

不連続変形法による組積造壁の静的構造性能評価

建築都市デザイン学科 155526 新藤 ちひろ
指導教員 張 景耀

不連続変形法 組積造 静的解析
面内変形 応力分布

1. はじめに

煉瓦や石、ブロックなどを積み上げて作る組積造は、その作業の単純さと容易さで世界各地に古くから存在し、建築物や塀、橋、城郭の石垣など用途は多岐に渡る。

海外では、耐火性や耐久性、耐候性から住宅や公共建築、教会、宮殿まで幅広く利用されている。特に地震がほとんど発生しない地域に関しては、紀元前に建てられたエジプトやローマの古代遺跡が今も当時とほとんど変わらない姿を留めているように、組積造による伝統的な街並が形成されていることもある。組積材には地域の特性が関わっており、ヨーロッパでは建材が入手しやすいため石造あるいは焼成煉瓦による建造物が多く見受けられ、アフリカなど砂漠で木々が育ちにくい乾燥した環境の地域では日干し煉瓦（アドベ）、中国やブータンでは土を層状に押し固めて作られる版築が長い間盛んに利用されている。しかし、地震が発生した場合には崩壊による被害のみならず、人々の日常生活に支障が出てくるため、防災を兼ねた早急な耐震補強が必要とされている。

一方地震が多く組積造による被害を受けてきた日本は、海外に比べ総数は少ない。しかし、明治時代における日本の近代化を象徴する主要な建造物に煉瓦造が積極的に取り入れられた経緯から、ユネスコ世界文化遺産に登録された「明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業」[1]など、文化的価値を有する歴史的組積造建造物が多く現存している。また、近年ではこのような歴史的建造物を街づくりや景観形成の一環として再生・共有する動きがみられる。近い将来、東南海地震はじめ巨大地震が高確率で発生すると予測されるなか、組積造の耐震安全性の確保かつ文化的価値を有する外観・内観意匠の景観や資料的価値を損なわない補強方法の確立が必要とされている。

このように組積造建造物の維持は世界規模で課題になっているが、現状一般的な構造性能評価方法が確立されていない。従来の力学解析手法では、物体は常に連続で強固につながれた「連続体」と仮定した上で、物体内の応力や変形分布状態を取り扱っていた。しかし、実際には連続体の集合体や不連続面を有する「不連続体」も存在する。不連続面で起こる接触・衝突運動は集合体の挙動になる場合もあり、多くの不連続面をもつほど集合体

の形状も複雑になる。

不連続変形法（DDA：Discontinuous Deformation Analysis）は接触部分の関係性を考慮する解析手法の一つで、不連続体かつブロック間に摩擦力が働く組積造の解析に適している[2]。本研究は、DDA による解析から組積造建造物の静的構造性能評価を試み、その結果の再現性について検討することを目的とする。

2. 不連続変形法

2.1. 概要

DDA は Shi ら[3]によって開発された解析手法の一つである。有限要素法（FEM：Finite Element Method）では節点の変位を主変数とする一方、DDA ではブロック重心における「剛体変位」「剛体回転」「ひずみ」を定義した 6 個の変数を主変数とする。また、エネルギー最小化原理による平衡条件を用いるため、不連続体を構成する個々のブロック要素に任意の形状、材料特性、接触条件、境界条件、荷重条件、ロックボルト要素などを設定することができ、結果として、各ブロックの変形変位、回転、応力、加速度、接触力などが計算される。また、時間ステップ計算で時間積分を行うため、同じ定式で動的・静的どちらにも対処でき、かつ順解析・逆解析にも対応可能である。

主に不連続性岩盤の挙動解析による安定問題の検討[4]などに用いられているが、建築分野においても構造解析手法の一つとして応用することが可能である。

2.2. モデル化

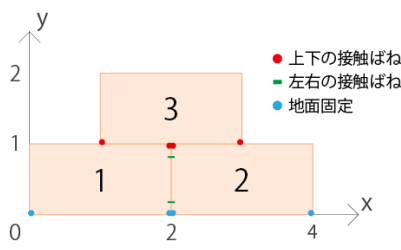


図 1. モデリング例

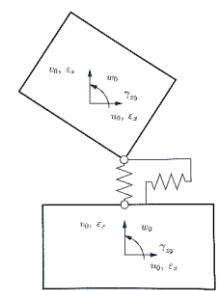


図 2. 接触面の仕組み

対象を構成する各ブロックの情報（位置座標、重心、面積、断面 2 次モーメント）、接触面で発生する摩擦、対象にかかる外力を図 1 のように設定する。DDA では摩擦

をばねに置き換えて考える (図 2) ので、ブロック間で発生する摩擦は接触ばね、地面・ブロック間で発生する摩擦は地面に完全固定したばねと仮定する。

3. 解析結果・考察

本研究では、Shrestha ら[5]の面内載荷試験で用いられた 308 個の煉瓦で構成される 26 段の組積造壁の試験体 (図 3) を解析対象とする。

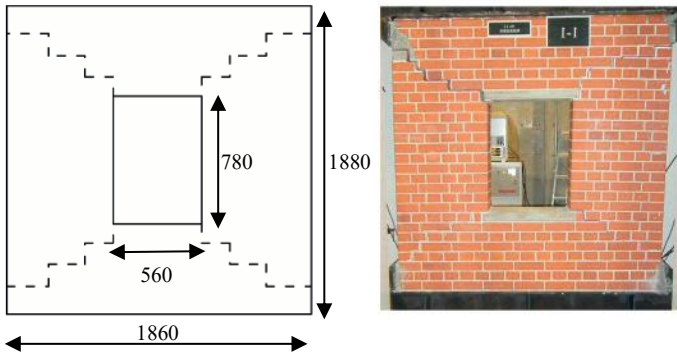


図 3. 試験結果[5]

次の図 4 は組積造壁を自重解析したときの変形図 (左) と応力分布図 (右) である。変形図は青実線が変形前、赤破線が変形後を示す (図 4 の場合、変形倍率 10^5 倍)。応力分布図は、ブロックの (a) 水平方向、(b) 鉛直方向、(c) せん断方向の応力と (d) ミーゼス応力を表している。組積造では鉛直・せん断方向に注目して挙動を分析する。

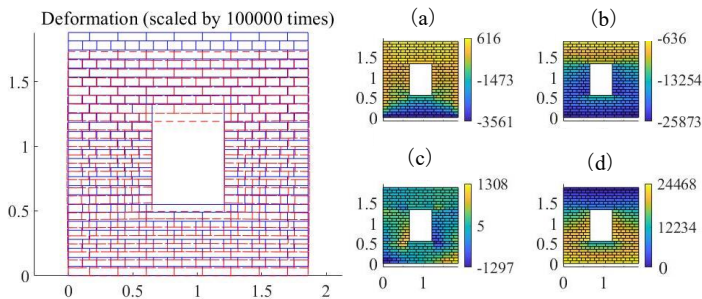


図 4. 自重による変形図 (左) と応力分布図 (右)

自重なので、大きく変形せず下方へ一定に沈むように変形する。各ブロックの重力がかかっているため、鉛直方向では地面に近いほど圧縮力が、せん断方向では開口部隅に沿ってはたらく応力が大きいことが分かる。

組積造壁へ最大荷重 (鉛直下方向 20kN、水平右方向 30.2kN) を加え静的解析を行った結果図 5 のようになる (図 5 の場合、変形倍率 10^4 倍)。

煉瓦壁は荷重をかけた右方向に傾き、地面を固定しているため上部へいくほど変形が大きい。応力分布は、鉛直方向に関して左に引張力、右に圧縮力がはたらくため数値が大きく異なる。

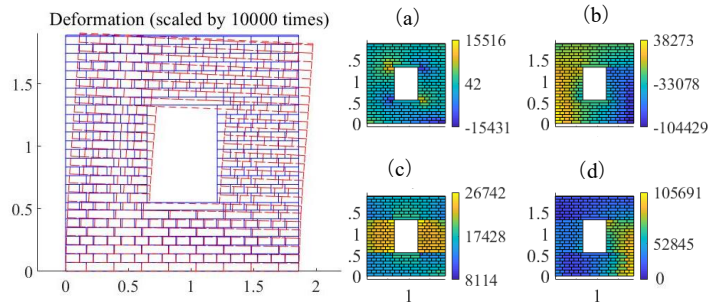


図 5. 水平鉛直加重+自重による変形図 (左) と応力分布図 (右)

せん断方向に関して、開口の有無ではっきり分かれ、開口のある真ん中部分 (黄) は左方向に、真ん中部分を挟む開口の無い上下部の段 (青) は右方向にせん断力がはたらくており、境界で負荷が大きいことが読み取れる。組積造は圧縮に強く引張に弱いいため、総合的に考察すると、引張力が一番大きく加わる箇所、今回は開口部隅、特に左上部の負荷が一番大きいと考えられる。

図 3 は実際に行われた面内載荷試験による煉瓦壁試験体の挙動結果である (写真は解析結果と加重方向を一致させるため左右反転)。開口部隅から煉瓦間を接続するモルタルに沿って階段状に亀裂がみられ、左上部の開口部隅が一番大きく損壊していることが伺える。

4. 今後の展望

DDA による解析で組積造壁の構造性能評価は可能である。今後の課題としては、以下のことが挙げられる。

- 接触ばねなど解析パラメーターの調整
- ばねの破断を考慮した解析
- 解析サンプルを増やし DDA 解析の精度向上
- 地震動など動的解析への適用

参考文献

- [1] <http://www.japansmeijiindustrialrevolution.com> (2019/1/30 時点)
- [2] 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua Shi : 不連続変形法 (DDA), 計算力学シリーズ, 丸善, 2005.
- [3] Gen-Hua Shi : Discontinuous Deformation Analysis - A New Numerical Model for the Static and Dynamics of Block System, PhD. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkley, 1989.
- [4] 佐々木猛, 大西有三, 吉中龍之進. : 不連続変形法 (DDA) とその岩盤工学への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.493, pp.11-20, 1994.
- [5] Shrestha, K.C., Nagae, T., Araki, Y. : Finite element study on pinning retrofitting technique of masonry walls with opening subjected to in-plane shear load, *ACEE Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 81-96, 2011

*名古屋大学芸術工学部建築都市デザイン学科

**名古屋大学大学院工学研究科 准教授・博士 (工学)

* Department of Design & Architecture, Nagoya city University

**Associate Prof., Graduate School of Design and Architecture, Nagoya City Univ., Dr. Eng.