

波形鋼板ウェブ合成桁中間支点部の 終局時せん断抵抗のメカニズムと耐荷力向上策について

大成建設(株)土木設計部 正会員 ○白谷 宏司
 大成建設(株)土木設計部 正会員 今井 義明
 大成建設(株)技術センター 小尾 博俊

1. はじめに

波形鋼板ウェブを有する PC 橋の設計においては、主桁断面に発生するせん断力に対し、使用限界状態、終局限界状態とも、ウェブのみで全せん断力を負担すると仮定して、ウェブ鋼板の発生せん断応力を算出する事例が多い。

筆者らは、波形鋼板ウェブ合成桁の中間支点部におけるせん断挙動特性に着目した検討を行い、中間支点部では、ウェブのせん断変形が床版の曲げ抵抗により拘束されるため、床版のせん断力分担が卓越し、ウェブのせん断応力が小さくなる挙動特性があることが見出した(図-1参照)^{1), 2)}。この挙動は、床版の弾性範囲から、引張側の床版にひび割れが生じて鉄筋ひずみが降伏値に達する程度の範囲までは少なくとも維持されることが、実験や弾塑性 FEM 解析により確認された。この挙動特性を設計に適切に反映させることができれば、従来の設計法よりも、ウェブ鋼板の板厚を減らすことが可能になる。

しかしながら、実際の多径間連続桁形式の橋梁においては、中間支点部の主桁がせん断に対して終局時に至る際には、同時に曲げに対しても厳しい状態となり、引張鉄筋のひずみも降伏値を大きく超えて床版の損傷が激しくなっている場合が多いと考えられる。従って、中間支点部における波形鋼板ウェブ合成桁の合理的な耐荷力評価法を確立するためには、曲げに対して終局状態に達した状態での桁のせん断抵抗のメカニズムやウェブ鋼板と床版のせん断力分担を把握する必要がある。

そこで、本検討では、曲げ破壊が先行する波形鋼板ウェブ合成 I 型断面の片持梁をモデルケースとして、3次元弾塑性 FEM 解析により、中間支点部の桁が終局限界状態に至るまでの各部材の挙動を追跡し、ウェブ鋼板と床版のせん断力分担との関連について考察した。また、この検討結果を踏まえ、桁の耐荷性能向上に対する一方策を提案する。

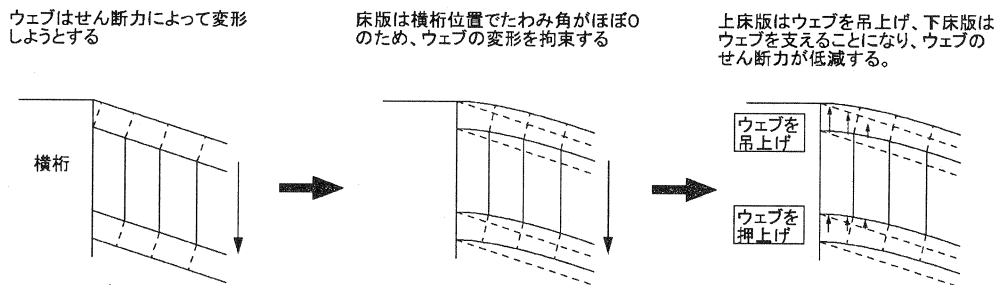


図-1 波形鋼板ウェブ橋中間支点部のせん断挙動の概念

2. 検討モデルと解析手法

本検討で対象としたモデルを図-2に示す。対象としたモデルは、桁の片側を完全固定とした、波形鋼板ウェブと RC 床版による I 型断面の、全桁長 10.5m の片持梁である。ただし、固定点における完全拘束が、実構造物では生じ得ない局部挙動を固定点近傍の主桁部材にもたらすことを避けるために、固定点から 1m の範囲

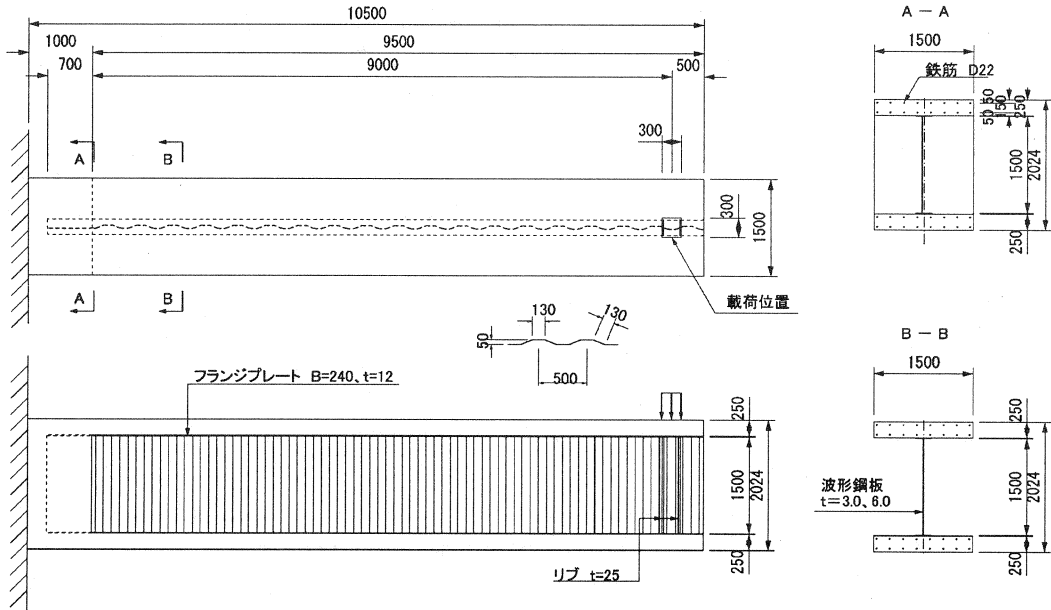


図-2 検討対象モデル

はコンクリートの矩形断面とした。ウェブ鋼板と床版の接合構造としては、フランジ鋼板を介したアングルジベル等を想定している。波形鋼板ウェブは、上下床版との接合部のフランジ鋼板と共に、この矩形断面区間に埋め込まれている。フランジ鋼板は、桁の全域で切れ目がなく、連続としている。

FEM 解析には、汎用解析コード DIANA (TNO) を用いた。波形鋼板ウェブおよびフランジ鋼板はシェル要素、床版は簡便のため梁要素、鉄筋は埋込み鉄筋要素でモデル化した。

コンクリートは設計基準強度 40N/mm^2 を想定し、圧縮側の応力-ひずみ曲線は、以前の実験¹⁾で用いたコンクリートの材料試験値を引用した。引張側は、ひび割れ発生限界応力を

$$f_{tr} = 0.33\sqrt{f_c} \quad (1)$$

で与え³⁾、ひび割れ以降は、解析の収束性の都合上、ひび割れ発生ひずみで f_{tr} 、鉄筋の引張降伏ひずみに達した時に 0 となる一次関数の応力-ひずみ関係とした。ひび割れ発生後のせん断剛性は、ひび割れ前のせん断弾性係数に、式(2)による補正⁴⁾を施して与えた。

$$\beta = \frac{1}{1 + 4447\varepsilon_n} \quad (2)$$

ここで、 ε_n はひび割れに直方向のひずみである。なお、矩形断面部のコンクリートは弾性部材とした。

波形鋼板、フランジ鋼板の材料特性も、以前の試験の際の材料試験結果を引用して設定した。本検討では、簡便のため、波形鋼板ウェブとコンクリート床版の接合部のジベルのせん断剛性、および鉛直方向の引張・圧縮剛性とも無限大としている。

荷重は、図-2 に示すように、I 桁断面部の張出側 9.0m の位置に集中荷重を載荷した。桁の自重は考慮していない。

3. 荷重-変位曲線およびウェブのせん断力分担率

図-3は、FEM 解析により得られた荷重-変位曲線である。FEM 解析においては、波形鋼板ウェブの板厚が6mm、

3mm の 2 ケースで計算を行った。また、比較のために、ウェブの軸方向剛性を無視した断面を仮定してのファイバーモデル解析の結果も示している。ファイバーモデル解析でも、フランジ鋼板の剛性は考慮されている。

ウェブの板厚を変えた 2 ケースの FEM 解析結果とも、ウェブの軸方向剛性を無視したファイバーモデル解析結果より大きな曲げ耐力を示している。また、FEM 解析においては、ウェブの板厚が大きい方が曲げ耐力も大きくなっている。従って、従来の設計における曲げ耐力の算出では、波形鋼板ウェブの軸方向剛性は、極めて小さいという理由で無視されているが、実際には、ウェブ鋼板が曲げ耐力の向上に寄与していることが伺える。

図-4 は、ウェブ厚 6mm の場合に対する FEM 解析結果より、載荷荷重 776kN 時および 925kN 時における、ウ

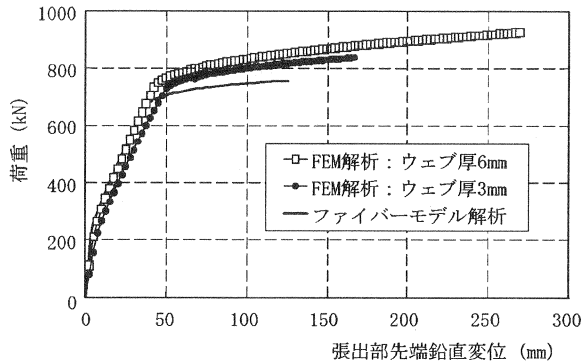


図-3 荷重と桁先端変位の関係

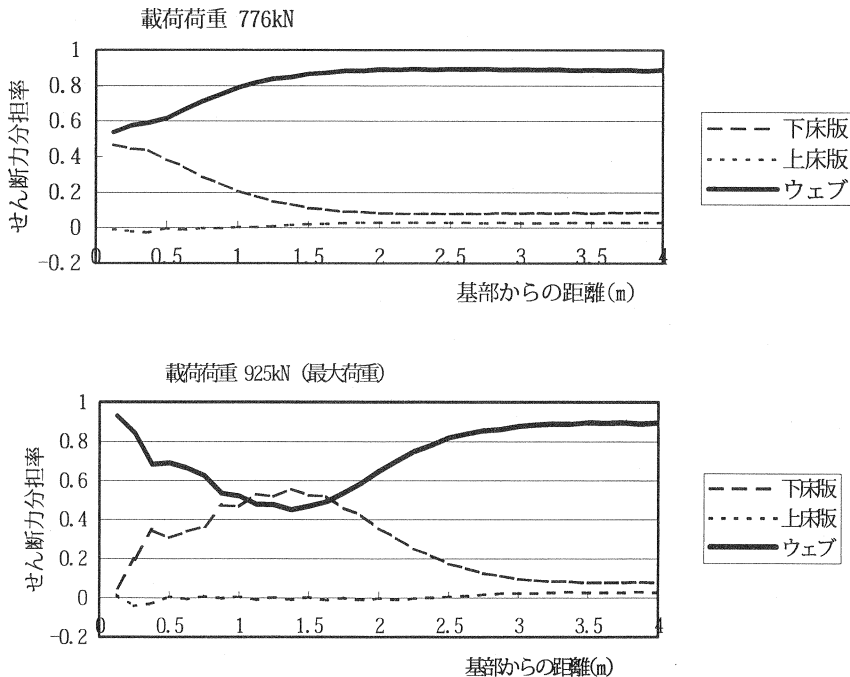


図-4 各部材のせん断力分担率の軸方向分布 (ウェブ厚 6mm)

ウェブおよび上下床版のせん断力分担率の、桁の軸方向の分布を示したものである。ウェブが分担するせん断力はウェブの各シェル要素のせん断応力をウェブ断面で集計した。上下床版が受けるせん断力は、それぞれの梁要素が受けているせん断力の値をそのまま用いている。荷重 776kN 時は、引張側の床版の引張鋼材の降伏によって桁の剛性が顕著に低下した段階である。荷重 925kN は解析上の最大荷重である。図の横軸は、コンクリート矩形断面の張出側を原点とした、張出方向の距離である。

引張鋼材が降伏した時点では、ウェブのせん断力分担率は、片持梁の基部に向かって単調減少している。上床版は曲げによる軸引張力のために剛性を失っているが、下床版とウェブが、基部ではほぼ 50%ずつせん断力を分担している。このようにウェブのせん断力分担率が基部に向かって単調減少する傾向は、筆者らのせん断破壊先行型の I 桁に対する実験でも生じており、その基本的なメカニズムは説明付けられている¹⁾。一方、解析上の曲げ破壊が生じた荷重 925kN 時では、片持梁の先端から基部に向かって一旦ウェブのせん断力分担が減少するが、基部付近では再びウェブのせん断力分担が大きくなり、付根の近傍では 90%以上のせん断力をウェブで受けている。

しかしながら、ウェブ鋼板厚が 3mm の場合に対する FEM 解析結果では、このような基部付近でのウェブへのせん断力の集中は顕著でなく、解析上の曲げ破壊時まで、図-4 の荷重 776kN 時のような各部材のせん断力分担曲線に近い。本検討結果から、桁の曲げに対する損傷が激しくなると、床版の曲げ拘束によるせん断力分担の機能が崩れ、ウェブにせん断力が集中する可能性があることが明らかになった。

4. 各部材の挙動

図-5 は、ウェブ厚 6mm のケースに対する解析結果から、基部付近の各部材の挙動と、基部近傍断面におけるウェブおよび上下床版のせん断力分担率の推移をまとめたものである。これらより、波形鋼板ウェブの片持梁基部のせん断挙動は、以下のように変化したと考えられる。

- 1) 荷重 100kN までは弾性範囲であり、基部では、ウェブのせん断変形に対する床版の曲げ拘束により、上下床版がウェブより多くのせん断力を分担している。
- 2) 荷重 100kN~200kN の間に、上床版の上縁から下縁にかけてひび割れが生じた。この間に上床版の剛性が低下したため、上床版のせん断力分担が低下し、ウェブと下床版にせん断力が移行した。
- 3) 荷重 200~500kN の間は、上床版の全面がひび割れた状態で定常状態となり、上下床版およびウェブのせん断力分担率に顕著な変化は見られない。
- 4) 荷重 500~730kN の間に、上床版の上段鉄筋、下段鉄筋、その後上床版下面とウェブの間にあるフランジ鋼板(桁全域で連続と仮定)が順次降伏する。この間に上床版のせん断力分担率がさらに低下し、荷重 730kN 時には上床版のせん断力分担率はほぼ 0 となる。
- 5) 上床版側の軸方向鋼材が全て降伏した 730kN から、780kN にかけて、下記の挙動が見られる。
 - ・特に上床版との接合部付近 ($z' = 0.1\text{m}$) で、ウェブの軸方向応力 (SXX) が急増し、せん断応力 (SZX) が減少する。
 - ・下床版に発生している曲げモーメントは、ウェブ鋼板のせん断変形を床版が曲げ拘束する際に生じる、いわゆる波形鋼板ウェブ橋中間支点部の付加曲げモーメントが主であり、荷重 730kN まではほぼ線形であるが、730kN 以降に急増する。

上床版側のフランジと波形鋼板ウェブの接合部近傍 ($z' < 0.1\text{m}$) では、ウェブの軸方向応力は本図に示す $z' = 0.1\text{m}$ の点での値よりも大きく、ウェブ鋼板は軸方向に降伏している。これに伴い、ウェブの上側でせん断剛性が低下し、平均的なウェブの剛性も低下するため、下床版のせん断力分担率が増加する。

- 6) 荷重 780kN の時に、下床版の上縁応力がひび割れ発生限界に達し、その後下床版の曲げ剛性が低下する。それに伴い、下床版のせん断力分担率が急減し、ウェブのせん断力分担率が急増する。

すなわち、波形鋼板ウェブ合成桁の中間支点部付近では、上床版が曲げにより激しい損傷を受けても、下

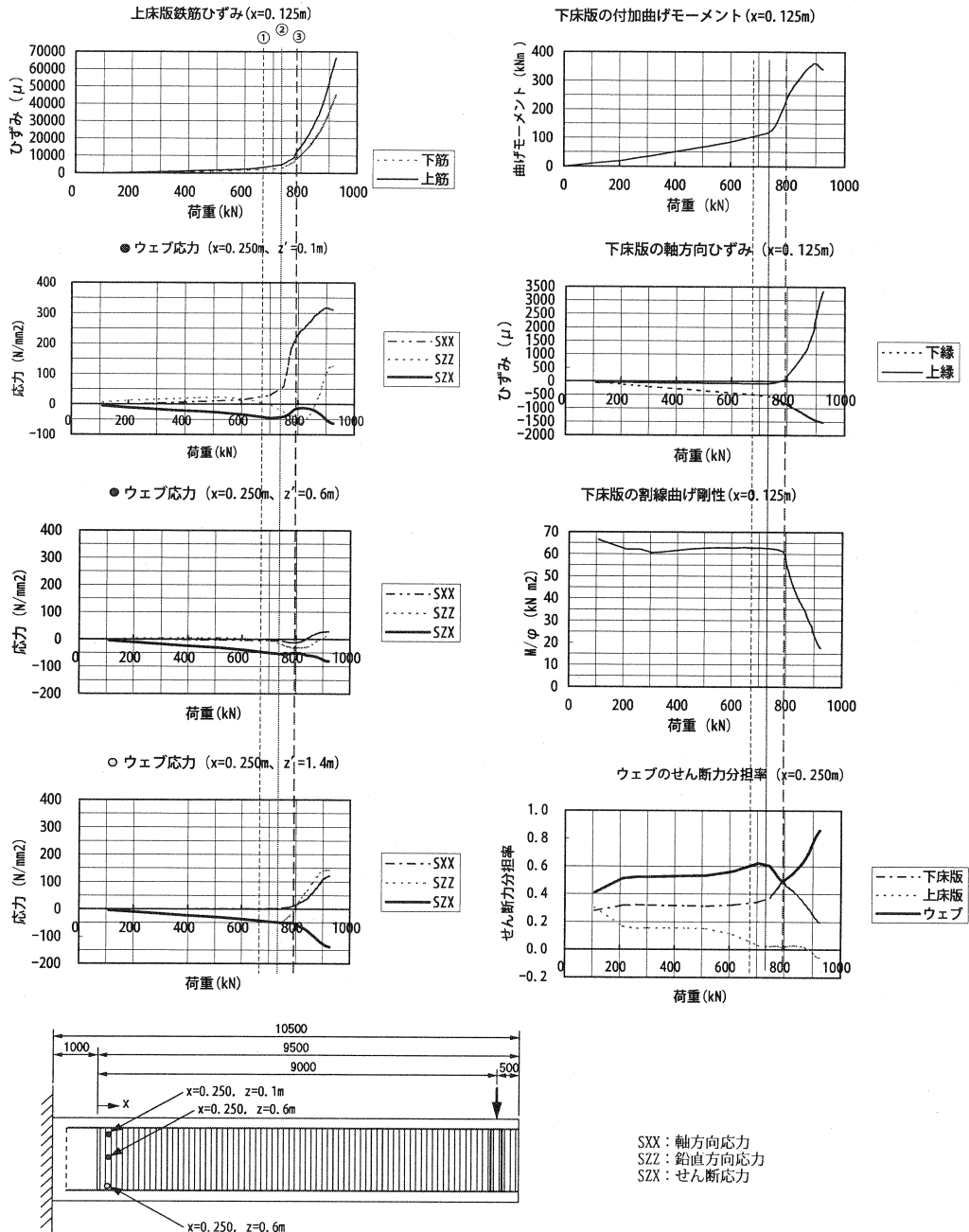


図-5 各部材の挙動とせん断力分担率の関連 (ウェブ厚6mm)

床版に顕著な剛性低下が生じるまでは、ウェブ鋼板と下床版が共同でせん断力を分担していることになる。ウェブ板厚が3mmと薄いケースにおいても、各部材の挙動の履歴は、図-5に示すウェブ厚6mmの場合とほぼ同様であったが、ウェブ厚が3mmのケースでは、桁の曲げ耐力がウェブ鋼板6mmの場合よりも小さく、下床版のひび割れによる剛性低下が顕著になる前に桁が曲げ破壊に達していたため、最大荷重時においても基部断面におけるウェブのせん断力分担率は44%程度と、ウェブ厚6mmのケースの半分以下であった。

なお、図-4において、荷重776kN時点では基部より1.5mの範囲でウェブのせん断力分担が減少しているが、最大荷重時には、基部より1.5~3.0mの範囲で、基部に向かってウェブのせん断力分担率が減少している。これは、荷重の増加に伴って、上床版側のフランジおよびウェブ鋼板の降伏範囲が桁の前方に広がり、前記5)で述べたウェブのせん断力分担率が低下する挙動が生じる区間も、前方にシフトしていると考えられる。

5. 中間支点部の主桁の耐荷性能向上策と今後の課題

検討結果より、波形鋼板ウェブ橋の中間支点部では、下床版の断面を大きくして付加曲げモーメントによるひび割れ発生を遅らせると共に、下床版の上側の軸方向鉄筋を多く配置して、ひび割れ発生後の曲げ剛性の低下を緩やかにすれば、桁が曲げ破壊に達するまでのウェブへのせん断力の集中が抑制される可能性がある。その結果、ウェブのせん断応力は、従来の設計の仮定（ウェブのみで全せん断力を負担）による計算値よりも小さくなり、桁断面としては従来の設計法よりも高いせん断耐力を有することになると考えられる。また、下床版は全体曲げによる軸圧縮応力と付加曲げモーメントによる負の曲げ応力を受けるが、下床版の上側の鉄筋を適度に増加させることは、床版の下縁の圧壊を遅らせることにも寄与し、桁の曲げ耐力やじん性の向上にも繋がると考えられる。

このような、中間支点部の波形鋼板ウェブ合成桁のせん断抵抗のメカニズムに影響を及ぼすパラメータとしては、下床版の断面性能（断面形状、鉄筋量）の他、上床版側の引張鋼材量、ウェブ板厚、桁高、および桁断面が受けているプレストレス力など、多くの要素が考えられる。本検討ではこのようなパラメータに対する詳細検討までは至らなかったが、今後、これらの問題点を整理してゆけば、波形鋼板ウェブ橋中間支点部の合理的な設計法が確立できると考えられる。

参考文献

- 1) 白谷宏司、池田博之、今井義明、加納宏一：波形鋼板ウェブ複合橋中間支点部の曲げ・せん断挙動特性に対する基礎研究、土木学会論文集 No. 274/I-62, 2003.
- 2) 藤倉修一、白谷宏司、今井義明、坂下克之：コンクリート付き波形鋼板ウェブ桁の非線形挙動に関する検討（その2）片持梁、第11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、2001.
- 3) Collins and Mitchell：Prestressed Concrete Basics, Canadian Prestressed Concrete Institute, 1987.
- 4) Pauley and Loeber：Shear Transfer by Aggregate Interlock Shear in Reinforced Concrete, Vol.1, Special Publication SP-42, American Concrete Institute, 1974.