

## 変形性能を持つ要素を用いた個別要素法による組積造の地震時挙動解析

京都大学大学院 学生員 ○堀川 理佐 京都大学大学院 正会員 古川 愛子  
 京都大学大学院 正会員 清野 純史 立命館大学 正会員 土岐 憲三

## 1. 研究の背景と目的

2003年12月26日にイラン南東部で発生したバム地震(M6.3)では約43,200人の方々が犠牲となった。組積造は発展途上国に多く、安価であるため現在も多数存在している。しかし、組積造は耐震性が低いため、地震が発生すると多くの方々が犠牲になってしまう。人的被害を軽減するためにも、有効な補強方法を開発する必要がある。そこで、3次元の地震時挙動を精度よく表現できる数値解析手法の開発が望まれる。

組積造のように地震時に破壊を生じやすい構造物の地震時解析手法の例として個別要素法(DEM)が挙げられる。しかし、従来のDEMでは要素自身の変形を考慮できないという問題点が存在する。発展途上国で用いられるレンガは剛性が小さいため変形が生じやすい。そこで本研究では、要素を2つの領域に分けて考え、FEMとDEMの両方からアプローチすることで、要素に変形性能を持たせた新たなDEMを開発する。

## 2. 変形性能を持つ要素を用いた個別要素法の概要

新しい要素モデルを提案する(図1)。要素の内側を要素自身の変形を表現する領域(変形領域)とし、外側を要素間の接触を表現する領域(接触領域)とする。変形領域は弾性体のFEM要素でモデル化する。接触領域は厚さを一定に保ったまま変形領域に沿って移動すると考える。即ち要素の頂点の座標は変形領域のFEM要素の節点座標によって決定されるので、解析では各節点の挙動を追跡する。要素間の接触にはDEMの概念を適用し、モルタルが破壊する前の弾性時には要素間に復元ばねを、モルタル破壊後に要素間が接触・再接触した際は、要素間に接触ばね・ダッシュポットを与えた。

提案手法では、構造物全体の变形は要素自身の变形と要素同士の重なり合いで表現される。よって、弾性体(変形領域)の变形による反力と要素間(接触領域同士)の復元力・接触力、重力と地震の慣性力の合力が各節点に働くと考える。各節点の運動方程式をそれぞれ解くことで各節点の座標を求める。新しい座標において再び各節点に働く力を算出して、次のステップにおける要素座標を求める。このように時々刻々と各節点の挙動を追跡していくことで、構造物全体の挙動を追う。

## 3. 提案手法における解析パラメータ

要素A、要素Bにおいて、要素間(接触領域)をつなぐばねの接触面積あたりのばね定数はRefined DEM<sup>1)</sup>と同様に考えると、次式で表すことができる。

$$\bar{k}_n = \frac{1}{\frac{r_A - r_M/2}{E_A/(1-\nu_A^2)} + \frac{r_M}{E_M/(1-\nu_M^2)} + \frac{r_B - r_M/2}{E_B/(1-\nu_B^2)}} \quad [1]$$

$$\bar{k}_s = \frac{1}{\frac{r_A - r_M/2}{E_A/2(1+\nu_A)} + \frac{r_M}{E_M/2(1+\nu_M)} + \frac{r_B - r_M/2}{E_B/2(1+\nu_B)}} \quad [2]$$

ここで、 $r_A, r_B$ は要素A、要素Bにおける接触領域の厚さ、 $r_M$ はモルタルの厚さを表す。 $E_A, E_B, E_M$ は要素A、要素B、モルタルのヤング率を表し、 $\nu_A, \nu_B, \nu_M$ は要素A、要素B、モルタルのポアソン比を表す。

減衰定数もRefined DEMと同様に考え、弾性体部分には3次元有限要素法における要素剛性行列を与える。

## 4. 提案手法の検証

## 4.1 概要

2で提案した要素モデルを用いて、実際に要素自身の変形が考慮できているかを検証した。要素の鉛直方向から荷重をかけた時の水平方向へのはらみ出し、つまりポアソン効果を調べた。FEMによって得られた結果と比較することで妥当性を確かめた。

## 4.2 解析モデル

提案手法、FEMともにレンガ・モルタルの材料特性は表1のものを用いた。表1の値はアドベレンガの実験結果<sup>2)</sup>である。本解析では、レンガの変形を調べるために、モルタル強度を実際のものよりも大きくしてモルタル破壊を生じないように設定した。ポアソン比は0.25と0.40の2通りで解析を行った。

提案手法では、2で提案した新しい要素の上に比重の大きい剛体要素を載せた(図2)。要素は一辺0.1mの立方体である。FEMにおいても一辺0.1mの立方体要素を用いる。提案手法での荷重Wを4等分し、要素上面の4頂点に荷重を加えた。

## 4.3 解析結果

載荷後の要素のx軸方向における変位量を表2に示す。表2より、2通りともFEMによって得られた結果とよい一致を示すことがわかった。また、図3よりx軸方向にはらみ出しているのが確認できた。

## 5. 提案手法による地震時挙動解析

## 5.1 解析モデル

単純な組積壁モデルとして、幅1.2m、奥行0.2m、高さ1.2mの組積壁を考える(図4)。要素の大きさは一辺が0.2mの立方体として、芋目地状(縦横ともに目地が揃っている状態)に積み上げたものを考える。レンガとモルタルの材料特性は表3の値を用いた。表3のモルタル

ル強度は、バム地震で損傷を受けたアドベ造から実験で得た結果<sup>3)</sup>である。

5.2 解析内容

入力地震動として、バム地震の際にバム市内で観測された加速度のT(水平)成分(図5)を組積壁のx(面内)方向に入力した。Refined DEM と提案手法を用いて解析を行い、結果を比較することで要素変形を考慮に入れることで地震時挙動にどのような影響を及ぼすのかを調べた。Refined DEM によって得られた結果を'RIDIG', 提案手法によって得られた結果を'DEFORM'と表す。

5.3 解析結果

(1) 相対変位波形

図2に示した要素Aの重心位置における相対変位波形を図6に示す。RIDIGでは0秒から0.6秒までは相対変位がほぼ0mである。つまりx方向への加振でy方向へ変形しなかった。それに対して、DEFORMではx方向への加振によってy方向への変形が確認でき、ポアソン効果が表現されていることが確認できた。

(2) 変形形状

結果を図7に示す。芋目地は目地が一直線に通っているため破壊が伝達しやすい。図7よりRIDIGでは(a)で破壊が生じ、(b)では崩壊した。一方DEFORMでは(b)で少し崩壊している程度である。DEFORMではポアソン効果によって要素の側面には接触力(圧縮力)が働く。モルタル強度を超えないような圧縮力が働いていたので、強度が増したと考えられる。

6. 結論

- 要素を変形領域と接触領域に分けて考えることで、要素自身の変形を表現することができた。
- 要素変形を考慮に入れた提案手法ではポアソン効果を表現できていることを確認できた。
- 提案手法ではポアソン効果によって要素間に適度な圧縮力が働くので、剛体要素を用いた Refined DEM より破壊が生じにくくなった。

参考文献

1) A. Furukawa, J. Kiyono, K. Toki, *Journal of Disaster Research*, Vol.6, No.1, p55-68, 2011,  
 2) M.A.Ghannand, A.Bakhshi, S.E.Mousavi, A.Khosravifar, Y.Bozorgnia, A.A.Taheri, *The Proc. of the First European Conf.*, No.680, 2006,  
 3) J. Kiyono, A. Kalantari, *Bulletin of Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, Vol.79, pp.157-161, 2004.

表1 材料特性

	レンガ	モルタル	剛体要素
密度 $\rho(kg/m^3)$	$1.8 \times 10^3$	$1.8 \times 10^3$	$2.0 \times 10^4$
ヤング率 $E(N/m^2)$	$9.8 \times 10^7$	$9.8 \times 10^7$	$9.8 \times 10^7$
ポアソン比 $\nu$	ケース1	0.25	0.25
	ケース2	0.40	0.40

表2 解析結果

	提案手法	FEM
$\nu = 0.25$	$6.804 \times 10^{-6}(m)$	$6.802 \times 10^{-6}(m)$
$\nu = 0.40$	$9.280 \times 10^{-6}(m)$	$9.142 \times 10^{-6}(m)$

表3 材料特性

	レンガ	モルタル
密度 $\rho(kg/m^3)$	$1.8 \times 10^3$	$1.8 \times 10^3$
ヤング率 $E(N/m^2)$	$9.8 \times 10^6$	$9.8 \times 10^6$
ポアソン比 $\nu$	0.25	0.25
引張強度 $f_t(N/m^2)$	-	$4.6 \times 10^3$
せん断強度 $c(N/m^2)$	-	$2.9 \times 10^3$
摩擦角 $\phi$	-	$32^\circ$
圧縮強度 $(N/m^2)$	-	$4.9 \times 10^5$

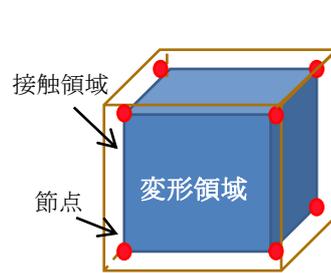


図1 要素モデル

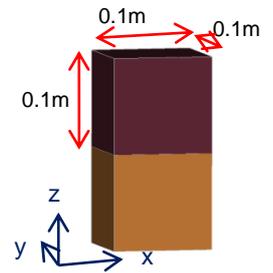


図2 解析モデル

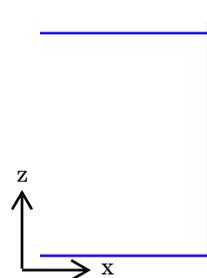


図3 解析結果(v=0.25)

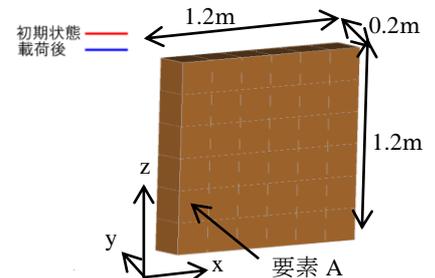


図4 解析モデル

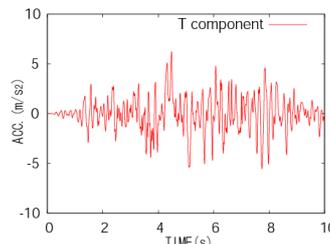


図5 入力地震動(T成分)

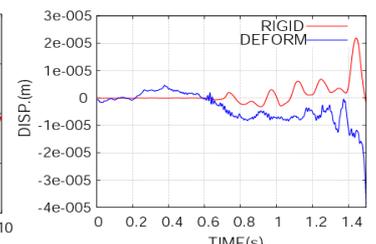
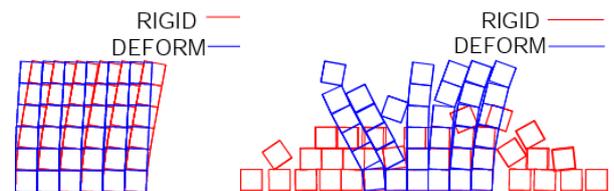


図6 相対変位波形(y方向)



(a)4.0 秒後

(b)5.5 秒後

図7 変形形状