

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760362

研究課題名(和文)組積造の地震時破壊挙動の数値解析手法の開発と耐震補強法の提案

研究課題名(英文)Development of numerical analysis method of seismic failure behavior and reinforcement for the masonry structures

研究代表者

古川 愛子(Furukawa, Aiko)

京都大学・地球環境学堂・准教授

研究者番号：00380585

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：有限要素法の空間離散化の考え方を、個別要素法の要素間接触の接触面の離散化に適用することによって、ばね定数と減衰定数を理論的に決定する方法を開発した。減衰モデルとして、要素重心に作用する減衰と、要素間に作用する減衰に分け、前者には質量比例減衰とLocal dampingの2つ、後者には臨界減衰と、瞬間剛性比例減衰の2つを考えた。要素変形を考慮に入れた個別要素法のプログラムも作成した。自重のポアソン効果によって、水平方向に連続する要素間に圧縮力が発生し、これがプレストレスとして作用することにより、若干ではあるが、要素変形を考慮しない場合に比べて破壊が遅れることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The method to determine spring and damping parameters theoretically based on the idea of spatial discretization of FEM was developed. Regarding the damping model, damping acting on the gravity center of the element and that acting between the elements are considered. For the damping acting on the gravity center of the element, mass-proportional damping and local damping is modeled. For the damping acting between elements is modeled by the critical damping and the temporal stiffness-proportional damping. The DEM considering the element deformability is also developed. Due to the poisson's effect by the gravity, the horizontal compression force is generated between horizontally-adjacent elements. It is found that this compression force delays the failure of the structure.

研究分野：地震工学

キーワード：個別要素法 組積造

1. 研究開始当初の背景

開発途上国で多く建設されている耐震性の低い組積造の倒壊によって多くの人が亡くなっている。耐震補強法の確立のためには、実験と数値解析の両面からの検討が重要であると考えられるが、組積造の耐震補強法に関しては、数値解析による検討は未だ手つかずのままである。なぜなら、現状では、組積造に適した数値解析手法、即ち、弾性挙動から破壊後の崩壊挙動までを追える数値解析手法が確立されていないためである。

2. 研究の目的

個別要素法は、連続体としての弾性挙動から、破壊の発生、そして破壊後の挙動までを取り込むことが出来、組積造に適した数値解析手法となる可能性を有している。しかし、個別要素法は、解析定数を理論的に決定できないことや、要素自身の変形を考慮できないなどの問題があり、未成熟である。そこで、解析定数の決定と要素変形を考慮に入れた個別要素法を開発することを目的とする。また、開発した手法を用いて組積造の解析を行い、補強効果を検討することも目的とする。

3. 研究の方法

有限要素法の空間離散化の考え方を、個別要素法の要素間接触の接触面の離散化に適用することによって、物理的にはばね定数を決定する。ばね定数を、3次元の応力ひずみ関係からガウスの発散定理を用いて導出する。ばねに並列に、ダッシュポットも付与する。このダッシュポットは、要素間の減衰を表す減衰モデルである。これに加えて要素重心に作用する減衰モデルも考えた。

要素の変形を考慮するためには、要素を内側と外側の2つの領域に分け、内側の領域の剛性を有限要素法の剛性マトリックスを用いて表現した。外側は、要素間の接触を判定するためのものとし、個別要素法に基づくばねを設置することとした。これにより、要素自身の変形は内側の領域で、要素間の接触は外側の領域で表現することが可能となった。

4. 研究成果

図1に示すように、有限要素法の空間離散化の考え方を、個別要素法の要素間接触の接触面の離散化に適用し、要素の面を分割した。分割された小さい面をセグメントと呼ぶこととし、セグメント毎にばねとダッシュポットを設置することとした。セグメント毎のばねとダッシュポットの定数は、セグメントの面積を考慮に入れることによって、物理的に

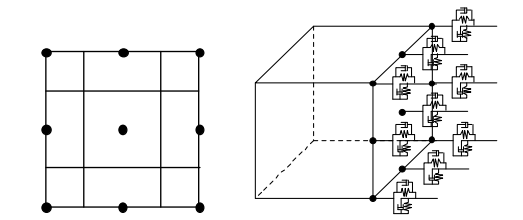
決定できるようになった。

開発したプログラムを用いて壁モデルの数値解析を実施し、また同じモデルを有限要素法でもモデル化し、両者の解析結果を比較した。その結果、個別要素法の結果は、有限要素法の結果と良好な一致を示した。

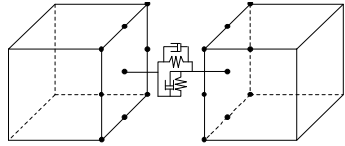
減衰モデルとして、要素重心に作用する減衰と、要素間に作用する減衰に分け、要素重心に作用する減衰には、質量比例減衰とLocal dampingの2つのモデルを考えてプログラムを作成した。質量比例減衰は、要素重心の速度に比例した減衰力が要素重心に作用するモデル、Local dampingは、要素重心に作用する力に比例する減衰力が要素重心に作用するモデルである。要素間に作用する減衰としては、臨界減衰と、瞬間剛性比例減衰の2つを考えた。解析結果を比較し、それぞれのモデルの特徴と、解析結果を解釈する際の留意点を整理した。例として、図2に示す無筋コンクリート橋脚の地震応答解析結果を図3に示す。

図3左は、質量比例減衰、図3右はLocal dampingを採用したときの解析結果であり、赤色は引張破壊が発生した領域を示す。自重を考慮した場合、上下方向に連続する要素間には自重による圧縮力が働き、local dampingではこれに比例した減衰力が作用するため、最初の破壊は発生しにくい結果となった。しかし、一度破壊が発生して要素間の接触力が減少すると減衰力も減少し、破壊が進展し易い結果となった。質量比例型減衰とlocal dampingでは異なる挙動を示すことから、解析の際はこれらの特徴を理解した上で選択する必要があることがわかった。実際の挙動がどちらの減衰モデルに近いのかは、今後の課題である。

要素変形を考慮に入れた個別要素法のプログラムも作成した。そして、要素に鉛直荷重を載荷した結果、水平方向にポアソン効果による水平変位を確認した。次に、要素変形を考慮に入れない場合と解析結果を比較した。解析モデルの例を図4に示す。図4(a)は、水平方向だけでなく上下方向にも目地が通った芋目地モデルである。図4(b)は目地は水平方向のみ通った馬目地モデルである。この解析モデルに、図5に示す2003年イランバム地震の際の観測記録を入力した。解析結果を図6と図7に示す。図6は芋目地、図7は馬目地の解析結果であり、赤色は要素変形を考慮しない剛体要素を用いた従来の個別要素法、青色は要素変形を考慮に入れた新しい個別要素法の解析結果である。ポアソン効果によって、水平方向に連続する要素間に圧縮力が発生することを確認した。この圧縮力がプレストレスとして作用することにより、若干ではあるが、要素変形を考慮しない場合に比べて破壊が遅れることを確認した。特に、上下方向に目地の通っていない馬目地においてはその差が大きくなった。



(a)要素面の離散化(b)ばねとダッシュポット



(c)ばね・ダッシュポット

図1 個別要素法の概要

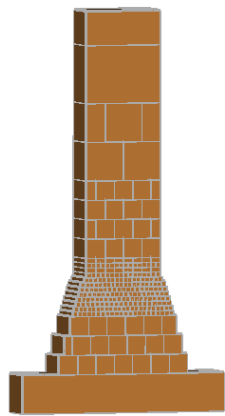
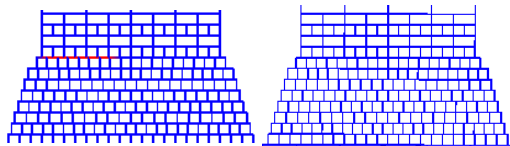
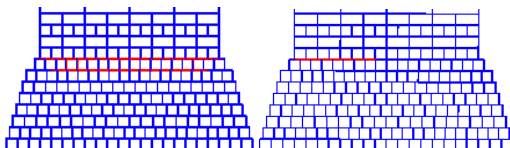


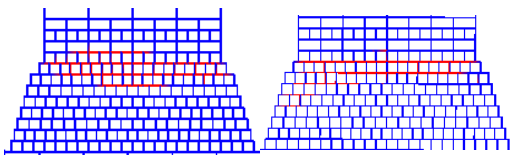
図2 解析モデル



0.6秒



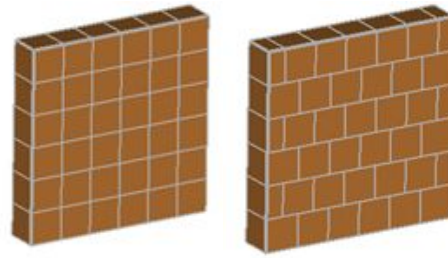
2秒



3秒

(a) 質量比例型減衰 (b) local damping

図3 要素重心に作用する減衰のモデル化の違いによる解析結果の比較



(a)芋目地 (b)馬目地

図4 解析モデル

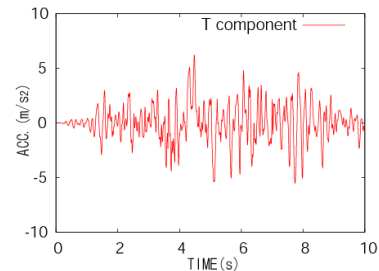
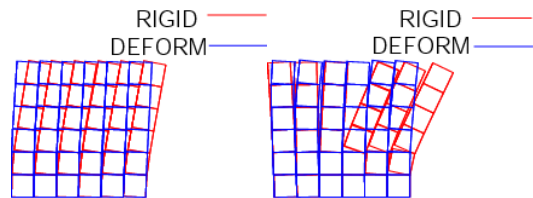
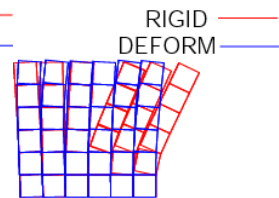


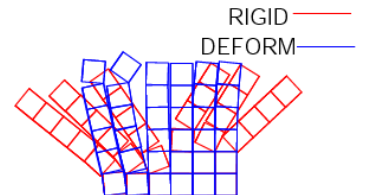
図5 入力地震動



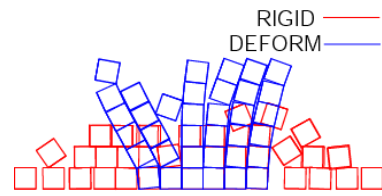
(a) 4.0s



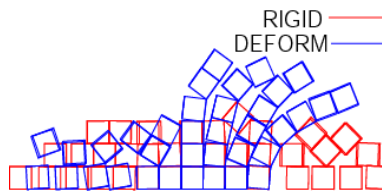
(b) 4.5s



(c) 5.0s



(d) 5.5s



(e) 6.0s

図6 変形状(芋目地)

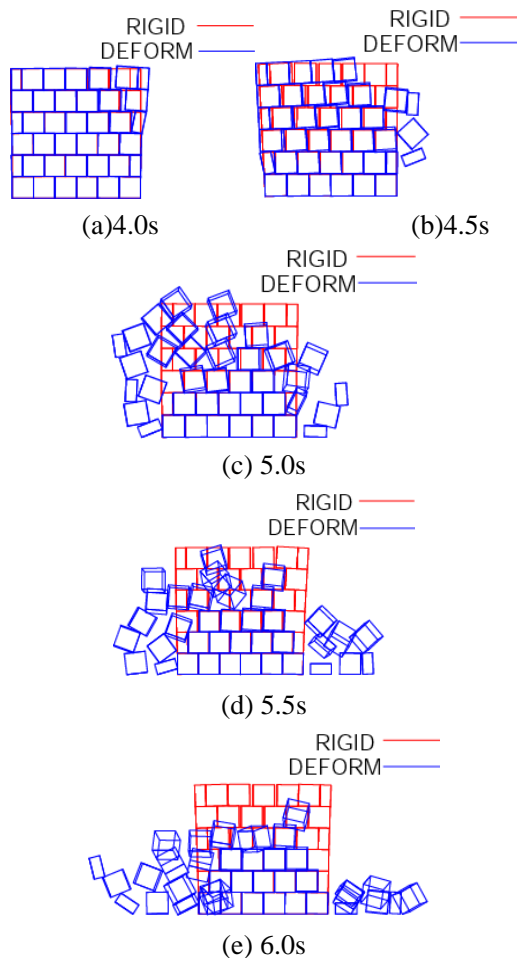


図7 変形形状(馬目地)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Aiko Furukawa, Risa Horikawa, Junji Kiyono, Kenzo Toki, Seismic Behavior Analysis of Masonry Structures Using the Distinct Element Method Considering Element Deformability, Journal of Natural Disaster Science, 査読有, Vol.35, Nov.2, pp.43-53, 2014.

古川愛子, 木村翔太, 清野純史, 個別要素法における減衰のモデル化が無筋コンクリート構造物の破壊挙動解析結果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, No.2, pp.739-744, 2014年.

古川愛子, 木村翔太, 清野純史, 個別要素法を用いた構造物の動的解析における減衰のモデル化に関する基礎的検討, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 査読有, Vol.70, No.4, (地震工学論文集第33巻), I_89-I_100, 2014年.

古川愛子, 清野純史, 谷口仁士, 鈴木祥之, 土岐憲三, 辰巳雅俊, H.R.Parajuli, ネパール・カトマンズにおける歴史的組積造建造物群の構造分類と地震リスク評価, 歴史都市防災論文集, 査読有, Vol.7 .pp.145-152, 2013年.

〔学会発表〕(計 2 件)

木村翔太, 古川愛子, 清野純史, 減衰のモデル化が個別要素法を用いた構造物の破壊挙動解析結果に及ぼす影響, 第68回土木学会年次学術講演会, 2013年9月4日.

木村翔太, 古川愛子, 清野純史, 個別要素法を用いた構造物の破壊挙動解析における減衰のモデル化に関する研究, 平成25年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2013年6月8日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川愛子 (Aiko FURUKAWA)

京都大学・地球環境学堂・准教授

研究者番号: 00380585

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし