



## 第 49 話 材料非線形解析における特異現象 No.2

今回も引き続き、材料非線形解析で生じる特異な現象とその対処法についてお話します。

### 3. 飛び越し対処によって数値解析が破綻をきたす例

荷重増分や変位増分を十分小さくしても、ファイバーやバネの変位増分値が大きくなる場合として、以下に代表的な例を挙げる。

- 1) 飛び越しや除荷時の処理が不適切
- 2) 内部に不安定な構造要素を含む骨組の解析
- 3) ファイバーやバネの剛性で軟化領域を有する骨組の解析

区分線形化で釣合経路が交点を通過する際、解析の都合で飛び越しの発生と除荷時に誤差が生じることは先にお話しました。特に、交点を挟んだこの2つの線分の剛性に大きな差があるとき、時にはひとつの剛性係数がほぼゼロとなるような場合、飛び越しと除荷時の処理が適切でないと大きな増分変位や不釣合力が発生する。

### 4. 内部に不安定部材を含む骨組の解析

ファイバーやバネの増分値が大きくなる場合として、「内部に不安定部材を含む骨組」や「剛性で軟化領域を有する部材」の解析では、さらに注意を払う必要がある。

全体が不安定となるような全体座屈や局所的な座屈を生じる骨組、あるいは塑性ヒンジによってメカニズムが発生する骨組では、接線剛性が特異となり、行列式の値がゼロとなる釣合点が釣合経路上に存在する。釣合曲線上のこの点は分岐点あるいは屈服点と呼ばれ、特別な処理を組み込んだ解析ソフトでないとこの点を通り抜けることはできない。

一般的な弾塑性解析システムでは、この種の特異な処理を組み込んでいないため、最大耐力や分岐座屈荷重を求めたりする代替的手法として、小さな初期不整を挿入する。同法によって釣合経路は特異点近傍を通ることになり、その際接線剛性は偽特異となる。特異点近傍では、ひとつもしくは数個の固有値がゼロに近似し、対応する固有モードは他の変位モードに比較して大きな変位を生じる。接線剛性の任意の固有値がゼロに近似するときや、ゼロを通過して負の値となる場合、その釣合経路の近傍では小さな増分変位や増分荷重でも、その固有ベクトルに対応する節点は大きな変位を伴う。結果、ファイバーの応力-ひずみ履歴やバネの履歴で大きな誤差が発生し、時には追跡が破綻することになる。固有値ゼロ近傍では、増分荷重が自動的に小さくなる手法を用いるのが有効

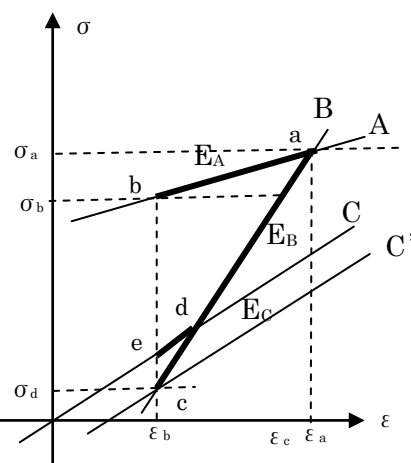


図 4 次の折れ曲がり点を飛び越す場合

である。例えば、弧長法は増分荷重と増分変位の和が一定となるように解析を進めるため、上記の状態でも有効な方法である。

接線剛性がゼロ固有値を持つのは、全体座屈や塑性メカニズムによって骨組全体が不安定となる場合だけではない。例えば、局部的に一本の部材に 3 つの塑性ヒンジが発生してメカニズムを構成したときとか、軸方向剛性がゼロとなるなどがある。この状態でも接線剛性はゼロ固有値を有しており、この種の局部的な不安定要因が解析破綻の原因となる場合が多い。

### 5. 骨組内に軟化部材・軟化バネを有する解析

コンクリートの圧壊後や、柱・耐震壁のせん断耐力後、あるいは鉄骨ブレースの座屈後の挙動を考慮する解析では、履歴の中に剛性が負勾配の軟化領域を有することになる。骨組にこの種の部材を含むと適切な解が得られないことがある。ここでは軟化領域を含む部材で構成された骨組の解析では、応力-ひずみ履歴が軟化に進行するとどのような現象が生じるかについて述べる。

弾塑性解析を実施する際、ある部材の履歴特性が正勾配から負勾配に変化する瞬間、他のファイバーの履歴追跡が正常であるにもかかわらず、その履歴の釣合経路で応答が振動して前に進まないことがある。例えば、振動状態に陥ると耐震壁のせん断バネはせん断耐力に達したにもかかわらず軟化領域に進まず、せん断剛性を維持した状態でせん断力を負担する。結果、骨組全体の水平耐力が過剰に評価されることになる。

耐震壁や柱のせん断バネの履歴特性が正勾配から負勾配に変化する瞬間、振動して釣合点が前に進まない現象は、当該せん断剛性の絶対値が曲げ剛性に比較して大きい場合に多く現れる。そこで、振動現象を避けるために、図 5 のように、負勾配をゼロに近い正勾配とみなして増分解析を行い、次のステップで不釣合力を解除するという方法がある。

図 5 をファイバーの履歴とすれば、線分 A の a 点で最大耐力となり、後は B 線の軟化履歴となる。上記の方法ではファイバーの剛性を線分 C のようにほぼゼロとし、増分解析を行う。得られた増分変位によって釣合位置は c 点となったとすると、線分 B の勾配を用いて b 点を求め、応力  $\sigma_b$  を得る。次に不釣合力  $\sigma_b - \sigma_a$  は次のステップで解除する。後は軟化領域である線分 B が終了するまでこの手法を繰り返すことになる。

この手法は比較的有効であるが、常に良い結果が得られるとは限らない。増分変位が小さい場合は有効であるが、逆に何らかの影響で増分変位が大きくなり、しかも負の勾配が大きいと不釣合力は非常に大きくなり、その解除で解析が破綻する場合もあり、注意されたい。

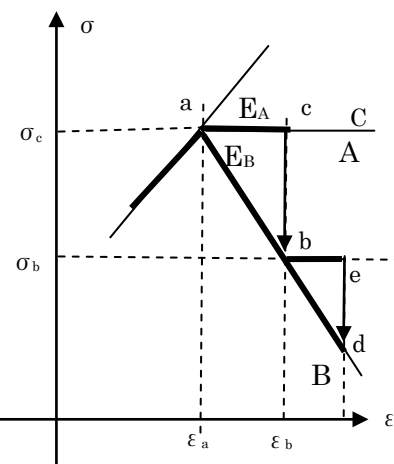


図 5 階段上に増分解析を行う