

## 弾塑性解析の不釣り合い力

弾塑性解析では部材の剛性変化にともなって節点に不釣り合い力が生じます。

ここでは、**図1**に示す門形フレームモデルを使って、「不釣り合い力」の処理について説明します。はりの曲げ剛性を  $EI_b$ 、柱の曲げ剛性を  $EI_c$  とします。材端バネモデルはともにバイリニアとし、降伏曲げモーメントはそれぞれ、 $25\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $6\text{kN}\cdot\text{m}$  とします。

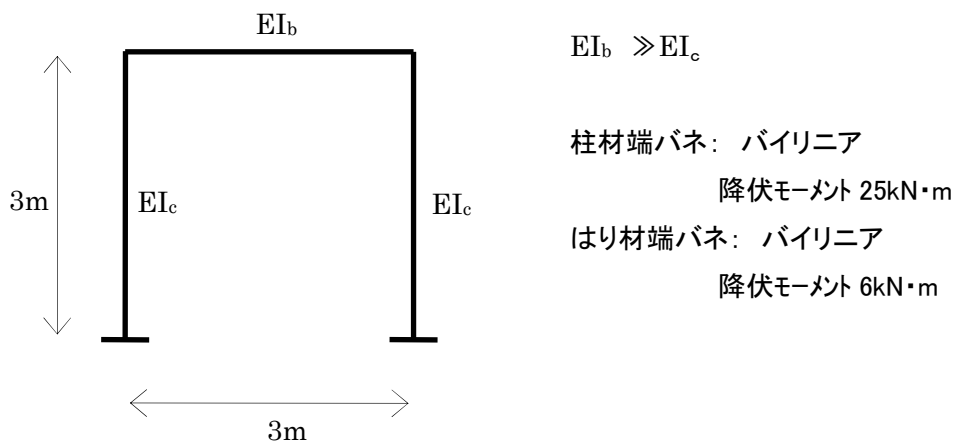


図1 解析対象モデル

$20\text{kN}$  の水平荷重がかかった場合の弾塑性解析方法について解説します。

まず、最初の応力解析結果として**図2**に示す材端モーメントが得られます。簡単のために柱の反曲点は階高の $2/3$ の位置にあるものとします。したがって、柱脚のモーメントは  $20\text{kN}\cdot\text{m}$ 、柱頭とはりのモーメントは  $10\text{kN}\cdot\text{m}$  になります。

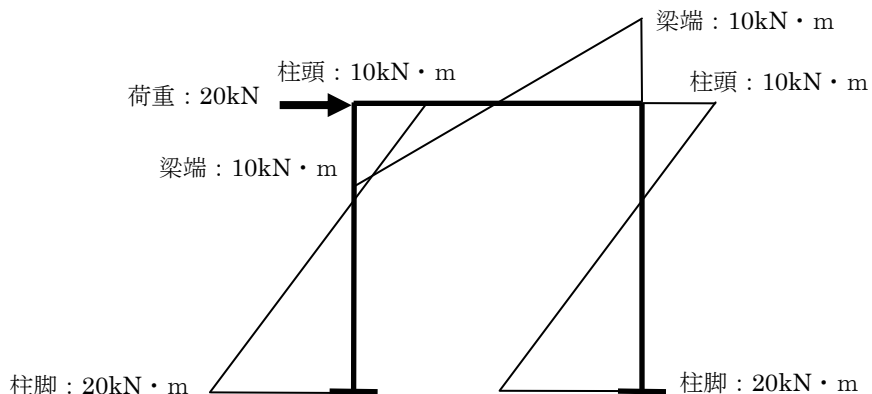


図2 弾性時の応力解析結果

次に図3に示すように、この応力解析結果とそれぞれの復元力特性と比較します。柱は弾性範囲にありますが、はり降伏耐力を超えています。従って、はりの曲げモーメントは  $10\text{kN}\cdot\text{m}$  から  $6\text{kN}\cdot\text{m}$  に修正します。

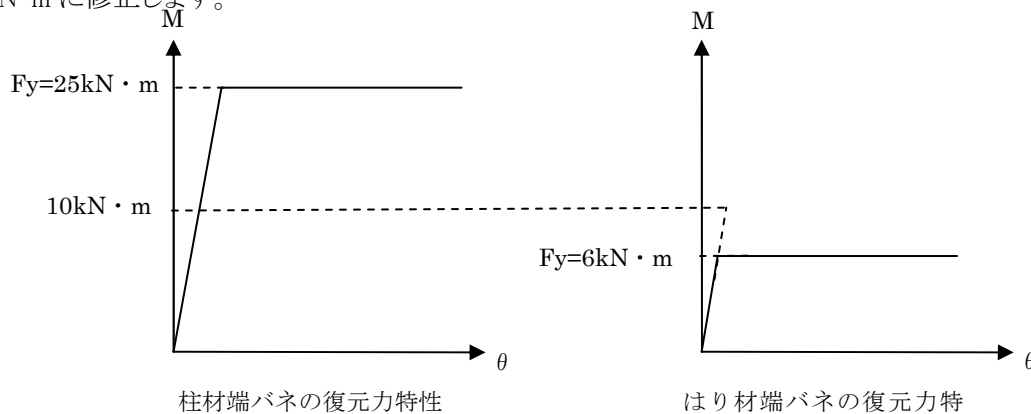


図3 部材端の降伏判定

はり端のモーメントが修正された結果、図4に示すように節点のモーメントが  $4\text{kN}\cdot\text{m}$  だけ釣り合わなくなります。これが、塑性化によって生じる「不釣り合い力」です。

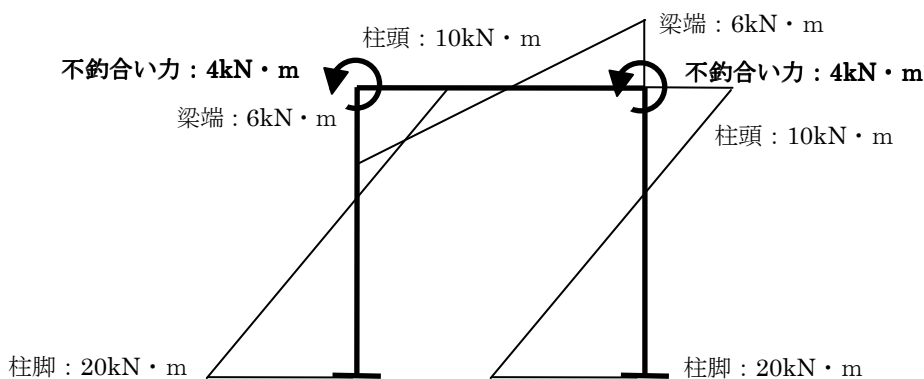


図4 不釣り合い力処理前のモーメント図

不釣り合い力を消去するために、図5に示すように節点に不釣り合い力と逆向きに力を加えます。はり降伏して剛性が0になっているので、応力解析結果は図のようになります。

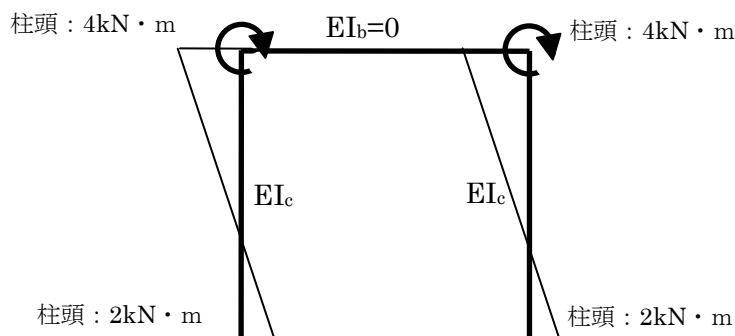


図5 不釣り合い力処理 1

図5の不釣合い力の処理をした結果の応力と図4の応力を足し合わせると、図6に示すようになります。節点のモーメントは釣り合っています。

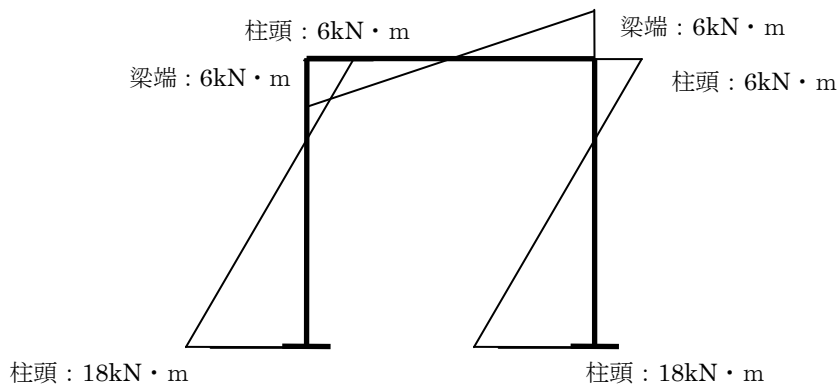


図6 不釣合い力処理後のモーメント図 1

しかし、こんどは図7に示すように柱のせん断力の和(16kN)が水平荷重(20kN)と釣り合っていない。

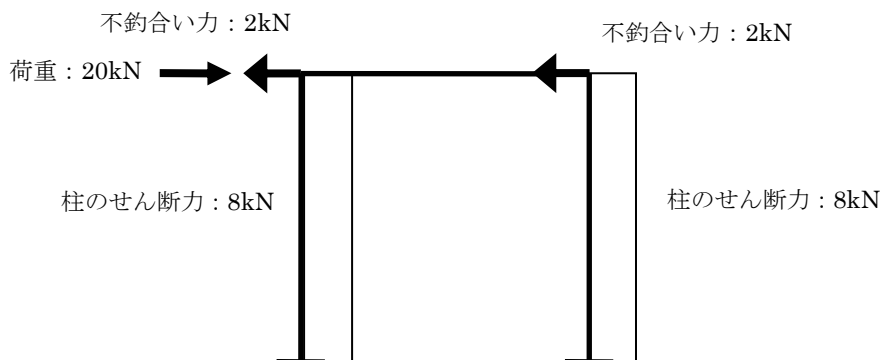


図7 不釣合い力

従って、前回と同様に不釣合い力と逆向きに力を加えます。はりには既に降伏して剛性が0になっているので、応力解析結果は図8の様になります。

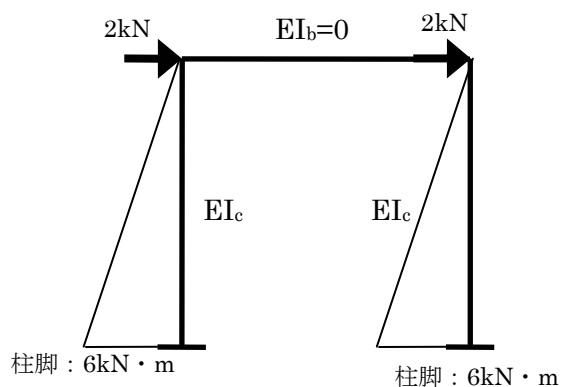


図8 不釣合い力処理2

図8の不釣合い力の処理をした結果の応力と図6の応力を足し合わせると、図9に示すようになります。節点のモーメントは釣り合っています。柱のせん断力も 10kN になり、水平荷重と釣り合っています。

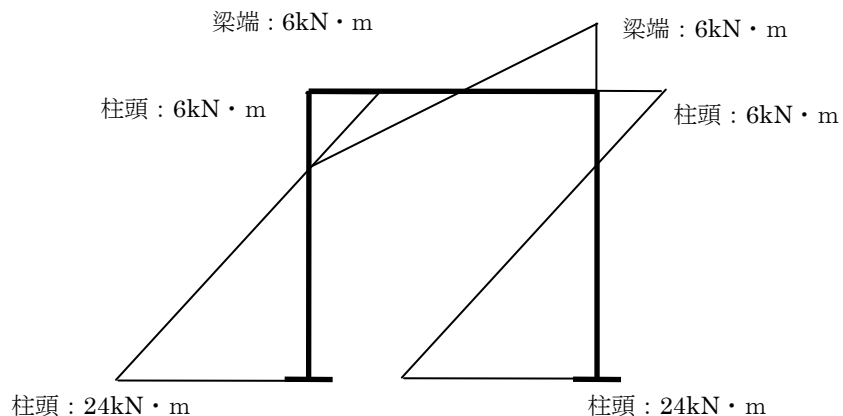


図9 不釣合い力処理後のモーメント図2

以上が、弾塑性解析の不釣合い力処理方法です。不釣合い力処理前のモーメント図(図4)と処理後のモーメント図(図9)のモーメント図大きく異なることから、不釣合い力を処理することの重要性がわかります。

また、一方で、不釣合い力は常に処理できるものではないことを理解してください。以下、上記の弾塑性解析において、柱の降伏モーメントが 21kN・mであった場合を考えます。

図9の応力解析結果の後、図3と同様に柱の復元力特性と照らし合わせた結果、柱は降伏耐力(21kN・m)を超えているので、柱脚の曲げモーメントは 24kN・m から 21kN・m に修正されます。

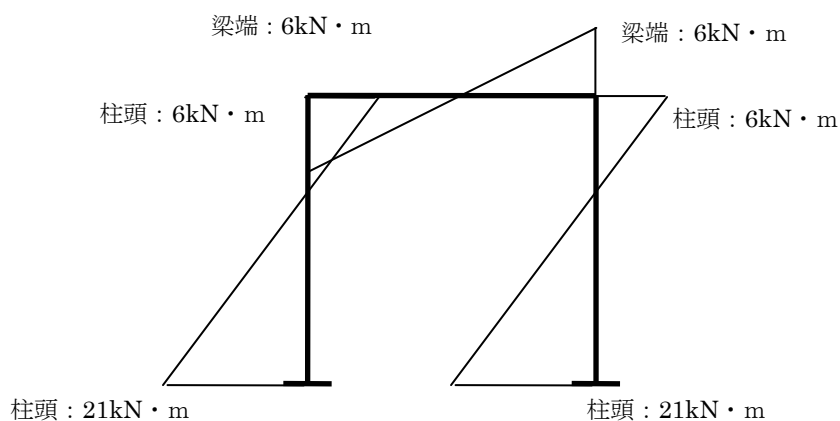


図10

その結果、柱のせん断力は、9kN になってしまい、水平荷重と釣り合わなくなります。

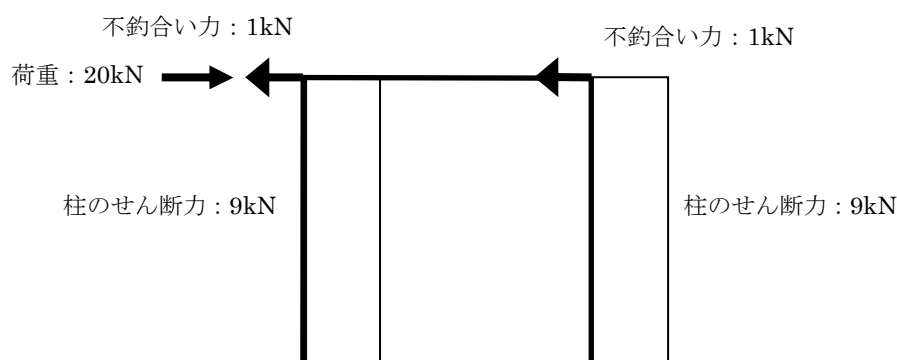


図11

不釣り合い力の処理をする必要がありますが、図12に示すように、柱脚とはり端が塑性化してしまったので(剛性=0) 不安定構造物になり応力解析ができません。このような場合SNAPでは「不釣り合い力が大きすぎます」のエラーメッセージが表示され解析が中止されます。

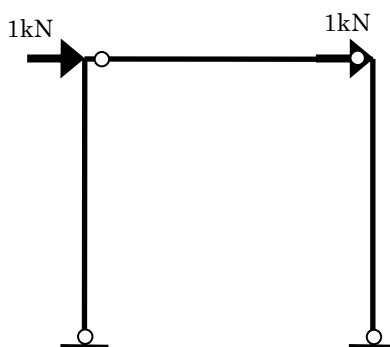


図12

以上を踏まえて、不釣り合い力が処理できないケースを回避するためには、次の点があげられます。

- ① 荷重(変位)増分を小さくする。  
荷重増分が大きいと不釣り合い力も大きくなります。
- ② 急激な剛性変化が生じないようにする。  
剛性変化が大きくなる箇所として以下があげられます。
  - ・ 降伏時 (塑性化後もできる限り剛性が存在するようにする)
  - ・ 除荷時 (除荷剛性は初期剛性であることが多いため)
  - ・ コンクリートの材料特性 (引張剛性が0であるため)
  - ・ スリップモデル (スリップ時の剛性が0であるため)

など