

軸ばねを用いた脆性構造物の破壊シミュレーション

建築都市デザイン学科 2280080053-0 中野 貴之
(指導教員 張 景耀)

1. はじめに

日本では西洋の文化を取り入れるとともに、耐火建築としてレンガが使用されてきた。明治中頃から大正期にかけては多くのレンガ建築物が建てられてきたが、関東大震災では大きな被害を受け、その後、鉄筋コンクリートの普及に伴い、レンガ造は衰退していった。

レンガ造はレンガをモルタルでつないでいるだけなので、大きな外力が加わったとき、構成材料に亀裂が入ったり、せん断したり、粉碎したりとバラバラになりやすい。つまり、不連続体になりやすいので、連続体解析のみでは破壊過程を十分に再現できない。

多くのレンガ構造物は造られた年代が古く、現在の耐震基準に対応できていないものがある。地震のような大きな外力が加わった場合でも破壊しないように補強するために、不連続体を扱える個別要素法を用いて、レンガ構造のような脆性構造物の破壊パターンを解明しなければならない。そこで、本研究では軸ばねを用いて脆性構造物の破壊シミュレーション手法を構築することを目的とする。

2. 概要

本研究では脆性構造物であるレンガ構造物の梁を対象とし、個別要素法を用いて、図1のように梁をモデル化し、図2のように法線方向の要素間に弾性を表すバネと粘性減衰を表すダッシュポットを仮定し、要素間に働く力を算出する。ここでバネに働く力が限度を超えたときにバネが破壊するものとする。そして、Dynamic Relaxation Method を利用してプログラムを作成し、解析を行う。

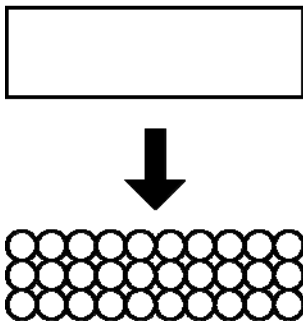


図1 梁のモデル化

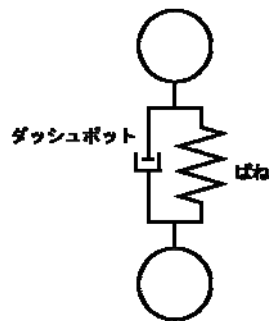


図2

2. 1 個別要素法

個別要素法 (Distinct Element Method) とは、1971 年に Peter A. Cundall によって提唱された理論である。これは解析の対象を二次元の場合は円形、三次元の場合は球形などの要素の集合体としてモデル化し、不連続体で区切られた要素の集合体において、個々の要素ごとに独立したバネを設定し、2 階常微分の運動方程式で表すことによって力の相互作用を示す。そして、この運動方程式を差分近似して、初期条件をもとに、その次の時点での状態を求め、それをもとに、さらにその次の時点の状態を求めるといふように解を求めて要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析する手法である。

2. 2 Dynamic Relaxation Method

Dynamic Relaxation Method は、まず構造物全体の変形速度から運動エネルギーを算出し、時間刻みごとに繰り返し計算し、その変化を追って解析を行っていく。次に、運動エネルギーが最大となったとき、各要素の速度を 0 にするなど強制的に過大な減衰を与えると、運動エネルギーは 0 になり、そこから再び変形が始まる。そして、この操作を繰り返すと、運動エネルギーは限りなく 0 に収束していき、やがて変形が収まる。このときの形状を安定とする手法である。

3. 解析例

3. 1 初期条件設定

各要素 (節点) の質量 $M=1.0$ [kg]、初速度 $v_0=0$ [m/s]、ばねの軸剛性 $k=1.00$ [N/m]、ダッシュポットの減衰定数 $C_e=4$ [N·s/m]、破断条件を要素間の内力 $f > 4.5$ [N] と設定し、同じ梁モデルで境界条件と荷重条件を変えて破壊シミュレーションを行った。

図3～5、図7～9は梁の形状 (節点の位置) と部材 (要素間のばね分布) を表した図である。●を固定節点、○を自由節点として、また、部材は直線、破断した部材は破線で示している。

図6、図10は縦軸に各節点における平均運動エネルギーの値の対数を、横軸に step 数 (時間刻み)をとった図である。

3. 2 解析例 1

図 3 に示すように節点を 3 つ固定し、下方向に鉛直荷重 $F=4$ [N] を与えた。

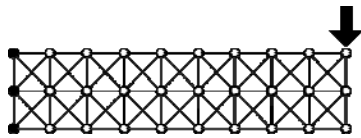


図 3 初期形状と荷重分布図

図 4 は step 数が 6000 のときの梁の形状である。この時点で 4 つの部材が破断している。

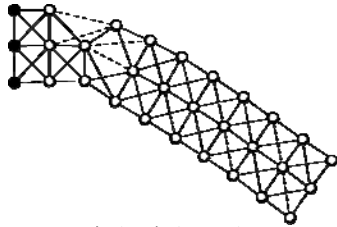


図 4 解析途中の形状

図 5 は解析が終わり、梁の変形が収束したときの形状である。このとき step 数は 11713 であった。さらに部材が破壊され、全部で 6 つの部材が破断している。

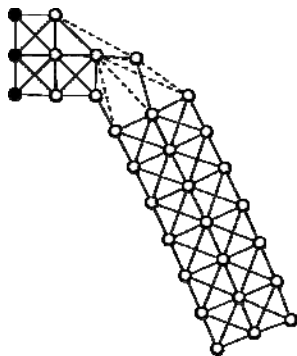


図 5 解析後の形状

図 6 は各節点の平均運動エネルギーと step 数を表した図である。Dynamic Relaxation Method によって徐々にではあるが、運動エネルギーがゼロに収束している。

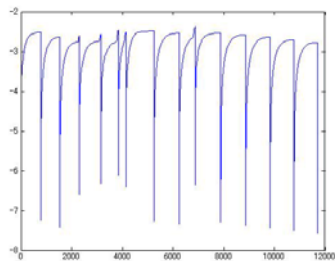


図 6 各節点の平均運動エネルギーと step 数の関係図

3. 3 解析例 2

図 7 に示すように 2 つの節点を固定し、鉛直荷重 $F=15$ [N] を与えた。

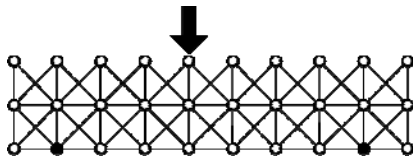


図 7 初期形状と荷重分布図

図 8 は step 数が 900 のときの形状である。この時点で 1 つの部材が破断している。

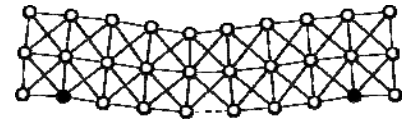


図 8 解析途中の形状

図 9 のような形状に収束したのは step 数が 1663 のときである。部材は全部で 2 つしか破断されず、少ない step 数で解析を終えた。

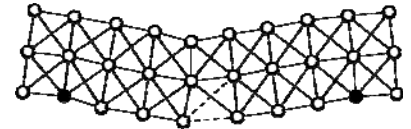


図 9 解析後の形状

また、図 6 と図 9 を比べると、少ない step 数で運動エネルギーがゼロに収束している。

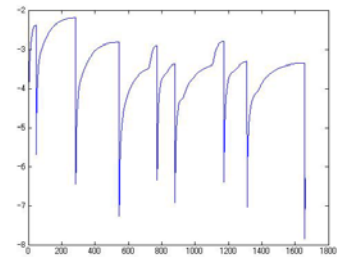


図 6 各節点の平均運動エネルギーと step 数の関係図

4. まとめ

本研究では脆性構造物の梁を想定して、境界条件や荷重条件を変えながら破壊シミュレーションを行った。これにより、破断する箇所や破断後の形状を得ることができた。

今後の課題としては、以下のものがあげられる。

- ・複数の箇所に荷重をかけるなど、複雑な荷重条件での解析。
- ・解析対象モデルを三次元にする。
- ・材料特性を軸・せん断ばねに置き換える。
- ・破壊シミュレーションが正確かどうか、妥当性を検証するために、作成したプログラムで崩壊例を解析し、その結果と崩壊結果を比較する。

参考文献

- 1) 伯野元彦：破壊のシミュレーション 森北出版株式会社 1997
- 2) 福森栄次：よくわかる有限要素法 オーム社 2005
- 3) Li Zhang, Bernard Maurin and René Motro : Form-Finding of Nonregular Tensegrity Systems (JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING) 2006 pp.1435-1440