

离散元在砌体结构中的计算模拟

杨敏¹, 方林¹, 周奎²

¹华东建筑设计研究院有限公司, 上海

²上海理工大学, 上海

Email: min_yang@arcplus.com.cn

收稿日期: 2020年9月2日; 录用日期: 2020年9月18日; 发布日期: 2020年9月25日

摘要

离散元法是专门用来解决不连续介质问题的数值模拟方法, 主要应用于岩土及地基工程。在既有建筑改造领域, 由于砌体结构建筑的主要材质为砖和砂浆的结合体, 在构造上有典型的非连续性特征, 因此本文以隧道窑结构为例, 尝试创新使用离散元法对砌体结构进行建模分析, 并据此提供一种可行的计算模拟思路及方法。

关键词

离散元, 砌体, 模拟

Numerical Simulation of Dispersion in Masonry Structure

Min Yang¹, Lin Fang¹, Kui Zhou²

¹East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai

²University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Email: min_yang@arcplus.com.cn

Received: Sep. 2nd, 2020; accepted: Sep. 18th, 2020; published: Sep. 25th, 2020

Abstract

Dispersion is a numerical simulation method specially used to solve the problem of discontinuous medium, which is mainly used in geotechnical engineering and foundation engineering. In the field of existing building reconstruction, because the main material of masonry structure is the combination of brick and mortar, which has typical discontinuous characteristics in structure, this paper, taking the tunnel kiln structure as an example, attempts to use the Dispersion to model and analyze the masonry structure, and provides a feasible calculation and simulation idea and method.

Keywords

Dispersion, Masonry, Simulation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

离散元方法的思想源于较早的分子动力学,是研究不连续体力学行为的一种新数值方法。物理介质通常呈现非连续即离散特征,这里的离散特征可以现实表现为材料属性、或细观、宏观构造形态意义上的非连续,离散构成本质决定介质亦呈现力学意义上的非连续特点,即离散介质在受力时呈现的变形不连续现象。

离散元法在岩土工程、地质工程和能源开采领域具有广泛的应用价值,例如自然边坡凸起的山梁模拟、结构面控制型边坡的稳定分析、复杂自然边坡的开挖模拟等等。

在既有建筑改造领域,砌体结构建筑占了很大的比例,鉴定过程中存在一些非常规的砌体结构建筑或构筑物,由于形状构造特殊,常规的结构计算软件无法进行建模计算,导致计算部分空白,因此为后续的鉴定分析带来困难,砌体结构的主要材料为砖砌体,而砖砌体则是用砖和砂浆两种材料砌筑而成,考虑到砖和砂浆的组成为非连续介质,因此尝试创新采用离散元法对砌体结构进行建模分析。

为更好的介绍离散元在砌体结构中的计算模拟,本文以隧道窑为例,详细的阐述采用离散元法对隧道窑建模,根据现场实测的砂浆及砖强度及材料本身的性能换算为离散元软件计算所需要的弹性模量、体积模量、剪切模量、泊松比、内聚力、摩擦角、抗拉强度等计算参数,最终获得隧道窑结构的主要力学性能信息,并模拟其在当前情况的发展趋势和稳定度的全过程,为砌体结构的计算模拟开辟一条全新的思路及方法。

2. 离散元建模

案例为拱顶隧道窑,砖砌体结构,窑长约为 108 m,内宽为 3.6 m,净高(拱顶最高处)为 2.63 m,由于隧道窑整体长度太长,考虑到计算量过大,且在不同分段区域的材料现状情况有所不同,在实际建模中根据隧道窑的测绘成果,截取一段材料现状较为接近的隧道窑结构进行三维建模(见图 1),并基于该模型进行参数化分析。

本次采用 3DEC 软件,该软件是一款以非连续介质力学模拟为目标,采用离散元法作为基本理论的三维分析程序,特别适用于因不连续界面导致变形和破坏现象的机制性研究。



Figure 1. 3D Dispersion model of local structure of tunnel kiln

图 1. 隧道窑局部结构离散元三维模型

3. 材料性能参数

根据案例隧道窑现场检测结果, 评定得到实测砖强度达到 MU10 的强度, 砂浆达到 M3.3 的强度要求。

1) 砂浆计算参数取值

弹性模量: 参考刘桂秋[1]数据回归得到的弹性模量 E 与抗压强度 f 的换算公式: $E = 1057f^{0.84}$ 。根据现场实测砂浆评定强度 M3.3 得到砂浆弹性模量 $E = 2881.6$ MPa。

泊松比: 参考刘桂秋[1]建议的砂浆泊松比取值, 本次砂浆泊松比取 0.24。

体积模量: 根据弹性模量(E)、体积模量(B)、泊松比(ν)三者关系公式 $B = E/[3(1-2\nu)]$, 计算得到砖的剪切模量 $G = 1847$ MPa。

剪切模量: 根据弹性模量(E)、剪切模量(G)、泊松比(ν)三者关系公式 $G = E/[2(1+\nu)]$, 计算得到砖的剪切模量 $G = 1162$ MPa。

内聚力及摩擦角: 查阅多方资料后将砂浆的内聚力取 1 MPa, 摩擦角取 35° 。

抗拉强度: 参考 Hamid [2]和 Chukwunenye [2]按照劈裂试验所定义的抗拉强度公示为 $f_{tm} = 0.58\sqrt{f_{km}}$, 其中抗压强度标准值 f_{km} 参照 JGJ98-2010《砌筑砂浆配合比设计规程》[3]中 5.1.1 章节中砂浆试配的计算公式 $f_{km} = kf$, f_2 为砂浆强度等级值, k 为系数通过表 5.1.1 砂浆强度标准值与 k 值查找, 该表按施工水平优良、一般、较差三级进行分类, 本文考虑最不利情况即较差进行取值为 1.25, $f_{km} = 4.125$ MPa, $f_{tm} = 1.18$ MPa。

2) 砖计算参数取值

弹性模量: 参考刘桂秋[1]数据回归得到的弹性模量 E 与抗压强度 f 的换算公式 $E = 4467f^{0.22}$ 。根据现场实测砖评定强度 MU10 得到砖弹性模量 $E = 7413.4$ MPa。

泊松比: 参考刘桂秋[1]根据国外文献中实测砖的泊松比数据, 得到泊松比平均值为 0.1645, 本次砖泊松比取 0.17。

体积模量: 根据弹性模量(E)、体积模量(B)、泊松比(ν)三者关系公式 $B = E/[3(1-2\nu)]$, 计算得到砖的剪切模量 $G = 3744$ MPa。

剪切模量: 根据弹性模量(E)、剪切模量(G)、泊松比(ν)三者关系公式 $G = E/[2(1+\nu)]$, 计算得到砖的剪切模量 $G = 3168$ MPa。

内聚力及摩擦角: 查阅多方资料后将砖的内聚力取 5 MPa, 摩擦角取 35° 。

抗拉强度: 参考 Cheema [4]和 Klinger [4]按照劈裂试验所定义的抗拉强度公示为 $f_r = 0.415\sqrt{f_k}$, 其中抗压强度标准值 f_k 参照 GB5101-2017《烧结普通砖》[5]中 6.3 强度等级章节中的表 3, 根据实测砖强度评定等级进行换算, 计算得到 MU10 砖的抗拉强度 $f_r = 1.06$ MPa。

4. 案例离散元模型计算

综上所述, 案例隧道窑砂浆及砖的离散元计算参数整理如表 1 所示。

Table 1. Dispersion calculation parameters and results of brick strength MU10 mortar strength M3.3

表 1. 砖强度 MU10 砂浆强度 M3.3 离散元计算参数及计算结果

| 材料种类 | 强度等级 | 弹性模量(MPa) | 泊松比 | 体积模量(MPa) | 剪切模量(MPa) | 内聚力(KPa) | 摩擦角($^\circ$) | 抗拉强度(MPa) | 弹性模量(MPa) |
|------|------|-----------|------|-----------|-----------|----------|-----------------|-----------|-----------|
| 砖 | MU10 | 7413 | 0.17 | 3744 | 3168 | 5 | 35 | 1.06 | 7413 |
| 砂浆 | M3.3 | 2882 | 0.24 | 1847 | 1162 | 1 | 35 | 1.18 | 2882 |

将计算参数导入模型代码,详细计算结果如图 2~4 所示,左侧 ZZ Stress 表示垂直应力,Z-displacement 表示垂直位移,Max.Prin.Stress 表示最大主应力。从计算结果可知:该段隧道窑结构的垂直应力范围在 0~210.8 KPa;主应力范围在 200~369.3 KPa;垂直位移范围在 0~ 2.2173×10^{-5} m,从图 5 模拟结果可知,主要的滑移发生在两侧墙体中段外侧、拱顶及底部、弧形拱与两侧墙体交接部位,但没有发生松散破坏,因此认为结构较为稳定。

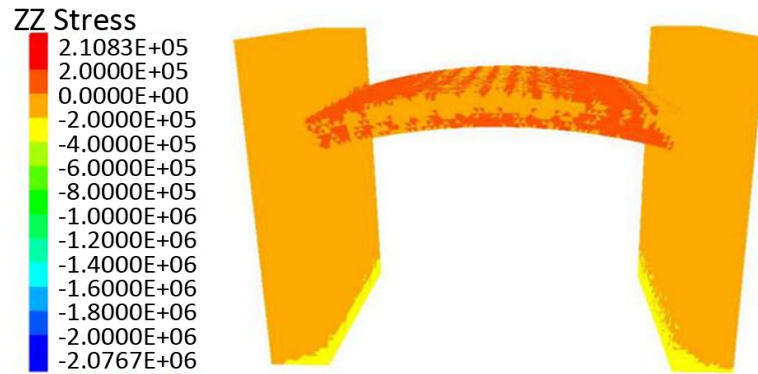


Table 2. Calculation results of vertical stress of local structure

图 2. 隧道窑局部结构垂直应力计算结果

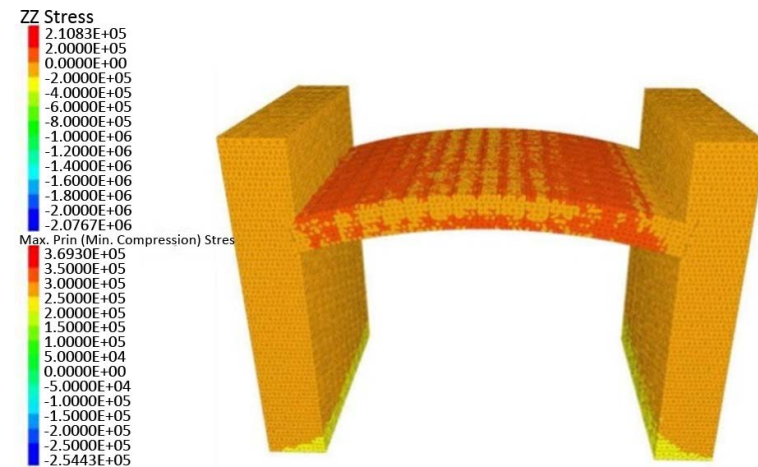


Table 3. Calculation results of maximum principal stress of local structure

图 3. 隧道窑局部结构最大主应力计算结果

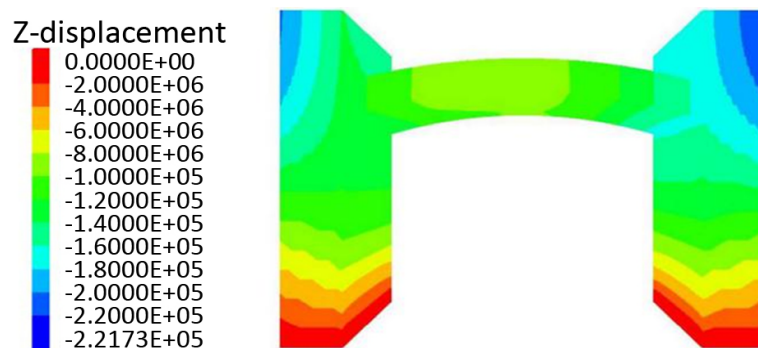


Table 4. Calculation results of vertical displacement of local structure

图 4. 隧道窑局部结构垂直位移计算结果

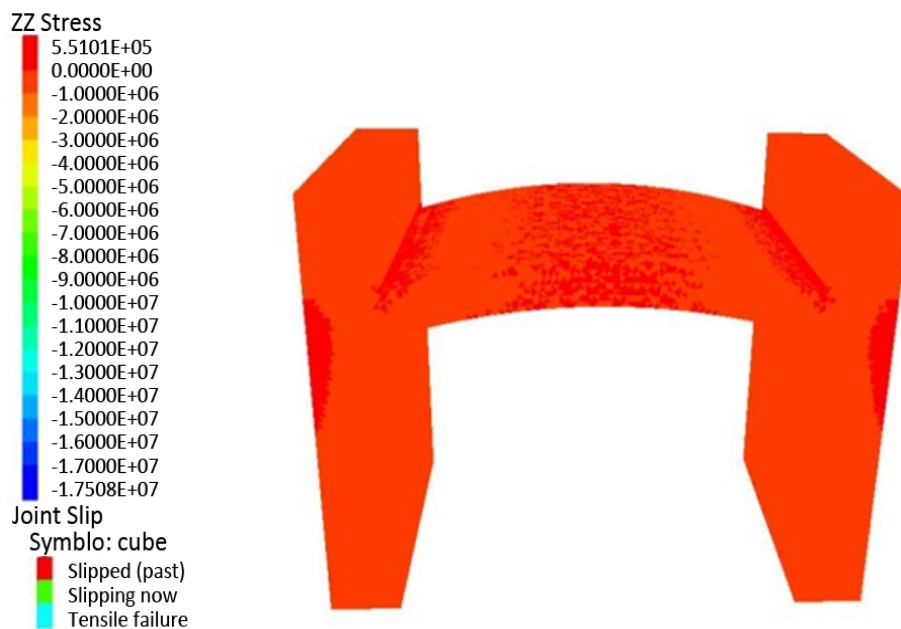


Table 5. Structural failure simulation results

图 5. 结构破坏模拟结果

5. 案例离散元破坏模拟

离散元破坏模拟的原理是结构自身的重力通过时间的推移所产生的变化，将案例模型进行破坏模拟，通过不断降低材料强度调整对应的计算参数组继续进行破坏模拟，最终获得其破坏发展规律及最终发生坍塌的材料强度临界值。

根据上述方法，我们主要通过降低案例隧道窑材料强度的方法进行几组破坏模拟，具体计算参数如表 2~4 所示，破坏模拟结果如图 6~11 所示。

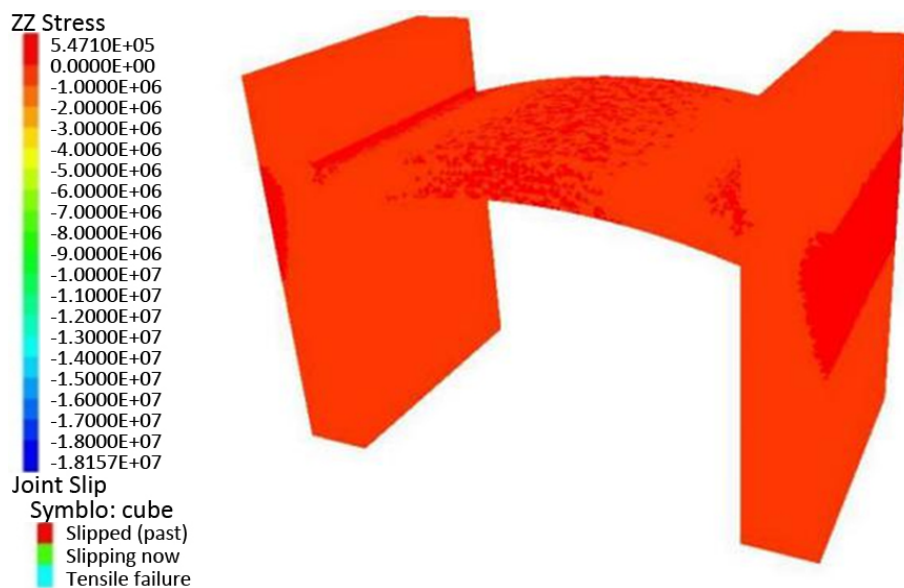


Table 6. Structural failure simulation results of case 1

图 6. 工况 1 结构破坏模拟结果

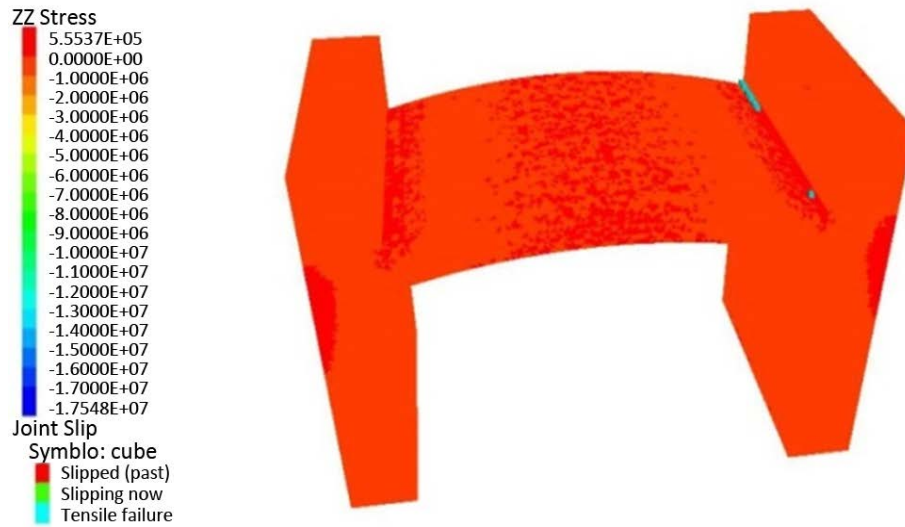


Table 7. Structural failure simulation results of case 2
图 7. 工况 2 结构破坏模拟结果

Table 2. Calculation parameters and simulation results of failure simulation under working conditions 1 and 2
表 2. 工况 1、2 破坏模拟计算参数及模拟结果

| 材料种类 | 工况 | 强度等级 | 弹性模量 (MPa) | 泊松比 | 体积模量 (MPa) | 剪切模量 (MPa) | 内聚力 (KPa) | 摩擦角(°) | 抗拉强度 (MPa) |
|------|----|-------|------------|------|------------|------------|-----------|--------|------------|
| 砖 | 一 | MU7.5 | 6959 | 0.17 | 3514 | 2974 | 3.5 | 35 | 0.90 |
| 砂浆 | | M2.5 | 2282 | 0.24 | 1463 | 920 | 0.76 | 35 | 1.03 |
| 砖 | 二 | MU7.5 | 6959 | 0.17 | 3514 | 2974 | 3.5 | 35 | 0.90 |
| 砂浆 | | M2.4 | 2205 | 0.24 | 1413 | 889 | 0.73 | 35 | 1.00 |

Table 3. Calculation parameters and simulation results of failure simulation under working conditions 3 and 4
表 3. 工况 3、4 破坏模拟计算参数及模拟结果

| 材料种类 | 工况 | 强度等级 | 弹性模量(MPa) | 泊松比 | 体积模量(MPa) | 剪切模量(MPa) | 内聚力(KPa) | 摩擦角(°) | 抗拉强度(MPa) |
|------|----|-------|-----------|------|-----------|-----------|----------|--------|-----------|
| 砖 | 三 | MU7.5 | 6959 | 0.17 | 3514 | 2974 | 3.5 | 35 | 0.90 |
| 砂浆 | | M2.3 | 2128 | 0.24 | 1364 | 858 | 0.70 | 35 | 0.98 |
| 砖 | 四 | MU7.5 | 6959 | 0.17 | 3514 | 2974 | 3.5 | 35 | 0.90 |
| 砂浆 | | M1.8 | 1732 | 0.24 | 1110 | 698 | 0.55 | 35 | 0.87 |

模拟结论：当砖和砂浆强度等级分别降低至 MU7.5 和 M2.5 时，主要的滑移任然发生在两侧墙体中段外侧、拱顶及底部、弧形拱与两侧墙体交接部位，没有发生松散破坏。随后逐步降低砂浆强度等级，当砂浆强度等级为 M2.4 时，拱与一侧墙体交接处上部局部发生小范围松散破坏；当砂浆强度等级为 M1.8~M2.3 范围内，拱与两侧墙体交接处上部均发生松散破坏；当砂浆强度等级为 M1.7 时，拱与两侧墙体交接处松散破坏延伸至拱侧端；当砂浆强度等级降至 M1.6 时，拱与两侧墙体交接处破坏发展至底部，

从而整体松散发生坍塌。

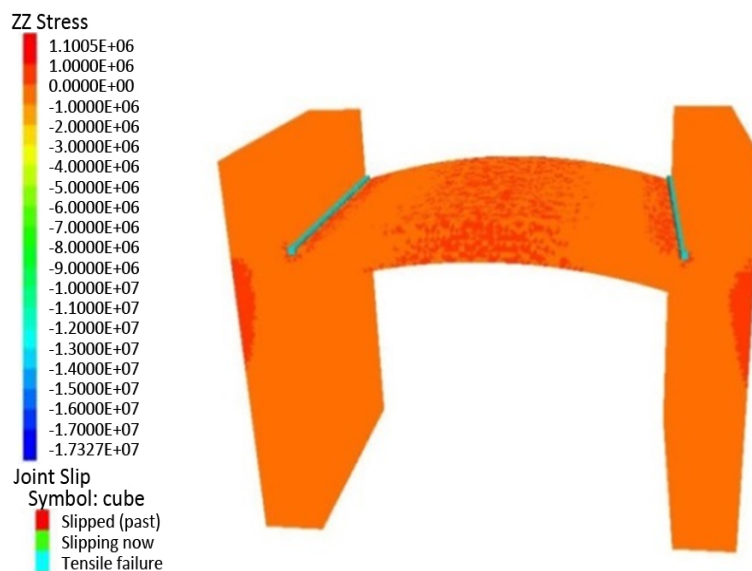


Table 8. Structural failure simulation results of case 3

图 8. 工况 3 结构破坏模拟结果

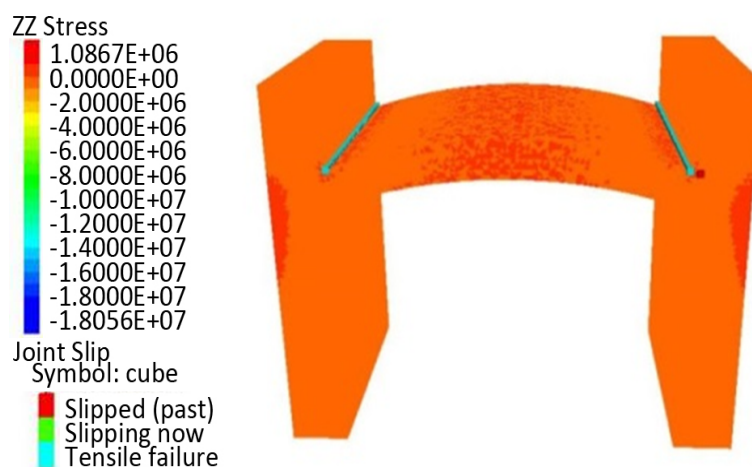


Table 9. Structural failure simulation results of case 4

图 9. 工况 4 结构破坏模拟结果

Table 4. Calculation parameters and simulation results of failure simulation under working conditions 5 and 6

表 4. 工况 5、6 破坏模拟计算参数及模拟结果

| 材料种类 | 工况 | 强度等级 | 弹性模量(MPa) | 泊松比 | 体积模量(MPa) | 剪切模量(MPa) | 内聚力(KPa) | 摩擦角(°) | 抗拉强度(MPa) |
|------|----|-------|-----------|------|-----------|-----------|----------|--------|-----------|
| 砖 | 五 | MU7.5 | 6959 | 0.17 | 3514 | 2974 | 3.5 | 35 | 0.90 |
| 砂浆 | | M1.7 | 1651 | 0.24 | 1058 | 666 | 0.52 | 35 | 0.85 |
| 砖 | 六 | MU7.5 | 6959 | 0.17 | 3514 | 2974 | 3.5 | 35 | 0.90 |
| 砂浆 | | M1.6 | 1569 | 0.24 | 1006 | 633 | 0.48 | 35 | 0.82 |

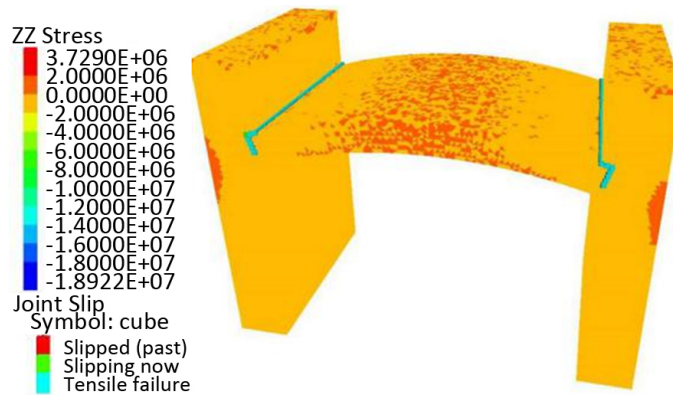


Table 10. Structural failure simulation results of case 5

图 10. 工况 5 结构破坏模拟结果

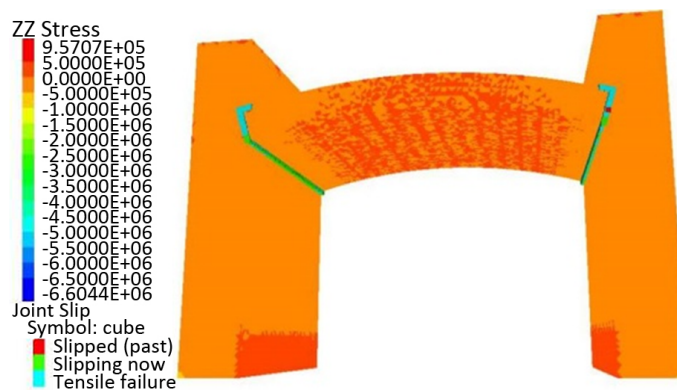


Table 11. Structural failure simulation results of case 6

图 11. 工况 6 结构破坏模拟结果

6. 结论

本文以砌体结构隧道窑为例，详细介绍了尝试采用离散元对该类不连续材料介质结构体进行计算模拟的方法，计算获取主要受力信息，同时通过降低两种材料介质的强度来进行坍塌模拟，获取整个结构体破坏的过程及最终破坏的材料强度临界点，提供一种砌体结构可行的计算及模拟思路及方法。

参考文献

- [1] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [2] Hamid, A.A. and Chunkwunenye, A.O. (1986) Compression Behavior of Concrete Masonry Prisms. *Journal of Structural Engineering*, **112**, 605-613.
- [3] 陕西省建筑科学研究院, 浙江八达建设集团有限公司. JGJ98-2010 国家行业标准《砌筑砂浆配合比设计规程》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] Cheema, T.S. and Klinger, R.E. (1986) Compressive Strength of Concrete Masonry Prisms. *ACI Structural Journal*, 88-89.
- [5] 西安墙体材料研究设计院. GB5101-2003 国家行业标准《烧结普通砖》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.