



## 第 2 3 話 材料非線形解析における履歴特性 No.1

今回は材料非線形性、特に代表的な履歴モデルについてお話しする。構造物の非線形解析として、材料非線形問題と幾何学的非線形問題があり、特に前者では、応力とひずみの関係  $\sigma_x = E_x \varepsilon_x$  で  $E_x$  が非線形となり、骨組の弾塑性状態を表す。弾塑性特性は一般に骨格曲線（バックボーンカーブ）と履歴ループ則によって表され、鋼やコンクリート、木材など使用する構造材料によって異なる。骨格曲線は、バイリニア、トリリニアなど直線を結合した区分線形化手法と、RO モデルや HD モデルなど曲線で表す方法があり、履歴特性は幾何学的非線形とは異なり、除荷によって元の釣合曲線には戻らず、新たな除荷曲線上を移動する。また、応力がゼロとなっても残留ひずみが残る。

平板や曲面板は、材料そのものの特性を用いて弾塑性状態を求めるが、多様に構成される骨組構造では、上記の材料特性のみでは解析できない。解析の目的や部材の状態、例えば床や耐震壁、面材を線材に置換した部材などには、骨格曲線と履歴ループ則を拡張して、特別な弾塑性履歴を設定する必要がある。さらに材と材との接合部のゆるみやすさ、基礎の浮き上がり、壁面との衝突など、材料特性とは異なる履歴も材料非線形として表現する。これらの動特性は、実験や特別な解析から骨格曲線と履歴ループ則を決めることになる。

動的問題で、最初に用いられた履歴は、図 2 のせん断型、俗にいう串団子型のせん断バネモデルにおいてである。このモデルでは、各階あるいは数階の柱や梁、耐震壁やブレースなどを全て含めた履歴特性として、最大点指向型トリリニアモデル、武田モデル、武藤モデルなどが使われる。動的解析時では、構造材料や耐震壁・ブレースなどを考慮して、技術者が履歴モデルを選択する。これらの設定には、かなりの知識と経験が必要である。ただし、非線形計算は安定しており、適切なパラメータを設定すれば、最大せん断力や最大変位など設計に必要な情報が容易に得られる。このせん断型モデルは現在でも設計時に多く用いられる。

骨組モデルの弾塑性解析では、ファイバー要素が多く用いられる。図 3(a) は両端ファイバー部材であり、部材の両端にファイバー要素が取り付けられている。同図 (b) には要素の断面が示されており、断面を分割してファイバーが設定されている。ファイバー要素では、梁理論により各ファイバーの応力とひずみを求め、ステップ毎に、材料の非線形特性に従って軸方向剛性を求める。一般に、ファイバーの中心位置でひずみを求

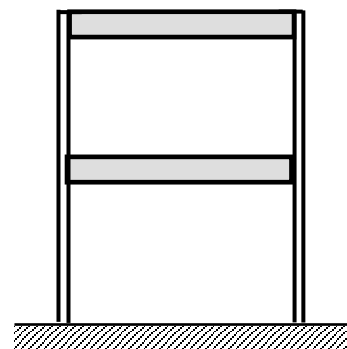


図 1 骨組モデル

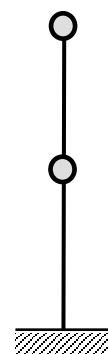
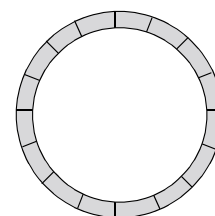


図 2 せん断型モデル



(a) 両端ファイバー部材



(b) ファイバー断面

図 3 部材モデル

め、その点の応力をファイバーの応力として剛性を求める。この剛性を利用して断面二次モーメントなどの断面特性を求めることになる。

部材の弾塑性特性は部材内に配置されたファイバー要素で表す。断面内応力は断面のファイバー分割数が多いほど解析精度は向上するが、計算時間と記憶容量が増加する。ファイバー要素は、軸力と曲げを同時に考慮した塑性状態を精度良く評価することができ、弾性要素との接合部では、変位と回転角は当然一致し、断面力も釣り合う。しかし、ファイバー要素が弾塑性状態になると中立軸が移動するが、弾性要素では固定されており、接合部の断面内応力は釣り合わないことになる。

ファイバーモデルの計算時間と記憶容量を節約する手法として、塑性論アナロジーモデルがある。固体の力学で発展した数理塑性論を、部材断面力の塑性理論に応用し、降伏則・流れ則・硬化則などを使用して、部材の構成則として捉えたものであり、**アナロジーモデル**と呼ぶ。代表的な降伏関数を以下に示す。この関数は、図 4 のように鉄骨断面の降伏関数として用いられる。軸力と曲げモーメントの値がこの関数値に達したとき、断面には塑性ヒンジが生じたことになる。

$$f = \left( \frac{N}{N_p} \right)^2 + \sqrt{\left( \frac{M_y}{M_{yp}} \right)^2 + \left( \frac{M_z}{M_{zp}} \right)^2} - 1$$

**マルチスプリングモデル**は、塑性論アナロジーモデルとファイバーモデルとの中間的な特徴を有する。このモデルによる要素は長さを有しないため、アナロジーモデルと同様に線形剛性は剛でなければならない。もし初期剛性を有すると、このバネが変位することで部材に余分な変位が生じてしまう。数値計算上、剛となる線形剛性を与えることはなかなか難しいが、部材軸方向剛性  $EA/L$  の 100 倍から 1000 倍を目安にすると良い。

上記のモデルでは、バネの履歴として、せん断モデルと同様に複雑な応答を考慮することができる。鉄筋コンクリート断面では、ファイバーモデルよりかなり少ない要素数で軸方向、曲げ履歴を表すことができ、弾塑性解析が格段に有利となる。しかし、この履歴を適切に設定することは難しく、技術的知識・判断が必要となる。ファイバーモデルではコンクリートと鉄筋の履歴を分けて、しかも、細分化して設定するため自動的に履歴特性が設定される。一方、マルチスプリングモデルでは、断面を 5 要素、7 要素、13 要素程度に分割し、鉄筋とコンクリートを含めたマクロな挙動を表さなければならない。マルチスプリングモデルを使用するためには、論文等で十分にこのモデルの特性を理解し、適切に履歴を設定しなければならない。

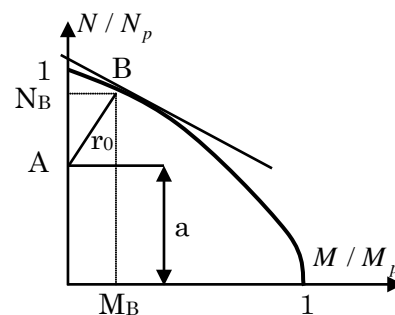


図 4 降伏関数