

京都大学工学部 学生員 ○堀川 理佐  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 古川 愛子  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 清野 純史  
 立命館大学歴史都市防災研究センター 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人の方々方が犠牲となった。主な死因は建物被害によるものだと考えられる。組積造は発展途上国の伝統であり、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ので、地震が発生すると多くの方々方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。従来のDEMでは要素を剛体でモデル化しているため、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、要素を要素間の接触を表現する領域と要素内の変形を表現する領域とに分けて考え、FEMとDEMの両方からアプローチすることで、要素自身の変形を考慮に入れた新たなDEMを開発する。

## 2. 要素変形を考慮に入れ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、モルタル破壊後には要素間が接触・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。

新しい要素を用いると、構造物全体の変形は要素自身の変形と要素同士の重なり合いで表現されるので、弾性体(変形領域)の変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。節点の運動方程式を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。

減衰係数もRefined DEMと同様に考える。まず、接触に関する単位面積あたりの質量 $m_{aveD}$ を次式で表す。

$$m_{aveD} = \rho_A l_A + \rho_B l_B \quad [3]$$

ここで、 $\rho_A, \rho_B$ は要素A, 要素Bの密度を、 $l_A, l_B$ は要素A, 要素Bの重心から接触面への垂線の長さを表す。

これより接触面積あたりの減衰係数は次のようになる。

$$c_n = 2h_n \sqrt{m_{aveD} \bar{k}_n}, \quad c_s = 2h_s \sqrt{m_{aveD} \bar{k}_s} \quad [4]$$

要素内(変形領域)における剛性には、FEMの8節点六面体要素における要素剛性行列を与える。

## 4. 提案手法を用いた数値解析

### 4.1 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 2)。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 1 の値を用いた。表 1 のモルタル強度は、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>2)</sup>である。

### 4.2 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 3)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。

### 4.3 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 4 に示す。RIDIG では 0 秒から 0.3 秒までは相対変位がほぼ 0m であるのに対して、DEFORM では約 -0.0002m となっている。先に自重解析を行っているので、DEFORM での初期値はポアソン効果によるものである。(b)においても 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た。ポアソン効果により(a),(b),(c)ともに数値が異なっていると考えられる。

#### (2) 変形形状

得られた結果を図 5 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 5 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。これによって強度が増したと考えられる。

## 5. 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。
- 相対変位波形を比較すると、提案手法においてポアソン効果が表現されているのが確認できた。
- 変形形状を比較すると、提案手法ではポアソン効果によって要素間に圧縮力が働くので、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) 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
密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$1.8 \times 10^3$	$1.8 \times 10^3$
ヤング率 $E(\text{N}/\text{m}^2)$	$9.8 \times 10^6$	$9.8 \times 10^6$
ポアソン比 $\nu$	0.25	0.25
引張強度 $f_t(\text{N}/\text{m}^2)$		$4.6 \times 10^3$
せん断強度 $c(\text{N}/\text{m}^2)$		$2.9 \times 10^3$
摩擦角 $\phi$		$32^\circ$
圧縮強度 $(\text{N}/\text{m}^2)$		$4.9 \times 10^5$

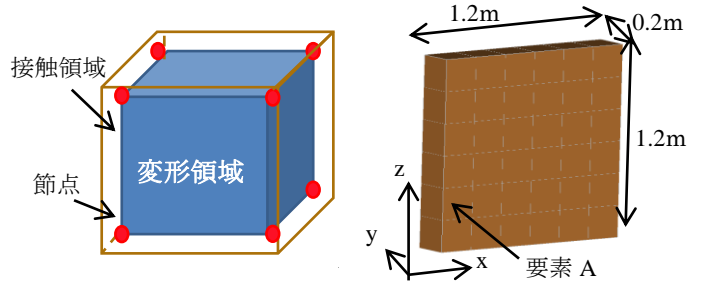


図 1 要素モデル

図 2 組積壁モデル

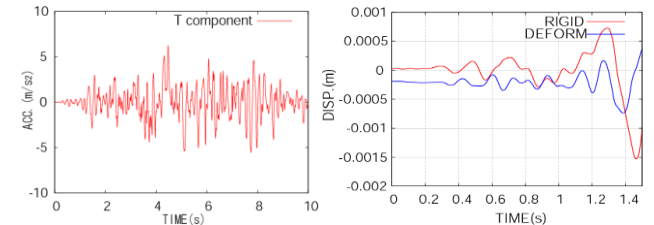
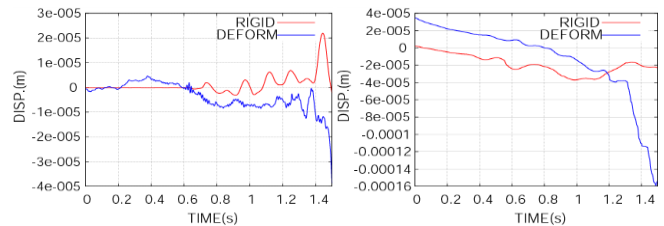


図 3 入力地震動

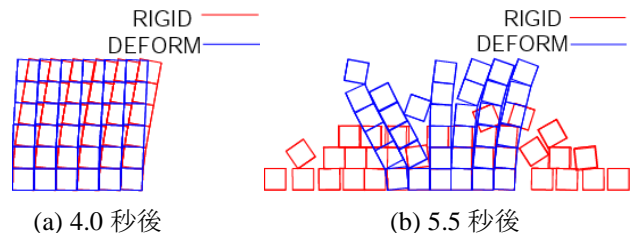
(a) x 方向



(b) y 方向

(c) z 方向

図 4 相対変位波形



(a) 4.0 秒後

(b) 5.5 秒後

図 5 変形形状