

## ものづくり計算センター CAE 基礎 ＜構造解析/非線形解析の特徴と解析事例＞

キーワード：CAE、CAD、FEM、構造解析、非線形解析、材料非線形、幾何学的非線形、接触解析

### はじめに

構造解析は、製品および部品の荷重や変位、応力状態を評価する技術です。解析には、弾性範囲の微小な変形を対象とする「線形解析」と、大変形や接触、塑性変形を考慮する「非線形解析」があります。既報(Technical Sheet No.24-12)で紹介した線形解析は、荷重と変形量が必ず比例する関係となり、塑性変形が始まるまでの強度評価に用いられます。一方、非線形解析は材料の塑性変形や部品同士の接触、形状変化に伴う剛性変化まで考慮できるため、より実際の挙動に即した詳細な評価が可能です。本報では、非線形解析の概要および代表的な解析設定手順、解析事例について紹介します。

### 非線形性とは

非線形解析とは、入力(荷重等)と出力(変位・応力等)の関係が比例しない問題を取り扱う解析手法です。非線形性は、主に以下の3種類に分類されます。

①【材料非線形】図1に一例を示すように、応力とひずみの関係が比例しない場合を取り扱う解析手法です。線形材料では材料が降伏しない前提で縦弾性係数の傾きにしたがって応力が上昇しますが、非線形材料では、弾性限を超えて塑性変形が生じる金属材料や、大変形により剛性が変化するゴム材料(超弾性)などの挙動を表現できるようになります。

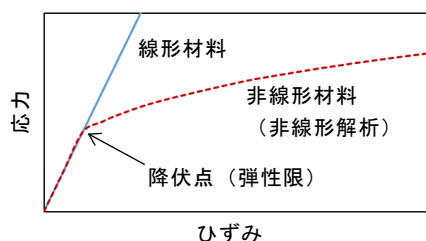


図1 線形材料と非線形材料の違い

②【幾何学的非線形(大変形)】変形が大きくなることで生じる形状変化が、構造全体の剛性や応力分布に影響を及ぼす現象を取り扱います。薄肉構造の座屈、膜やケーブルのたわみ(張力の発生)、大変形を伴う構造の形状変化などがこれに該当します。

当します。解析は一般に非線形方程式となり、適切な増分ステップの設定や収束判定が必要になるため、計算時間は増大する傾向があります。

③【境界条件非線形(接触)】代表的なものに、部品同士が接触・分離することで境界条件が不連続に変化する接触非線形があります。この非線形性を考慮することで、実際の製品における複雑な接触挙動や荷重伝達を、より現実に即した形で評価することが可能になります。

### 非線形解析の代表的な設定手順

非線形解析では、線形解析に必要な基本手順に加え、以下の詳細な設定が必要になります。

①対象の現象整理: 材料、幾何、接触のどの非線形性を考慮すべきかを明確にします。解析の複雑化は計算時間の増大を招くため、線形解析としてモデル化できる項目がないかも併せて検討します。

②材料モデルの設定: 塑性、超弾性、粘弾性など、適切な数式モデルを選定します。解析対象の変形様式を想定し、変形に対する剛性の変化を適切に表現できるモデルを選択することが重要です。

③境界条件・接触の定義: 拘束条件に加え、接触部の挙動(固着、すべり、摩擦係数など)を設定します。変形によって接触状態がどのように変化するかを予測して設定する必要があります。

④ステップ分割と荷重制御: 収束性を向上させるため、荷重を細かなステップに分割して付与します。非線形性が強い解析では、ステップの細分化やメッシュ品質の向上が計算を収束させる鍵となります。

⑤反復計算と収束判定: 解析ソフトウェアが残差を評価しながら自動で反復計算を進めます。計算が収束しない(発散する)場合は、ステップ分割や境界条件の設定見直しが必要になります。

⑥結果評価: 変位、相当応力(ミーゼス応力)、接触状態などを確認し、想定される物理現象と異なる点がないか慎重に評価します。

### 非線形解析(大変形・材料非線形)の解析事例

鋼製の角パイプの曲げを題材に非線形解析の具体的な特徴を紹介します。解析モデルには図2に示すとおり、20 mm角、長さ400 mm、板厚0.2 mmの鋼製角パイプを用いました。境界条件として両端

を完全固定し、中央部を 200 N で押込むシミュレーションを実施しました。比較のため、①線形解析、②非線形解析(大変形)、③非線形解析(大変形+材料非線形)の 3 パターンで、荷重に対する変形量(下方向へのたわみ量)を評価しました。

図 3 に解析結果(変形量分布)を示します。①線形解析では、変形量が押込み位置から固定部に向かって均等なグラデーションとなっています。これに対し、②非線形解析(大変形)では、押込み位置付近の天面に分布の乱れ(座屈)が生じています。薄肉構造体では、曲げ変形の圧縮側(曲率の内側)に座屈が生じることが知られていますが、非線形解析を用いることでこの物理現象を表現できることがわかります。

次に、図 4 に変形量の推移を示します。①線形解析では、押込み荷重に比例して変形量が上昇しました。荷重が 20 N 増加すると変形量は 0.07 mm 増加するという比例関係の維持は、線形解析の大きな特徴です。一方で、②非線形解析(大変形)では、座屈の発生に伴い 150 N 付近から線形解析を上回る変形量が確認できます。さらに、③非線形解析(大変形+材料非線形)では、座屈の発生と 180 N 付近で材料が降伏点を超えて塑性変形に至るため、さらに変形量が増大する結果となりました。

### 非線形解析(接触)の解析事例

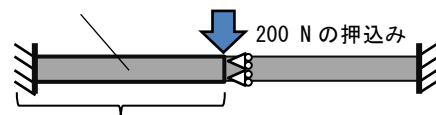
押込み位置の下部に 0.3 mm のクリアランス(隙間)を設けて支えを配置した接触解析の例を紹介します。①線形解析と③非線形解析(大変形+材料非線形)の比較を図 5 および図 6 に示します。

①線形解析では、図 5 および図 6 において相当応力、変形量ともに概ね 0 になることがわかります。線形解析では、クリアランスが存在する場合でも、解析開始時から固着されていると定義して扱われるため、接触状態の変化を追従できないという特性があります。一方、③非線形解析では、図 6 のとおりクリアランス分(0.3 mm)だけ変形した後に支えとの接触を検知し、それ以上の変形が抑制されるとい実挙動に即した結果を示しました。また図 5 では、接触に至るまでの荷重伝達により、角パイプに相当応力が発生している様子を確認できます。このように、境界条件が不連続に変化する現象には非線形解析が不可欠です。

### おわりに

ものづくり計算センターでは、さまざまな CAE ソフトウェアを用いてお客様の技術課題を解決いたします。ご興味ある方はぜひご相談ください。

角パイプ (幅 20 mm×高さ 20 mm×長さ 400 mm 板厚 0.2 mm)



対称性を考慮して 1/2 で解析

図 2 解析の境界条件

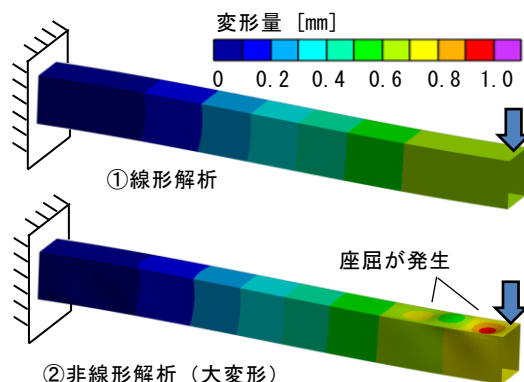


図 3 角パイプの解析結果 (1/2 対称境界条件)

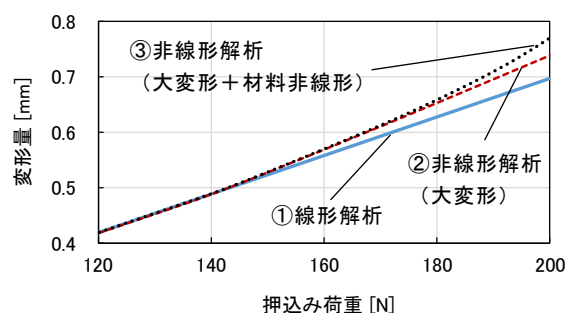


図 4 押込み荷重と変形量の関係

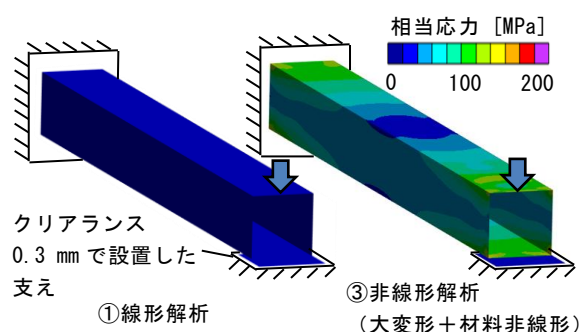


図 5 接触解析により得られた相当応力

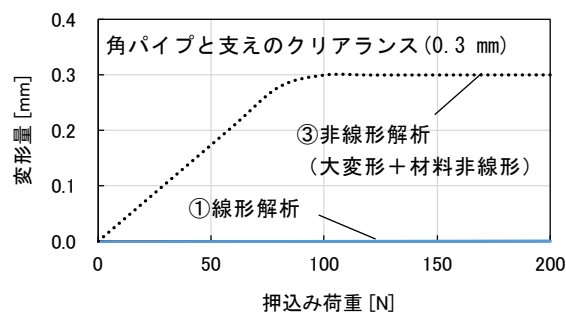


図 6 押込み荷重と変形量の関係 (接触解析)

※ テクニカルシートの内容の一部または全部を転載する場合には、前もって大阪技術研に連絡の上、了解を得てください。

発行日 2026 年 2 月 1 日

作成者 ものづくり計算センター(加工成形研究部 精密・成形加工研究室 四宮 徳章、特殊加工研究室 三木 隆生)