



## 第 2 4 話 材料非線形解析における履歴特性 No.2

今回は、前回に続いて材料非線形性についてお話する。耐震壁置換モデルやせん断破壊を考慮した柱モデルなど、重要な材料非線形モデルについては後日改めて話をする。ここでは MSS 要素やバネ要素、衝突要素などについてお話する。第 48 話と第 49 話で、材料非線形解析を行う際発生する異常な現象とそれを防ぐための対処法について触れる。

最初に MSS(Multi Spring System)モデルの履歴について解説する。このモデルは、せん断剛性を円周上に配置した仮想的なモデルであり、円周上に置かれたスプリングは、円周面から垂線方向の変位に対して、挙動するものとしており、立体骨組用の免震デバイスの履歴に適している。一つのスプリングの履歴が図 5 のようにバイリニア型であっても、MSS モデル全体の挙動は、滑らかなせん断力-変位関係を表す。さらに部材のせん断バネは 2 方向独立となるが、この MSS モデルは互いに相関を持たせることができる。つまり、変位がゼロの場合と大きく変位した場合では、その変位の直交方向せん断剛性は異なる。

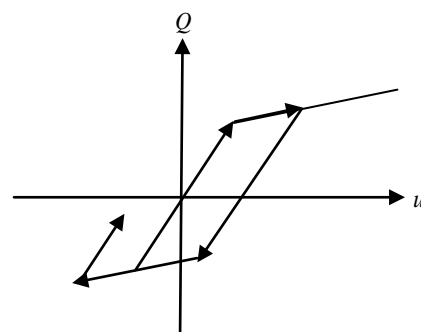


図 5 スプリングのバイリニア型履歴特性

次に、鉄骨ブレースの挙動を表すモデルについて説明する。個材の圧縮耐力は、材の細長比  $\lambda$  をパラメータとして図 6 に示される。図中上部に示す降伏、弾性座屈、弾塑性座屈で材の耐力は決まってくる。また、個材の圧縮力と軸方向変位の関係は材の細長比  $\lambda$  によって異なり、図 7 の模式図に示される。 $\lambda$  が小さいか(c)あるいは大きい場合(a)、最大耐力を超えて変位が進んでも、耐力の低下は緩やかである。一方、材の細長比が限界細長比付近の場合(b)、最大耐力に到達した後、耐力は急激に低下する。このように座屈後挙動が  $\lambda$  によって異なる。

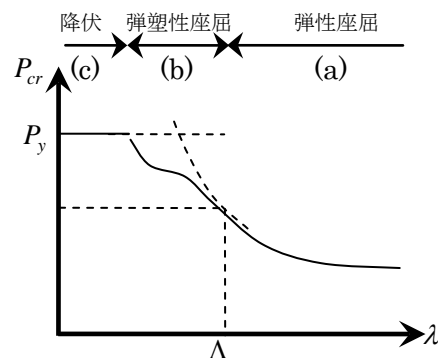


図 6 圧縮耐力と細長比の関係

個材の座屈後、及び降伏後も含めた履歴挙動に関する理論的研究では、塑性ヒンジの概念を導入したものと、有限要素法による直接解析によるものとがある。また、実験的研究も数多く行われており、理論の検証と共に、個材の非弾性座屈挙動そのものが明らかにされつつある。

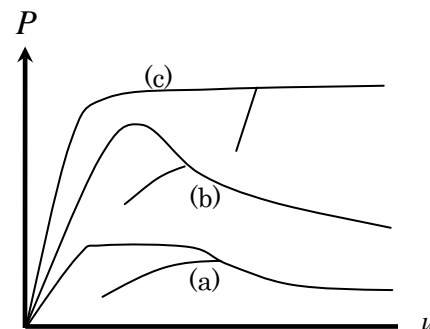


図 7 圧縮力と軸方向変位の関係

軸方向力と軸方向変位の関係をモデル化し、部材の復元力特性を近似する手法は様々な形で提案されている。その中で最も単純なモデルは、直線型モデルで全ての領域を線形近似する。しかし、座屈後の挙動は直線で近似すると誤差が大きくなり、精密な非弾

性領域の追跡ができない。コンピュータの能力が向上した今日では、弾性領域は直線、非弾性領域は曲線で近似することが多い。特に、双曲線関数や高次関数を用いられる。この方法では、処女载荷時の挙動は良い精度で近似できるが、繰返し载荷を受けると、その誤差が大きくなっていく。この欠点は、除荷が起こった際の弾性領域で、細長比が大きいものほど幾何学的非線形性の影響を強く受け、非線形性の履歴を描くためであると思われる。また、バウジンガー効果など材料の特性を無視したモデル化を行うと、この傾向が強くなる。

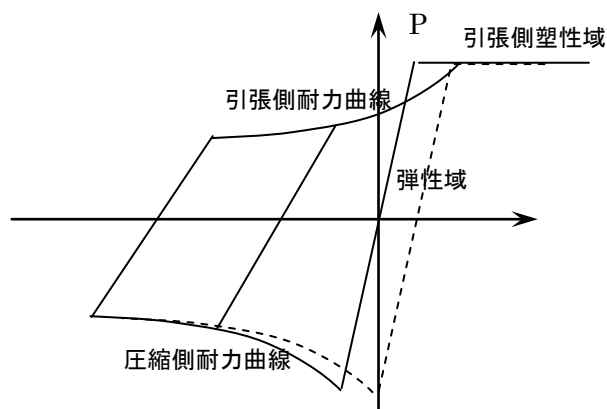


図 8 軸方向履歴モデル

図 8 には、一般的に良く用いられる座屈後挙動を含む部材の復元力特性を示す。引張・圧縮耐力曲線や除荷剛性などは、材の細長比に対応して自動的に設定される。

免震構造では、免震層で大きく水平変位を生じる。そのため、ドライエリアなどを設けて、上部構造が外部と接触もしくは衝突をしないようにクリアランスを取る必要がある。しかし、想定を超える大きな地震動や長周期地震動が作用すると設計値を超えて水平変位を生じ、壁やストッパーに衝突する可能性がある。そのよう解析では、衝突モデルを利用する。図 9 に示すように、引張側はスリップ、圧縮側はクリアランス用の変位を生じた後、弾性あるいはバイリニア型の履歴を有する弾塑性バネを用いる。

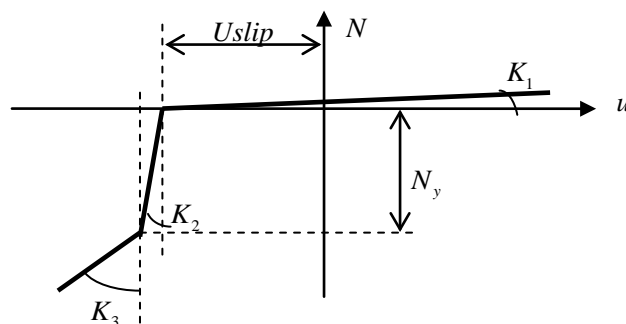


図 9 衝突モデルの履歴特性

衝突モデルのパラメータはクリアランスの長さで 3 つの剛性である。一つ目の剛性  $K_1$  は衝突前であることからゼロであるが、数値計算上非常に小さな値を用いる。第 2 剛性  $K_2$  は衝突の際の相手側の剛性である。この剛性があまりに高いと、衝突時、近傍に高周波の加速度が発生する。そのため、精度良く計算を継続するためには、増分時間をかなり小さくする必要がある。通常の弾塑性解析で使用する増分時間より、おおよそ 10 分の 1 から 100 分の 1 以下を用いることになる。

図 10 はケーブルのスリップバイリニア型の履歴特性である。このケーブル材の弾塑性挙動は引張側の剛性は降伏点で折れ曲がるバイリニア型で表し、圧縮側は応力を維持できない、つまり、剛性がゼロとなる。ただし、多くのプログラムでは、圧縮折れ点の軸力を与えられるようになっており、圧縮側も応力を負担可能となっている。この点を超えると剛性はゼロとなる。

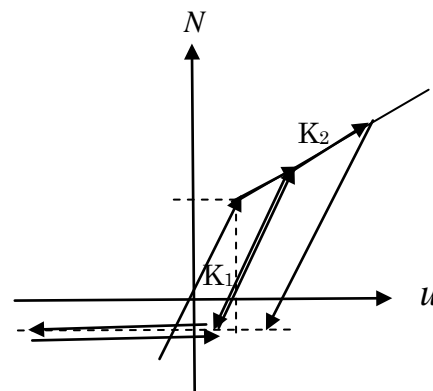


図 10 ケーブルのスリップバイリニア型履歴