

反复加载下无浆砌体接缝剪切特性

林 坤¹, 刘红军¹, Yuri TOTOEV²

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 518055 广东 深圳; 2. 纽卡斯尔大学 基础设施性能与可靠度中心, 2308 澳大利亚 纽卡斯尔)

摘 要: 为研究在钢筋混凝土框架结构和砌体结构中具有良好的应用前景的无浆砌体墙的剪切特性, 采用反复加载试验方法, 完成了 36 组干砌块双剪试验, 随后利用界面单元和平面应力单元建模开展了相应有限元分析. 试验研究中着重考察了反复加载过程对砌体剪切特性的影响, 研究表明: 无浆砌体通缝剪切特性符合摩尔-库仑关系; 剪切摩擦系数随加载周期、幅值变化而改变; 利用界面单元及平面应力单元建立的有限元模型可以有效地对剪切试验进行仿真.

关键词: 无浆砌体接缝; 剪-压试验; 摩擦系数; 反复加载; 滞回特性; 有限元分析

中图分类号: TU398.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0006-05

Behavior of mortar-less masonry joint under cyclic shear-compression loading

LIN Kun¹, LIU Hong-jun¹, Yuri TOTOEV²

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 518055 Shenzhen, Guangdong, China;

2. Centre for Infrastructure Performance and Reliability, The University of Newcastle, 2308 Callaghan NSW, Australia)

Abstract: To research the shear-compression behavior of mortar-less masonry which has potential in the reinforcement concrete frame and masonry structures, 36 shear-compression tests were carried under cyclic loads. During the test, the influence of cyclic shear-compress load on the behavior was emphasized. After that, a finite element model was built with interface and plain stress elements. The research indicates that the coulomb friction law is adequate to represent the failure of mortar-less joints under moderate stress levels, the friction coefficient varies under different load aptitude which can't be ignored and the model with interface element and plane stress element is valid in simulation of shear-compression test.

Key words: dry stack masonry joint; shear-compression test; friction coefficient; cyclic loading; hysteretic behaviour; finite element method analysis

砌体因其取材广泛、施工简单等优点,在我国乃至世界都有广泛应用^[1];但现有砌体结构在地震作用下通过材料发生断裂破坏消耗能量,震后调查发现墙体产生大量交叉斜裂缝,修复困难^[2-3].为提高砌体自身耗能能力,部分学者开展了无浆砌体的研究.该结构在砌筑的过程中不采用砂浆,仅利用砌块之间的摩擦来抵抗面内剪力,

利用砌块之间的嵌固来抵抗面外荷载.研究发现干砌块之间的相互摩擦作用能够消耗能量,对于提高结构整体的阻尼性能具有良好意义^[4-5].

无浆作业使得该结构的性能不依赖于砂浆的特性以及建筑工人的技术(这两者是造成传统砌体墙复杂非线性的重要因素),使得结构特性更加稳定;同时提高了工作效率,降低了对环境的污染,符合我国近年来提倡的绿色经济概念.近年来,随着世界各地建筑市场的蓬勃发展,该结构形式也得到了越来越多的应用^[6].

无浆砌体依靠砌块之间的摩擦消耗能量,其接触面的剪切特性对结构整体耗能具有重要影

收稿日期: 2012-03-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178153);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0160).

作者简介: 林 坤(1984—),男,博士研究生;

刘红军(1968—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 刘红军, liuhongjun@hit.edu.cn.

响. 对于有浆砌体剪切特性的研究, 当前已有成熟的试验分析^[7]和数值建模策略^[8], 但对无浆砌体的研究很少. 本文在有浆砌体研究成果基础上, 结合无浆砌体特点, 提出反复加载的试验方法并对试验结果进行分析, 旨在研究该新型无浆砌体性能以及循环加载对其性能的影响, 最终提出有限元建模方法.

1 砌体接缝性能

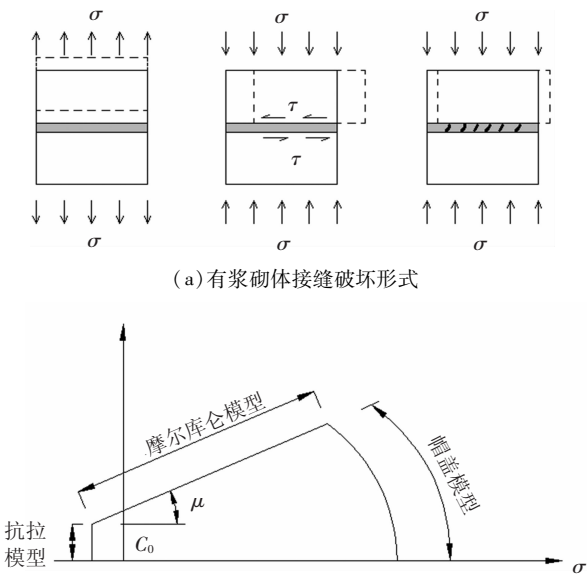
依据不同的压应力, 有浆砌体接缝的破坏^[9-11]可以分为 3 种形式, 即拉伸、剪切及剪压破坏, 见图 1. 其中, 拉伸破坏由接缝粘结强度以及砂浆抗拉强度决定; 剪切破坏由接缝初始粘结力 c_0 以及剪切摩擦系数决定, 可采用摩尔-库仑模型表示; 剪压破坏由接缝的抗压强度决定, 可采用帽盖模型 (Cap Model) 表示.

无浆砌体因为没有砂浆的粘结, 其接缝力学性能仅表现为剪切“破坏”, 此时接缝剪应力、压应力之间的关系为

$$\tau = c_0 + \mu \sigma.$$

式中: τ 、 σ 分别为接缝的剪应力、压应力; c_0 为接缝初始粘结应力; μ 为剪切摩擦系数.

采用摩尔库仑模型对无浆砌体接缝的剪切试验结果进行分析, 考察循环加载对砌体接缝剪切特性的影响.



(b) 有浆砌体接缝力学模型

图 1 砌体接缝破坏形式

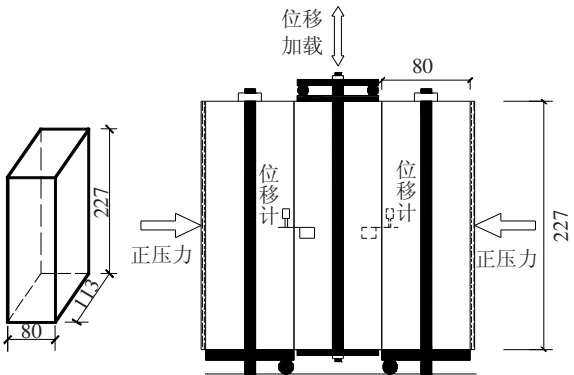
2 试验介绍及加载

无浆砌体剪切试验在澳大利亚纽卡斯尔大学材料性能试验室进行, 采用澳大利亚常用的小型实心混凝土砌块无浆砌筑试件, 考察砌块表面之

间的相互作用. 砌块尺寸为 227 mm × 113 mm × 80 mm, 见图 2 (a). 通过材料试验得到该砌块的参数, 弹性模量 $E = 26\ 365\text{ MPa}$, 密度 $\rho = 2\ 250\text{ kg/m}^3$, 抗压强度 $f_m = 28.55\text{ MPa}$, 抗拉强度 $f_t = 2.92\text{ MPa}$, 砌体棱柱体抗压强度 $f_{mas} = 18.3\text{ MPa}$, 泊松比假定为 0.2.

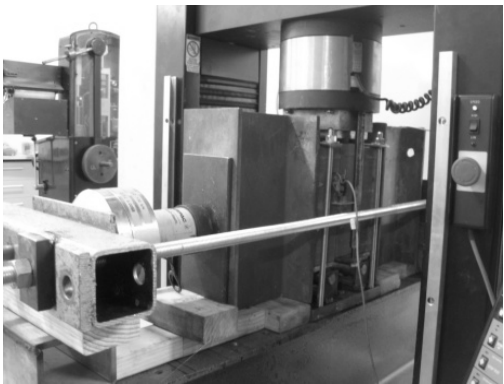
参考规范^[7]中三砖双剪面砌体模型试验改造, 进行砌体剪切反复荷载试验, 装置见图 2 (b)、(c). 试验台采用 Enstron 5500R 通用试验框架改造而成. 试验采用两个独立的作动器, 水平方向作动器提供正压力, 竖直方向作动器提供切向位移. 通过作动器内置压力传感器得到竖向作动器实时加载; 利用位移计记录砌块实时相对位移. 位移计量程为 10 mm, 在砌块两侧对称布置.

试验采用竖向位移控制, 竖向作动器最大出力为 100 kN. 固定外侧 2 个砌块, 对中间砌块进行反复位移加载. 分别采用 0.1、0.3、0.5 MPa 正压力进行加载试验, 每组正压力有 3 个试件, 共计 9 个试件. 在反复荷载试验中, 针对每组正压力情况, 采用 4 种位移幅值 ($\pm 0.8/\pm 1.6/\pm 2.4/\pm 3.2\text{ mm}$), 对应速度 (1 mm/min, 2 mm/min, 2 mm/min 以及 4 mm/min), 每一幅值为一个工况, 因此总共有 36 个工况.



(a) 砌块尺寸示意

(b) 试验示意



(c) 试验照片

图 2 无浆砌体剪切试验

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

图3为无浆砌体剪切试验的典型剪力-位移曲线,该滞回曲线可以表示为图4的力学模型,可以看到:

1) 最初加载阶段(a阶段),力-位移呈线性增加.当砌块开始滑动时,摩擦力保持不变,呈完全塑性(b阶段).

2) 力-位移曲线表现出明显的“捏缩特性”(c阶段及c'阶段),且随着加载幅值的增加,捏缩特性越明显.该捏缩特性是由于中间砌块滑动过程中,两侧施加力产生附加弯矩所引起的剪力增大造成的(图5).

3) 反向加载曲线(d阶段)的加载刚度随正压力的增加而逐渐呈刚性,见图3(b).

4) 滞回曲线相对位移不对称,这是由于中间砌块与作动器连接不够紧密造成的.

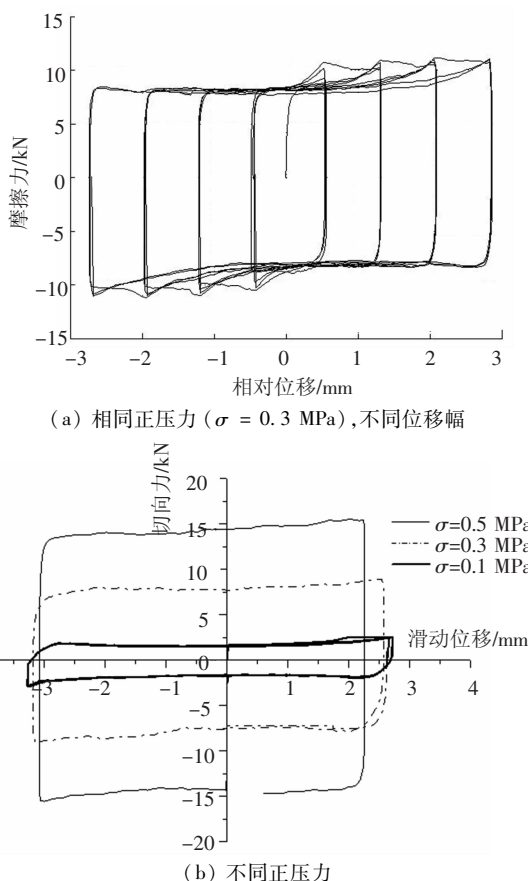


图3 典型滞回曲线

3.2 摩尔-库仑准则及剪切摩擦退化

利用试验所得恒定加载阶段对应的剪力均值以及正压力均值求解应力

$$\tau = F/2A,$$

$$\sigma = N/A.$$

式中: F 为切向力,即竖向作动器施加的力; N 为

正压力,即水平作动器所施加的力; A 为砌块的接触面积.

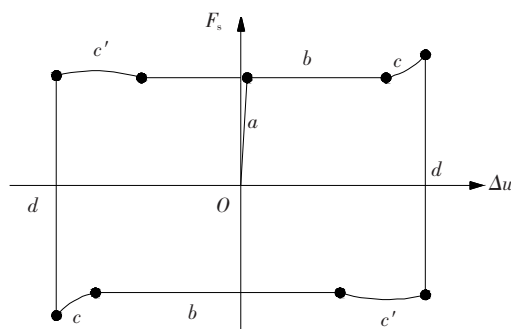


图4 无浆砌块剪切滞回曲线力学模型

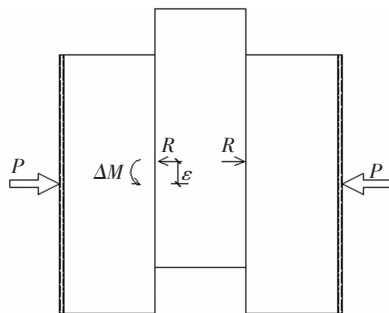


图5 捏缩原因示意

剪切应力曲线见图6、7. 图7中,“L”、“M”、“H”表示压应力的低、中、高工况,即:0.1、0.3、0.5 MPa,后一项“1~3”表示加载试件标号. 对于L_2工况,由于试验结果存在明显离散性,分析中并没有采用. 从图6~8可以看出:

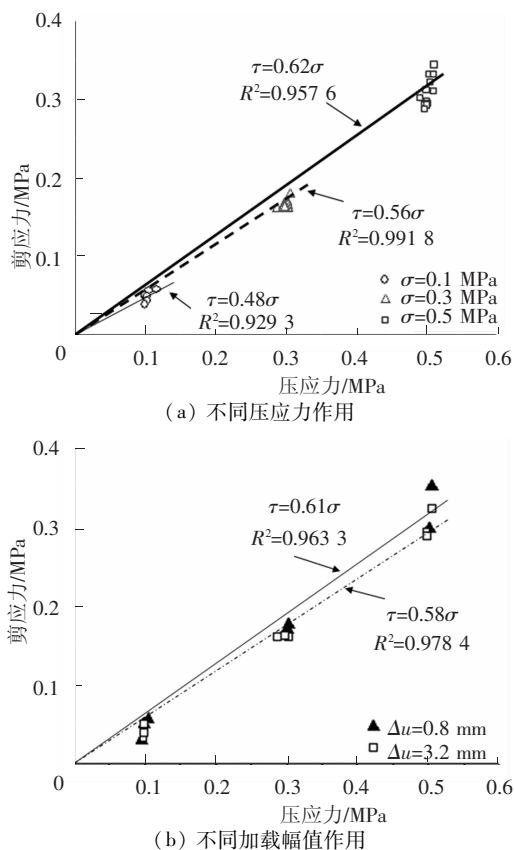


图6 剪切摩擦系数随加载的变化

1) 摩擦系数随正压力的增加而加大, 这是由于压力的增加使得砌块表面接触更紧密造成的. 对于整体结果, 摩擦系数为 0.62, 相关系数为 0.96, 见图 6(a).

2) 相同正压力下, 砌体剪切摩擦系数随加载幅值的增加而减小, 且离散性降低. 对于初始工况 (极小位移幅值 $\Delta u = 0.8\text{ mm}$), 剪切摩擦系数为 0.61, 相关系数为 0.96; 对于最终工况 (极大位移幅值 $\Delta u = 3.2\text{ mm}$), 剪切摩擦系数为 0.58, 相关系数为 0.98, 见图 6(b). 这是随着加载过程中砌块表面磨损造成的, 见图 8.

3) 剪切力幅值随着正压力的增大而变得更加稳定, 如图 7 所示. 因此在进行该类型试验时, 建议选取较大正压力. 随着正压力的增大, 砌块之间的摩擦系数随之增大, 这是由于砌块接触更紧密所致.

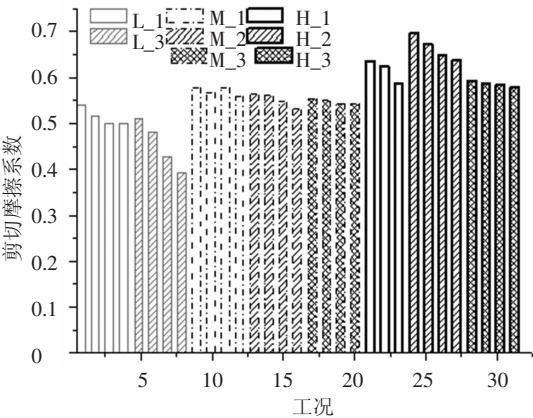


图 7 剪切摩擦系数随加载幅值衰减

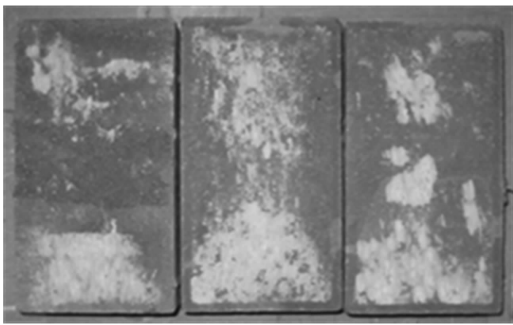


图 8 试验后砌块表面磨损情况

4 数值仿真

选用有限元软件 DIANA 对试验进行建模分析. 采用 8 节点连续单元 CQ16M 模拟砌块, 6 节点零厚度界面单元 CL12I 模拟接缝. 因为试验过程中, 砌块自身并未发生破坏, 因此材料特性采用弹性, 弹性模量 26 365 MPa, 密度为 2 250 kg/m³,

泊松比为 0.2. 界面单元材料特性采用理想塑性摩尔 - 库仑摩擦准则, 初始粘结力为 0, 摩擦系数为 0.5. 对模型施加正压力 0.3 MPa, 得到砌体滑动前后接缝处应力分布情况, 见图 9、10. 图 10 中横坐标为考察点沿砌块接缝 (长边) 的位置. 在滑动前后, 接缝不同位置的应力分布并不均匀, 边界处存在应力集中现象. 初始滑动位移 ($\Delta u = 0.01\text{ mm}$) 时, 压应力最大为 0.383 (比输入值大 28%), 最小值为 0.268 (比输入值小 10%); 最大滑动位移 ($\Delta u = 3\text{ mm}$) 时, 应力集中加剧, 其中压应力最大值为 0.409 (比输入值大 33%), 最小值为 0.241 (比输入值小 20%). 两种不同滑动位移时, 压应力均值皆为 0.3 MPa, 且每一接触点的剪、压应力比例关系都符合摩尔 - 库仑准则.

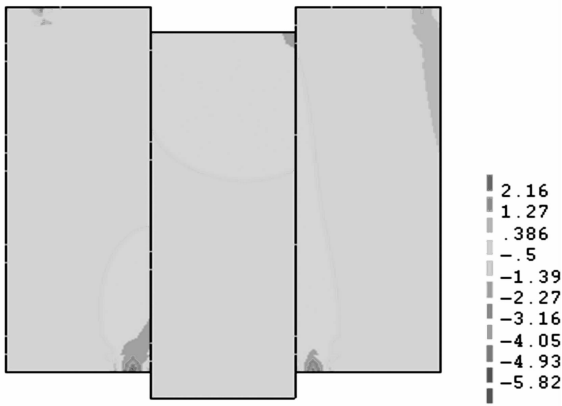


图 9 有限元模型压应力分布情况

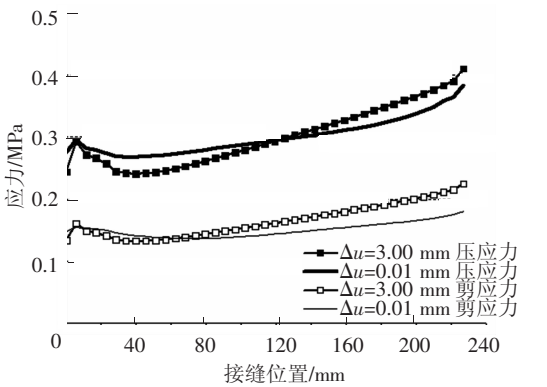


图 10 滑动前后砌体接缝应力分布情况

利用有限元模型得到砌体滑动中剪切位移 - 剪切力滞回曲线, 见图 11. 有限元结果可以很好地反映砌体反复加载中塑性特点; 砌体最大滑动位移 ($\Delta u = 3\text{ mm}$) 时接缝剪应力、压应力关系见图 12, 可以看出接缝处所有点剪应力、压应力全部呈线性关系, 且求得的摩擦系数与定义值相同, 表明该界面单元可以有效对剪切试验建模分析.

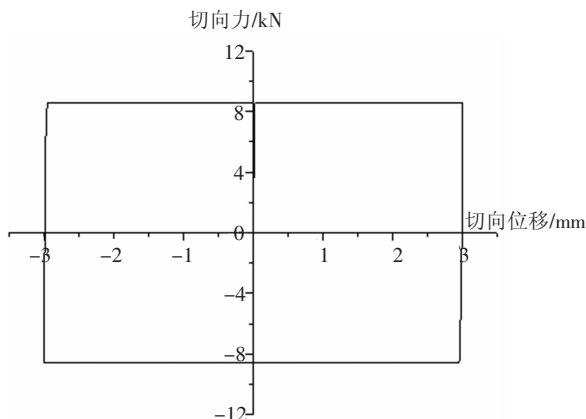


图 11 有限元结果滞回曲线

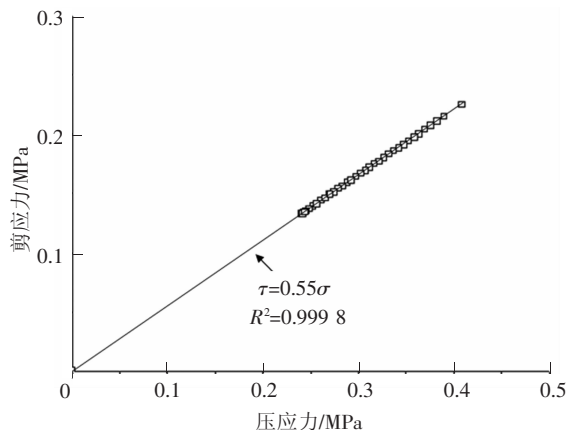


图 12 极大加载位移时接缝处剪应力 - 压应力关系

5 结 论

- 1) 试验得到了无浆砌块反复双剪试验滞回曲线,并研究了该滞回曲线特点. 由于附加弯矩的影响,该力 - 位移曲线表现出“捏缩特性”.
- 2) 摩尔 - 库仑准则可以用来描述无浆砌体的剪切失效,砌体剪切摩擦系数随正压力的增加而增大,随加载幅值的增加而减小.
- 3) 利用有限元软件对试验进行仿真. 结果表明尽管加载前后接缝处存在应力集中现象,但应力均值保持输入值不变,同时该模型可以有效地对反复加载及摩尔库仑摩擦进行仿真.

参考文献:

- [1] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [2] 杨伟, 欧进萍. 抗震结构中填充墙倒塌数值模拟与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(6): 16 - 19.
- [3] ZHAO B, TAUCER F, ROSSETTO T. Field investigation on the performance of building structures during the 12 May 2008 Wenchuan earthquake in China[J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1707 - 1723.
- [4] UZOEGBO H C, SENTHIVEL R, NGOWI J V. Loading capacity of dry-stack masonry walls[J]. The Masonry Society Journal, 2007, 25(1): 41 - 52.
- [5] YAMAGUCHI K, MATSUFUJI Y, KOYAMA T. A new structural system; friction-resistant dry-masonry [J]. Building Research & Information, 2007, 35(6): 616 - 628.
- [6] BANSAL D. Interlocking dry stacked masonry [C]// Proceedings of the Eight International Masonry Conference. Dresden, German; [s. n.], 2010: 1605 - 1614.
- [7] European Committee for Standardization. prEN 1052-3 methods of test for masonry [S]. Brussel: European Committee for Standardization, 2002.
- [8] 刘立鹏, 唐岱新. 无筋砌体材料本构模型述评[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(9): 1256 - 1259.
- [9] SYRMAKEZIS C A, ASTERIS P G. Masonry failure criterion under biaxial stress state[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(1): 58 - 64.
- [10] 骆万康, 朱希诚. 砌体抗剪强度研究的回顾与新的计算方法[J]. 重庆建筑大学学报, 1995, 17(4): 41 - 49.
- [11] LOURENCO P B, ROTS J G. Multisurface interface model for analysis of masonry structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(7): 660 - 668.

(编辑 赵丽莹)