

(90) 各種複合桁の耐荷性能の比較

日本大学	大学院	正会員	○本田	智昭
日本大学	大学院	正会員	大熊	康広
日本大学	理工学部	正会員	井戸	功誠
日本大学	理工学部	正会員	山崎	淳

1. はじめに

本研究室では大偏心外ケーブル橋についての研究を行っている。この構造を、PC箱桁を用いて検討してきたが、更なる効率化・軽量化のため、PC箱桁のウェブに波形鋼板や鋼トラスを適用させた大偏心外ケーブル複合桁構造についての検討をはじめた。

従来からの設計例が豊富に蓄積されているPC箱桁の挙動は、軸力・曲げ・剪断・ねじりのすべての断面力に対して研究が尽くされ、これらに対する設計の方法も確立され、設計規準における安全性照査の計算方法も明示されている。従って、PC箱桁の設計の安全性は実証的に示されており、必要な場合の照査の方法も透明性・説明性があり、信頼性が高い。

これに比較して、鋼トラスウェブや波形鋼板ウェブを腹部とするPC複合箱桁については、設計規準はまだ発展途上にあり、安全性の限界は明らかになっているとは言い難い。現段階では、経済性を求め、かつ安全性を明らかにするためには、限られた小数の実験研究の範囲を踏襲するか、FEM解析などによる事象に極力忠実な解析に依らなければならない。

FEM解析は、現段階の解析プログラムとコンピューター的能力では全体構造の解析と、構造細部の検討を目的とした部分構造の解析の2段階で行うのが実際的であると思われる。

部分構造の解析は、いわゆるサブストラクチャ法、またはズームアップ法と呼ぶ境界条件を全体構造解析の結果から決める方法として行うものと、今回の対象のように、部分構造の基本的挙動を明らかにする目的で行う二つの場合がある。

本報告は、上記のような背景の考察に基づき、構造特性を明らかにする目的で行う一連のFEM解析のうち、その一部につき例示するものである。対象構造物としては、上下床版・桁高を一定として、ウェブをそれぞれコンクリート板・波形鋼板・鋼トラスとした3つの構造形式を取り上げ、その一部に対し、3次元FEM解析をおこなった。FEM解析により、桁の挙動を確認し、比較検討をおこなった。

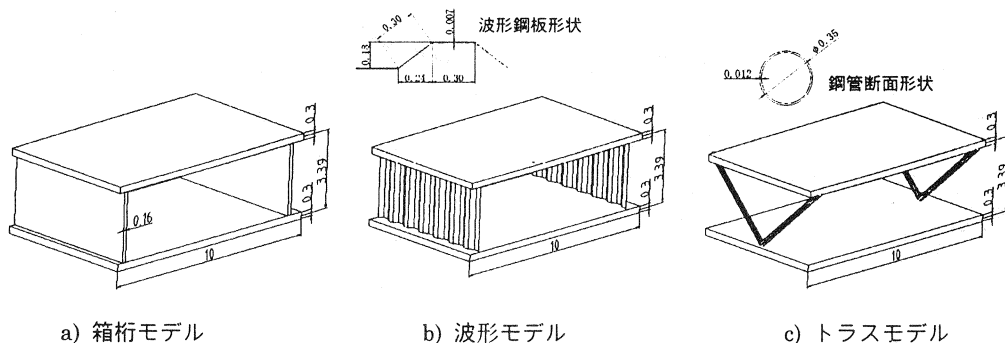


図-1 対象構造物

2. 対象構造物

図一1に対象構造物を示した。対象構造物は、本研究室で検討を行っている、大偏心外ケーブルPC複合桁(スパン180m)(井戸他、第8回シンポジウム論文集)に適応させることを想定して決定した。

解析の第一段階として、断面形状は、シンプルな形状である長方形断面とした。ウェブは、コンクリート板(箱桁)・波形鋼板・鋼トラス構造の、3つの構造形式をとりあげた。(以後順に、箱桁モデル・波形モデル・トラスモデルとする。)その他の断面形状は、今後随時検討していく。

断面の決定は、次のようにした。

3つの構造形式の共通の値として、床版と桁高を決める。床版の寸法は、幅10m・厚さ0.3mとした。桁高の決定は、曲げに対しては上下床版のみで抵抗するものとし、中央スパン180mの大偏心外ケーブルPC複合桁に適応させて計算し、3.69mと決定した。

ウェブは、共通の作用剪断力に対してそれぞれの方法で決定した。作用せん断力は、中央スパン180mの3径間連続桁にL活荷重(平均化し、 $w=3.6tf/m$)を載荷した場合に、作用する最大剪断力 $V=325tf$ とした。

箱桁モデルのコンクリートウェブ厚 b の決定方法は、次のようにした。作用剪断力 V から、ウェブに作用する、最大剪断応力 $\tau = \frac{QV}{bl}$ (Q :断面1次モーメント, l :断面2次モーメント, b :ウェブ厚さ) と軸応力 $\sigma = 50kgf/cm^2$ による主応力 σ_1 (引張) が、許容引張応力度 $8kgf/cm^2 \geq \sigma_1$ となるようなウェブ厚 b を決定した。

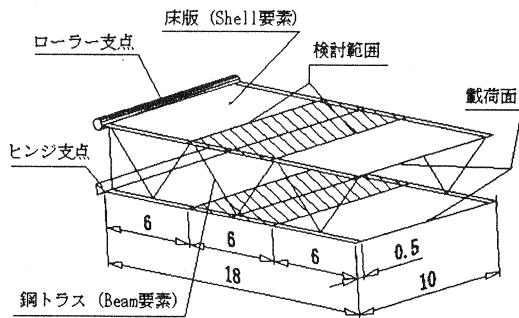
波形モデルの波形鋼板は、 $V = \tau_m t h$ (h :鋼板高さ, t :板厚) の関係になり平均剪断応力 τ_m が、許容剪断応力 $1050kgf/cm^2 \geq \tau_m$ となるように板厚 t を決定した。

トラス部材の断面は、作用剪断力がトラスと床版の接合部に作用したときの、トラス部材に伝達される軸力 $N = \alpha V$ (ここでは、 $\alpha = 1.337$) が作用した場合の軸応力 σ が許容応力度 $1800kgf/cm^2 \geq \sigma$ となる断面となるようにした。

以上より、ウェブの各形状は、図一1に示した通り、箱桁モデル-コンクリート板厚0.16m、波形モデル-波形鋼板厚0.007m、パネル幅0.3m、波高さ0.18m、トラスモデル-鋼管外径0.35m、板厚0.012mとした。

表一1 解析条件

コンクリート弾性係数 $E_c [kgf/cm^2]$	280000
鋼材の弾性係数 $E_s [kgf/cm^2]$	2100000
上フランジの厚さ $t_1 [m]$	0.3
下フランジの厚さ $t_2 [m]$	0.3
コンクリートウェブの厚さ $t [mm]$	160
波形鋼板の厚さ $t [mm]$	7
鋼管の外径 $D [mm]$	350
鋼管の管厚 $t [mm]$	12



図一2 解析モデル(トラスモデル)

3. 解析方法

構造のモデル化・解析・解析結果出力には、汎用FEMプログラム“COSMOS/M”を使用し、3次元FEM解析を行った。

3.1 解析モデル

2の対象構造物を以下のようにモデル化した。表-1に解析条件を示し、トラスモデルを例に、図-2に解析モデルを示した。

解析モデルは、片持ち梁形式とした。支持面の条件は、上床版はローラー支点、下床版はヒンジ支点とした。もう一方の端面を、載荷面とした。

橋軸方向の長さは、桁高の3倍~4倍の長さとなるように、18mとした。また、結果の検討には、解析モデルの中央6mの部分で行うこととした。

解析モデルの要素は、トラスモデルのトラス部材をBeam要素、その他のコンクリート床版・コンクリートウェブ・波形鋼板ウェブは、すべてShell要素とした。

3.2 載荷荷重

図-3に各荷重作用位置を、トラスモデルを例に示した。

基本的な挙動を調べることを目的としていることから、載荷荷重は、軸力・曲げ・せん断・ねじりを作用した場合について、4つの荷重ケースを設定した。荷重 $F \cdot V$ は、載荷面上にあるすべての節点(node)に平均値を集中荷重として載荷した。

- 1) 軸力 — 軸力に対して、上下床版のみで抵抗すると考えた場合、軸応力 50kgf/cm^2 となるように、上下各床版に、圧縮力として合計 $F=1500\text{tf}$ を載荷する。
- 2) 曲げ — 軸力と同じ力を、同じ位置に、上床版には圧縮力、下床版には引張力として載荷する。断面に作用するモーメントは、 $5085\text{tf}\cdot\text{m}$ となる。
- 3) 剪断 — 断面の計算時の最大剪断力を、上床版の同じ位置に、鉛直下向きに合計 $V=325\text{tf}$ 載荷する。
- 4) ねじり — T 荷重を端部に作用させた場合のねじり成分を考え、断面の横縁から 1m の位置に、それぞれ上下反対方向に $T=10\text{tf}$ 載荷する。

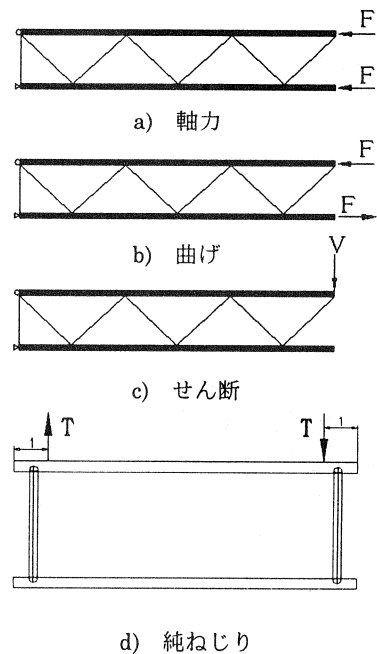


図-3 載荷荷重作用位置図

4. 解析結果

3の方法で解析した結果を、検討範囲で図-4~9に示した。各荷重ケースごとに、3つのモデルについて示している。

1)軸力

載荷面の上下床版に、軸圧縮力の合計1500tfを載荷した場合の軸方向ひずみ分布を、図-4に示す。ひずみ分布より、箱桁モデルは、ひずみが全体に均一に分布していることがわかる。

波形モデルは、鋼板には、ほとんどひずみが発生せず、また床版では鋼板との結合部付近のひずみは、小さくなっていることがわかる。

トラスモデルでは、トラス部材と床版の結合部に大きなひずみは発生しなかった。

このモデルの支持端側の断面の平均ひずみは箱桁モデルで0.000152、波形モデルで0.000162、トラスモデルで0.000159となった。このときの床版に作用している力は、箱桁モデルで1278tf、波形モデルで1364tf、トラスモデルで1338tfとなった。残りがウェブの抵抗している力と考えられるので、ウェブが軸力に対して、箱桁モデルで14.8%(222tf)、波形モデルで9.09%(137tf)、トラスモデルで10.8%(162tf)抵抗していることになる。本来、波形鋼板の軸力成分は無視出来るといわれる。この原因は、現在不明である。今後検討していく。

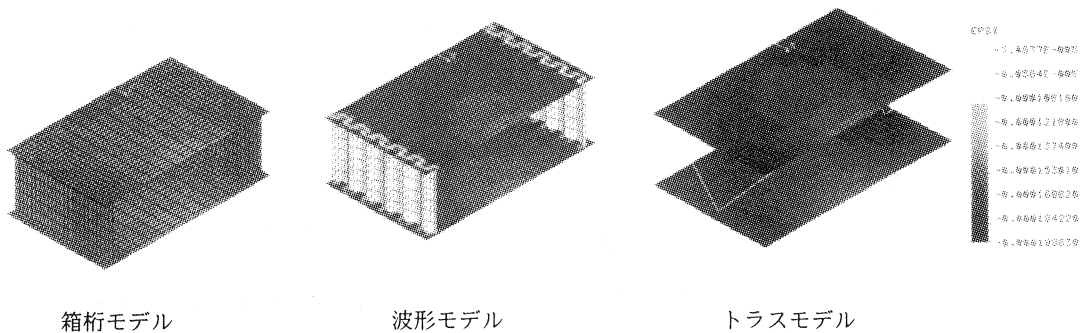


図-4 軸力-軸方向ひずみ ϵ_x 分布

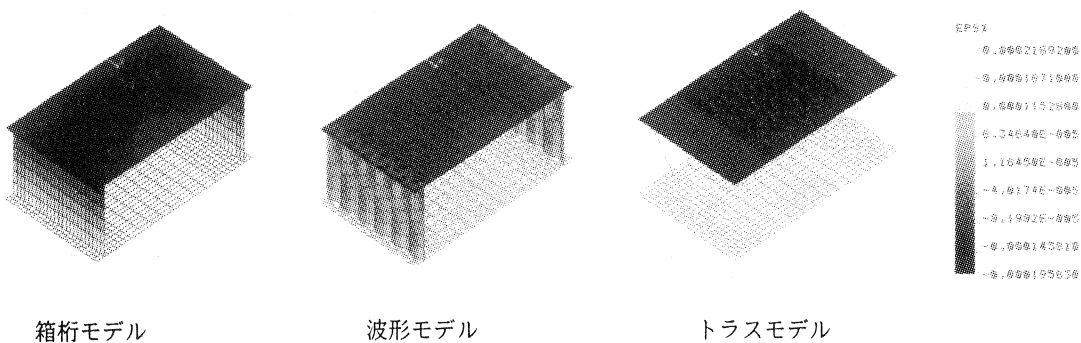


図-5 曲げ-軸方向ひずみ ϵ_x 分布

2) 曲げ

載荷面に曲げモーメント 5085tf-m を作用した場合の橋軸方向ひずみ分布を、図-5 に示す。

ひずみ分布より、上床版には圧縮ひずみ、下床版には引張りひずみが発生している。これにより、箱桁モデルではコンクリートウェブに床版からの距離に比例したひずみ分布となっている。それに対して、波形モデルの波形鋼板には全体的に小さいひずみが分布している。

このときの、床版の平均応力は、箱桁モデル 47.1kgf/cm²、波形モデル 46.8kgf/cm²、トラスモデル 49.8kgf/cm² となる。この応力から算出してモーメントは箱桁モデル 4787tf-m、波形モデル 4757tf-m、トラスモデル 5067tf-m、であり、作用モーメントに対し、床版の受け持つ割合は、箱桁モデル 94.1%、波形モデル 93.5%、トラスモデル 99.6%となった。

3) 剪断

図-6 には、橋軸直角方向の断面に対し、床版に作用する鉛直方向成分のせん断分布を示した。

箱桁モデルでは、床版の鉛直方向のせん断応力は、ほぼ均一に作用しているのに対し、トラスモデルでは、トラスと床版の結合部付近に非常に大きなせん断力が作用していることがわかる。また、波形モデルでも、結合部付近に大きな力が作用している。

図-7 には、箱桁モデルと波形モデルはせん断応力を、トラスモデルには斜材の軸応力を示した。波形モデルでは、床版の結合部付近で小さくなっていることがわかる。

支持端側断面の床版に作用した最大せん断応力は、箱桁モデルで 2.35kgf/cm²、波形モデルでは 1.84kgf/cm²、トラスモデルでは 6.68kgf/cm²、という結果になり、トラスと床版の結合部の応力が大きくなっている。

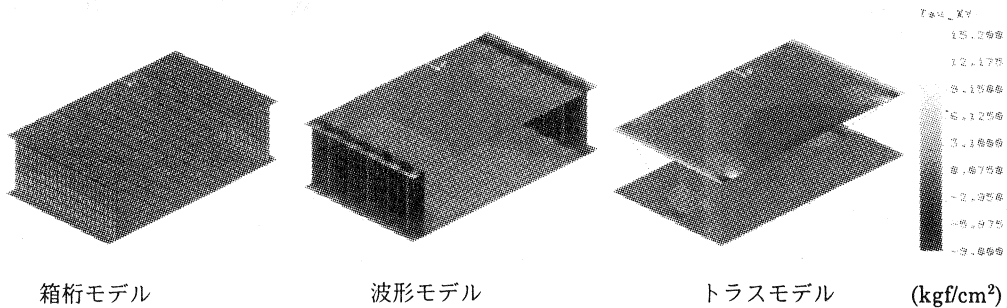


図-6 剪断-床版の剪断応力

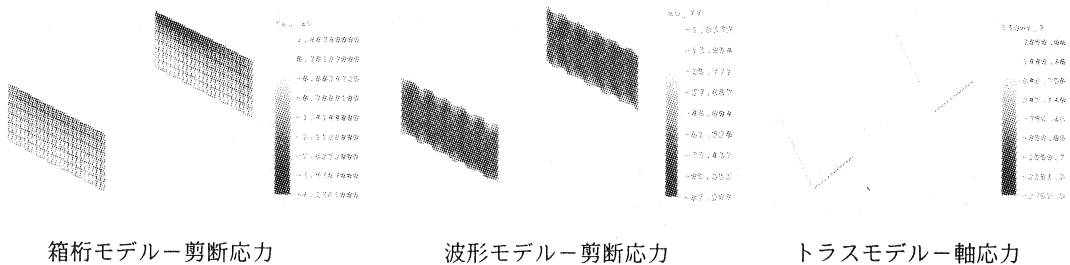


図-7 剪断-ウェブの各応力(kgf/cm²)

4) ねじり

ねじりモーメント 90tf-m を作用した場合の変形図を図-8 に、剪断応力分布を図-9 に示した。ねじりによる変形では、箱桁が小さい変形なのに対し、トラスモデルでは大きな変形となった。

鉛直方向の最大変位は、箱桁モデルで 0.22mm、波形モデル 0.74mm、トラスモデル 2.10mm、の変位となり、トラスモデルは箱桁の約 10 倍の変位となった。

図-9 には、橋軸直角方向の断面に対し、床版に作用する水平方向成分のせん断分布を示した。

床版の剪断力は、3つのモデルとも床版中央部に大きな値となっている。最大せん断応力は、箱桁モデルで 1.998kgf/cm²、波形モデル 2.790kgf/cm²、トラスモデル 3.8691kgf/cm²であった。

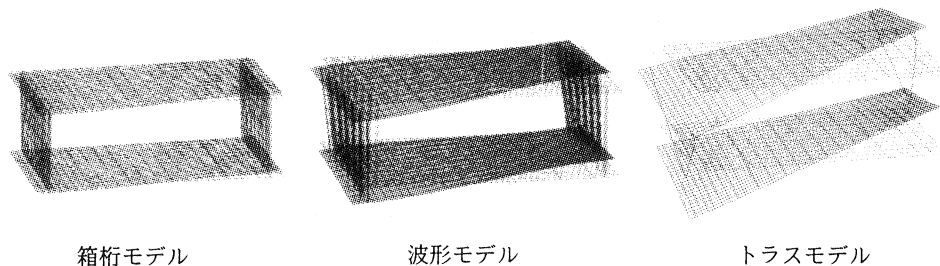


図-8 ねじり変形図

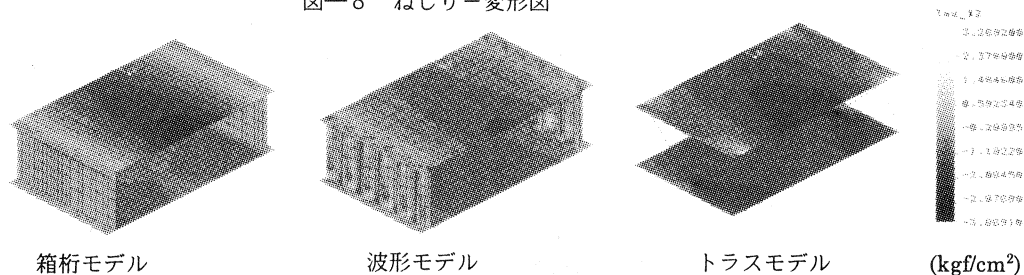


図-9 ねじり剪断応力

5. まとめ

今回の検討は、複合構造の波形鋼板ウェブ構造と鋼トラスウェブ構造を取り入れた構造を検討する最初の段階である。これらの構造を箱桁と比較することにより、構造の基本的な特徴を捕らえることを目的とした。桁全体でウェブ構造が変化した場合のみに着目し、結果を得た。

今回の結果では不明な点が多く残った。大きな問題点として、軸力の検討では、波形モデル・トラスモデル共に、平均軸応力が十分な応力にはなかったことが挙げられる。現在の時点で、床版中央部に発生した応力が、ウェブとの結合部付近よりも、小さい値になっていたことは大きな原因と考えられる。これらの不明な点を解明するために、解析結果の再検討、モデルの再検討、床版の幅に対するウェブの位置の影響、断面形状などを、検討していく必要がある。

また、ねじりでは、トラスモデルの変形が非常に大きいものになっていたことなどが挙げられる。トラス構造にこのような特徴があるとすると、立体トラスなどの構造も検討していく必要がある。

これら今回発生した問題を検討し、今後の更なる展開としては、各構造形式を用いるという前提にて、より良い断面を検討し、最終的には大偏心外ケーブルP C桁に適用するのに、最良の桁構造を考えていく。

参考文献 [1]: 井戸・大熊・張・山崎: 大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁模型の設計・製作
P C技術協会第8回シンポジウム論文集、1998年10月、pp.579-584