

薄肉単純曲線桁のねじり挙動に対する解析的基礎研究

Basic analytical study on torsional behavior of single-cell thin-walled curved box girder

○青木真人¹, 関文夫²*Masato Aoki¹, Fumio Seki²

Abstract: The current design method for curved girders is based on a framework analysis that neglects torsional stiffness. In this study, the framework analysis and finite element analysis were carried out for a thin-walled curved box girders. The deflection increase rate based on the current numerical analysis is compared with the analytical results. It was concluded that for curved girders with large curvature, the effect of torsion is significant. The framework analysis can be adapted up to an opening angle of 20 degrees. According to the analysis, the allowable deflection ratio was increased up to an opening angle of 30 degrees.

1. はじめに

現在の曲線橋の設計法は、一般に主桁のねじり剛性を無視した骨組み解析で断面力を算出するなど、単純化された部材設計法を用いている。また、鋼道路橋設計便覧^[1]によると、曲線桁の曲率は、直線桁と比較した際のたわみの増加率が5%以下となるよう、中心角や主桁形状の選択基準が明記されている。一方でこの選択基準に際し、参考とされている文献^[2]は格子桁理論や曲げねじり理論による数値解析から算出したもので、断面変形挙動などの評価はされていない。また、日本橋梁建設協会による鋼橋の選定フロー^[3]によると、曲率が比較的小さな曲線橋が目安とされ、設計の幅が制限されている。この曲率に基づき、鋼構造委員会^[4]によると、中心角5%程度の曲線橋を対象に骨組み解析と有限要素解析による比較が行われ、反力結果にわずかな差異が生じることが報告され、現在も中心角を広げた際の力学的挙動が検討されていない。

そこで、本研究では中心角60°程度の曲率の大きな曲線桁を対象に面外骨組み解析と3次元有限要素解析結果を比較し、ねじりによるたわみ挙動や応力評価の基礎的解析を行う。また、現設計法の曲率と断面形状の選定基準による直線桁と曲線桁のたわみ比を比較し、曲率が大きな場合の解析方法の適応範囲を考察する。

2. 解析

本解析では、ねじり剛性の高い閉断面で単純な1室箱桁を対象とする。曲率は、中心角0°の直線桁、10°から60°の曲線桁6モデルを解析に反映した。全橋模型を用いた実験的研究^[5]を参考にモデル寸法を決定した。材料諸元はSS400材とし、モデル寸法と合わせてTable1に示す。面外骨組み解析ソフトはコスモ情報システムのEzy-Frame、3次元有限要素解析ソフトはアーキ情報システムのTDAPIIIを使用した。解析モデルは

薄肉断面であるため、有限要素（以下、FEM）解析はシェル要素を使用した。軸方向の要素幅を統一し、骨組み解析は52要素（軸方向25mm）、FEM解析は1248要素（軸方向25mm、断面方向各25mm）とした。支承条件は両端剛結とし、載荷荷重は最大曲率半径を有するモデルで弾性範囲内に収まるよう、支間中央に150kN載荷とした。FEM解析のモデル図はFigure1に示し、局所変形に対応する目的で試験体と同様の材料で載荷部（幅50mm、30mm厚）を設けた。

Table1. Dimensions and material specifications

Table	Symbol	Value	Unit
Elastic modulus	E	205×10^3	N/mm ²
Shearing modulus	G	79.0×10^3	N/mm ²
Unit volume weight	γ	77.0	kN/m ³
Span length	L	1300	mm
Cross-sectional dimensions	B×H	150×150	mm
Plate thickness	t	6.0	mm

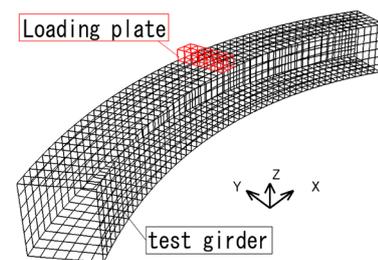


Figure1. Finite element analysis model

3. 解析結果

単純支承における桁の-span中央に荷重を載荷した際の直線桁と曲線桁のたわみ比がねじり剛比により算出されている^[2]。また、本解析結果の-span中央における鉛直たわみのたわみ比をFigure2に示す。本解析では支承条件を両端剛結としているが、同一支承条件との比であるたわみ比には影響がないと考えられるため使用した。現設計法の鋼道路橋設計便覧^[1]によると、たわみ比が5%以下となる中心角が選定範囲にある。

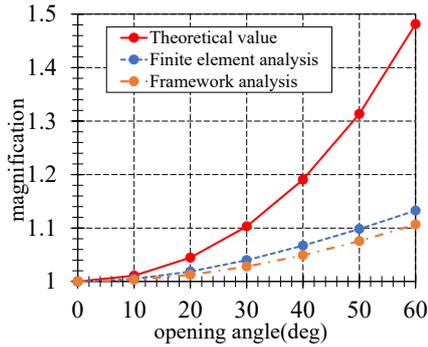


Figure 2. Relationship between opening angle and deflection ratio

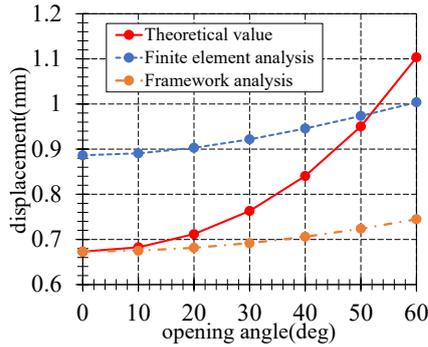


Figure 3. Relationship between opening angle and displacement

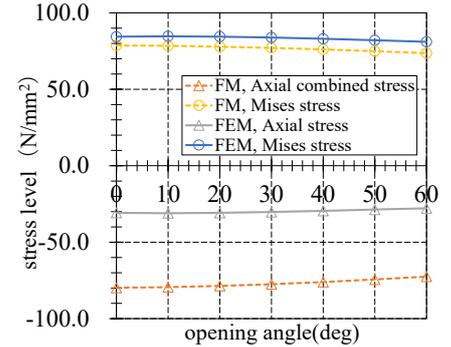


Figure 4. Relationship between opening angle and stress level

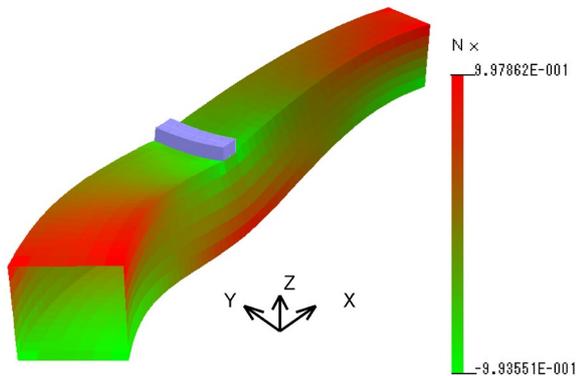


Figure 5. Displacement and axial stress contour diagram (FEM)

これによると現設計法の理論値は 20° が適応範囲であるが、FEM 解析では 33°、骨組解析では 40° になることが示された。これは、理論式で純ねじり剛性、そりねじり剛性が過大に評価された為と考えられる。モデルは閉断面の箱桁で、一般にそりねじりは無視できる程そりねじり剛性が高いとされているが、FEM 解析とそりねじり剛性が適応されない骨組解析との差が生じたことから、曲率が極大な場合はそりねじりを考慮する必要があるといえる。変位と軸力コンター図を Figure 5 に示す。骨組解析と FEM 解析のスパン中央たわみと、直線桁における骨組解析結果と一致する場合の理論値の増加予想値を Figure 3 に示す。直線桁において、骨組解析と FEM 解析結果に差異がみられるが、薄肉断面による断面変形によるものであるとされる。FEM 解析は、局所的な変形が比較的少ない下フランジ中央から数値を抽出した。理論値による変位は中心角 20° までは、骨組解析と 3% 程度の差であるが、20° から 50° では理論値は大きく変位するため、骨組解析の適応範囲は 20° 程度であるといえる。また、中心角が 50° 付近で FEM 解析と一致することから、FEM 解析は中心角 50° 程度の曲率の大きな際に用いる必要があるといえる。これは前述の通り、FEM 解析はそりねじりを考慮している点に由来すると考察できる。

スパン中央、上フランジ部における、骨組解析と FEM 解析の軸方向応力度と Mises 応力度の関係を Figure 4 に示す。骨組解析では、曲げによる垂直応力度とそりモーメントによる垂直応力度を足し合わせた合応力で示し、圧縮を負で示している。軸方向応力度は、骨組解析と FEM 解析にはおよそ 50 N/mm² の差が生じている。一方で、Mises 応力度は差が少ないことが明らかとなった。これは、FEM 解析は骨組解析と比較し、ねじれ挙動が大きくなり、ねじりによるせん断力が発生するためであると考えられる。

4. 結論

薄肉単純曲線桁のねじれ挙動に関して、解析的検討を行った結果を要約して以下に示す。

- 直線桁と比較した際の曲線桁のたわみ比は、理論値では 20° であったが、本解析を基にすると、FEM 解析では 33°、骨組解析では 40° となり曲率の選択範囲が広がる。
- ねじりを無視した骨組解析の適応範囲は、現設計法の理論値から比較し、たわみ比や変位量、軸方向応力度の増加量から中心角 20° 程度といえる。

今後、解析妥当性を検討するために、実験的検討により実際のねじり挙動を明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] 日本道路協会：「鋼道路橋設計便覧」，丸善，令和 2 年。
- [2] 小松定夫，中井博，田井戸米好：「ねじり定数比とねじり剛比から考察した曲線桁橋設計計算法への一提言」，土木学会論文報告集，第 224 号，pp.55-66，1974。
- [3] 日本橋梁建設協会：「新しい鋼橋の誕生 II 改訂版」，2004。
- [4] 鋼構造委員会：「鋼橋の合理的な構造設計法に関する調査研究小委員会報告書」，鋼構造委員会出版物，2015。
- [5] 有住康則，浜田純夫，大城武：「箱桁断面を有する曲線合成桁の静的挙動に関する研究」，土木学会論文報告集，第 304 号，pp.67-76，1983。