

大阪大学大学院工学研究科
 東京工業大学大学院理工学研究科
 大阪大学大学院工学研究科
 大阪大学名誉教授
 大阪大学大学院工学研究科

学生員 ○谷上 裕明
 正会員 小野 潔
 正会員 三好 崇夫
 フェロー 西村 宣男
 正会員 奈良 敬

1. はじめに

鋼アーチ橋のアーチリブや鋼トラス橋の上下弦材のように、細長比の大きい鋼長柱部材の耐震性能照査では、全体(部材)座屈の照査が必要となる場合がある。『鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン』¹⁾(以下、『ガイドライン』という)によると、幾何学的非線形と材料非線形をともに考慮した複合非線形骨組解析であれば、梁要素を用いて適切にモデル化を行うことにより部材座屈の影響は自動的に考慮されるとしている。その場合、対象部材に対して曲げ変形が生ずるように端部を剛結にするか、またはピン結合にして製作誤差程度の初期たわみを与えるようなモデル化を要求している。しかしながら、ガイドラインには、複合非線形解析で部材座屈を考慮できることの妥当性が明示されていない。また、軸圧縮力を受ける鋼長柱の全体座屈は、初期たわみ、残留応力などの初期不整の影響を受けることが知られており、多くの基準でそれらの影響を考慮して鋼長柱の耐荷力曲線が決定されている。ところで、鋼橋の耐震性能照査に用いる骨組解析としてファイバーモデルを用いる場合がある。しかし、実際の鋼橋の耐震設計では、死荷重載荷時に生じる初期たわみを考慮するものはあるが、道示Ⅱに規定されている製作誤差の上限値の $L/1000$ (L : 部材長)の初期たわみを導入されているかは不明である。また、残留応力を導入した解析は行われていない。そこで、本研究では、両端をピン支持された鋼長柱の全体座屈に関する実験結果と、骨組解析としてファイバーモデルを用いた複合非線形解析結果とを比較することにより、複合非線形を考慮したファイバーモデルで自動的に鋼長柱の全体座屈が評価可能かどうかについて検討を行ったので報告する。

2. ファイバーモデルによる複合非線形骨組解析

2. 1 対象とした実験供試体

溶接残留応力の影響を確かめるため、文献 2)では、無補剛箱形断面の鋼長柱部材を対象に、溶接のままの A シリーズ(溶接材)と溶接応力除去焼鈍を行った B シリーズ(焼鈍材)に対して、中心軸圧縮載荷実験が行われている。図-1 に供試体の断面図を、表-1 に供試体の主な構造諸元等を示す。また、文献 2)では 60 キロ鋼、80 キロ鋼に対して載荷実験が行われているが、本研究では 60 キロ鋼の鋼種 Welcon 2H のみを対象とした。詳細については文献 2)を参照されたい。

2. 2 解析モデル

複合非線形骨組解析プログラムとして、汎用プログラム EERC³⁾を用いた。解析モデルは図-2 に示す 4、8、16 分割の 3 パターンとした。初期たわみ δ_0 は、

表-1 供試体の諸元等

柱番号	平均板厚 mm	B mm	H mm	σ_y MPa	細長比 パラメータ λ	
						溶接材
	2A	10.7	250.0	251.3	540	0.65
	3A	10.6	250.9	250.9	564	0.85
	4A	10.6	250.3	252.9	508	0.96
	5A	10.7	248.7	252.6	529	1.14
	6A	10.8	250.7	251.9	541	1.32
焼鈍材	1B	10.7	250.8	250.9	438	0.44
	4B	10.7	249.8	251.3	468	0.91
	6B	10.9	250.7	251.9	470	1.23

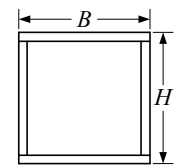


図-1 供試体の断面図

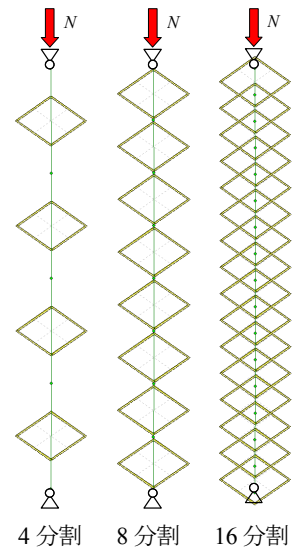


図-2 解析のモデル

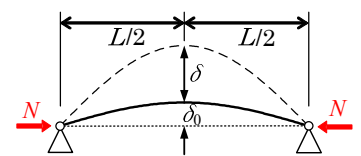


図-3 N, δ_0 , δ の説明

道示Ⅱに規定されている製作誤差の上限値の $L/1000$ を図-3 のように与えた。鋼材の応力-ひずみ関係は2次勾配 $E/100$ のバイリニアモデルとし、 σ_y の値は表-1 に示す。解析モデルに残留応力は導入していない。また、載荷は図-2 の N の方向に変位の単調増加で制御させた。

3. 解析結果と考察

表-2 にはファイバーモデルを用いた解析結果と実験結果の最大圧縮力 N_{max} を比較したものを示す。図-4、図-5 は4A(溶接材)、4B(焼鈍材)についてのそれぞれのモデルの解析から得られる圧縮力 N と図-3 の柱中央点の面外変位 δ の関係を示す。図-4、図-5 には、実験の最大圧縮力 N_{max} の値も示す。また、図-6 には最大圧縮力 N_{max} の解析値(4分割モデル)と実験値の比較を溶接材と焼鈍材とに分けて示す。

図-5 に示すように焼鈍材の実験結果は今回の残留応力を導入していないモデルでの解析結果と近いことがわかる。それに対して、図-4 に示すように溶接材の場合には残留応力を導入していないモデルでは実験結果よりも大きな解析結果が出ていることがわかる。その他の全ての柱についても表-2、図-6 に示すように同様のことがいえる。よって、実鋼部材では焼鈍材ではなく溶接材であるため、実務設計において、初期不整として $L/1000$ の初期たわみのみを考慮した複合非線形解析によって、鋼長柱の全体座屈を自動的に評価するのは難しいと考えられる。したがって、初期たわみと残留応力とを考慮したファイバーモデルを用いた解析により、適切な評価を行うことができると考えられるが、汎用の解析プログラムでは、残留応力が導入できるものは限られており、現実的には課題が多い。現状の解決策としては、道示Ⅱの柱の耐力曲線のような初期たわみや残留応力等の初期不整の影響を考慮した許容値およびその許容値を使用した照査法を開発することが挙げられる。

また、表-2、図-4、図-5 より、分割数の違いにより最大圧縮力 N_{max} の結果に違いが生じ、6A においては4分割モデルと16分割モデルで約10%の違いが生じている。そのため、ファイバーモデルを用いた解析における照査をする際には分割数による違いも検討する必要がある。

4. 結論

本論文では、実験結果と解析結果との比較により複合非線形を考慮したファイバーモデルを用いた解析での鋼長柱の全体座屈に関して、特に最大圧縮力の評価の可能性について検討を行った。その結果、供試体の残留応力の影響により最大圧縮力を評価できないので、複合非線形解析においても残留応力も考慮するか、別途照査法を開発する必要があることが示された。また、3通りの分割モデルでの検討により、分割数についても最大圧縮力の評価に影響を与えるので、解析における分割数についても検討を行っていく必要があるといえる。

【参考文献】 1) 宇佐美勉編著：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，社団法人日本鋼構造協会，技報堂出版，2006。 2) 伊藤文人，田島二郎：高張力鋼を用いた溶接角柱の圧縮強さ，鉄道技術研究報告，No.516，Jan.1966。 3) (株)地震工学研究開発センター：EERC/Fiber User's Manual，2007。

表-2 実験と解析の N_{max}

柱番号	実験結果 N_{max} (kN)	解析結果			4分割モデル 解析の N_{max} 実験の N_{max}	
		4分割 N_{max} (kN)	8分割 N_{max} (kN)	16分割 N_{max} (kN)		
溶接材	1A	4577	4726	4708	4701	1.03
	2A	4410	5210	5167	5151	1.18
	3A	4214	5130	5018	4984	1.22
	4A	3783	4321	4159	4113	1.14
	5A	3430	3810	3577	3516	1.11
	6A	2989	3224	2990	2933	1.08
焼鈍材	1B	4263	4359	4344	4337	1.02
	4B	4018	4078	3944	3907	1.01
	6B	3038	3129	2917	2864	1.03

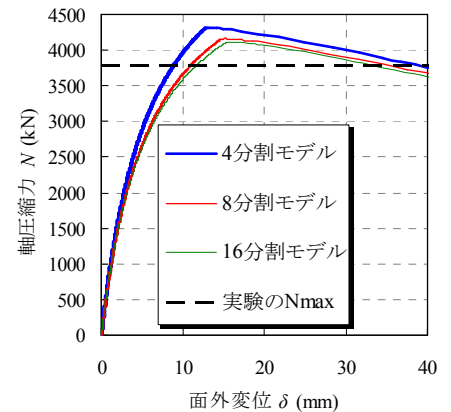


図-4 4A(溶接材)の N - δ

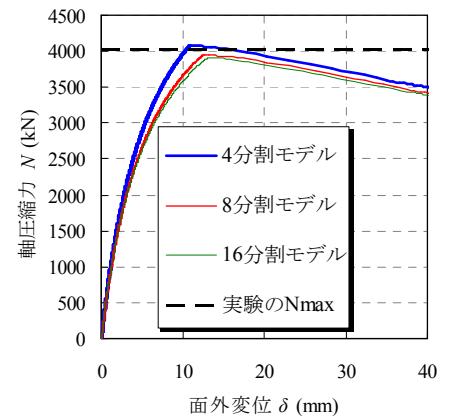


図-5 4B(焼鈍材)の N - δ

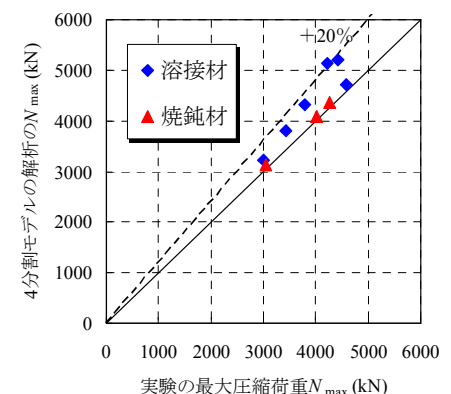


図-6 実験と解析の N_{max}