

中空床版橋の設計用解析モデルに関する考察

A study of the analytical model for the design of solid and voided slab bridges

今村 晃久*, 毛利 忠弘**, 角田 與史雄***

Akihisa IMAMURA, Tadahiro MOHRI, Yoshio KAKUTA

*ドーピー建設工業株式会社 本社設計部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-16-6 大塚ビル)

**ドーピー建設工業株式会社 本社設計部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-16-6 大塚ビル)

***工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

We have many actual results about the prestressed voided slab bridge. However we found in our investigation about this type bridges that the design method is not authorized even now. In this paper we will report the result of the investigation about voided slab bridges, and we will report a method of design optimization for this structure.

Key Words: Slab Bridge, voided slab bridge, skew, grid, Prestressed Concrete

キーワード: 中空床版橋、斜角、格子、プレストレストコンクリート

1. まえがき

著者らは、橋梁における版構造で最も採用例が多いPC中空床版橋において、同様の設計条件下で設計が成されているものでも、補強方法（鉄筋配置、鉄筋量等）が大きく異なる例が見られることに着目し、本構造に対する実績調査を行った。¹⁾その結果、設計方法が未だオーソライズされているとは言い難く、断面力解析モデルの選定から、その結果に対する補強計算に至るまで、一定の設計思想を見出すことは出来なかった。この調査結果を踏まえ、本構造の設計手法検証に取り組むこととした。

2. 設計手法の問題点

41 橋を対象とした調査で確認された、設計手法上の問題点を以下に列挙する。

- ① 断面力解析には格子桁解析を用いていたが、斜角を有した構造に対する解析モデルとして、平行格子モデル（図-1）と直角格子モデル（図-2）の 2 種類が存在した。
- ② 両モデルとも部材剛性の算出方法に差異は認められなかったが、平行格子モデルで剛性算出方向と部材配置方向の違いを補正していない。
- ③ 解析後の処理において、格子モデルで算出した断面力を幅員方向に足し合わせ、補強設計を棒モデルに変換して行っている。

上記の中でも、特に③は再分配した断面力を用いて、終局時ばかりでなく、使用時の検討も行っていることを

意味しており、非常に特殊な設計方法である。この処理を行わずに、ウェブ毎の設計を行ったものとの比較では、使用時において、支点鈍角部で危険側の設計となる他は、安全側の設計になることが確認出来たが、両者で PC 鋼材量が 2 割程度変化するケースもあり、①、②の解析モデルを含めた設計方法の検証が必要と判断した。本文では、特に解析モデルとその扱いについて、検証した結果を述べるものとする。尚、以下の FEM 解析には、COSMOS/M Ver.1.75A を使用した。

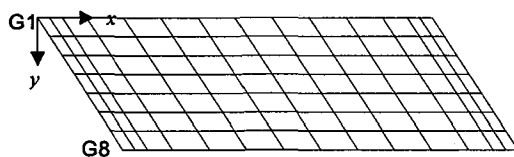


図-1 平行格子 Model

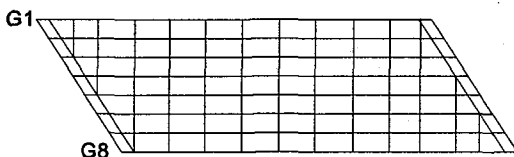


図-2 直角格子 Model

3. 横方向剛性について

3.1 横方向剛性解析モデル

検証を行うに当たって、解析モデルとして一般的である格子モデルの適用を前提とし、まず明確な横方向部材を

持たない中空床版構造を格子モデルへ最適化する際の横方向剛性に対する検討を、平面 FEM モデルによる線形解析値と、棒解析を比較することで行った。

FEM 解析モデルの境界条件と载荷条件を図-3 に示す。使用した要素は、1m 厚の 3 節点平面応力要素で、左右の下端節点に対して単純支持の境界条件を与えた。比較する棒解析の断面としてはウェブ位置を想定した充実断面 Type1 と円筒中心を想定した穴空き断面 Type2 の 2 種類について解析を行った。これらの断面形状と断面 2 次モーメントを図-4 に示す

解析に影響する変動パラメータとして、版幅と版厚、円筒の上下かぶり、ウェブ厚が考えられたが、実際の中空床版橋の断面決定は、円筒の上下かぶりを構造細目と、想定される配筋段数から定め、ウェブ厚を PC 鋼材の配置列数より定めるのが一般的であり、調査結果でも両者は数種のバリエーションしか存在しない。よって、版幅の影響確認のための解析では版幅変更とそれに伴う円筒数のみを変化させた。

3.2 横方向剛性解析結果

図-5、図-6 に示す通り、変位量、応力度ともに FEM 解と Type2 断面を用いた棒解析の解が極めて近い結果となった。これは円筒のかぶりが最も薄い部分の断面が横方向剛性として支配的であることを示している。尚、Type2 断面を用いた解析で、変位量が FEM 解を多少下回ったのは、棒解析を行う際にせん断変形を考慮していなかったためと思われる。次に、円筒数を変化させた解析結果のうち、円筒数 6 個のケースについて図-7 に示すが、円筒の数の変化や奇数、偶数の場合においても上記結果と同様の傾向であった。しかし、円筒数の減少と共に Type2 断面の解析値と FEM 解の差が増大することが確認出来た。これは円筒数の減少と共に、棒性状からボックスラーメンの性状に近づいていくためと推察することが出来る。円筒数が 3 個程度の中空床版橋は非常に稀ではあるが、このような場合に、横剛性を 1 つの断面で代表させるような解析は困難であると思われる。

実橋の設計では、Type1 の断面を用いている例は皆無で、一部両者の平均値を用いている例が存在した。本検討の範囲では、中空床版橋を格子モデルに置き換える上で、仮想的横方向部材（以下、横方向部材と表記する）として Type2 の断面を用いることの妥当性がある程度検証することが出来た。この結果を踏まえ、次節の 3 次元解析値に対する比較格子モデルの横方向部材には Type2 断面を用いることとした。

4. 格子モデルの検証

4.1 解析モデル

次に図-1、図-2 に示した格子モデル形状の妥当性を検証するために、各格子モデルと 3 次元 FEM による線形

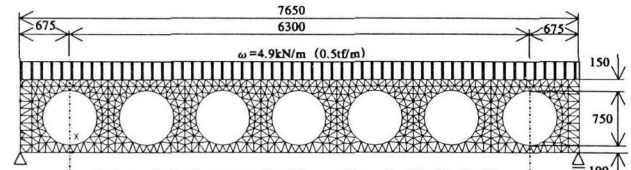


図-3 平面 FEM 解析モデルと载荷条件

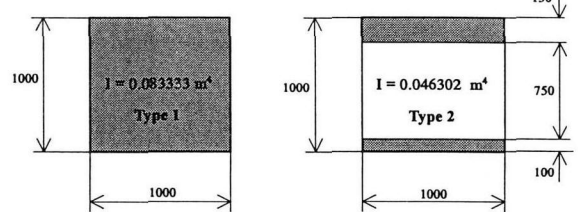


図-4 比較用棒解析モデルの断面形状

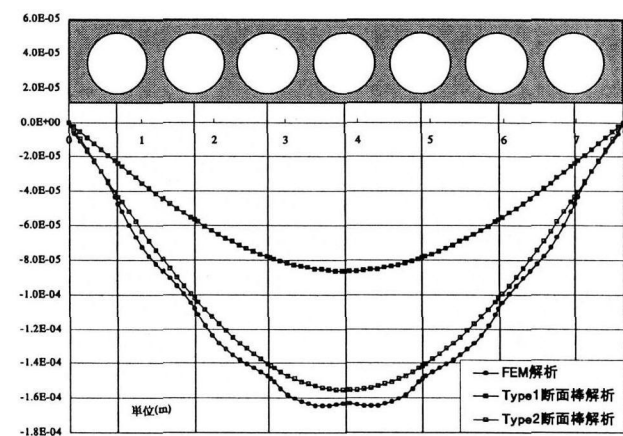


図-5 FEM 解析と棒解析の変位量比較

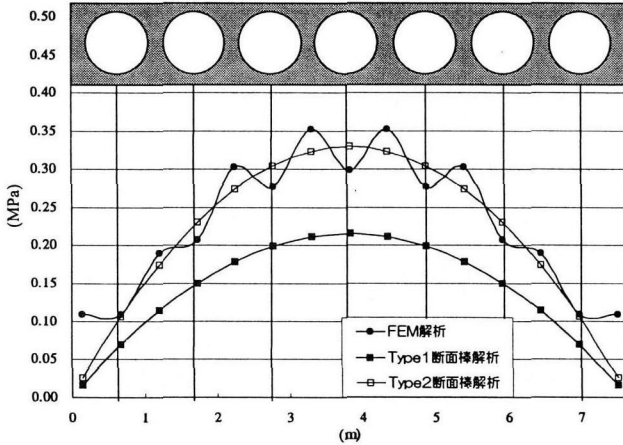


図-6 FEM 解析と棒解析の下縁応力度比較

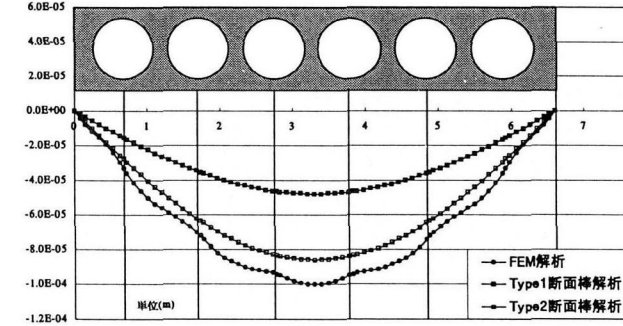


図-7 FEM 解析と棒解析の変位量比較（円筒数 6）

解析との比較検討を行った。

解析対象として、全長 18m、版幅 8.4m で 60° の斜角を有する単純中空床版橋を選定した。実橋では張出し床版を有する断面形状が一般的であるが、今回の解析ではウェブ形状の影響を無くするため、外ウェブ、内ウェブ共同一形状とした。8 節点 Solid 要素を用いた FEM モデルの全体図を図-8 に、その際の端部と一般部の要素割り図を図-9(b), (c) に示す。図-9(a) に示す中空床版断面を要素分割するに当り、断面積、断面 2 次モーメント、図心位置が変化しないよう配慮した。検証モデルとして図-10(a)(b) に示すような平行、直角格子桁モデルを用いた。主方向部材 (G1~G8) については両モデルとも同一であるが、横方向部材は支間を横切る部材剛性の合計が等しくなるよう設定した。尚、実設計とは異なり剛性算出方向と部材配置方向の違いに対する補正を行った。

載荷荷重は主版自重のみとし、FEM モデルに対しては、単位体積質量 2.5ton/m³ を与えた上で、Y 軸と反対向きに重力加速度を作用させ、格子桁解析モデルに対しては、各ウェブ上に線荷重を載荷した。境界条件については、全モデル共、G1、G3、G6、G8 ウェブに与えた。尚、基準となる FEM 解析については、図示の要素割りの他に複数パターンの解析を行い、解の精度を検討した上で、要素最適化を行った。

4.2 主方向曲げに対する検討

FEM 解析におけるウェブ下縁の z 方向 (以下、主方向と記す) 応力度 σ_z と各格子桁解析の下縁曲げ応力度の比較結果について G1 を図-11、G4 を図-12 に示す。尚、図-11 には参考値として、単純棒解析による値も表示した。

格子桁解析では振り剛性を有する横方向部材が有り、節点の左右で異なる断面力を算出するため、不連続なグラフ形状となっている。平行格子モデルと直角格子モデルの比較では、直角格子モデルの方が顕著な断面力差が認められたため、G1 の直角格子モデルの解については左右値の平均値を算出し図示した。(凡例では「直角平均」と表示) 一見して明らかなように、外ウェブ (G1)、中ウェブ (G4) 共に、直角格子モデルが、FEM 解により近い解となった。支間中央の曲げモーメント、変位共に平行格子モデルの方が 20% 程度、直角格子モデルに比べ算出値が大きい。これは、支点から同一距離に横方向部材が接合されているため、横方向部材の変位拘束効果が少ないことが原因と思われる。本構造のように主曲げ方向と主方向部材配置が異なる場合、直交部材配置にしなければ良好な力の分配が行われなことが確認出来た。また、直角格子モデルの算出値について、節点左右の平均値が FEM 解に近くなったことについては、主方向部材の回転変形拘束が実際の構造物では連続的に分布するのに対して、格子桁モデルでは節点に集中しているため、

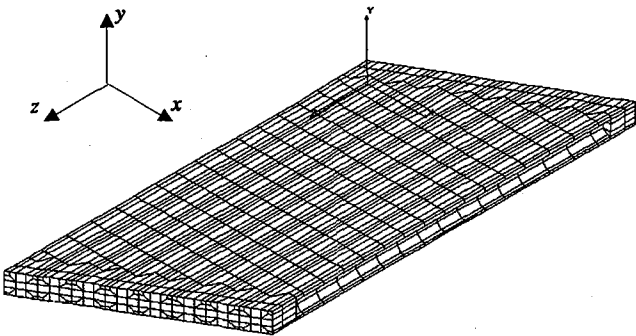
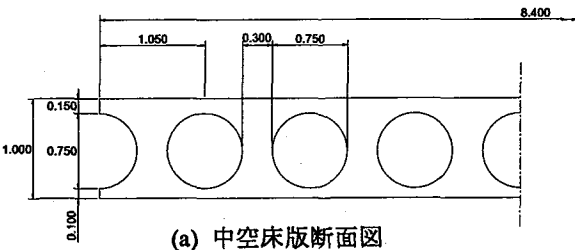
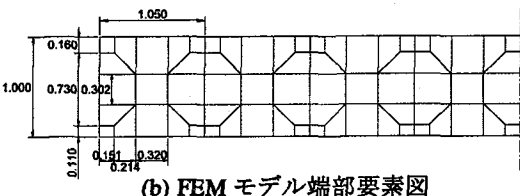


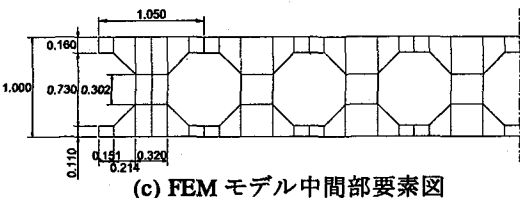
図-8 3次元 FEM 解析モデル全体図



(a) 中空床版断面図

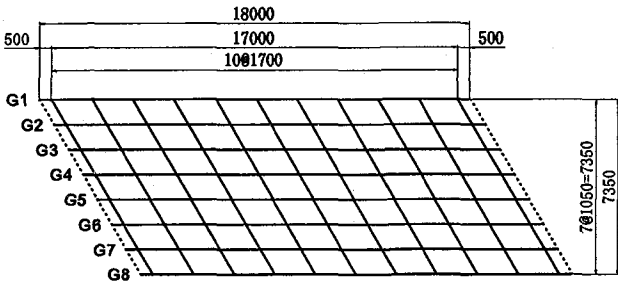


(b) FEM モデル端部要素図

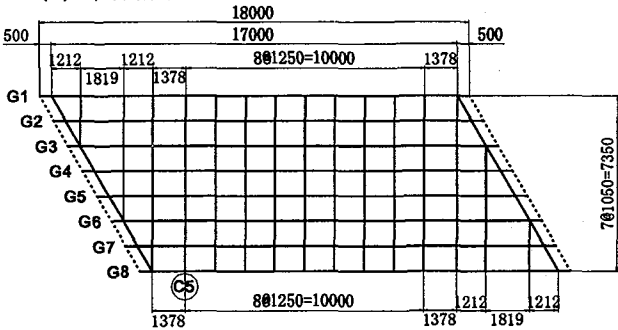


(c) FEM モデル中間部要素図

図-9 解析モデル断面図



(a) 平行格子



(b) 直角格子

図-10 格子桁解析モデル

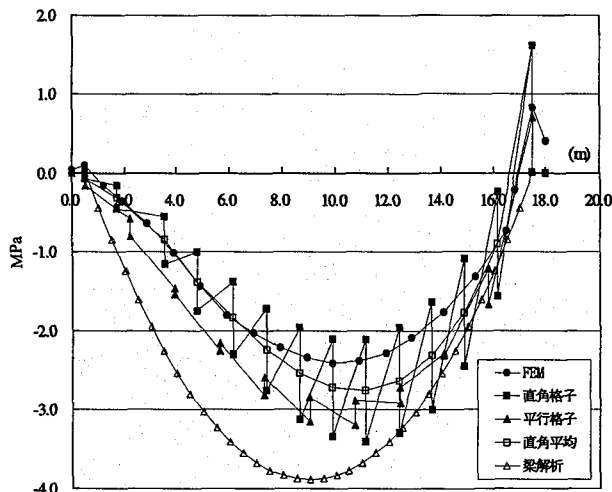


図-11 G1 下縁応力度解析値比較

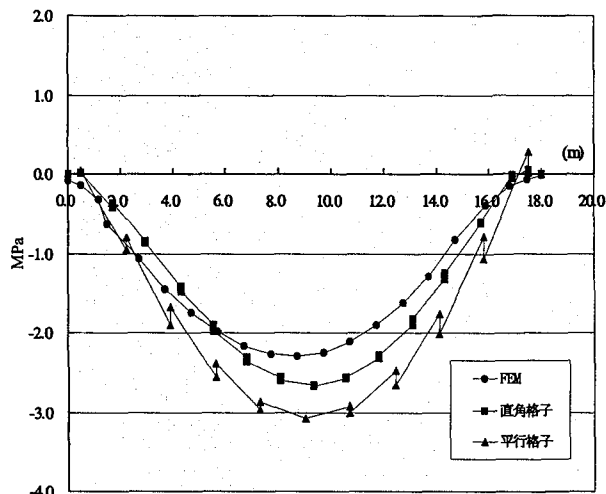


図-12 G4 下縁応力度解析値比較

実際にはその両側の部材に分布して作用する応力の影響を代表しているものと考えることが出来る。

もしも FEM 解に基づいて設計するとすれば、主応力の方向と配筋方向とが異なる場合、配筋方向の断面には配筋方向の直応力成分による曲げモーメントの他に、水平せん断応力による振りモーメントも作用するので、前者に対する曲げ補強鉄筋の他に、後者に対する補強鉄筋を加える必要がある。その量はコンクリート標準示方書²⁾の面内力を受ける面部材に準じることが出来る。そこで式-4.1から主方向 z、横方向 x の平面応力を算出した。

$$\begin{aligned}\sigma_{zd} &= \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha + (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ \sigma_{xd} &= \sigma_1 \cdot \sin^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \alpha + (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \alpha \cdot \cos \alpha\end{aligned} \quad \text{--- 式-4.1}$$

ここに、 σ_1, σ_2 : 最大最小主応力 (xz 平面)
 α : σ_1 と z 軸の成す角度

式-4.1 において、 $(\sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2 \alpha)$ は曲げによる応力度、 $(\sigma_1 - \sigma_2) \sin \alpha \cdot \cos \alpha$ が振りによるものであり、前 2 項の合計値と前記 σ_z の値が同じであることを確認した。これらの値を比較するに当たって、格子桁モデルに対する剛性の影響を見るため、直交異方性版の基本式

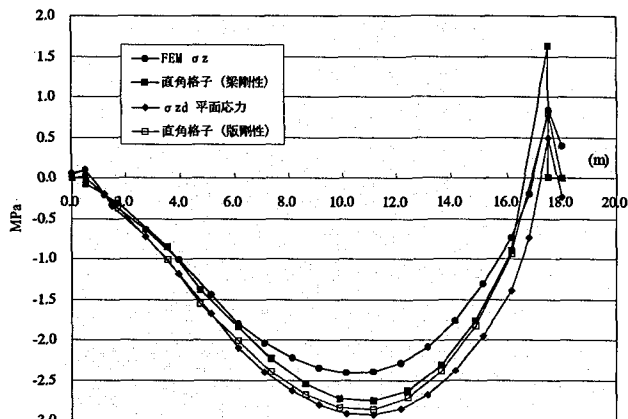


図-13 G1 下縁平面応力度比較

より求めた、版としての剛性³⁾を式-4.2より算出し、直角格子モデルを用いた解析を行った。

$$D_x \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = p$$

----- (直交異方性版の基本式)

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \frac{bh^3}{12(1-\nu_x \nu_y)} & I_y &= \frac{ah^3}{12(1-\nu_x \nu_y)} \\ J_x &= \frac{C_x}{G_{xy}} = \frac{bh^3}{6} & J_y &= \frac{C_y}{G_{xy}} = \frac{ah^3}{6} \end{aligned} \right\} \quad \text{--- 式 4.2}$$

ここに、 I_x, I_y : 断面 2 次モーメント
 J_x, J_y : 振り断面 2 次モーメント
 G_{xy} : せん断弾性係数
 a : 橋軸方向部材間隔
 b : 横方向部材間隔
 h : 主版厚
 C_x, C_y : x、y 方向仮想桁の振り剛性
 ν_x, ν_y : x、y 方向のポアソン比

σ_{zd} と σ_z 、直角格子モデルの下縁応力度を G1 について比較したものを図-13 に示す。比較の結果、直角格子モデルの解は、 σ_z に比べ σ_{zd} により近いものであった。これは、直角格子モデルが先に述べた二つの作用成分を適切に評価し得ることを意味している。また、直交異方性版の剛性を用いて解析した結果は σ_{zd} に対する精度向上が見られたが、その差は若干であり、現状の設計における剛性算出手法は妥当であると判断出来る。

以上の結果から、本構造に対して直角格子モデルで解析した節点左右の断面力平均値を用いて、補強設計が可能であると考え。

4.3 主方向せん断力に対する検討

次に主方向部材のせん断力に対する検討を行った。せん断力の比較を行うに当たって、FEM 解析における τ_{zy} に各要素面積を乗じ、ウェブ毎のせん断力を算出した。これについても、曲げ応力度の時と同様に、G1、G4 ウェブについて、各解析モデルの比較を各々図-14、図-15 に示す。せん断力についても、曲げ応力度と同様に直角

格子モデルが基準値である FEM 解に近い結果となった。しかし、曲げ応力度の場合に比べ、平行格子モデル G1 ウェブのせん断力値と分布形状は他の解析値と大きく異なっている。これは、主方向部材の鉛直変位を横方向部材が拘束し、その力をせん断力として隣接の主方向部材に伝えるのだが、平行格子モデルではそのような力の伝達機構が適切に評価されていないと考えられる。G2～G7 の中ウェブについては、図-15 のように解析手法による大きな差は無かったが、外ウェブの結果を見る限り、平行格子モデルによる解析は妥当とは言えない。また、ウェブ毎のせん断力には最大で3倍の差が生じていることから、ウェブ毎の補強設計が必要と思われる。尚、境界条件を与えた支持ウェブ G3、G6 のせん断力図は示していないが、これらのせん断力も基本的に G4 と同様であり、せん断力の差はウェブの支持、不支持が原因となって生じているものではなかった。

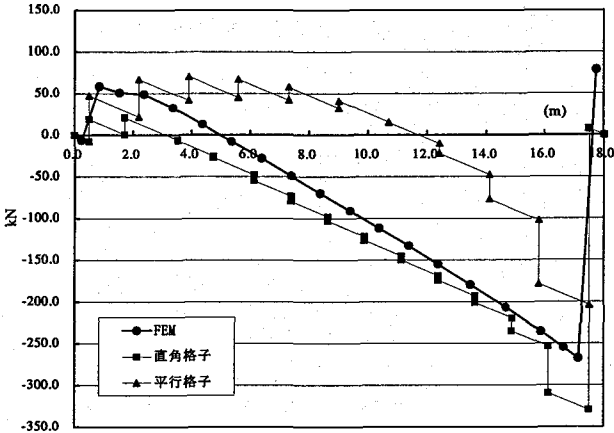


図-14 G1 せん断力解析値比較

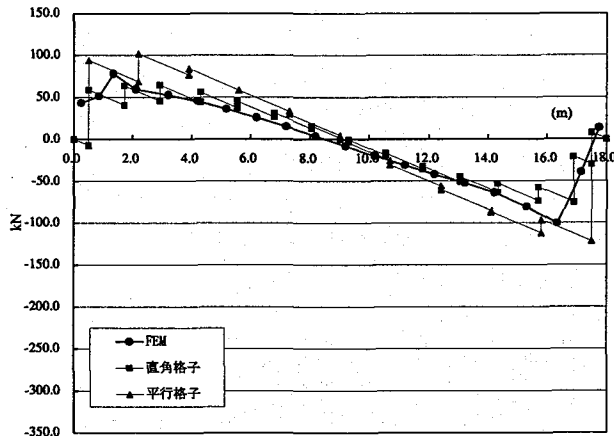


図-15 G4 せん断力解析値比較

4.4 主方向振りモーメントに対する検討

本構造のように、主曲げの方向が主方向部材配置方向と異なる場合、構造全体に変形適合振りが発生することは予想されるが、格子桁解析で算出されるようなウェブ毎の振りが生じているか否かについての確認を行うために、式-4.3 を用いて、x-y 平面におけるせん断力 τ を算出し、版断面におけるせん断力の流れを確認した。

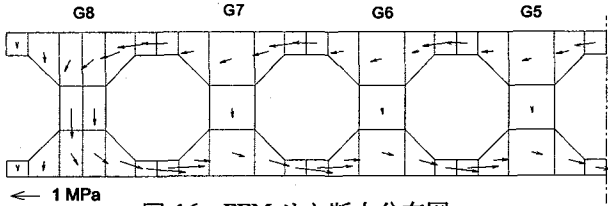


図-16 FEM せん断力分布図

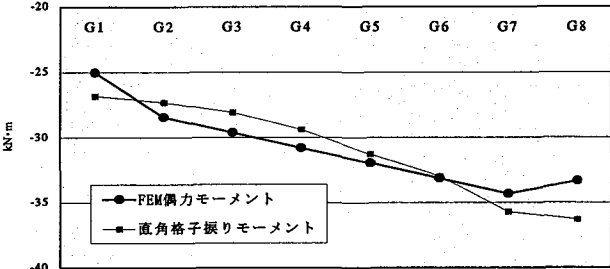


図-17 振りモーメントと FEM 偶力モーメント比較

$$\tau = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2}, \tan \theta = \frac{\tau_{yz}}{\tau_{xz}} \quad \text{--- 式-4.3}$$

ここに、 τ_{xz} 、 τ_{yz} : 要素中心のせん断応力度
 θ : x 軸に対する τ の角度

C5 断面 (図-10 (b)参照) でのせん断力の分布を図-16 に示す。FEM 要素割において、外ウェブのみウェブを二分したのは、本検討において、ウェブ内におけるせん断力の状態を確認するためである。図示の通り、上下床版に逆方向のせん断流が存在し、ウェブ毎の振りモーメントを生じさせる力は確認出来なかった。確かに外ウェブに振りモーメント (上下逆向きのせん断流) は生じていなかったが、他のウェブにおいて振りを生じさせる正負のせん断力が互いに打ち消しあっている可能性は、今回の要素割では証明出来ないため、先のせん断力を用いてウェブ毎の偶力モーメントを算出し、直角格子モデルの同位置における振りモーメントと比較したものが、図-17 である。各モデルの解には最大で5%程度の差はあるが、格子桁解析で算出される振りモーメントは、断面内せん断流の偶力モーメントと考えられる。よって、補強設計においては、直角格子モデルの振りモーメントを上下床版距離で除し、平面応力として処理することで、合理的設計が可能と思われる。

4.5 反力に対する検討

最後に支持点の反力に対する検討を行った。比較結果を図-18 に示すが、反力値、反力分布共に、直角格子モデルが良好な解を算出した。曲げ、せん断の所でも述べた通り、平行格子は本構造の特性を評価し切れていないと判断出来る。現状の設計手法から推察すると、格子解析を行う主たる目的は多点支承の反力算出にあると考えることが出来るが、平行格子モデルはこの目的に対しても妥当なモデルとは言えない。直角格子モデルも反力分布は FEM 解に近いものであるが、最大反力 (鈍角部 G8)

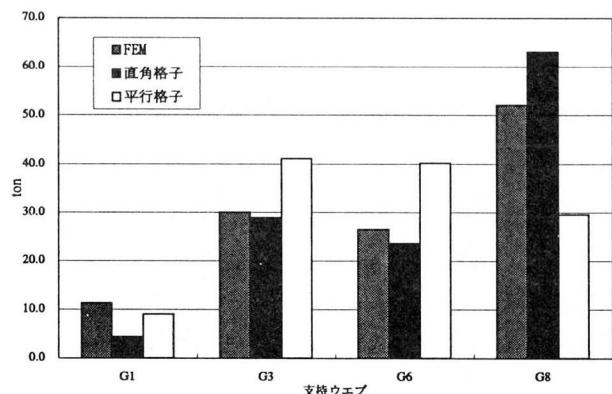


図-18 反力値比較

は、FEM 解に対して 20%程大きな結果となった。しかし、本解は固定境界に対するものであり、実橋と同様にバネ境界とすることで、この差は 4%程度になることが確認出来ており、直角格子モデルが反力解析に対しても十分な精度を有していることが確認出来た。

8. まとめ

今回の検討の範囲で、確認することが出来た内容を以下にまとめる。

- ① 設計モデルとして格子桁モデルを用いることは妥当な選択であるが、平行格子モデルは斜角を有する構造に対してその構造特性を適切に評価しているとは言えない。実際の補強筋の方向を考えても、直角格子モデルを採用するべきである。
- ② 実際の設計で行われている、支点から同一距離の主方向部材の断面力を足し合わせた値に対して補強設計を行う手法に対して、妥当性を見出すことは出来なかった。応力度分布を見ても、全ての断面力に対して、ウェブ毎に補強設計を行う必要がある。
- ③ 格子モデルでは節点の左右で異なる断面力を算出する。これは本来連続した変形拘束を不連続な節点で行っているためであり、実設計では絶対値の大きい値に対して補強設計を行っているが、左右の値の平均値を用いて設計を行って良い。
- ④ 直角格子モデルで算出した主方向曲げモーメントに対して、補強設計をすることで、主応力方向と配筋方向が異なることにより生じる、水平せん断力による振りモーメント成分に対する補強を行うことが可能である。
- ⑤ 主方向のせん断力も、直角格子モデルが FEM 解と近い解を算出することが確認出来た。外ウェブと中側ウェブの断面力差が大きいことから、せん断力についても、曲げモーメントと同様にウェブ毎に補強設計を行う必要がある。
- ⑥ 振りモーメントについては、FEM 解析の結果からはウェブ毎の振りは確認出来なかった。格子桁モデルで算出される振りモーメントは、上下フランジセ

ん断力の偶力モーメントと考えることが出来る。よって、振りモーメントに対する補強は、スターラップではなく、主方向、横方向の上下フランジ鉄筋で行う必要がある。

- ⑦ 反力についても、直角格子モデルの解が FEM 解に近いことが確認出来た。本文では触れなかったが、平行格子では与える剛性によって反力バランスが大きく変動することが確認されており、反力算出においても直角格子モデルが適当と思われる。

以上の検証は基本的に使用状態に対する検証であり、終局状態については現状の設計方法で問題ないという前提に立っている。これは、終局状態では塑性変形による断面力の再配分が期待されるのでかなり安全側の設計になっていると考えられるからである。今後、この点の確認と合理化の検討が必要と考えている。

現状の設計手法では、従来、設計断面として来た支間中央で過度に安全側の設計になる反面、鈍角部外ウェブでは危険側の設計になる可能性が高い。鈍角部支点付近の円筒かぶりに貫通クラックが発生した例や、死荷重作用時における鋭角部支承の浮き上がり等は、設計モデルが主な原因になっていると推察出来る。今回は、実績調査に対する検証であるため、使用実績の多い平行格子モデルを比較対象としたが、変形拘束や力の伝達を考えた場合、部材配置が直交している直角格子モデルの方が適しているのは、構造的に自明な結論であり、自重以外の荷重に対しても同様と考える。斜角が 90 度に近づけば、両モデルの差は小さくなっていくと予想出来るが、平行格子モデルの適用範囲を定めることに大きな意味はなく、プレストレスや偏載荷重等の設計荷重についても、解析モデルとしては直角格子モデルを採用するべきである。しかし、自重以外の荷重、支間-幅員比や、斜角の大きさによる直角格子モデルの精度と断面力の取り扱いについては、今後とも検証していく必要があると考える。

新しい構造に対する設計手法は新しい知見により検証されているが、伝統的に行われている手法に対する検証は見過ごされがちである。今後、現状の課題を明らかにした上で、安全性に関する検証を含めた本構造全般に対する設計手法を提言し、設計手法最適化の一助となるよう努力して行く所存である。

参考文献

- 1) 今村晃久、毛利忠弘、角田史雄：中空床版橋の設計最適化についての一考察／第 54 回年次学術講演会
- 2) 土木学会：平成 8 年制定 コンクリート標準示方書 設計編
- 3) S.Timoshenko, S.Woinowsky-Krieger：Theory of Plates and Shells

(1999 年 9 月 17 日受付)