

## 第2章 解析理論

### 2.1. 個別要素法

建築物の時刻歴応答解析にはマトリックス法に代表される有限要素法（Finite Element Method：以下FEM）を用いた数値計算が広く用いられている。FEMは連続体の応力解析を目的として開発されたツールであるため、破壊までを解析的に追跡するためには、幾何学非線形、材料非線形を考慮する必要があり、汎用のソフトを用いる場合でも、研究用に自作したプログラムの場合でも、相当の計算テクニックを要する。特に部材の破断（木材の折損）、亀裂の進展といった極端な破壊が進行する場合には、計算の中で不釣り合い力をどう処理するかという問題が生じる。これらの問題を解決し、倒壊までを追跡できる解析手法として、本研究では個別要素法<sup>1,2)</sup>（Distinct Element Method）を基本理論として採用した。個別要素法は、元来、図2.1.1に示したような土壌や岩盤の崩壊を計算する為に開発された「非連続体解析法」（バラバラな物体の挙動を計算する手法）であるので、大変形・倒壊解析を自然に行うことが可能である。個別要素法は数値解析手法の中では動的陽解法のカテゴリーに入る。個別要素法では、元々は図2.1.2に示したように、物体と物体が接触した際にその反発力と摩擦力を計算するのみであった。形状が複雑な場合や、物体の数が多き場合は計算時間の大半は接触判定と、接触後の挙動の計算に費やされる。

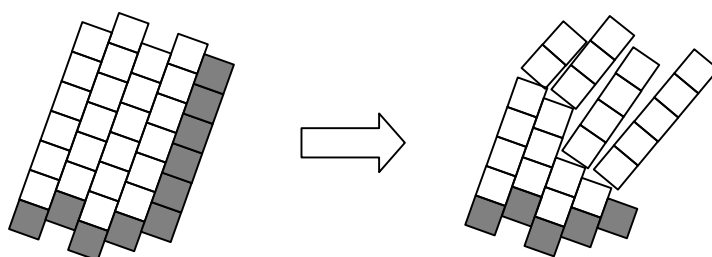


図 2.1.1 岩盤の崩壊シミュレーション

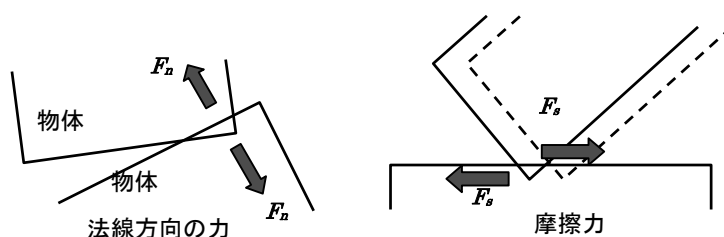


図 2.1.2 個別要素法で計算する力

建築分野で個別要素法を用いた研究例は少なく、現状では木造建築を対象とした市販の解析ツールは無い状況である。本研究では個別要素法を木造軸組構法建築物に適用するために、梁要素やせん断バネなどの建築の構造解析では一般的に用いられている構造要素を、個別要素法の解法の中に組み込む作業を行った。反面、元々の個別要素法で行われている接触判定は本解析手法では行わず、部材のめり込み等の接触に伴う現象は全て連結されたバネによって表現することとした。接触判定を行わないため、計算時間は大幅に短縮されることとなる。

## 2.2. 数値解析手法

下記に個別要素法の数値解析法を示す。モデルはマトリックス法と同様、節点とバネを組み合わせていくことで構築する。あるバネ  $i$  において両端の節点 1、2 間の時刻  $t-1$  における全体座標系での変位ベクトル、応力ベクトルを

$$\begin{aligned}
 [Di]_{t-1} &= [ \{Di_1\}, \{Di_2\} ]_{t-1} \\
 &= [ X_1, Y_1, Z_1, \theta_1, \theta_{y1}, \theta_{z1}, X_2, Y_2, Z_2, \theta_{x2}, \theta_{y2}, \theta_{z2} ]_{t-1} \\
 [Fi]_{t-1} &= [ \{Fi_1\}, \{Fi_2\} ]_{t-1} \\
 &= [ Px_1, Py_1, Pz_1, Mx_1, My_1, Mz_1, Px_2, Py_2, Pz_2, Mx_2, My_2, Mz_2 ]_{t-1}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

バネ  $i$  の変位ベクトル  $[Di]_{t-1}$ 、応力ベクトル  $[Fi]_{t-1}$  の時刻  $t-1$  における部材座標系での変位ベクトル、応力ベクトルを

$$\begin{aligned}
 [di]_{t-1} &= [ \{di_1\}, \{di_2\} ]_{t-1} \\
 &= [ x_1, y_1, z_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}, x_2, y_2, z_2, \theta_{x2}, \theta_{y2}, \theta_{z2} ]_{t-1} \\
 [\hat{f}i]_{t-1} &= [ \{\hat{f}i_1\}, \{\hat{f}i_2\} ]_{t-1} \\
 &= [ px_1, py_1, pz_1, mx_1, my_1, mz_1, px_2, py_2, pz_2, mx_2, my_2, mz_2 ]_{t-1}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

各ベクトルの時刻  $t-1 \sim t$  の  $\Delta t$  間の増分を

$$\begin{aligned}
 [\Delta di]_t &= [ \{\Delta di_1\}, \{\Delta di_2\} ]_t \\
 &= [ \Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1, \Delta \theta_{x1}, \Delta \theta_{y1}, \Delta \theta_{z1}, \Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2, \Delta \theta_{x2}, \Delta \theta_{y2}, \Delta \theta_{z2} ]_t \\
 [\Delta \hat{f}i]_t &= [ \{\Delta \hat{f}i_1\}, \{\Delta \hat{f}i_2\} ]_t \\
 &= [ \Delta px_1, \Delta py_1, \Delta pz_1, \Delta mx_1, \Delta my_1, \Delta mz_1, \Delta px_2, \Delta py_2, \Delta pz_2, \Delta mx_2, \Delta my_2, \Delta mz_2 ]_t
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

とする。

時刻  $t-1$  において外力の作用によりバネ  $i$  の両端の節点 1、2 に  $[\Delta di]_t$  の変位増分があったとすると、要素剛性マトリックス  $[Ki]_t$ 、減衰マトリックス  $[Ci]_t$  のバネ  $i$  では下記式によって  $[\hat{f}i]_t$  を算出する。

$$\begin{aligned}
 [\Delta \hat{f}i]_t &= [Ki]_t [\Delta di]_{t-1} \\
 [\hat{f}i]_t &= [\hat{f}i]_{t-1} + [\Delta \hat{f}i]_t + [Ci]_t [\Delta di]_{t-1}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

全体座標系 → 部材座標系の座標変換マトリックスを  $[Ti]_t$  とすると

$$[Fi]_t = [Ti]_t^{-1} [\hat{f}i]_t \tag{2.5}$$

上記式を各バネにおいて計算し、各節点における応力ベクトル  $[\hat{f}i]_{t1}$ 、 $[\hat{f}i]_{t2}$  を算出する。この応力ベクトルを、ある節点 A に接続されるすべてバネにおいて加算することで、節点 A に作用する応力ベクトル  $[F_A]_t$  を算出する。

$$[F_A]_t = \{ P_{x_A}, P_{y_A}, P_{z_A}, M_{x_A}, M_{y_A}, M_{z_A} \}_t = -\Sigma\{F_{i_A}\}_t \quad (2.6)$$

この式によって算出された応力ベクトルを Newmark のβ法（平均加速度法 β=1/4）によって数値積分を行い、時刻  $t$  における加速度  $[a_A]_t$ 、速度  $[v_A]_t$ 、変位増分  $[\Delta D_A]_t$  を算出する。

$$\begin{aligned} [a_A]_t &= \{ ax_A, ay_A, az_A, \theta ax_A, \theta ay_A, \theta az_A \}_t \\ &= \{ P_{x_A}/m_A, P_{y_A}/m_A, P_{z_A}/m_A, M_{x_A}/I_{x_A}, M_{y_A}/I_{y_A}, M_{z_A}/I_{z_A} \}_t \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$[v_A]_t = [v_A]_{t-1} + ([a_A]_{t-1} + [a_A]_t) \Delta t / 2$$

$$[\Delta D_A]_t = [\Delta D_A]_{t-1} + ([v_A]_{t-1} + [v_A]_t) \Delta t / 2$$

ここで、 $m_A$  は要素 A の質量、 $I_{x_A}$ 、 $I_{y_A}$ 、 $I_{z_A}$  は要素 A の慣性モーメント

以上の計算を各要素、各時刻についておこなうことで、外力に対するモデル全体の応答を算出していく。全体剛性マトリックスを解かずに各要素で個別に応力を算出する点が個別要素法の特徴である。時刻が進むことによる要素間の応力の伝播によって釣り合いを保つため、不釣り合い力の処理や、崩壊後の挙動などは特別な処理をすることなく解析をすることができる。

## 2.3. 解析モデルの構築

以下、本研究で用いた各構成部材のモデル化手法について詳細を解説する。

### 2.3.1. 軸組のモデル化

軸組は折損を考慮するために図 2.3.1 に示したような弾塑性回転バネ（塑性ヒンジ）＋弾性梁要素でモデル化を行った。履歴特性は図 2.3.2 に示した履歴則<sup>3)</sup>を用いた。部材の曲げ強度を文献などにより設定し、断面係数に従い最大曲げモーメントを決定した。

骨格曲線の曲げモーメントがゼロの回転角に達すると、部材が折損したとみなし、部材間の回転バネをピン接合に変更する。このように設定することで、通し柱の折損や、垂れ壁がついた柱の横架材接合部での折損現象を解析で表現することが可能となった。

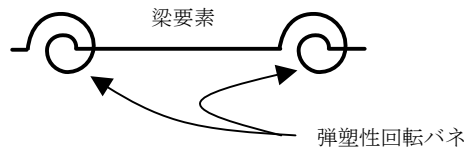


図 2.3.1 軸組の概念図

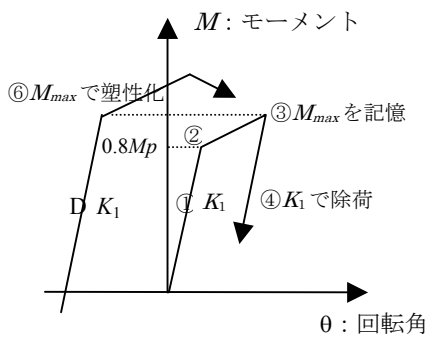


図 2.3.2 復元力特性

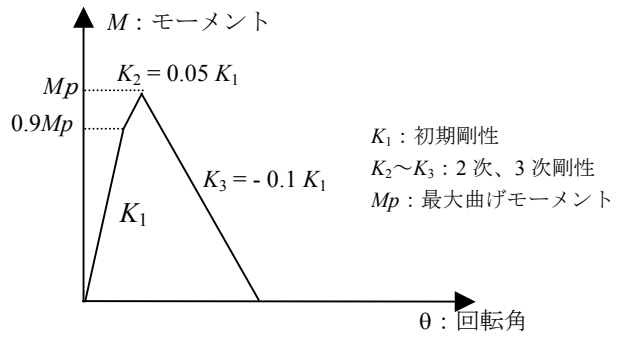


図 2.3.3 骨格曲線

### 2.3.2 接合部のモデル化

軸組間の接合部は図 2.3.4(a) に示したような回転バネ＋弾塑性バネ（せん断に対しては剛）を用いてモデル化を行った。圧縮引張の弾塑性バネの履歴特性は図 2.3.4(b) に示したような片側弾性＋片側スリップ型で、骨格曲線は実験データを元にして設定した。回転バネの履歴特性は図 2.6(c) に示したようなスリップ型を用い、文献から骨格曲線を決定した。回転バネは強軸、弱軸の各方向に独立に作用するように設定した。

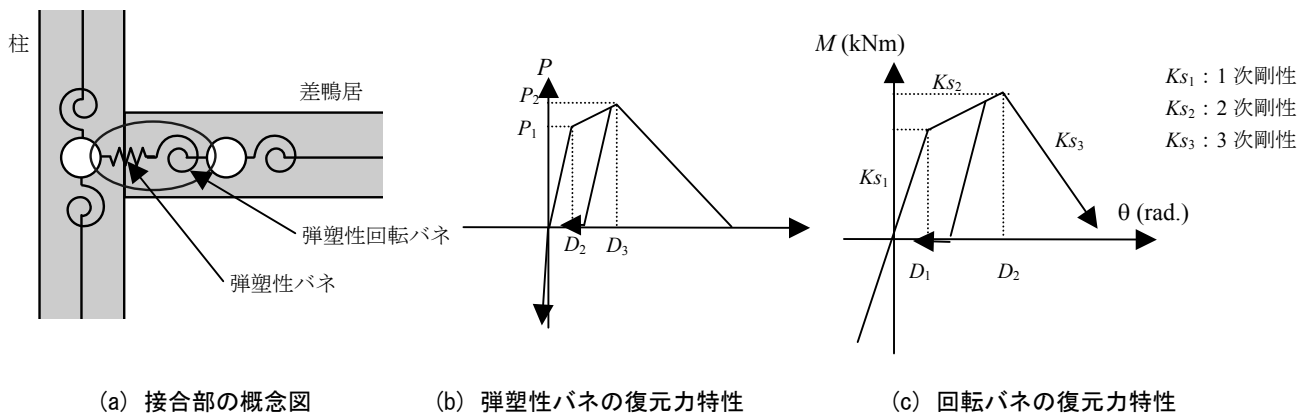


図 2.3.4 接合部のモデル化概要

### 2.3.3 鉛直構面、水平構面のモデル化

鉛直構面は図 2.3.5 に示した通り、トラスバネでブレース置換することでせん断力のモデル化を行った。履歴特性は図 2.3.6 に示したバイリニア+スリップ型履歴則を用いた。水平構面も同様にトラス要素でブレース置換することでモデル化し、履歴特性も同様にバイリニア+スリップ型履歴則を用いた。骨格曲線は文献の文献や実験結果を参考に設定した。第 3 章の解析例では解析に用いた骨格曲線を各解析モデルにおいて示した。

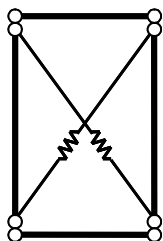


図 2.3.5 トラスバネによるブレース置換

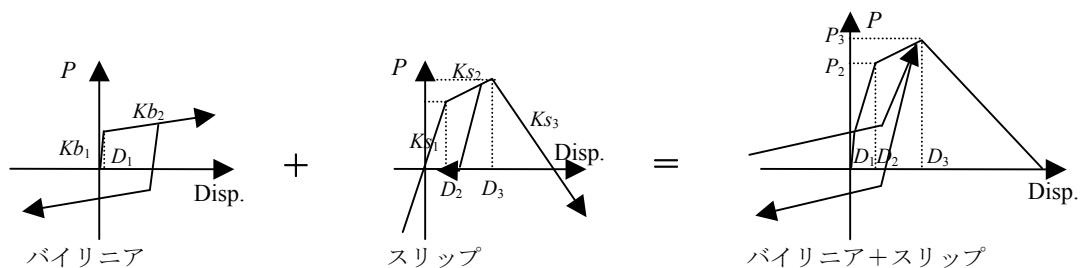


図 2.3.6 鉛直構面の履歴特性

### 2.3.4 筋かいのモデル化

筋かい構面は図 2.3.7 に示したように 1 本の筋かいに対して圧縮と引張の 2 本のトラス要素を配置することでモデル化を行った。圧縮筋かいのバネは引張り方向の力には作用せず、引張筋かいのバネは圧縮方向のバネには作用しない。この特性により、筋かい耐力壁の非対称な水平復元力を表現した。また、圧縮筋かいはフレームとの接合点を横架材に設定することで、圧縮筋かいによる梁・桁の突き上げ挙動をモデル化した。履歴特性は構面のバネと同様にバイリニア+スリップ型の履歴則で表現した。

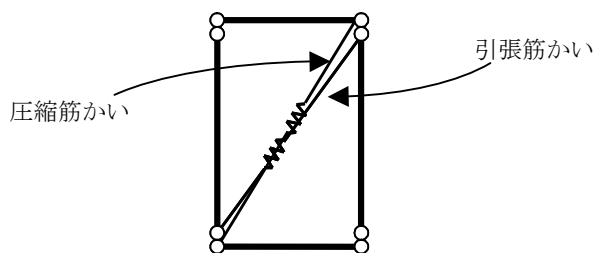


図 2.3.7 筋かいのモデル化

### 2.3.4 その他

数値積分は平均積分法とし、粘性減衰は瞬間剛性比例型の 2%で、下り勾配では 0%になるものと設定した。個別要素法では粘性減衰を、全体剛性マトリックスではなく、要素剛性マトリックスで与える。