

FEMを用いた波形鋼板ウェブ構造の検討

上平 謙二*

1. はじめに

波形鋼板ウェブPC橋とは、図-1に示すように、床版にはコンクリートを、箱断面のウェブには橋軸方向に波形を形成した鋼板を併用した合成構造橋梁であり、コンクリート床版と波形鋼板は剛結合された構造である。また、プレストレスは、基本的に架設ケーブルではコンクリート床版内に配置された内ケーブルによって、またウェブが鋼板であるため、連続ケーブルについては外ケーブルによってそれぞれ与えられるのが一般的であるが、近年では、高耐久性を目的として維持管理を容易とする全外ケーブル方式によるプレストレス導入方法を用いた橋梁も建設されている。

さらに、本合成構造を採用することにより、通常のPC箱桁橋に比べ、25%程度自重の軽量化が図れると言われている。これは、PC箱桁橋における上下のコンクリート床版とコンクリートウェブの断面積比率が、一般的に図-2に示す

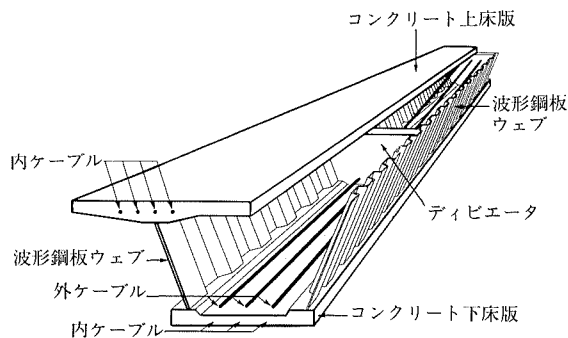


図-1 波形鋼板ウェブPC橋の概念図

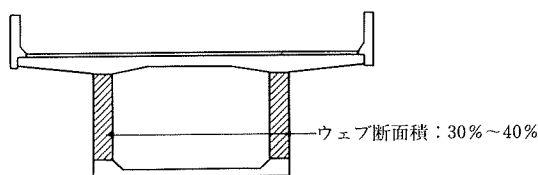
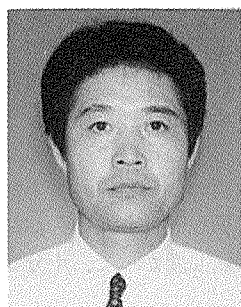


図-2 コンクリートウェブの断面積比率



* Kenji UEHIRA

ドービー建設工業(株)
本社 技術センター

範囲にあり、この30%~40%の割合を占めるコンクリートウェブを軽量の鋼板に置換することにより理解できる。したがって、地震国であるわが国において、コンクリート上部工のトップヘビー化の弱点を克服するための優れた構造であるとともに、上下部工を含めたPC橋梁の建設コストの観点からも、従来のPC橋に比べ工費削減を期待できる。

また、施工性の面からも、箱断面におけるコンクリートウェブの施工性に対して、波形鋼板の使用により、鋼板の製作・立込みといった施工性に優れ、また、上下のコンクリートフランジを分離施工できるなど、施工の省力化・急速化が可能となり、更なる経済性が発揮できる。

近年では、本橋梁形式の計画および建設が急速に進んでおり、国内では施工中を含め、すでに10橋以上の橋梁が建設され、今後の展開が期待される場所である。

本稿では、波形鋼板ウェブPC橋の設計において、本橋梁特有の構造特性を把握するための解析方法として、とくにFEM解析手法に的を絞る。それによる設計例を述べるものとする。

2. 波形鋼板ウェブPC橋の構造特性

波形鋼板ウェブPC橋は、その力学的特性から、コンクリート床版と波形鋼板とに分離してそれぞれの部材の設計ができる特徴を有している。すなわち、図-3に示すように、箱断面である合成断面に作用する面内方向の曲げや軸力成分については、波形鋼板のアコーディオン効果により力はほとんどコンクリート床版に負担することになり、設計上、波形鋼板に伝達される力は工学的に無視できるオーダーであるとされる。また、箱断面に作用する橋軸方向せん断力については、その大半を波形鋼板が負担する特徴を有している。

一方、面外方向（横方向）に対しては、平鋼板に比べて波の形状による剛性が大きいいため、座屈耐力の向上が期待できる。

これらのことから、とくにPC橋として重要なプレストレ

(a) アコーディオン効果

(b) 高いせん断座屈耐力

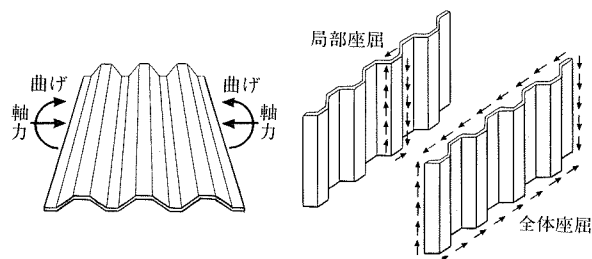


図-3 波形鋼板の性質

スの導入においても、曲げ、軸力に抵抗するコンクリート断面積の減少、およびそれに伴う自重の減少により、プレストレスの導入効果に優れる特徴を有している。

3. 波形鋼板ウェブPC橋の設計検討

本橋を設計する場合、前節でも述べた本橋特有の構造特性を理解したうえで、構造物の安全性を確保するための設計を行う必要がある。

一般的に、本構造の主桁の曲げ、せん断に対する設計については、計画マニュアル¹⁾や規準²⁾があるため、一応の設計が可能となっているが、構造規模や施工方法の相違によって、構造の安全性を確認するために、梁理論や簡易計算法では解決できない部位の設計が必要な場合がある。

そこで、波形鋼板ウェブPC箱桁橋の各部位の設計に対し、一般的なPC箱桁橋の場合と異なると考えられる部位に着目して、その挙動を明確にするための考え方について述べる。

- ① 外ケーブル定着部の検討
- ② 外ケーブル偏向部の検討
- ③ プレストレス有効範囲の検討
- ④ 中間支点部での付加曲げ応力に対する検討
- ⑤ 反り応力度の検討
- ⑥ 変形量の検討
- ⑦ 裏打ちコンクリート部の検討

ここで、①の外ケーブル定着部の検討については、基本的に2つの定着部の検討が挙げられる。一つは、連続ケーブルを桁端部で定着するための定着部横桁の検討であり、もう一つは、外ケーブルによる張出し施工の場合の架設ケーブル定着突起および定着部の検討である。前者の定着部横桁の検討では、通常のPC箱桁構造と異なり、波形鋼板ウェブの剛性がコンクリートウェブの場合より低下するため、定着横桁を含めた構造の変形性能が異なることが予想される。そのため、コンクリートウェブでの定着横桁と同様な設計手法では、その安全性を損なう場合も考えられる。

また、後者の外ケーブルによる架設ケーブル定着突起や定着部の構造には、図-4に示すように、現在2通り考えられている。いずれにしても、外ケーブルの1本あたりの大きな緊張力に対する構造提案とも言える。上床版からウェブを打ち下ろして突起定着させる方法では、定着力がウェブ近傍に集中するため、波形鋼板と打下しウェブの接合部位と上床版を含めた詳細な応力伝達機構の把握が必要と考えられるとともに、打下しウェブがあるため、波形鋼板に作用するせん断分担が小さくなり、打下しウェブでせん断を担う構造となる。また、鋼リブを設けた場合には、床版に定着された緊張力が上床版に集中せず、鋼リブを介して下床版と一体性をもった挙動をすると考えられるが、この方法についても詳細な応力伝達機構の把握が必要と考えられる。この構造の場合、鋼リブによって、波形鋼板ウェブ箱断面のねじり剛性の低下を補う効果があるとともに、断面変形を拘束する効果も備えている。

②の外ケーブル偏向部の検討について、偏向部の構造に

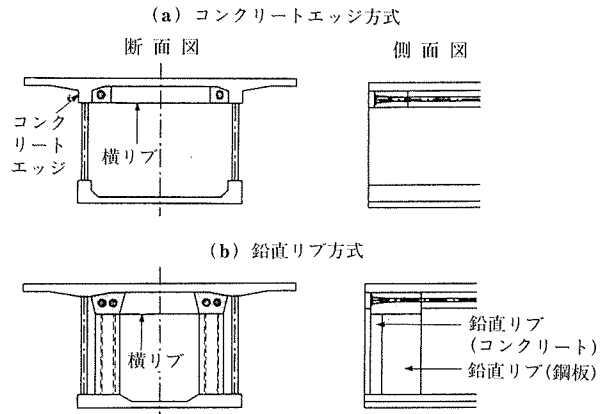


図-4 外ケーブル定着部構造の事例

対しては、現在2通りの設計法があり、それは、波形鋼板と偏向部を一体化する方法と分離する方法である。偏向部を分離することで、断面変形やねじり変形性能に悪影響を与えることはないようである。これらの構造選定については、全体の構造特性、外ケーブルの配置、施工性等を十分勘案して、安全な構造選択を行えばよいと考えられるが、いずれにしても、偏向部の安全性を検討するためには、偏向部を含めた構造の詳細な応力伝達機構の把握が必要と考えられる。

③のプレストレス有効範囲の検討について、ウェブが波形鋼板であるため、通常のコンクリートウェブの場合に比べ、たとえば上床版に定着されたプレストレスがどのように下床版まで伝達されているかを把握する必要がある、とくに外ケーブルを使用した場合の定着力の影響範囲を詳細に把握する必要がある。

④の中間支点部での付加曲げ応力とは、とくに本橋の構造特性として、波形鋼板のせん断変形に起因して、中間支点横桁やラーメン構造のような柱頭部横桁の拘束効果によって波形鋼板のせん断変形が拘束されることにより生じる横桁近傍の上床版に生じる付加的な曲げ応力度である。この応力度は、梁理論を用いて計算した曲げ応力度より大きな応力度となることが知られており^{3), 4)}、場合によっては、部材の安全性に影響を与えるオーダーとなる可能性があるため、この付加曲げ応力度を把握することが必要であると考えられる。ただし、この付加曲げ応力度のオーダーについては、橋梁の規模、桁高、曲げ応力度のオーダーによっても異なるため、十分に注意する必要がある。

⑤の反り応力度とは、とくに本構造のねじり挙動によって生じる応力度で、この応力度は、一般に連続桁の中間支点横桁やラーメン構造の柱頭部横桁によって、ねじり変形が拘束されることによって箱断面の上床版先端に卓越する橋軸方向の引張応力度である⁵⁾。この応力度は、主桁断面にねじり挙動が卓越する場合に大きくなるが、主桁のねじり剛性や床版の張出し長さによってもそのオーダーが異なるとともに、中間支点やラーメン構造の柱頭部の主桁上縁引張りが卓越する部位に引張挙動が助長されるため、部材の安全性を損なう場合も考えられる。したがって、十分な検討が必要である。

⑥の変形量の検討について、橋梁を施工する場合、最終的なエレベーション管理が重要となるが、本橋の場合、波形鋼板のせん断変形が重要なファクターとなる。通常のPC箱桁橋では、コンクリートウェブのせん断変形量は、主桁断面の曲げ変形量に比べ非常に小さいため、変形量の計算においては、一般的にせん断変形量を無視している。しかしながら、波形鋼板ウェブPC橋では、曲げせん断を担うウェブの波形鋼板には、せん断変形能力が高い特徴を有しており、場合によっては、このせん断変形量を無視できない⁴⁾。これは、橋梁の規模、桁高あるいは前記①で説明したが、外ケーブルの定着突起構造に起因するウェブ構造によっても波形鋼板の負担するせん断分担率が異なることによって、曲げ変形とせん断変形の分担も異なる。したがって、変形管理には、これらの影響を十分反映した検討が必要であると考えられる。

⑦の裏打ちコンクリート部の検討において、支間の増大に伴い、連続桁の中間支点部やラーメン構造の柱頭部近傍の主桁断面に曲げが卓越することによって、下床版に圧縮応力が卓越することが憂慮される。これらの緩和手段として、ウェブの波形鋼板に裏打ちコンクリートを打設することによって、断面剛性を期待する方法がとられている場合がある。また、張出しケーブルに外ケーブルを用いて、それをこの裏打ちコンクリートウェブ部に突起定着される場合もある。このような場合、この裏打ちコンクリートの安全性の検討においては、波形鋼板とコンクリートが結合した合成断面の挙動と応力伝達挙動を把握する必要がある。

4. FEM解析を用いた設計例

前述した①～⑥の項目は、単純な梁理論や簡易計算では評価できないことが多く、したがってここでは、FEM解析手法を用いた解析モデルの設定と設計例を紹介するものである⁶⁾。

一般的に、本構造をFEM解析する場合、コンクリート床版と波形鋼板ウェブをすべてシェルモデルで構築した3次元FEM解析手法と、コンクリート床版はソリッドモデルと

し、波形鋼板をシェルモデルで構築した3次元FEM解析手法が考えられる。前者では、全体構造の曲げ挙動等の把握に対し十分な精度を備えていると考えられるが、本検討項目の評価としては、局所的な応力伝達機構の把握やウェブと床版のせん断分担性能の把握等を目的としていることから、本解析手法としては、後者のソリッドモデルとシェルモデルからなる3次元FEM解析によった。

ただし、本構造の特徴として、波形鋼板とコンクリート床版の接合方法があり、本例では、波形鋼板にフランジプレートに溶接し、さらにフランジプレートにアングルジベルを溶接した接合方法を採用しているが、上記の評価はすべて弾性挙動の範囲内としていること、また、検討項目には、とくにこれらの接合部の挙動に言及していないことから、波形鋼板とコンクリート床版の接合方法は、剛接合とし、フランジプレートはとくにモデル化していない。

また、モデル化の際の各要素の切り方については、個々の要素の切り方による解析精度の比較が目的ではないため、メッシュの切り方についての厳密な検討は省略した。

本FEM解析例の対象とした橋梁は、図-5に示す小河内川橋（日本道路公団発注）の2径間連続ラーメン橋であり、本解析にあたっての解析条件を以下に示す。

- ① コンクリートのヤング係数については、検討部位の設計強度に対する公称値を用いた。ただし、張出し施工時の外ケーブル緊張時や定着横桁でのPC鋼材の緊張時についての各部位の安全性の検討については、その時期に応じた材齢のコンクリートの物性を用いた。
- ② 波形鋼板の物性についても、上記①と同様である。
- ③ コンクリートと鋼材のボアソン比は、それぞれ0.167および0.3を用いている。

以下に各部位の検討におけるFEM解析モデルと設計例を示す。

4.1 外ケーブル定着部の検討例

解析モデルと境界条件をそれぞれ図-6、7に示す。解析モデルは、箱断面の対称性を考慮して、半モデルとしている。また、境界条件については、断面の対称性を満足するように定めた。

端支点横桁の支持条件については、実際の沓位置、大き

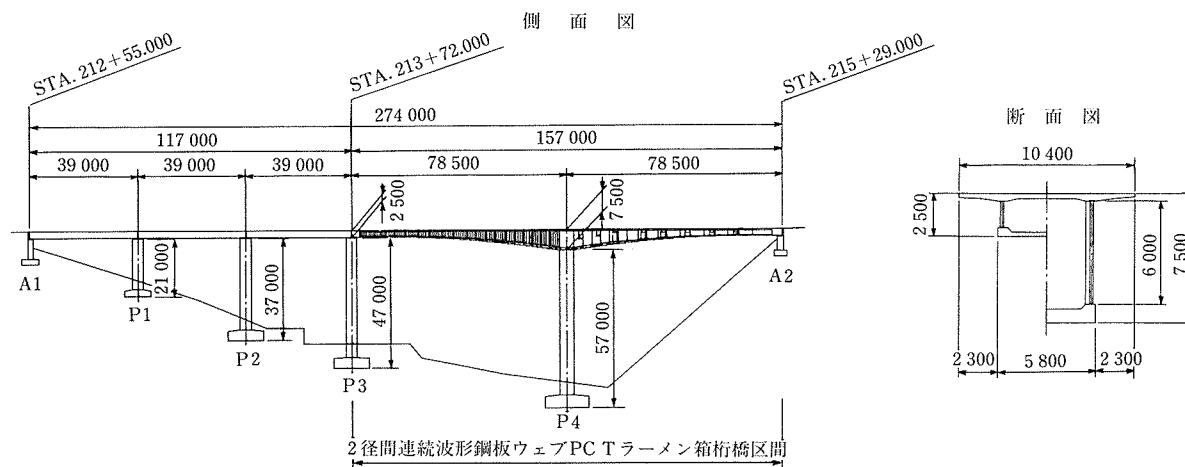


図-5 対象橋一般図

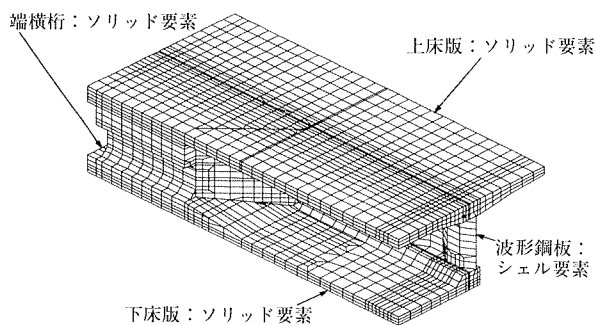


図-6 端支点外ケーブル定着FEM解析モデル

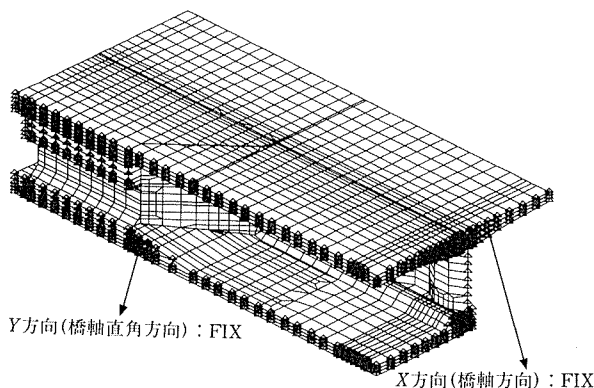


図-7 端支点外ケーブル定着FEM解析モデルの境界条件

さおよび支持条件を満足させている。

解析モデルは、端支点横桁を含む部分モデルとしているため、モデルに載荷した荷重は、図-8に示すように、全体構造の挙動と等価となるように等価断面力を載荷している。

考慮した載荷荷重は、実際の構造と等価となるよう、以下の荷重を考慮した。

- ① 主桁自重
- ② 橋面荷重
- ③ 活荷重
- ④ 床版横締めプレストレス力
- ⑤ 外ケーブルの端部緊張力

ここで、主桁自重については、解析モデルに物体力 (body force) を作用させている。橋面荷重については、図-9に示すように、床版上面の各要素に単位面積あたりの荷重として載荷している。活荷重載荷の一例を図-10に示すが、載荷方法は橋面荷重と同様である。床版横締めPC鋼材によるプレストレスについては、床版の端部に集中荷重を載荷することで評価している。また、外ケーブルによるプレストレスについては、図-11に示すように端支点横桁の端部に集中荷重を載荷することにより評価しているが、この場合、プレストレス力の載荷については、その作用方向を忠実に再現している。ただし、プレストレス力の載荷に対し、たとえば、床版横締め鋼材は、実際には曲上げ配置されているが、本計算例では床版の応力検討でないため、実構造とFEM解析ではその載荷方法を簡略化している。

FEM解析結果の一例を図-12に示す。解析結果として得られたコンクリートの引張応力度を積分した全引張力に対し鉄筋量を計算し、引張領域にその鉄筋を分散配置してい

$$1/2S = -590.0 \text{ (kN)}$$

$$1/2M = -8490.0 \text{ (kN-m)}$$

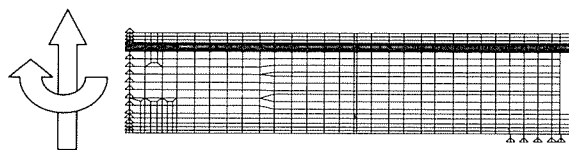


図-8 FEM解析モデルに載荷する等価断面力

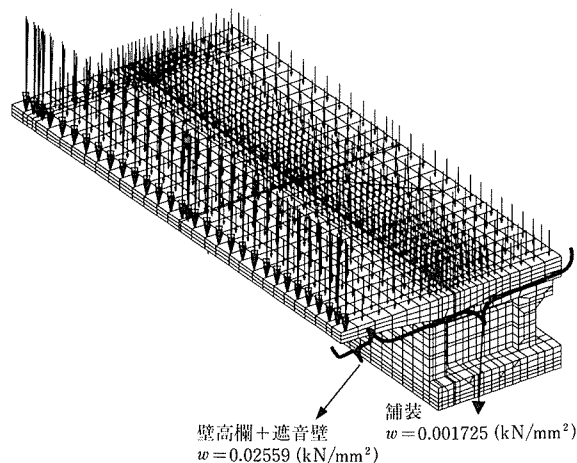


図-9 載荷橋面荷重

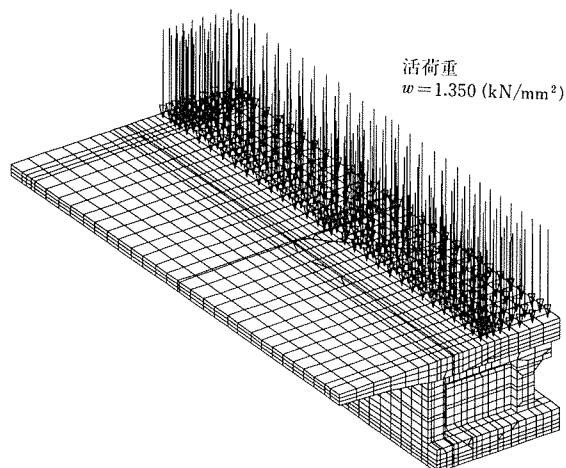


図-10 載荷活荷重

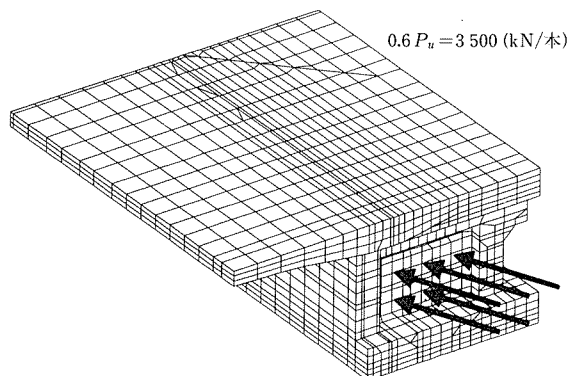


図-11 載荷プレストレス荷重

る。この場合の鉄筋の許容値は、 $\sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$ を用いている。鉄筋配置例を図-13に示す。

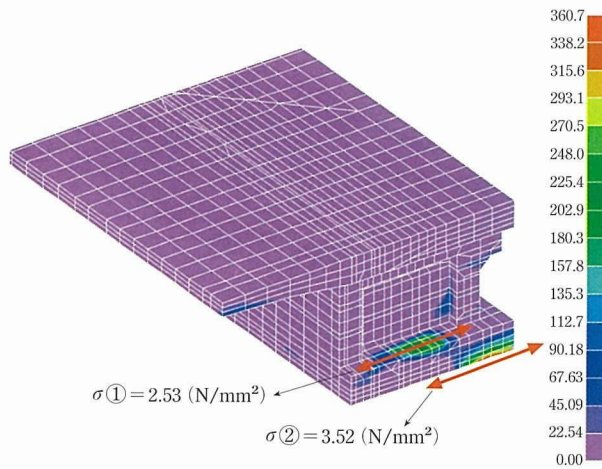


図-12 端支点外ケーブル定着部の発生応力度の一例

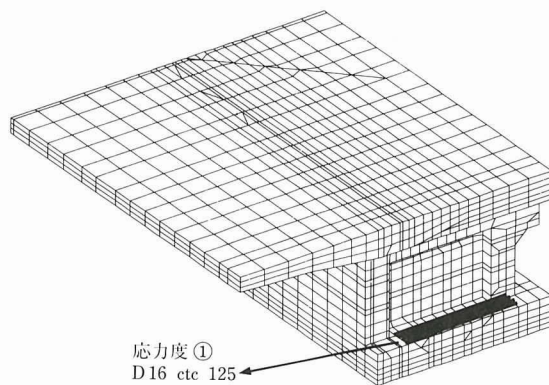


図-13 端支点外ケーブル定着部の補強鉄筋の一例

4.2 外ケーブルの定着部および偏向部の検討

本検討では、架設ケーブルとしての外ケーブルの定着部および偏向部について述べるが、本橋で採用した定着部の構造は、鋼リブを設けた構造である。

解析モデルの一例を図-14に示す。図-14は、外ケーブル定着部の検討を行うための張出し架設状態での構造である。また、連続外ケーブルの偏向による偏向部の検討のために完成構造を採用している。解析モデルは、箱断面の対称性を考慮して半モデルとしている。また、境界条件については前頁と同様である。

考慮した載荷荷重は、実際の構造と等価となるよう、以下の荷重を考慮した。

- ① 主桁自重
- ② 床版横締めプレストレス力
- ③ 外ケーブルの端部緊張力

ここで、各荷重の載荷方法については、前述した端支点横桁の場合と同様であるが、とくに張出し用の外ケーブル定着部においては、図-15に示すように、外ケーブルの定着板に均等にプレストレス力を載荷した。

ここでは、定着部そのものの検討やその近傍の応力伝達を検討するためと、鋼リブによる下床版との一体性を検討する目的でも行った。

FEM解析結果の一例を図-16に示す。本解析結果から、定着体背面には、外ケーブルの緊張力によって、大

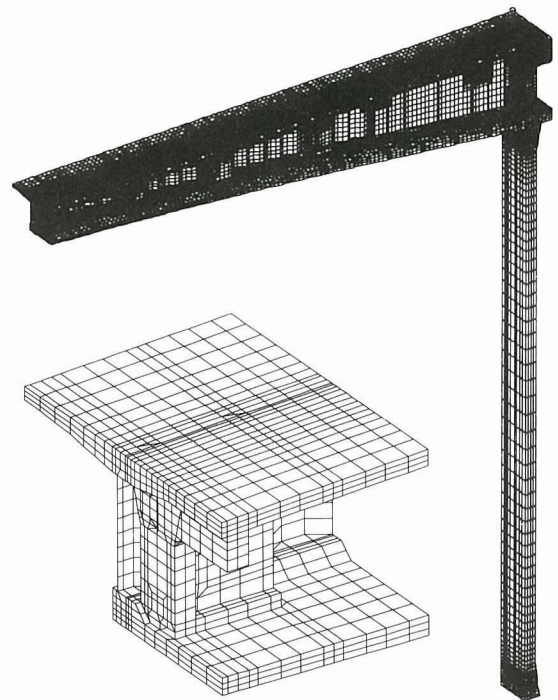


図-14 架設外ケーブル定着部の検討に用いたFEM解析モデル

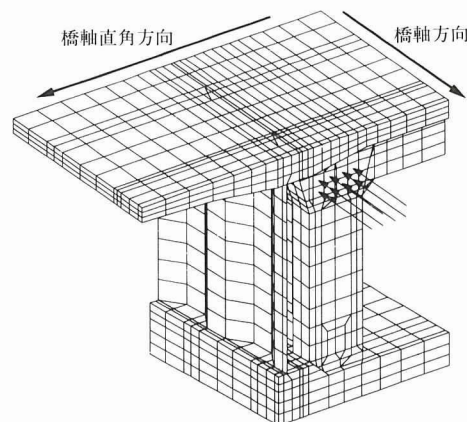


図-15 架設外ケーブルプレストレス力

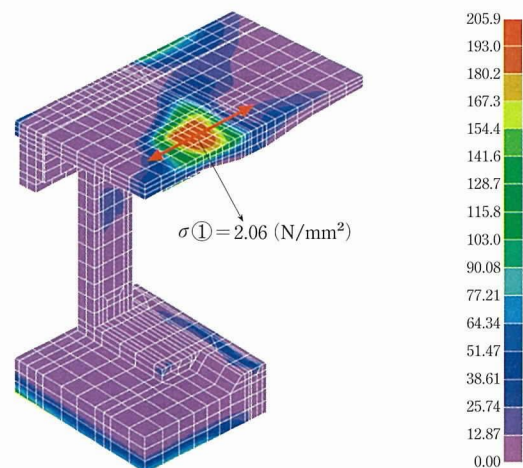


図-16 架設外ケーブル定着部の発生応力度の一例

きな割裂引張力が作用していることが明らかにされた。ここで得られたコンクリートの引張応力度を積分した全

引張力に対し鉄筋量を計算し、引張領域にその鉄筋を分散配置している。鉄筋配置例を図-17に示す。また、下床版との一体性によって、鋼リブと下床版には図-18に示すように鉛直方向に引張力が作用するため、図-19に示すように、鉛直方向に引張鉄筋を配置するとともに、鋼リブと下床版が分離しないようにボルトで堅固に結合させている。

また、外ケーブル偏向部の検討について、解析モデルの

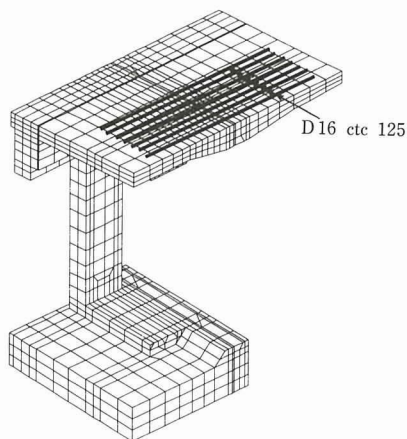


図-17 架設外ケーブル定着部の補強鉄筋の一例

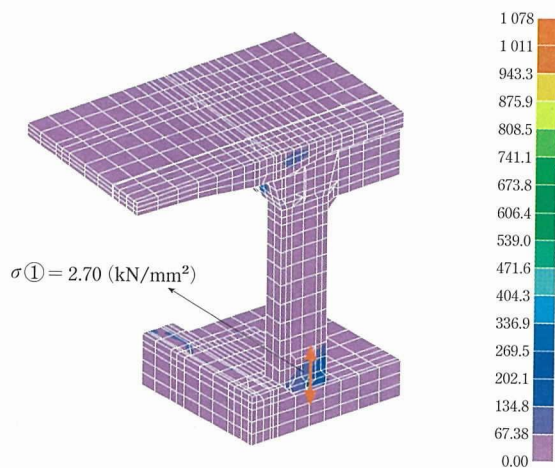


図-18 架設外ケーブル定着部の発生応力度の一例

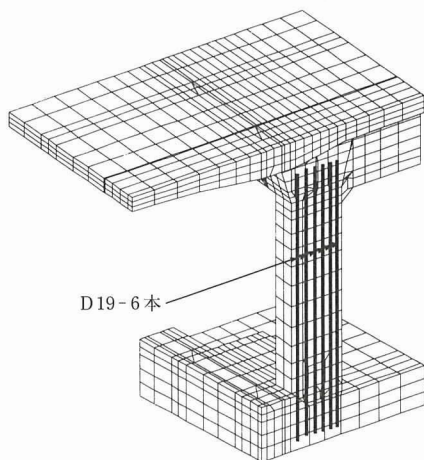


図-19 架設外ケーブル定着部の補強鉄筋の一例

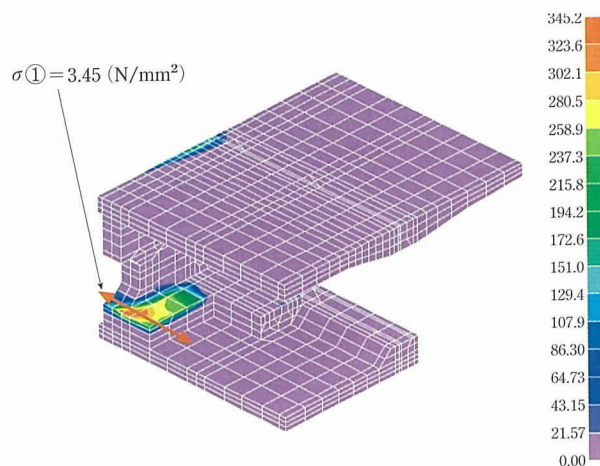


図-20 連続外ケーブル偏向部の発生応力度の一例

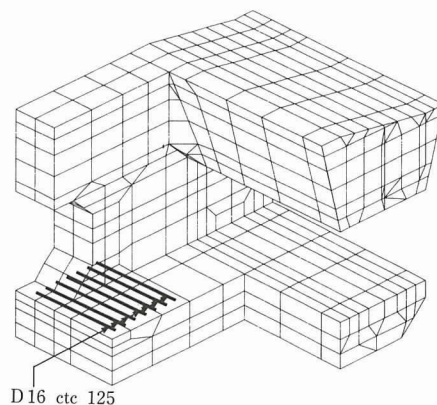


図-21 連続外ケーブル偏向部の補強鉄筋の一例

一例を図-20に示し、補強鉄筋の配置方法の一例を図-21に示す。これは、外ケーブルを偏向することによって、検査孔近傍の剛性の低い部位に力が集中して引張応力度が卓越するものと考えられる。

4.3 プレストレス有効範囲の検討

プレストレスの有効範囲で注意しなければならないのが、張出しケーブルの中間定着による影響である。本橋においては、前述の4.2項の定着部の検討での応力伝達挙動から、有効範囲を定着部から2ブロック背面で有効とした。

4.4 中間支点部での付加曲げ応力および反り応力の検討

本橋では、付加曲げ応力や反り応力が卓越する柱頭部近傍での波形鋼板に裏打ちコンクリートを行っているため、波形鋼板のせん断変形の影響はほとんどないことから、付加曲げ応力の検討は省略した。また、ねじり変形に起因する反り応力についても、本橋は直橋に近く、平面曲率によるねじりの影響は極めて小さいため、反り応力の検討も省略した。

4.5 変形量の検討

波形鋼板はせん断変形に敏感であることから、たわみの上越し管理については、せん断変形を考慮する必要があると言われている。

そこで、本橋では、変形量の検討において以下の方法で計算を行った。

- ① 波形鋼板のせん断変形を無視し、コンクリート床版

の曲げ変形のみを考慮した梁理論

② 波形鋼板のせん断変形とコンクリート床版の曲げ変形を考慮した梁理論

③ 3次元FEM解析（本解析）

たわみの解析結果を図-22に示す。本計算例は、最大張出し時の主桁自重による変形量を示すが、解析結果から、せん断変形量の影響は約60 mm程度あった。しかしながら、プレストレスの影響を加味すると、その差は10 mm程度となったため、本橋梁での上越し管理では、せん断変形の影響を無視した。

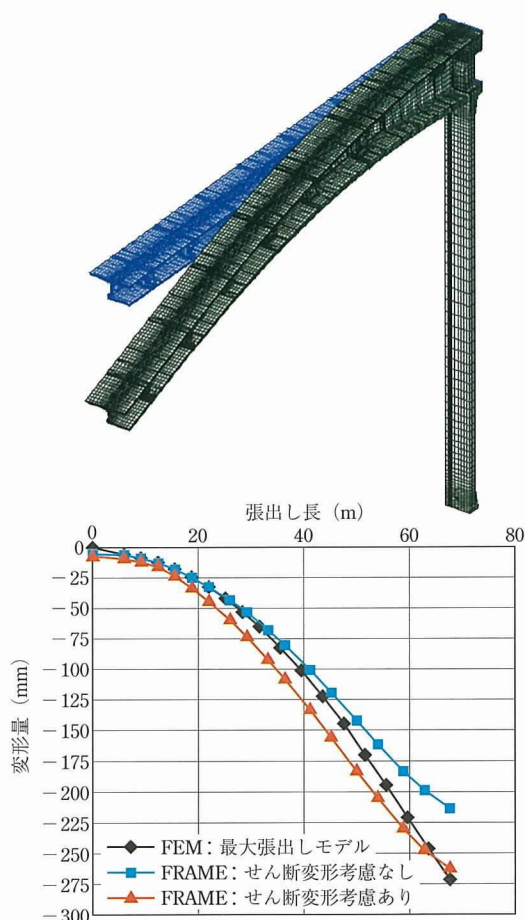


図-22 せん断変形量FEM解析モデルと梁理論との比較図

4.6 裏打ちコンクリート部の検討

裏打ちコンクリート部の検討については、この部分に外ケーブルが突起定着されるため、裏打ちコンクリート部と波形鋼板のみのウェブとの界面の安全性、柱頭部への応力伝達等を確認するために解析を行った。

解析モデルを図-23に示す。解析モデルとしては、箱断面の対称性を考慮して、半モデルを採用している。また、部分モデルのため、載荷荷重としては全体構造の挙動と等価となるように等価断面力を載荷している。

さらに、FEM解析結果の一例を図-24に示す。

以上、波形鋼板ウェブPC橋の設計におけるFEM解析の適用例と解析結果の一例を示したが、これがすべてではないことを付け加えたい。

すなわち、構造形式や施工方法によっては、構造系の変

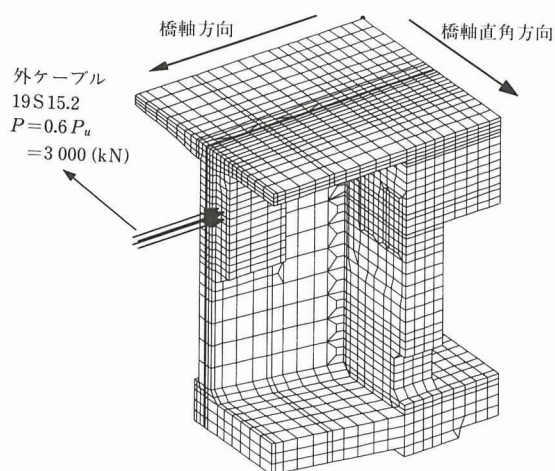


図-23 裏打ちコンクリート部のFEM解析モデル

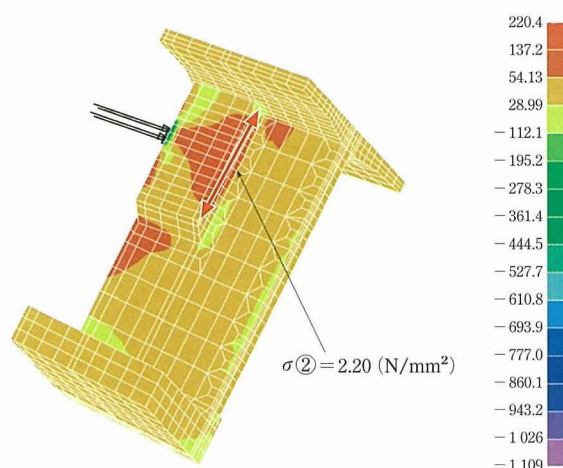


図-24 裏打ちコンクリート部の発生応力度の一例

化やプレストレスの導入方法によっても、検討部位が異なるからである。重要なことは、波形鋼板ウェブを採用するにあたって、構造の特異性を的確に判断して、検討部位を設定することにある。したがって、構造検討において、すべてFEM解析を使用する必要はないと判断される。

5. 今後の展望

近年、本構造橋梁の計画が急速に進んでおり、近い将来には、日本国内でも数十橋にも及ぶ橋梁が建設されるであろう。

このような環境の中、本橋梁の長大化に伴い、吊り形式の波形鋼板ウェブPC橋の計画もあり、桁高を絞ることにより、柔構造による曲げ挙動として、主桁断面の平面保持の仮定の検証も行われている。また、非線形FEM解析によって、波形鋼板の座屈耐力についても、鋼板製作時の初期不整等の影響によって、耐力が若干低下するとの報告もあり、今後これらの課題に対する解決策を指針等に整備することが急務であると考えられる。

6. おわりに

ここでは、波形鋼板ウェブPC橋のFEM解析を用いた設計例について、一つの橋梁を例にとって報告したが、長支間

橋梁の実績が少なく、とくに本橋は全外ケーブル対応の橋梁であるため、外ケーブルの定着方法や定着近傍での部材の安全性の評価について、いまだ設計法が十分確立されていないのが現状である。したがって、細部の構造部材の安全性を確保するために、3次元FEM解析が多用され、構造設計に多大な時間と労力が必要とされている。今後、このような解析例の集積を行い、より経済的な設計方法を提案していくことが、PC技術者の使命であると考ええる。

参 考 文 献

- 1) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブPC橋 計画マニュアル(案)，1998.12
- 2) 複合橋設計施工規準(案)：プレストレストコンクリート技術協

会，1999.12

- 3) 山崎，内田，御子柴：波形鋼板ウェブのせん断変形を考慮したコンクリートスラブの設計法の提案，第8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，プレストレストコンクリート技術協会，pp.25～30，1998.10
- 4) 水口，芦塚，大浦，日高：波形鋼板ウェブPC橋のせん断力分担率と床版の付加曲げについて，第9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，プレストレストコンクリート技術協会，pp.59～62，1999.10
- 5) 上平，立神，本田，園田：波形鋼板を有するPC箱桁橋のせん断およびねじり特性に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.40，No.3，pp.16～25，1998
- 6) 前田，津田，和田，足立：東九州自動車道小河内川橋（波形鋼板ウェブPC橋）の設計について，第10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，プレストレストコンクリート技術協会，pp.837～842，2000.10

【2001年3月8日受付】