

I-4 曲線鋼床版の構造特性

北海道大学工学部	正員	荻澤 憲吉
北海道大学工学部	正員	芳村 仁
本州四国連絡橋公団	正員	伊藤 進一郎

1. まえがき

曲線橋の床版は、曲率をもつ主桁に支持された扇形の平板構造になる。その床版を鋼床版（曲線鋼床版）とする場合、その構造は、扇形平板のデッキプレート下面に、半径方向には放射状に横リブが配置され、さらにそれと直交する橋軸円周方向には縦リブが等間隔に配置された片面補剛構造になる。その配置間隔は一般に、直線鋼床版と同様に縦リブに比べて横リブのほうがかなり疎であり、またリブの一本あたりの剛性も縦リブに比べて横リブのほうがかなり大きい。したがって、鋼床版の力学的機能は非常に複雑ではあるが大きく分けて、（１）主桁と横リブの剛性は無限大で変形を生じないと考えて、それらによって囲まれた部分で直接荷重を担う床版作用と、（２）主桁および横リブの変形を考慮してそれらの一部として協力して働く合成作用の二つに区別される。

この報告は、曲線鋼床版のそれらの機能のうち、（１）の床版作用における構造特性を調べたものである。まず最初に、厳密な理論解析の結果と曲線直交異方性扇形平板理論の解析結果の比較と検討をおこなう。つぎに、曲線鋼床版に車輪荷重が作用する時に生じる縦リブ方向曲げモーメントの解析結果について検討する。さらに設計上重要な床版曲げモーメントの評価に関係させて、曲線鋼床版の簡易曲げ理論を展開してその適用の可能性を調べる。

2. 曲線鋼床版の解析理論

デッキプレートの中央面内に半径方向と円周方向の軸、およびそれらと直交して下向きにもう一つの軸をもつ極座標をとる。リブを含めた断面の変形に平面保持を仮定し、デッキプレートは平面応力状態、縦リブは一軸応力状態と考えて、断面力と３方向変位の間の関係式を誘導する。それらを鋼床版の要素の力学的つりあい条件に代入すると、極座標の３方向変位に関する３元連立偏微分方程式が誘導される。それが構造的に曲線直交異方性をもつ片面補剛板の基礎方程式である。この連立方程式からたわみ変位だけの式を誘導することは不可能で、面内変形と曲げ変形が連成することがわかる。

この基礎方程式の３つの変位の解は、８つの積分定数を含む一次結合の形の余解と荷重項に関する特解の和として表される。基礎方程式およびその解について詳しくは参考文献１）に示す。

3. 曲線直交異方性扇形平板の曲げ理論の解との比較

曲線直交異方性扇形平板の曲げに関する研究は、著者の一人によって行われている²⁾。この理論は半径方向と円周方向のそれぞれの曲げ剛性が異なる扇形平板の曲げ問題を扱ったものである。材料組織的な曲線直交異方性を有する板の曲げ理論であり、またその理論解析ではポアソン比は０とおかれるのが普通である。

そこで本解析による結果と曲線直交異方性扇形平板の曲げ理論による解析結果を比べてみた。

解析例として採用した曲線鋼床版は、扇形平板の下面に平鋼の縦リブが円周方向に等間隔に配置された構造で、その縦リブの高さによって剛比が大きく変わるので、高さの異なる３種類の縦リブについて解析を行った。作用荷重は等分布満載荷重である。その他のデータは結果の表に示す。

解析結果のうち、スパン中央のたわみと縦リブ方向曲げモーメントについて、その鋼床版の中央点での値とそこより外側に生じる最大値を表１に示す。

たわみの大きさおよび縦リブ方向曲げモーメントのいずれに関しても、下段の曲線直交異方性扇形平板の曲げ理論による解析結果は上段の本解析結果よりも小さな値が得られている。これは、曲線直交異方性扇

形平板の曲げ理論と本解析理論の間に、ねじり剛性の評価の違いと構造材料のポアソン比の取り扱い方の違いがあることによるものであると思われる。

4. 簡易曲げ理論

鋼床版の設計上、一般に重要となるのは縦リブ方向の曲げモーメントの大きさである。その計算の簡便化を目的として、簡易曲げ理論を展開する。

先の曲線鋼床版の基礎方程式の誘導過程において、まず最初に、床版内における半径方向および円周方向の2つの面内軸力の一般式をともに0とおくと、面内方向の変位と曲げ変形のたわみとの間の関係式が誘導され、これを用いて面内方向変位を消去すると、曲げ変形に関する断面力がすべてたわみ変位のみの関数となる。

ここで、鋼床版の断面に作用する2方向の曲げモーメントおよび2方向のねじりモーメントの大きさを検討すると縦リブ方向の曲げモーメントに比較して他の3種のモーメントの大きさは小さいから、力学的つりあい条件においてそれらの3種のモーメントの項を無視すると、次式になる。

$$\left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) M_\theta = -p \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M_θ ：縦リブ方向曲げモーメント、 p ：分布荷重強度、 r, θ ：半径方向および円周方向座標。

さらにまた、鋼床版の断面に作用するせん断力のうち、直線境界辺に沿って分布するせん断力に比較して円弧境界辺に沿って分布するせん断力のほうを無視することができれば、つりあい条件式は次のようになる。

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} M_\theta = -p \quad \dots\dots\dots (2)$$

この(2)式は、梁の曲げに関する方程式と同じ形である。したがって、以上のような近似的な考え方が許されるならば、曲線鋼床版のある断面における縦リブ方向曲げモーメントの分布とその大きさは、その

剛比	たわみ		縦リブ方向曲げモーメント	
	$w / (p L^4 / D)$ ($\times 10^{-3}$)		$M_\theta / p L^2$	
	中央点	最大値	中央点	最大値
71.3	0.204 (0.177)	0.249 (0.199)	0.124 (0.112)	0.139 (0.116)
211	0.0675 (0.0636)	0.0910 (0.0783)	0.119 (0.117)	0.143 (0.128)
456	0.0308 (0.0301)	0.0426 (0.0390)	0.118 (0.119)	0.144 (0.135)
簡易理論	-----	-----	0.125	-----

床版：床版の幅＝3000mm，床版のスパン（L）＝3000mm，（辺比＝1），開き角＝30°
 縦リブ：縦リブ間隔＝300mm，縦リブの板厚（平鋼）＝10mm，縦リブの高さ＝100mm（剛比＝71.3），150mm（剛比＝211），200mm（剛比＝456）の3種，剛比＝円周方向曲げ剛性と半径方向曲げ剛性の比，デッキプレート：デッキプレートの板厚＝12mm，ポアソン比＝0.3（ただし曲線直交異方性扇形平板の解析解の場合はポアソン比＝0.0），支持条件：周辺単純支持，荷重：等分布満載荷重（垂直下向き，荷重強度：p），D：デッキプレートの曲げ剛性

表1 本解析解と曲線直交異方性扇形平板の曲げ理論解の比較

（下段が曲線直交異方性扇形平板の曲げ理論解）

断面位置のリブ方向スパンと同じスパンをもつ直線ばりの曲げモーメント分布と同じになるとして計算されることになる。この近似的な考え方を、簡易曲げ理論とする。

この簡易曲げ理論によって縦リブ方向曲げモーメントを計算する場合に留意しなくてはならない事は、半径方向の拘束を解放したことのために円弧境界辺の境界条件を考慮することはできないことである。

先の表1の解析例について簡易曲げ理論で計算すると、縦リブ方向曲げモーメントの大きさと分布は、スパン中央断面に沿って、内側円弧境界辺で0.068、中央点位置で0.125、外側円弧境界辺で0.199 ($\times p L^2$)であり、ゆるやかな凹の曲線状の分布となる。

等分布満載荷重が作用したときの、厳密解による縦リブ方向曲げモーメントの半径方向の分布形状は、一般に中央部の領域では半径方向にゆるやかに増加する形となるが、簡易理論の計算によって得た分布はその分布曲線によく似た形状で数値的にはやや大きめ（安全側）の分布であり、異方性が強いほど（剛比が大きいくほど）より良好な近似を示すことがわかった。

5. 車輪荷重作用時の曲線鋼床版の曲げモーメント

実際には、曲線鋼床版はその上面の舗装体とともに車輪荷重の作用を直接受けるため、部分的な荷重作用によって生じる応力状態はかなり局所的に集中する分布状態である。このような部分荷重載荷の場合の解析は、載荷領域と非載荷領域に分けた複数の鋼床版要素同士をその境界辺で連続条件を与えることによっておこなわれる。

車輪荷重のような部分面分布する荷重が作用すると、曲線鋼床版の内部にはその荷重の直下に最大値の強いピークをもつ応力分布を生じる。ここには、車輪荷重が作用したときの縦リブ方向曲げモーメントの最大値の解析結果を表2に示す。

境界条件		車輪荷重の作用位置		
内側	外側	内側1/4位置	中央位置	外側1/4位置
自由	自由	5176	6242	6974
固定	自由	5167	6213	6974
自由	固定	5169	6186	6815
単純	単純	5172	6213	6839
固定	固定	5160	6211	6815
簡易理論		5715	7600	9485

床版：床版の幅=3600mm，床版のスパン=2000mm，開き角=30°

縦リブ：縦リブ間隔=300mm，縦リブの板厚（平鋼）=10mm，縦リブの高さ=200mm

デッキプレート：板厚=12mm，ボアソン比=0.3，荷重：8tfの部分分布荷重（500mm×200mm，T-20の後輪荷重），荷重作用位置：スパン中央で幅員方向には3ケース（上記）

境界条件：直線辺では単純支持，円弧辺では5ケース（上記）

表2 車輪荷重作用時の曲線鋼床版に生じる荷重直下の縦リブ方向最大曲げモーメント

（単位：kgf・cm/cm）

解析例として採用した曲線鋼床版は、高さ200mmの縦リブで補剛された鋼床版で、作用荷重の分布はT-20の後輪荷重を想定して横幅500mm縦200mmで、解析の都合からやや扇形の分布とした。

車輪荷重の作用位置は、スパン方向にはスパン中央であり、半径方向には幅員を4等分した位置のそれぞれ3点、すなわち内側1/4位置、中央位置、外側1/4位置の3ケースについて解析した。

境界条件については、内側と外側の円弧境界辺において表に示すような組み合わせで5ケースの場合について解析した。

表2の結果によれば、縦リブ方向曲げモーメントは円弧境界辺の境界条件にはあまり影響されていない。

この表にはさらに簡易曲げ理論による計算結果も示した。この計算値は、車輪荷重の作用している荷重中心位置の円周方向スパンと同じスパンの単位幅の梁を考えて、そこに分布長200mmの部分線荷重が作用しているものとして計算したものである。この簡易理論による計算値を厳密解析による結果と比べると、厳密解より大きめで、特に外側に載荷したときの場合大きな値となりすぎている。

車輪荷重が載荷する場合では、荷重の作用位置が外側になればなるほど横リブの間隔が大きくなるため（縦リブのスパンが長くなるため）、縦リブ方向曲げモーメントは大きくなるが、しかし、縦リブスパンが長くなる割り合いほどには、曲げモーメントは大きくはならないようである。

6. あとがき

曲線鋼床版の床版作用について、曲線直交異方性板理論によって検討を行った。まず、2種の曲線直交異方性板理論の解析解について比較を行い、次に車輪荷重が曲線鋼床版上に作用する場合に生じる縦リブ方向曲げモーメントの極値の解析例を示した。

特に、縦リブ方向曲げモーメントの値については、近似的な考え方を適用して簡易曲げ理論による計算値と比べてみた。今後、曲線鋼床版の設計法に関してこれらの結果をもとに研究を進める予定である。

(参考文献)

- 1) 韭澤憲吉：構造的に曲線直交異方性を有する板の理論，北大工学部研究報告，80，1976
- 2) 芳村仁：曲線直交異方性扇形平板の曲げについて，土木学会論文集，82，1962