

座屈固有値問題の縮約により得られる 個材座屈荷重を反映した崩壊形の実験検証

Experimental Verification of Collapse Mode Reflecting Individual Element Buckling
Loads Obtained by Contraction of the Buckling Eigenvalue Problem

学籍番号 47-206715

氏 名 氏岡 啓威 (Ujioka, Hirotaka)

指導教官 佐藤 淳 准教授

1 序

解析技術の進歩, 消費エネルギー削減などを背景に, 構造物の材料使用量の低減が要求され, 崩壊挙動を詳細に把握する必要性が増している. 省部材化などを志向し, 座屈現象が支配的な場面は数多くなったが, 構成部材の座屈性状を崩壊形の設計に反映するには未だ課題が多い.

構造物の特定の部材の座屈性状を検出する方法として, 座屈固有値問題を縮約する手法が提案されている¹⁾. 座屈固有値問題の縮約によって得られる「個材座屈荷重」は構造物の終局解析に影響すると考えられるが, これを具体的な設計に反映させた崩壊形の評価法やその妥当性については未検証である. そこで, 本研究では個材座屈荷重を反映した崩壊形を求める手法を構成し, 実験による検証を行うことで, 構造物のより実的な終局設計法を構築することを目的とする.

2 座屈固有値問題の縮約¹⁾⁻²⁾

本研究で採用する座屈固有値問題の縮約手法を概説する. 従来の構造全体系の座屈解析により評価される座屈荷重 (以下全体座屈荷重) を用いる設計法は座屈に対して支配的でない部材について耐力を過小評価してしまう場合があり, 個材の座屈耐力の検出法として座屈固有値問題を縮約する手法が提案されている¹⁾.

全体弾性剛性マトリクス, 全体幾何剛性マ

トリクスを $[K_E], [K_G]$, 全体座屈固有値, 全体座屈モードを $\lambda, \{U_e\}$ とすると構造全体系の座屈固有値問題は式 (2.1) のようになる.

$$[K_E]\{U_e\} = \lambda[K_G]\{U_e\} \quad (2.1)$$

この時, 全体座屈荷重は $N_{cr} = \lambda N$ となる.

座屈固有値問題の縮約では固有値問題の両辺をガウスの消去法と同様の手法で対象とする部材に該当する行と列になるまで行と列を削除していき, 式 (2.2) に示されるような固有値問題を再構築する. これを解くことで個材についての座屈固有値 λ' と座屈モード $\{U'_e\}$ を得ることができる.

$$[K'_E]\{U'_e\} = \lambda'[K'_G]\{U'_e\} \quad (2.2)$$

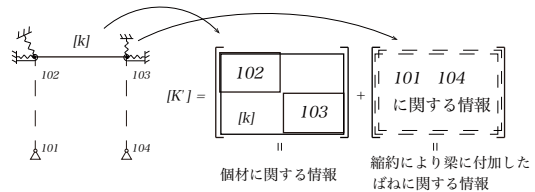


図 2.1 縮約のイメージ

3 弾塑性解析

3.1 個材座屈荷重を反映した降伏曲面

部材端の 6 応力の降伏曲面を式 (3.1) のように擬似球面で定式化する. f_n は各応力, f_{nmax} は各応力の限界値である.

$$\sum_{n=1}^6 \left(\frac{f_n}{f_{nmax}} \right)^{1.5} = 0.95^{1.5} \quad (3.1)$$

座屈を考慮しない場合は N_{max} は降伏軸

力 N_y となるが、これを縮約により得られる個材座屈荷重 N'_{cr} に修正した降伏曲面を設定する (式 (3.2)).

$$N_{max} = N'_{cr} = \lambda' N \tag{3.2}$$

応力が降伏曲面に達すると塑性関節が生成されたとし、以降応力は降伏曲面上を進行するものとする。

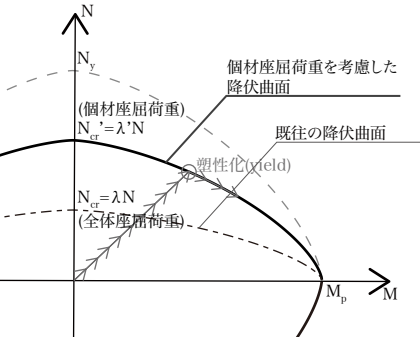


図 3.1 降伏曲面上の応力の進行

なお、本論文では計算負荷の観点から座屈解析は初期荷重に対して一回のみ行い、構成部材の塑性化などによる座屈荷重の変動は考慮しないものとする。

3.2 個材座屈荷重を反映した耐力・崩壊形解析諸元

図に示したようなラチス骨組を例に、座屈を考慮した弾塑性解析を行う際、個材座屈荷重を反映した場合と従来の全体座屈荷重を用いた場合とで得られる結果を比較する。ラチス骨組の構成部材は SN400 相当の鋼材とし、自重は無視する。また、全塑性モーメントを求める際の降伏部分の応力度は 235N/mm^2 とした。

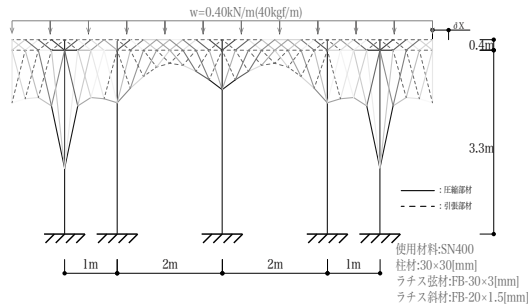


図 3.2 諸元・長期軸力図

座屈解析

ここでは座屈解析は長期鉛直荷重を用いる設計法を採用する。長期鉛直荷重に対して全体座屈解析によって得られる全体座屈モードと座屈固有値問題の縮約によって得られる個材座屈安全率 $1/\lambda'$ 分布を図 3.3 に示す。全体座屈解析ではラチス部材の局所的な座屈が検出されており、主要な構造部材である柱部材やその他の座屈耐力を過小評価してしまう可能性がある。一方、個材座屈安全率はラチス部材に比べて柱部材で小さくなっており、柱部材の座屈への余裕度が大きく評価されている。

耐力の評価：荷重増分解析

長期鉛直荷重を与えた状態で、長期鉛直荷重に対して層せん断力係数 C_i 倍の水平力を加えていく荷重増分解析を行い、耐力を求める。個材座屈荷重を反映した場合、全体座屈荷重を反映した場合と比べて、2.42 倍の耐力と評価される (図 3.4)。

崩壊形の評価：時刻歴応答解析

時刻歴応答解析を行い、吸収エネルギー量の分布を観察する (図 3.5)。時刻歴応答解析の諸元は表 3.1 に示す通りである。

数値解析	Newmark- β 法 ($\beta = 1/4$)
地震波	バイリニア型模擬地震波 ³⁾
時間刻み・解析時間	0.02(s), 20.0(s)
減衰	初期剛性比例型, 減衰率 $h = 0.02$
地震波基準化	75(kine)

表 3.1 応答解析諸元

全体座屈を反映した場合に柱のエネルギー吸収量が大きくなる。これは、全体座屈解析ではラチス部材の座屈が支配的であり、柱部材の座屈荷重が過小評価となっていることで、より損傷が多く発生すると評価されてしまうが、座屈固有値問題の縮約によって得られる個材座屈荷重を反映した場合には余裕度が適切に評価でき、結果としてより経済的な設計が可能になると予想される。こ

これらの解析手法が実際と一致するか、実験による検証例が少ないが、この例は両者の差が大きく出ており、検証を行うための試験体の良い候補となり得る。

座屈縮約結果

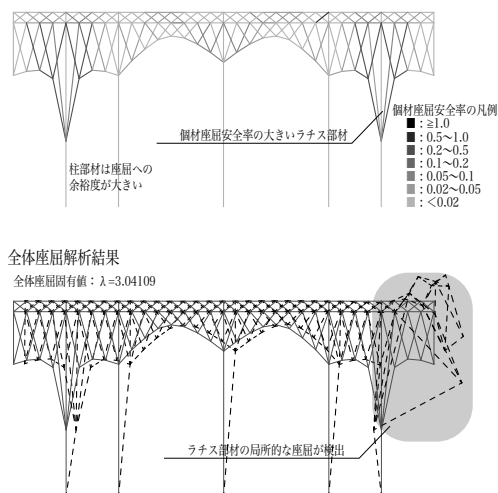


図 3.3 座屈解析結果

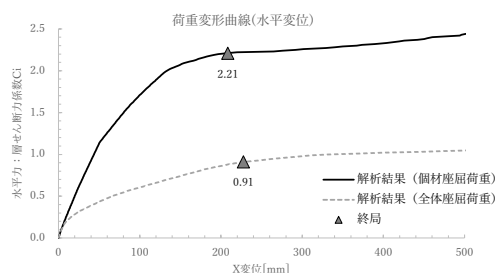


図 3.4 荷重増分解析結果：荷重変形曲線

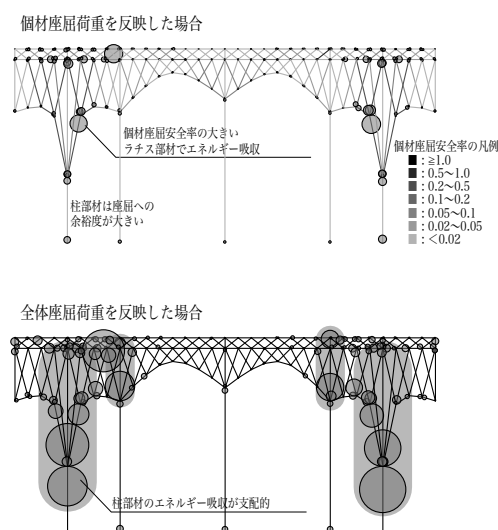


図 3.5 応答解析結果：エネルギー吸収分布

3.3 部材量に及ぼす影響

既往の手法に対して、個材座屈荷重を反映した場合耐力が大きく見積もれるため、設計上部材量を少なくできると考えられる。ラチス骨組の形状を変化させ、個材座屈荷重を反映した場合と全体座屈荷重を反映した場合でそれぞれ同程度の耐力となる形状を比較した。全体座屈荷重を反映した場合に比べて、個材座屈荷重を反映した場合、同程度の耐力を持ちながら全体で 6.8%（ラチス部材のみでは 23.9%）の部材量の削減となった。

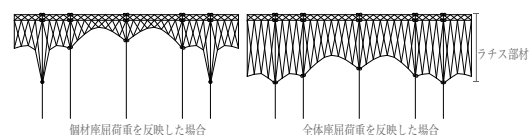


図 3.6 各解析手法で同程度の耐力となる形状

4 実験による検証

4.1 概要・座屈解析

降伏曲面における圧縮軸力による座屈の反映方法を構造物の崩壊挙動で実験的に検証するため、鉛直荷重を載荷すると軸力と曲げが発生するフィーレンディールアーチの試験体を作成し、二点載荷実験を行った。

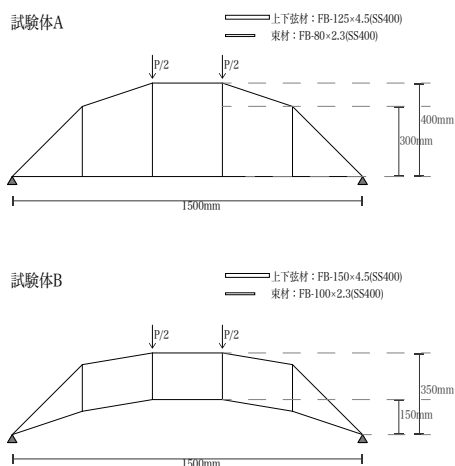


図 4.1 試験体寸法、諸元

試験体 A,B について、降伏曲面の設定のための座屈解析は次のように行った。試験体 A は、載荷する点に集中荷重を与えて座屈解析を行った。試験体 B については、集中荷重

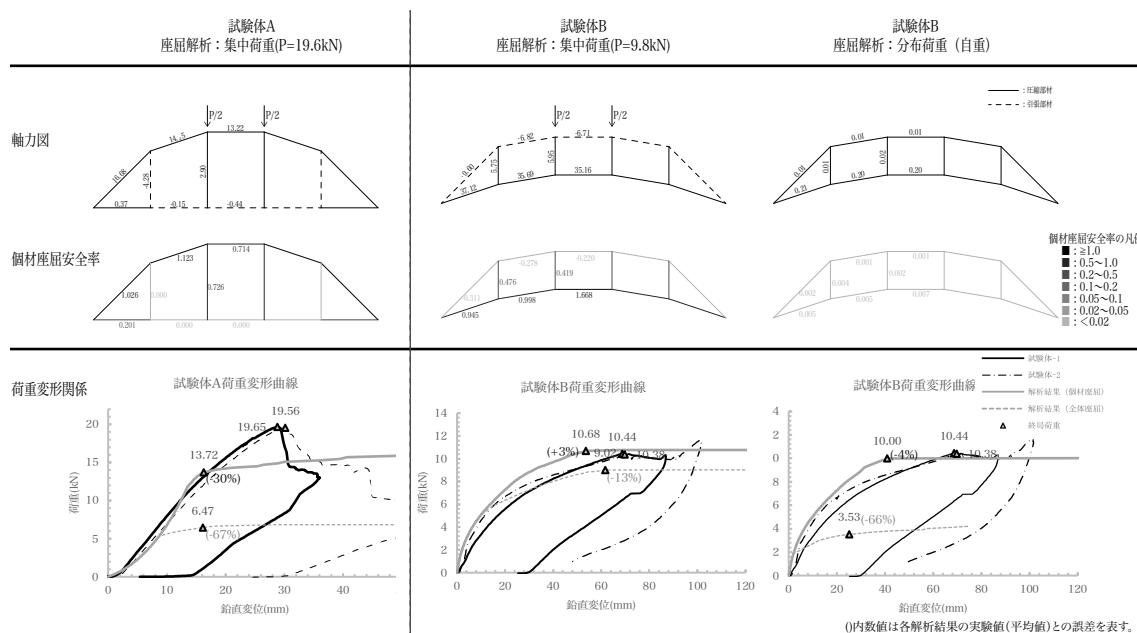


図 4.2 フィーレンディールアーチ実験結果, 座屈解析, 荷重増分解析

に対する静的線形応力解析では上弦材が引張となるが, 荷重増分解析の過程で下弦材の塑性化により上弦材が圧縮に転じることが分かっており, 集中荷重に対する座屈解析ではこれが検出できない。一方, 自重のような分布荷重に対しては上下弦材いずれも圧縮となるので便宜的にこれを用いることを考える。座屈解析の荷重条件を集中荷重と分布荷重の2通りで行った場合についてそれぞれ検討を行った。将来的には, 増分解析の各ステップで逐次座屈解析を行う手法や, 初期には集中荷重モデルで座屈解析を行っておき, 上弦材が圧縮に転じた時点で改めて座屈解析を行う手法も考えられる。

4.2 実験結果と荷重増分解析結果の比較

荷重変形曲線に示したように, 全体座屈荷重を反映した解析での終局荷重の実験値との誤差は-67%~-13%であったが, 個材座屈荷重を反映した場合は-30%~+3%の範囲であり, いずれの条件下においても後者の方がより実現象に近い結果が得られている。ま

た, 試験体 B で個材座屈荷重を反映した場合は座屈解析の荷重条件の設定によらず実現象に近い終局荷重を得られており, 荷重状態の変化に適応しやすい可能性が高い。

5 結

本研究では, 構造物の崩壊形を求める際に, 部材の降伏曲面に個材座屈荷重を反映することで, 従来の全体座屈荷重を反映した場合よりも耐力が大きく評価できることを示した。さらに, フィーレンディールアーチの試験体を作成し, 実験と解析で崩壊挙動を比較することによって, 解析手法の妥当性を検証した。今後, 塑性化による応力分布や座屈荷重の変動を含めた挙動について検討が必要である。

主要参考文献

- 1) 堤千春他, 弾性剛性と幾何剛性を用いた座屈固有値問題の縮約による個材座屈荷重の検出法 その 2: 解析結果の分析と最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018
- 2) 朝原真知子他, 座屈固有値問題の縮約による個材座屈荷重の検出法とその実験検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019
- 3) 金澤亮磨他, 地震応答時の損傷に伴う固有周期の変動に基づく形状最適化手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021