性は、供試体の物性値を下記のようにモデル化し、拘束条件は下端を全方向固定、上端を水平方向のみ自由とし、鋼板とコンクリート間は縁切れが生じず完全に付着しているものとしてモデル化した。

コンクリート： $f^c = 75.8\text{N/mm}^2$

鋼板 SS400 $t=8\text{mm}$ ： $f_y = 285\text{N/mm}^2$



鉄筋 : SD345

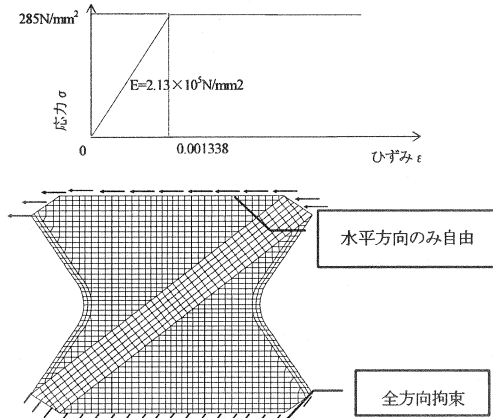
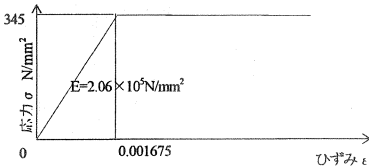


図-3 非線形解析モデル

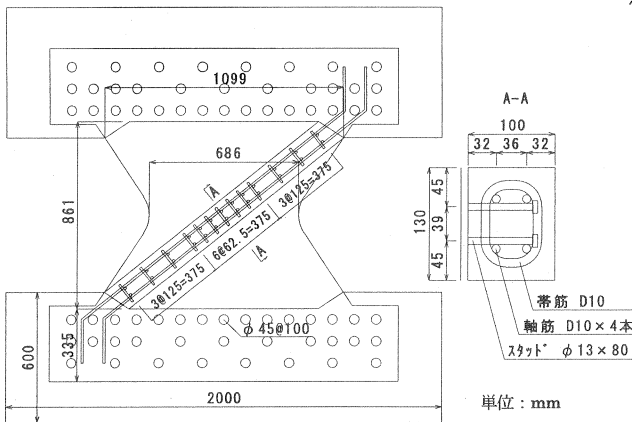


図-4 実験供試体

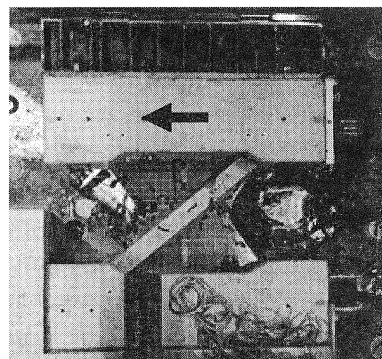


図-5 試験方法

(3) 試験結果

1) 耐力力曲線

水平載荷荷重と変位の関係を図-6に示す。鋼板のみ (case1) の最大水平荷重 866kN に対して、補剛コンクリートを有する (case2) ことにより耐力力は 1657kN と 1.9 倍程増加した。破壊形態は、case1 が荷重増加のないまま水平変位のみ増加したのに対して、case2 は水平荷重 1657kN にて補剛コンクリートの一部が圧縮破壊して終局を迎えた (写真-2 参照)。ここで座屈が生じなければ鋼板が降伏する水平荷重は von-mises 応力、板厚、鋼板中央部の最小幅を用いて $285 \text{ (N/mm}^2\text{)} / \sqrt{3} \times 8\text{mm} \times 686\text{mm} = 903\text{kN}$ と算出される。試験結果より、case1 は座屈が生じているためこの値を下回り、case2 は補剛コンクリートによって圧縮側の抵抗断面が大きくなり、鋼板の座屈が抑制されたことによってこの値を上回っていると判断できる。補剛の有無による耐力力増加の度合は本供試体の鋼板厚、コンクリート強度等の組み合わせによる固有の値であるが、試験耐力力の解析値に対する比率は case1 が $866\text{kN} / 860\text{kN} = 1.01$ であり、case2 では $1657\text{kN} / 1602\text{kN} = 1.03$ とほぼ解析値と同じ値となった。これによりバタフライウェブの耐力力は解析により予測可能であることが分かった。一方、水平変位は試験値が解析値に対して 903kN 時で 20%ほど大きい値となった。解析モデルの拘束条件が水平移動以外を完全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、拘束状態の差異が生じたためと考えられる。

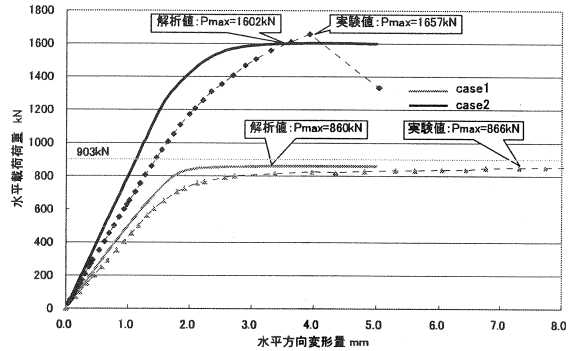


図-6 耐力力曲線

試験結果より、case1 は座屈が生じているためこの値を下回り、case2 は補剛コンクリートによって圧縮側の抵抗断面が大きくなり、鋼板の座屈が抑制されたことによってこの値を上回っていると判断できる。補剛の有無による耐力力増加の度合は本供試体の鋼板厚、コンクリート強度等の組み合わせによる固有の値であるが、試験耐力力の解析値に対する比率は case1 が $866\text{kN} / 860\text{kN} = 1.01$ であり、case2 では $1657\text{kN} / 1602\text{kN} = 1.03$ とほぼ解析値と同じ値となった。これによりバタフライウェブの耐力力は解析により予測可能であることが分かった。一方、水平変位は試験値が解析値に対して 903kN 時で 20%ほど大きい値となった。解析モデルの拘束条件が水平移動以外を完全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、拘束状態の差異が生じたためと考えられる。

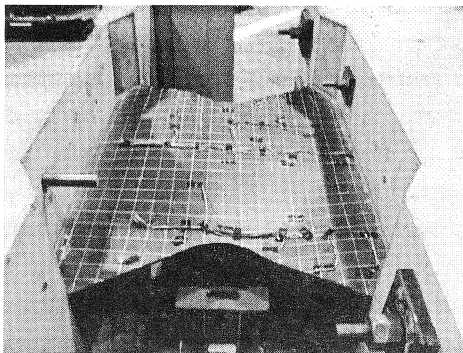


写真-1 case1 終局状況

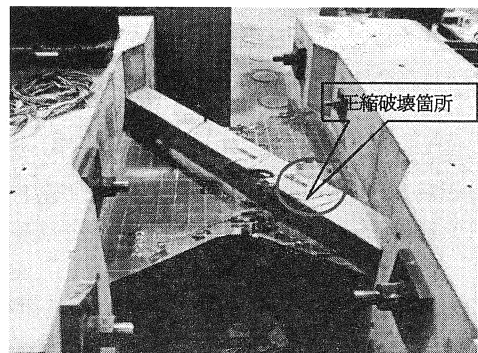


写真-2 case2 終局状況

2) 面外方向変位

補剛コンクリートを有さない case1 の座屈モードを図-7に示す。座屈モードは圧縮が働く方向に向かって 2 次モードに近い変形となり、図の○位置にて面外変形が最大となる。同位置での面外方向変位の試験結果を図-8に示す。case1 の結果より、解析と同方向に変位しており、座屈解析と同様なモードを生じているのが分かる。変形量に関しては、荷重が小さい範囲では実験値の方が小さい値を示したが 400kN を超えると荷重の増加にともない試験の変形量が大きくなった。これらの要因として解析に用いた初期不整と試験鋼板に生じていた初期変形量並びに初期応力に差が生じていたこと、また

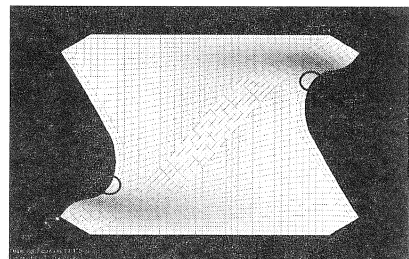


図-7 座屈モード

して解析に用いた初期不整と試験鋼板に生じていた初期変形量並びに初期応力に差が生じていたこと、また

鋼板を固定していたコンクリートがわずかに面外方向に回転もしくは変位を生じたことが考えられる。一方 case2 では最大水平荷重時においても面外変形が 0.91mm しか生じず、途中の履歴もほぼ解析値と同じ傾向であった。このことから、補剛コンクリートが鋼板の面外変形による座屈を抑制していたことが分かる。

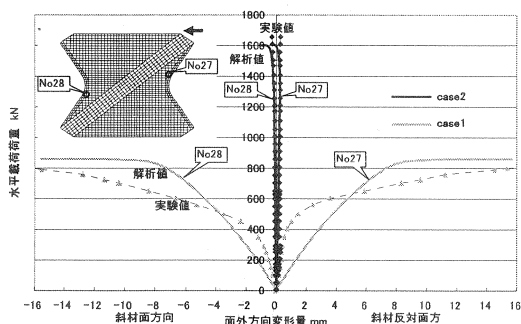


図-8 面外変位

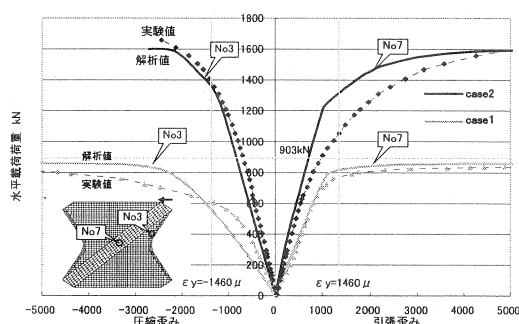


図-9 鋼板ひずみ

3) 鋼板ひずみ

case1 において面外変形量が最大となる点と面内せん断応力が最大となる鋼板中央部の鋼板ひずみを図-9に示す。鋼板の材料特性より降伏ひずみは 1460 μ であることから判断すると、case1 では水平荷重 600kN 付近で No.3 点が降伏し、その後 800kN 付近で鋼板中央部が降伏に至っている。これは、前述したように No3 点で座屈により面外変形が急激に増加するためこの位置での降伏が鋼板中央部のせん断降伏より先行するからである。一方 case2 では水平荷重 1050kN 付近で鋼板中央部が降伏し、その後中央から進行し 1400kN 付近で No3 点が降伏し、1657kN で補剛コンクリートが圧縮破壊する。また、前述の鋼板の降伏強度を用いて算出した水平荷重 903kN 時には鋼板の降伏がまだ生じておらず、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ている。以上より、バタフライウェブは鋼板端部の局所的な降伏が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すること、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 ($\sigma_y/\sqrt{3}$ *厚さ*最小幅=903kN) を上回ることが判明した。

5. まとめ

本試験により、バタフライウェブに関して以下の知見が得られた。

- (1) 補剛コンクリートにより座屈が抑制されるとともに、耐力が向上する。またその挙動は非線形解析により予測することが可能である。
- (2) 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。
- (3) 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 ($\sigma_y/\sqrt{3}$ *厚さ*最小幅) を上回る。

今後の課題としては、本試験結果をふまえて補剛コンクリートが負担するせん断力を考慮した耐力算出式の確立が挙げられる。また、梁におけるコンクリートの接合部の安全性を確認することが必要である。バタフライウェブは引張側を PC 鋼材で補強したプレキャストコンクリートでも可能であるため、種々の材料に対する適用性の検討を進めてコスト構造改革に貢献できるよう、今後も研究を展開していく所存である。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：複合橋設計施工規準 (案), 1999.12.
- 2) 土木学会：鋼構造シリーズ2 座屈設計ガイドライン
- 3) 池田, 芦塚, 山野辺, 一宮：複合非線形による波形鋼板ウェブのせん断座屈耐力評価, 第 11 回 PC シンポジウム論文集 (2001,11)