

## 論文の内容の要旨

論文題目 逐次座屈固有値解析法を用いたH形断面梁の最大曲げ耐力評価

氏 名 福島 佳浩

近年、H形断面梁の上フランジにシアコネクタを介して接合されたコンクリートスラブによる梁の横補剛効果について盛んに研究が行われている。解析技術の発達により、スラブ付梁のように複雑な条件を含む場合でも、詳細にモデル化することで実験の挙動を精確に再現するような解析を行うことはできるようになりつつあるが、結果として得られる膨大な量の情報から横補剛効果の力学的機構を把握することは必ずしも容易ではなく、未だに不明な点が多い。力学的機構を解明するにあたっては、最大耐力の値だけでなく、最大耐力に至るまでの剛性低下に着目することが有用であると考えられる。

本論文では、幾何学的非線形性による剛性低下を定量的に評価する方法を提案することで、材料非線形性を加えた二つの非線形性による剛性低下に着目した非弾性座屈耐力の評価方法を確立することを目的としている。

材料非線形性による剛性低下の影響については、塑性化領域のヤング係数を低減させたときの座屈固有値の変化として考慮する方法が、Tangent modulus theoryやDouble modulus theoryとして確立されている。一方で、幾何学的非線形性の影響については、Perry-Robertson式のように変形の増加に伴う応力度分布の変化として捉えることで材料非線形性の問題に置き換える方法や確率論的に評価する方法があるが、いずれも幾何学的非線形性を定量化するものではない。

本論文では、部材の変形を座屈モード方向への変形（面外変形）とそれに直交する方向への変形（面内変形）に分解し、面外方向への変形量が増大するにつれて座屈耐力が低下するとみなすことで、幾何学的非線形性の影響を定量化することを提案する。座屈固有値や座屈モードは、部材の変形や塑性化の進展に伴い時々刻々と変化するため、逐次的に座屈固有値解析を実行することで、材料非線形性と幾何学的非線形性の両方による剛性低下を考慮した座屈耐力を求め、荷重と座屈耐力が一致する時点における荷重を最大耐力の予測下限値とする。この手法を逐次座屈固有値解析法と称す。本手法は材料非線形性と幾何学的非線形性の両方を考慮したTangent modulus loadを求めることで最

大耐力を評価する方法であり、二つの非線形性の影響を区別して考慮することができる。本論文では、強軸まわり曲げモーメントを受ける梁の最大曲げ耐力について、同手法の適用性を確認する。

本論文は全6章からなっている。以下に、各章の概要について述べる。

第1章「序」では、研究の背景、既往の研究、研究の目的について述べている。

第2章「逐次座屈固有値解析法」では、力学モデルを用いて逐次座屈固有値解析法の概要について述べている。

力学モデルは並進ばね、回転ばね、ローラ、レールの四つの要素で構成され、

- 並進ばねの伸び＝初期変形様式での変形
- レール上でのローラの移動＝座屈変形様式での変形
- 回転ばねの降伏耐力＝座屈耐力

というかたちで座屈現象を抽象的に表したものになっている。

回転ばねが降伏耐力に達する前に回転し、レール上をローラが移動することで、幾何学的非線形性による剛性低下が生じる場合について、回転ばねの回転が生じないモデル（等価モデル）を用いて座屈を定義することを提案している。等価モデルと元のモデルを比較することで、座屈モード方向への変形量を基に幾何学的非線形性の影響を定量化していることになる。この定量化方法をTangent modulus theoryと統合することで、材料非線形性と幾何学的非線形性の両方を考慮したTangent modulus loadを求めることができる。

より複雑な構造物について、力学モデルと同様に、二つの非線形性を考慮したTangent modulus loadを算出する方法として、逐次座屈固有値解析法を提案している。逐次座屈固有値解析法は以下の三つの手順からなる。

手順1：荷重増分解析

手順2：座屈固有値解析

手順3：面外変形量の評価

手順1では、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した荷重増分解析を行い、変形形状と塑性化領域の進展状況を求める。手順2では、手順1の各段階について、変形形状と塑性化領域の分布を考慮した線形座屈固有値解析を行い、座屈固有値と座屈モードを求める。手順3では、手順1で得られた変形形状と手順2で得られた座屈モードを用いて座屈モード方向への変形量を評価する。

二つの非線形性の影響を考慮して求めた座屈モーメントの推移を表す曲線（剛性低下曲線）と荷重変形曲線の交点における荷重（分岐モーメント）が、材料非線形性と幾何学的非線形性の両方を考慮したTangent modulus loadに相当し、本論文ではこの荷重を

最大耐力の予測下限値とすることを提案している。

また、非線形性を幾何学的な不安定性として捉えると、材料非線形性は微視的不安定性、幾何学的非線形性は巨視的不安定性とみなすことができ、

分岐モーメント  $M_{bt}$ : 二つの不安定性によって巨視的不安定に至るときの荷重

全塑性モーメント  $M_p$ : 微視的不安定性によって巨視的不安定に至るときの荷重

弾性横座屈モーメント  $M_e$ : 巨視的不安定性によって巨視的不安定に至るときの荷重と位置付けることができるため、部材が巨視的不安定に至る時点での二つの非線形性の影響を図示するための方法として、 $M_{bt}/M_p$ と $M_{bt}/M_e$ の関係を表す「巨視的不安定曲面」を用いることを提案している。

第3章「材料非線形性の評価」では、材料非線形性による剛性低下のみが生じる場合について、逐次座屈固有値解析法を用いた検討結果を述べている。

幾何学的非線形性による剛性低下の影響がない場合には、剛性低下曲線の形状は座屈固有値の低下のみによって決まり、荷重変形曲線と剛性低下曲線の交点は座屈分岐点となる。本論文で用いた解析方法では座屈分岐点において荷重変形関係の釣合経路の分岐が再現されないため、荷重増分解析で得られる最大荷重は分岐モーメントを大きく超えているが、実際には座屈分岐点において釣合経路が分岐し、その後の耐力上昇は小さいと考えられる。

本章では、曲げモーメント分布、残留応力の有無、二次剛性をパラメタとして、各パラメタの材料非線形性による剛性低下への影響について考察している。曲げモーメント分布と残留応力の有無の影響は塑性化領域の分布形状の違いとして現れる。逆対称曲げモデルと片曲げモデルでは、梁端部から徐々に塑性化が進行する点が共通しているため、剛性低下の推移が一致する傾向にあるが、一様曲げモデルではフランジが材軸方向に一斉に塑性化するため、他の曲げモーメント分布に比べて剛性低下量が大きい。残留応力が存在すると、塑性化領域分布に偏りが生じることで剛性低下状況が変化する。二次剛性が大きくなると剛性低下量は小さくなる傾向にある。

第4章「幾何学的非線形性の評価」では、幾何学的非線形性による剛性低下のみが生じる場合について、逐次座屈固有値解析法を用いた検討結果を述べている。

材料非線形性による剛性低下の影響がない場合には、梁端回転角を増加させていくと全変形に占める面外変形の割合が急激に増大しながら荷重が緩やかに座屈モーメントに漸近する。逐次座屈固有値解析法では、面外変形の割合が急増する領域で座屈モーメントが急減するとみなすため、面外変形が増加する領域での荷重増加を無視することになる分、分岐モーメント  $M_{bt}$  は解析で得られる最大荷重を過小評価する。

本章では、曲げモーメント分布、初期たわみ形状、初期たわみ量をパラメタとして、各パラメタの幾何学的非線形性による剛性低下への影響について考察している。初期た

わみベクトルを  $\mathbf{v}_{\text{init}}$ 、座屈モードベクトルを  $\mathbf{e}_n$  としたとき、 $\langle \mathbf{v}_{\text{init}}, \mathbf{e}_n \rangle \neq 0$  となる次数で幾何学的非線形性による剛性低下が生じ、そのうち最小の次数に対応する分岐モーメントが最大曲げ耐力の予測下限値となる。曲げモーメント分布によって  $\mathbf{e}_n$  が異なるため、曲げモーメント分布と初期たわみ形状の組み合わせに応じて剛性低下の生じる次数が変化する。梁端回転角が小さい範囲では、 $\langle \mathbf{v}_{\text{init}}, \mathbf{e}_n \rangle$  が最大となる  $\mathbf{e}_n$  の方向に面外変形が進行する傾向にあり、 $\langle \mathbf{v}_{\text{init}}, \mathbf{e}_n \rangle \neq 0$  となる最小の次数と  $\langle \mathbf{v}_{\text{init}}, \mathbf{e}_n \rangle$  が最大となる次数が異なる場合には、载荷途中で面外変形の変化する可能性がある。初期たわみ量を梁スパンに対する最大たわみ量の比で表すと、初期たわみ量が同じでも横座屈細長比が大きいほど剛性低下量が大きくなる傾向にある。

第5章「材料非線形性と幾何学的非線形性の連成」では、材料非線形性と幾何学的非線形性の両方による剛性低下が生じる場合について、逐次座屈固有値解析法を用いた検討結果を述べている。

材料非線形性と幾何学的非線形性の両方の影響がある場合には、塑性化と面外変形が同時に生じるため、(a)面外変形による塑性化進展状況の変化、(b)塑性化による面外変形進展状況の変化、の二つのかたちの相互作用によって剛性低下量が決まる。(a)について、剛性低下に対する影響が大きいのは圧縮側フランジにおける塑性化領域分布の変化であり、幾何学的非線形性による剛性低下を生じない曲げモーメント分布と初期たわみ形状の組み合わせでも、圧縮側フランジの塑性化領域分布に影響を与える場合には、材料非線形性の影響による剛性低下は生じる。(b)について、塑性化によって面外変形量が増加する傾向にあるが、幾何学的非線形性による剛性低下のみが生じる場合と同様に、 $\langle \mathbf{v}_{\text{init}}, \mathbf{e}_n \rangle \neq 0$  となる最小の次数に対応する分岐モーメントが最大曲げ耐力の予測下限値となる。

二つの非線形性を考慮して求めた分岐モーメント  $M_{bt}$  と最大曲げ耐力は、横座屈細長比  $\lambda_b$  が中程度の範囲では概ね一致する。 $\lambda_b$  が小さい範囲では  $M_{bt}$  が Tangent modulus load に相当するため、 $\lambda_b$  が大きい範囲では面外変形が過大となる領域における荷重の増加を無視しているため過小評価となる傾向にある。

第6章「結論」では、第5章までの内容をまとめ、本論文の結論として述べている。