

有限要素解析における鋼橋のモデル化に関する研究

建設構造研究室 楠 卓志

指導教員 岩崎 英治

1. 研究背景と目的

近年の計算機の能力向上と設計・解析ツールの発展は目覚しく、これまで数値解析のネックであった記憶容量や計算時間、データ作成のわずらわしさは急速に解消されてきている。そのため、モデルの簡易化を行わない、より実構造物に近いモデルでの解析が可能になりつつある。従来の格子解析による全体設計に比べ、FEM解析による設計では実際の応力をより正確に表現できるため、FEM解析による設計法が整備されれば、より経済的な設計が可能になるものと思われる。そのためにも、FEM解析精度に与える、要素分割やモデル化の影響を明らかにしておく必要がある。

このような背景をもつ有限要素法であるが、既往の研究でも、要素分割やモデル化を細かく変更しての検討は行われた例が少なく、鋼橋上部工の有限要素解析における要素分割やモデル化の解析精度へ与える影響は未だ不明な点が多い。

そこで本研究は、鋼多主桁橋をモデルとし、要素分割やモデル化を種々変化させた有限要素解析により、鋼橋上部工の設計のために有限要素法を利用する際のいくつかの問題点を喚起し、その対処法の目安、判断材料を示すことを目的とする。なお、本研究では支点部や補剛材取り付け位置などに発生する局所的な応力は対象にしない。

2. 有限要素の基本特性

図-1に示すような、シェル要素による板の面内曲げ、シェル要素による板の面外曲げ、ソリッド要素による板の面外曲げといった、鋼橋上部工を構成する板の問題について単純なモデルを作成し、種々のFEMソフト、有限要素についての計算結果を比較し、要素分割の影響を検討する。使用したFEMソフトは自作FEMソフトとDIANA ver.9.1である。また、「土木学会 3次元FEM解析の鋼橋設計への適用に関する小委員会」において、同じモデルについて様々なFEMソフトでの計算が行われており、その結果も含めて検討を行った。

結果として、同種の要素種類や同一の要素分

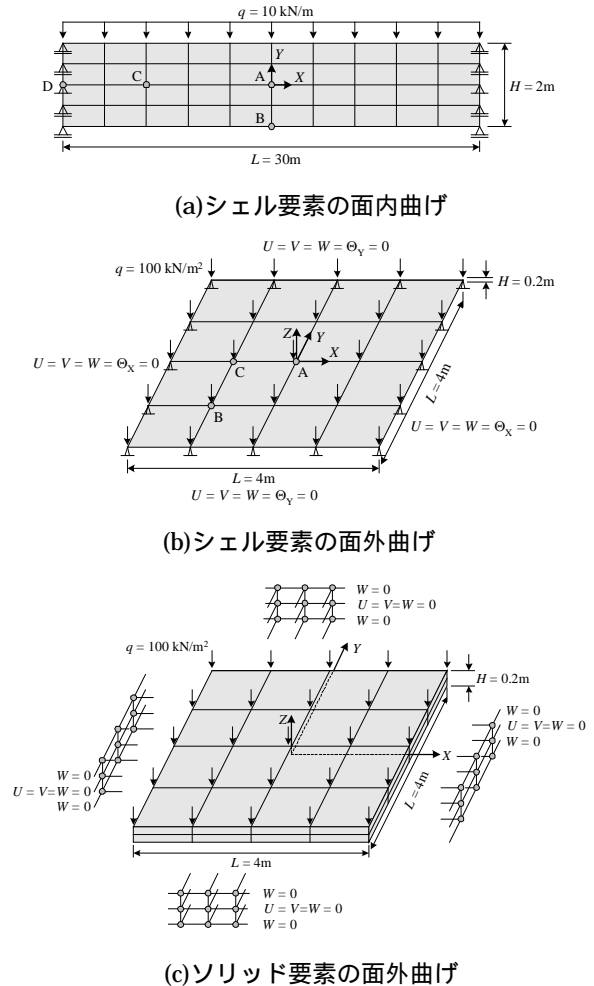


図-1 単純な板モデル

割で計算を行っても、FEMソフトによって精度が異なることがわかった。中でも、ロッキングが起きていると思われるものは著しい精度低下であった。また、FEMソフトには面内曲げ問題と面外曲げ問題、シェル要素とソリッド要素それぞれに得意不得意があることが明らかになった。以上から、実際に使用するFEMソフトについて、本研究で取り扱ったような単純なモデルについてあらかじめ計算を行い、FEMソフトに組み込まれている要素の精度特性を確認するのがよい。

なお、どの問題においても、精度のよいものは自作FEMソフトの選択積分と同程度の結果、精度の悪いものは自作FEMソフトの完全積分

と同程度の結果であり、ほとんどのFEMソフトの結果が完全積分と選択積分の結果の範囲に収まった。そのため、以後の検討では自作FEMソフトの完全積分と選択積分の結果を示すことにより、これを精度の悪いFEMソフトの結果と精度のよいFEMソフトの結果に代えることにする。

3. 主桁

まず、本研究で使用した要求精度について説明する。通常、有限要素解析での精度は正解に対する数値解の比で表される。しかしながら、この方法を実務に適用することを考えると、発生するたわみや応力の数値が小さい部位には厳しい要求になっていると思われる。そこで、本研究では、たわみならたわみの許容値、応力なら許容応力度を基準として、要求精度を決定する。本研究では許容値の2%程度を要求精度に設定する。この方法により試算された要求精度を表-1にまとめる。

表-1 要求精度（試算）

	たわみ	応力	せん断応力
主桁	1mm	4N/mm ²	2N/mm ²
横桁	-	3N/mm ²	2N/mm ²

対象橋梁は、文献1)で使用されている橋梁とした。モデルは主桁、分配横桁、端横桁をシェル要素で、中間対傾構、下横構をはり要素で作成した。図-2に作成したモデルの全体像を示す。

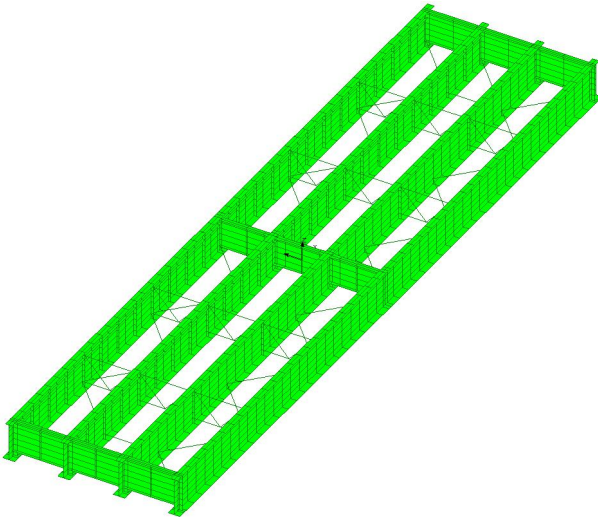


図-2 対象モデル

主桁の検討では、図-3に示すようなモデルについて、要素分割とモデル化方法を種々変更して精度の検討を行った。応力の参照断面も図-3に示している。モデル化では、補剛材の有無、ウェブとフランジの接続方法の違い(図-4)

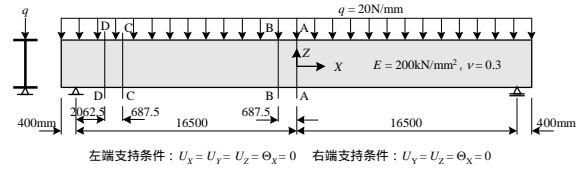


図-3 主桁の支持条件と荷重条件

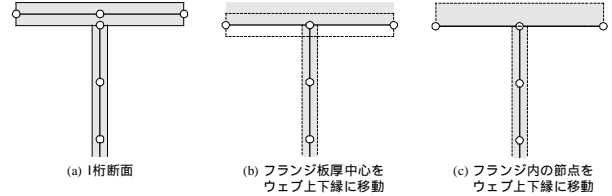


図-4 ウェブとフランジの接続方法

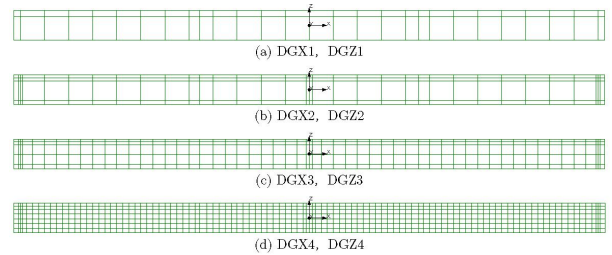


図-5 要素分割図の一例

について検討を行った。要素分割図の一例を図-5に示す。要素分割図(図-5)には4レベル目まで表示し、以降7レベル目まで要素長を半分にしていく。

図-6に完全積分でのたわみの結果を3次元グラフにプロットした結果を示す。橋軸方向の分割[DGX]が粗い場合に、ロッキングによる著しい精度低下が見られる。

表-2に、図-4に示した2種類のモデルの計算結果とその差を示す。表からウェブとフランジの接続方法により、発生するたわみや応力は変化し、本研究で使用したモデルでは、設定した要求精度と同程度の誤差が生じていることがわかる。

表-2 モデル化による結果の差異(mm, N/mm²)

モデル	(b)	(c)	差
たわみ	-85.451	-83.278	-2.173
A断面ウェブ上縁応力	-153.521	-150.215	-3.306
A断面ウェブ下縁応力	87.754	84.708	3.046
B断面ウェブ上縁応力	-153.254	-149.955	-3.299
B断面ウェブ下縁応力	87.601	84.557	3.044
C断面最大せん断応力	-20.374	-20.116	-0.257
D断面最大せん断応力	-21.254	-20.984	-0.270

図-7にせん断応力の橋軸方向分布を示す。垂直補剛材や支点近傍では応力集中が発生する。全体設計を目的とした解析ではこのような応力は対象としないので、応力集中位置から離れた点の応力を参照する必要がある。

図-8に選択積分のA断面ウェブ下縁垂直応力を示す。[DGX2]において応力が急激に変化していることがわかる。ここで、図-5(b)を見ると、応力の測定点近傍で要素長が急激に変化しており、これが原因で精度が低下したと思われる。このことから、応力の測定点近傍の要素長が急激に変化しないような要素分割をする必要があるといえる。

以上の結果を踏まえ、要求精度を十分に余裕を持って満足する要素分割を選定すると、フランジとウェブの接続に図-4(b)を使用し、補剛材を考慮した場合、図-9のようになる。第2節の結果から、本研究で使用したモデルの場合、精度の悪いFEMソフトでは図-9(a)の分割を、精度のよいFEMソフトでは図-9(b)の分割を使用すれば、十分な精度で計算が行えることになる。

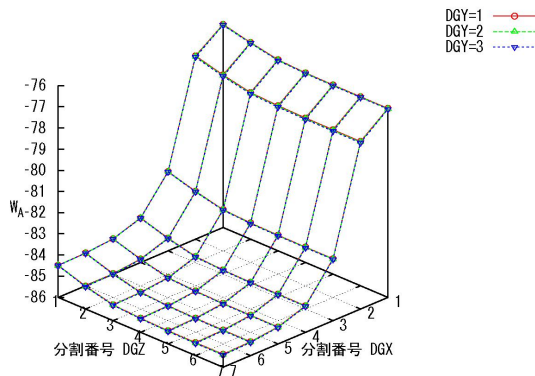


図-6 ウェブ中央下縁たわみ（完全積分）

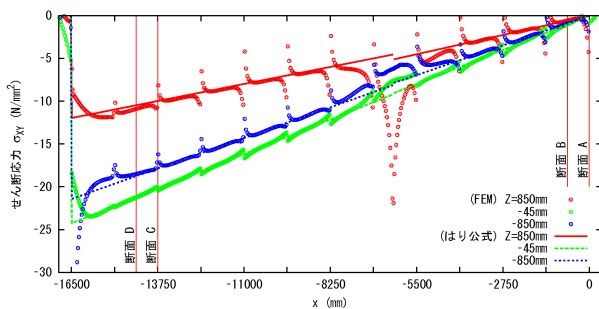


図-7 せん断力の橋軸方向分布

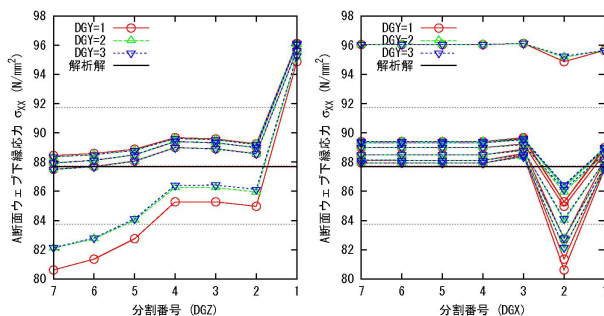


図-8 A断面ウェブ下縁垂直応力（選択積分）

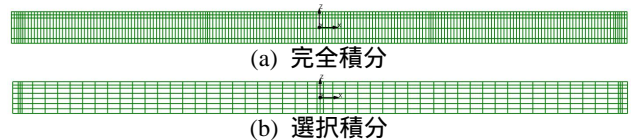


図-9 要求精度を満足する最も粗い分割

4. 分配横桁

主桁と分配横桁からなる4主桁モデルを対象に、主桁の荷重分配、分配横桁内の応力について、要素分割とモデル化方法を種々変更して精度の検討を行った。分配横桁内の応力の参照点を図-10に、要素分割図の一例を図-11に示す。要素分割図(図-11)には3レベル目まで表示し、以降6レベル目まで要素長を半分にしていく。主桁の分割には図-9の分割を使用した。主桁への荷重分配の検討では、G1桁に線荷重 $q=20\text{N/mm}$ を載荷した場合、G2桁に線荷重 $q=20\text{N/mm}$ を載荷した場合の2ケースについて検討を行った。分配横桁内の応力の検討では、G2桁、G3桁にそれぞれ $q=20\text{N/mm}$ を載荷した。

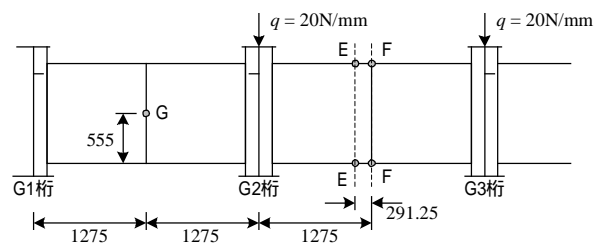


図-10 分配横桁

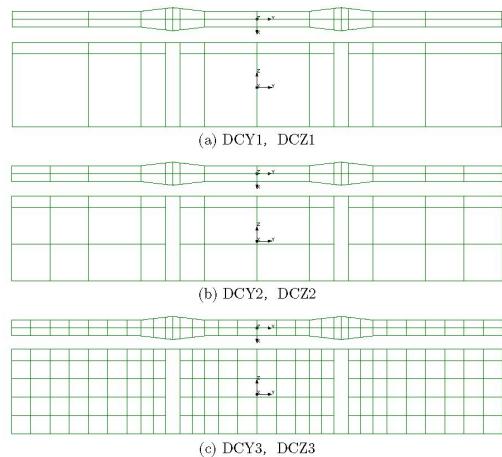


図-11 分配横桁の要素分割図の一例

図-12にG1桁に載荷した場合、G2桁に載荷した場合の各主桁の支間中央ウェブ下縁応力について、すべての要素分割における結果を重ねて示す。この図から、すべての曲線はよく一致しており、分配横桁の分割が主桁の荷重分配に与える影響は非常に小さいことがわかる。

図-13 に分配横桁内応力の桁軸方向分布を示す。この図から、主桁近傍において横桁の応力は大きく乱れることがわかる。

以上の結果を踏まえ、要求精度を十分に余裕を持って満足する要素分割を選定すると、図-14 のようになる。第2節の結果から、本研究で使用したモデルの場合、精度の悪い FEM ソフトでは図-14(a)の分割を、精度のよい FEM ソフトでは図-14(b)の分割を使用すれば、十分な精度で計算が行えることになる。

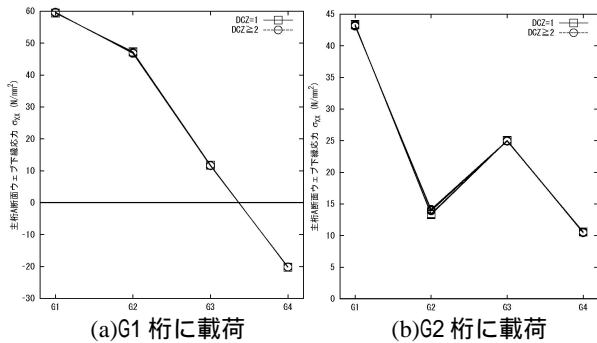


図-12 主桁の荷重分配

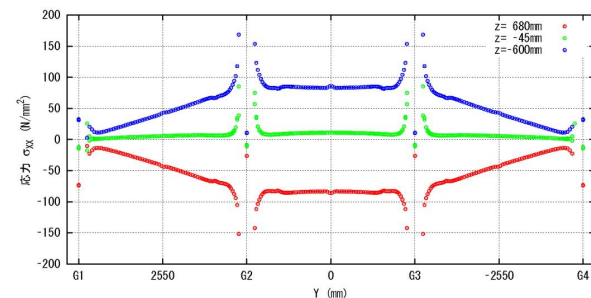


図-13 分配横桁の応力 桁軸方向分布

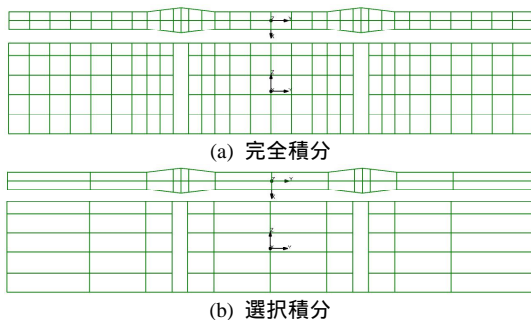


図-14 要求精度を満足する最も粗い分割

5. 二次部材

端横桁、中間対傾構、下横構が主桁の荷重分配に与える影響を検討した。

主桁と分配横桁の要素分割は、図-9、図-14 を使用した。また、端横桁の要素分割が主桁の荷重分配へ与える影響は非常に小さいため、端横桁の要素分割には分配横桁と同程度の分割を使用した。荷重は G2 桁と G3 桁に線荷重

$q=20\text{N/mm}$ を载荷し、A 断面ウェブ下縁たわみ、B 断面ウェブ上下縁応力、D 断面最大せん断応力を参照応力とした。

完全積分と選択積分でほとんど結果は変化しなかったため、完全積分の G1 桁の結果を図-15 に示す。このグラフから、中間対傾構を追加した場合、中間対傾構の荷重分配効果により、大きく結果が変動していることがわかる。中間対傾構の荷重分配効果は大きいといえる。また、下横構の追加により、無視できないレベルの差が生じているが、下横構を追加した場合、記憶容量と計算時間が大幅に増加するため、下横構を省略するための適当な対処方法も必要と思われる。

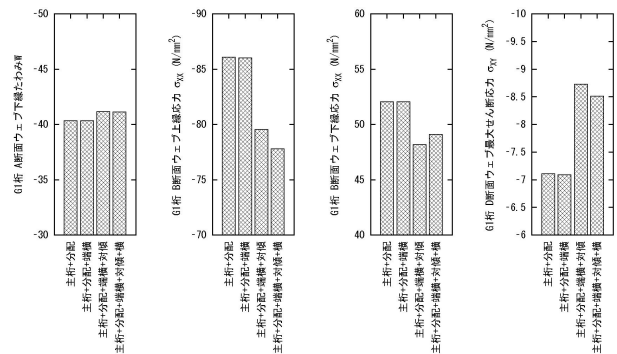


図-15 二次部材が主桁の荷重分配に与える影響

6. 結論

本研究の主要な成果を以下に要約する。

- ・ FEM ソフトにより面内曲げと面外曲げ、シェル要素とソリッド要素など、各問題に得意不得意がある。
- ・ 支点や補剛材部、主桁近傍の分配横桁内に応力が集中するため、集中が発生しない断面で応力を評価する。
- ・ 応力の参照点近傍の要素長が急激に変化することで応力の精度が低下する。
- ・ ウェブとフランジの接続方法の違いによりたわみや応力は変化し、本研究で使用したモデルでは、設定した要求精度と同程度の誤差が生じた。
- ・ 分配横桁、端横桁の要素分割が主桁の荷重分配に与える影響は非常に小さい。
- ・ 要素分割の目安を示した。
- ・ 中間対傾構による荷重分配効果が確認された。

参考文献

- 1) (社) 日本橋梁建設協会：合成桁の設計例と解説，平成 17 年 1 月