

FRP 与砖界面粘结性能的数值分析

黄奕辉¹, 罗才松², 黄田良¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 利用有限元软件 ABAQUS 建立纤维复合材料(FRP)-砖界面分析模型,模拟其粘结应力分布,加载端荷载-位移曲线及界面应力的传递过程,并与试验结果进行对比分析. 结果表明:数值模拟结果与试验结果吻合较好,采用的 FRP-砖界面计算模型具有可行性;粘结承载力随着 FRP 与砖粘结长度的增加而增加,当粘结长度达到某一定值后,粘结承载力基本不增长,此时增加粘结长度可改善试件的延性,增加试件的极限位移.

关键词: 纤维复合材料; 砖; 界面; 数值分析

中图分类号: TU 398 **文献标志码:** A

纤维复合材料(FRP)与砌体之间的界面粘结性能对 FRP 加固砌体结构起着至关重要的作用^[1-5],而粘结强度是其决定性因素. FRP-砖的界面粘结性能是两种材料共同工作的关键,其发生的剥离破坏属于界面破坏问题,牵涉到复杂的几何非线性、材料非线性、裂缝扩张及断裂等力学行为,很难直接量测界面行为. 在试验方面,很难通过试验方法观测界面下砖内部微裂缝的发生及发展过程,进而很难对界面剥离破坏进行研究和机理讨论;在理论方面,界面非线性行为和砖材料的离散性导致无法获得理想的解析解^[4]. 为了更深层次地了解 FRP 与砖之间的粘结应力分布规律,并解释其内在机理,本文运用通用有限元软件 ABAQUS 分析模拟 FRP-砖界面粘结性能.

1 复合材料数值分析方法

基于 ABAQUS 的复合材料模型建模是使用内聚力模型模拟裂纹的产生和扩展,在预计产生裂纹的区域加入内聚力层,即粘结层. 粘结界面应力数值分析主要有以下两种方法^[6]:1) 建立完整的结构,切割出一个薄层来模拟内聚力单元,内聚力单元与其他单元公用节点,并以此传递力和位移(图 1);2) 分别建立内聚力层和其他结构部件的实体模型,通过“tie”绑定约束,使得内聚力单元两侧的单元位移和应力协调(图 2).

上述两种方法都可以模拟复合材料粘结界面的分层失效问题. 但是,第一种方法划分网格比较复杂;第二种方法分配材料属性简单,划分网格也方便,但装配及“tie”绑定约束很繁琐. 因此,在实际建模中,应根据实际结构选取较简单的方法. 文中采用的普通烧结砖和 FRP 属于不同的单元类型,所以选用第二种方法建立 FRP-砖的界面粘结模型.

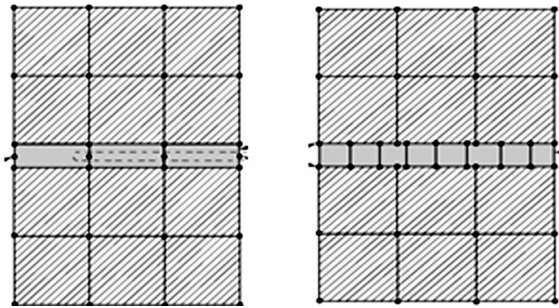


图 1 公用节点 图 2 通过“tie”绑定
Fig.1 Common node Fig.2 Binding through the “tie”

2 FRP-砖有限元模型的建立

2.1 单元类型的选择

2.1.1 砖单元类型 在仿真模拟分析中, 烧结砖采用实体单元 C3D8R. 该单元有 8 个节点, 每个节点有 3 个平动自由度, 即 UX, UY, YZ 三个方向的线位移. 采用实体单元 C3D8R 模拟烧结砖位移计算结果较精确, 不易发生剪切自锁, 且当网格发生较大变形时, 分析精度不会受到明显影响^[7].

2.1.2 纤维布单元类型 纤维布采用壳体 S4R 单元. 该单元有 4 个节点, 每个节点有沿着 X, Y, Z 轴平移的 3 个自由度. 在 ABAQUS 中, 壳体有 5 种截面特性: homogeneous (均匀的), composite (复合的), membrane (膜), surface (表面), general shell stiffness (广义壳刚度) 等^[8].

2.1.3 界面单元类型 界面层采用 COH3D8 单元. 内聚力单元理解为一种准二维单元, 看作被一个厚度隔开的两个面. 这两个面分别和其他实体单元连接. 内聚力单元只考虑面外的力, 包括法向的正应力及 XZ, YZ 两个方向的剪应力^[9-10], 如图 3 所示. 图 3 中: 1, 3 分别为上下两个连续的实体单元; 2 为内聚力单元; 4, 6 分别为内聚力单元的顶面和底面.

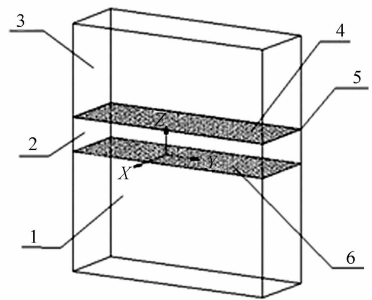


图 3 八节点三维内聚力单元
Fig. 3 Eight node three-dimensional cohesive unit

2.2 材料模型的选择

2.2.1 砖材料模型 在 ABAQUS 程序中, 砖材料需要输入砖的弹性模量 E_m , 泊松比 ν_m 等参数. 其中: $E_m = 784 f_m$, 烧结砖的强度 f_m 通过对砖进行回弹试验确定^[11]. 砖材料的输入参数: 砖的尺寸为 12.8 mm; 抗压强度为 10.035 2 GPa; 弹性模量 $0.15 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$; 泊松比为 0.15.

2.2.2 纤维布材料模型 纤维布作为一种正交异性的理想线弹性材料, 没有屈服强度, 其应力-应变关系是一条直线. 当其应力达到极限强度时, 纤维布发生破坏. 在 ABAQUS 程序中, 纤维布材料的输入参数: 计算厚度为 0.130 mm; 抗拉强度为 3.720 GPa; 弹性模量为 $235 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$; 泊松比为 0.3.

2.2.3 界面层材料模型 应用 Cohesive 单元模拟复合材料界面失效. 有两种材料模型: 一是基于连续体描述; 二是基于 Traction-Separation 描述. 文中采用基于 Traction-Separation 描述方法. 在此方法中, 给出了材料达到强度极限前的线弹性段和材料达到强度极限后的刚度软化阶段. 在定义内聚力的力学性能时, 要求解出有关内聚力模型的参数, 如最大粘结剪应力、界面粘结断裂能和特征位移、最大粘结位移等. 内聚力单元的断裂能和应力随着预定义的张力-位移曲线的不同而变化, 当应力减小为零时, 单元失效破坏.

损伤准则为 ABAQUS 计算分析提供了一个界面开始破坏时的判决依据. 当模型界面处于损伤准则的情况下, 界面开始出现裂纹直至破坏. ABAQUS 为内聚力单元设置了 6 种损伤判断: maxs damage, maxe damage, quads damage, quade damage, maxps damage, maxpe damage. 根据试件所用材料的属性, 采用 maxs damage 进行分析. 内聚力单元完全失效的裂纹扩展判据是指单元的断裂能达到临界值, 或者位移值达到最终破坏值. maxs damage 损伤准则的表达式为 $\max\{t_n/t_n^0, t_s/t_s^0, t_t/t_t^0\} = 1$. 式中: t_n^0, t_s^0, t_t^0 分别为 I 型, II 型, III 型的最大名义应力.

2.3 建立整体模型

FRP-砖的单元网格划分, 如图 4 所示. 有限元计算模型, 如图 5 所示. 图 5 中: 砖和 FRP 的几何尺寸均与试验构件一致.

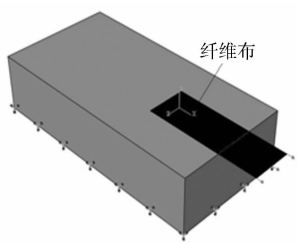
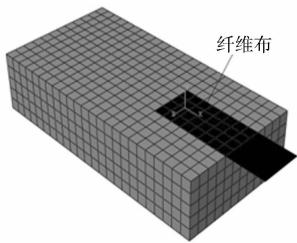


图 4 单元网格划分图

图 5 有限元计算模型

Fig. 4 Finite element mesh Fig. 5 Finite element model

3.1 粘结承载力模拟值与试验值的比较

文献^[12]进行了大量的 FRP-砖界面粘结性能

单剪试验研究, 分析了粘结长度、粘结宽度和层数、砖抗压强度、FRP 种类、不同粘结树脂等参数对界面粘结性能的影响. 粘结承载力模拟值与试验值的对比, 如表 1 所示. 表 1 中: l 为粘结长度; p 为砖的平均

强度; n 为粘结层数; F_r 为承载力的试验值; F_{th} 为承载力的模拟值; η 为误差. 所有试件的粘结宽度均为 40 mm. 由表 1 可知:模拟得到的粘结承载力与试验值较吻合,只有个别试件的误差相对较大,但也在可接受的范围内. 误差产生的主要原因:试件制作过程的不确定性和试验加载过程中加载速度的不一致性;砖的离散型和非均质性造成的误差直接影响砖参数的确定,再次产生误差.

表 1 模拟值与试验值对比

Tab. 1 Comparison between experimental results and simulation values

试件编号	试验目的	l/mm	FRP 类型	ρ/MPa	n	F_r/kN	F_{th}/kN	$\eta/\%$
C1L4W4	粘结长度影响	40	CFRP	9.6	1	5.195 37	4.865 16	6.35
C1L6W4		60		11.8		9.813 43	8.827 92	10.04
C1L8W4		80		12.7		11.609 37	9.833 77	15.29
C1L10W4		100		13.0		10.166 20	9.429 52	7.25
C2L8W4	粘结层数影响	80	CFRP	12.0	2	12.314 90	12.115 40	1.62
G1L4W4		100		16.3		9.813 50	10.684 60	8.88
C2L10W4	砖强度的影响	40	GFRP	11.8	1	5.708 50	6.835 40	19.70
				13.6		8.830 00	8.065 29	8.66
				27.2		9.086 50	8.752 33	3.68
				11.9		8.573 40	8.996 70	4.94
		60		16.7		9.642 40	10.378 40	7.63
G1L6W4				27.5		11.630 70	11.340 10	2.49

3.2 粘结面上的应力分布规律

C1L4,C1L6,C1L8 达到粘结承载力时,烧结砖、纤维布、界面层的应力分布云图,如图 6~8 所示. 由图 6~8 可知:在达到粘结承载力时,界面粘结剪应力主要存在于距加载端 20 mm 以上的部分,沿粘结界面长度方向先慢慢增大,而后逐渐减小,且随着粘结长度的增加,粘结剪应力沿粘结界面长度方向逐渐减小的区域也相应地增加. 由于在载荷加载的后期,粘结界面靠近加载端的区域已经产生了裂纹甚至剥离,所以在加载端附近的界面剪应力很小.

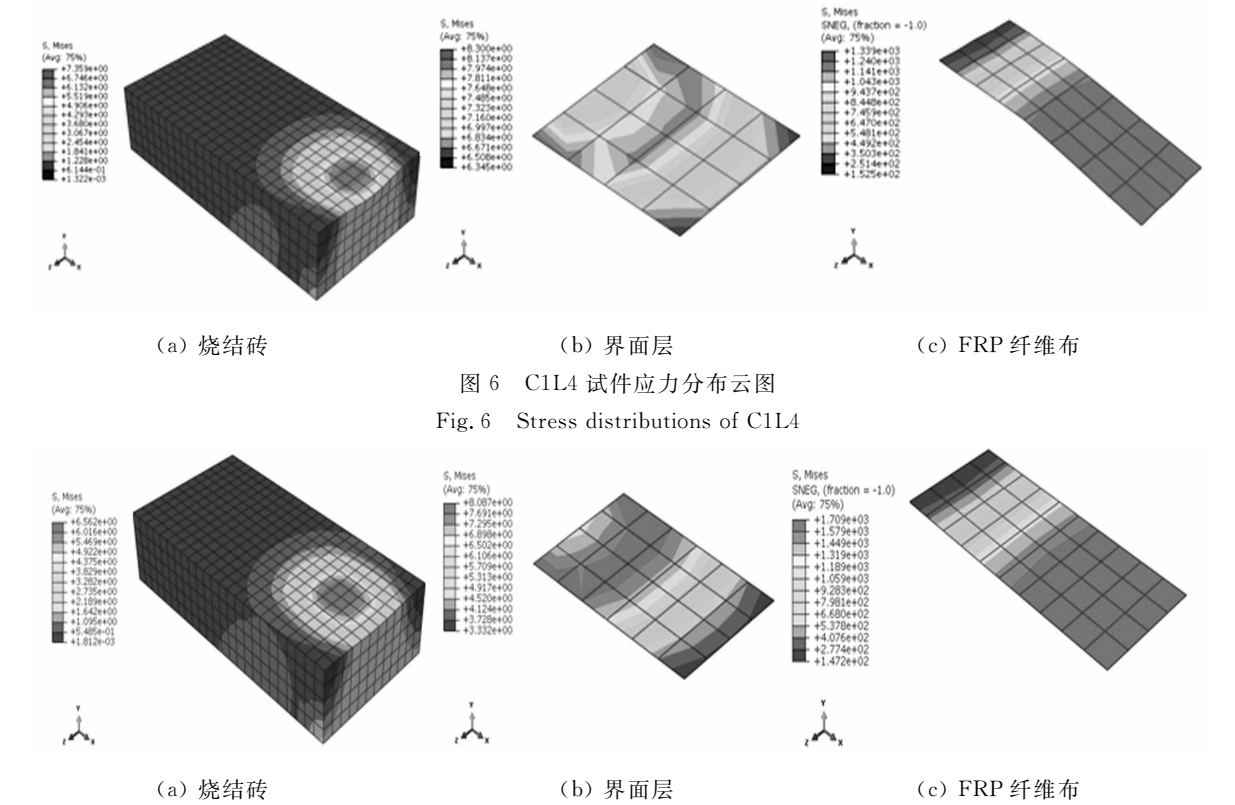


图 6 C1L4 试件应力分布云图
Fig. 6 Stress distributions of C1L4

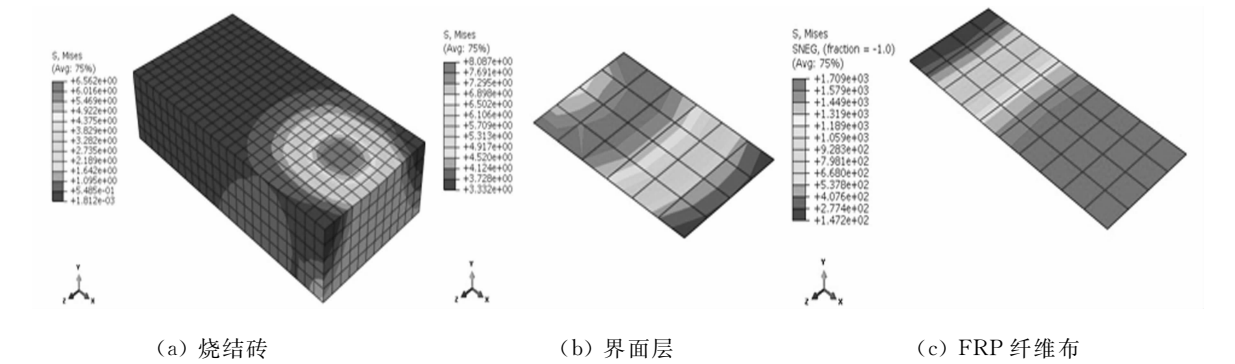


图 7 C1L6 试件应力分布云图
Fig. 7 Stress distributions of C1L6

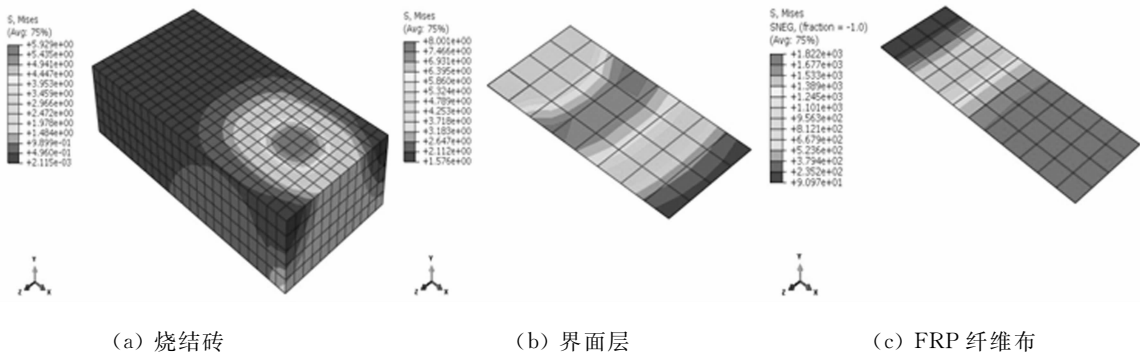


图 8 C1L8 试件应力分布云图
Fig. 8 Stress distributions of C1L8

由界面层应力分布云图还可知:界面上的粘结剪应力沿粘结层横向不是均匀分布的,在粘结剪应力沿粘结界面长度方向逐渐增加的区域,中心部分的剪应力大于边缘部分的剪应力;而在粘结剪应力沿粘结界面长度方向逐渐减小的区域,中心部分的剪应力明显小于边缘部分的剪应力,粘结剪应力大概呈凸向加载端的圆弧形分布. 沿着粘结界面长度方向推进,横向剪应力的部分更趋复杂.

3.3 载荷-位移曲线的比较

在 ABAQUS 的可视化模块中对分析结果进行处理,可得加载端 FRP 中点位置的荷载(F)-位移(D)关系曲线,如图 9 所示. 由图 9 可知:基于 ABAQUS 仿真模拟得到的载荷-位移曲线能够与试验测得的载荷-位移曲线很好地吻合;粘结承载力随着 FRP 与砖粘结长度的增加而增加,当粘结长度达到某一定值后,粘结承载力基本不增长,此时增加粘结长度可以改善试件的延性,增加试件的极限位移.

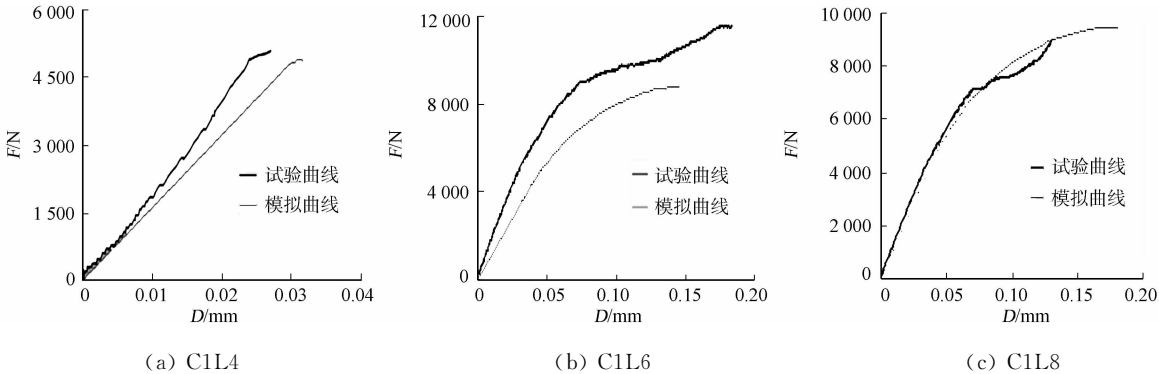


图 9 数值模拟与试验曲线对比
Fig. 9 Curves of numerical simulation and experiment

3.4 粘结剪应力传递过程

试件从加载到剥离破坏各阶段,界面上粘结剪应力的传递过程,如图 10 所示. 由图 10 可知:随着载荷的增加,粘结剪应力逐渐沿粘结长度方向传递;界面经历弹性阶段、弹性-塑性阶段、弹性-塑性-剥离阶段,并最终发生剥离破坏. 以试件 C1L8 为例,粘结剪应力传递过程有以下 5 个阶段.

1) 载荷为 1.204 kN,即荷载加载的早期阶段,粘结应力主要集中在加载端附件区域. 2) 载荷为 2.100~5.460 kN 时,随着载荷的增加,靠近加载端的界面粘结应力相应地变大,有效粘结区域也不断扩张,界面处于弹性阶段. 3) 载荷为 7.700~8.930 kN 时,加载端处界面粘结应力达到极限粘结强度,该处粘结界面进入了软化阶段,粘结应力逐渐变小,有效粘结区域继续向前推移,粘结应力的峰值也朝着背离加载端方向移动,界面处于弹性-塑性阶段. 4) 载荷为 9.430~

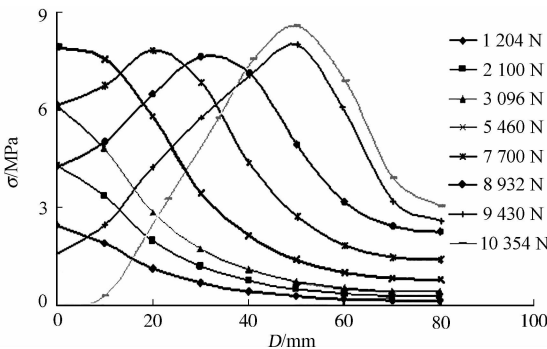


图 10 C1L8 中 ABAQUS 模拟的应力传递过程图
Fig. 10 ABAQUS simulation of stress transfer process in C1L8

10.354 kN 时,由于经历前面的几个阶段后,加载端附近已经产生了微小裂纹,继续加载,加载端附近界面粘结应力急剧较小,界面下的微小裂纹也逐渐发展为一条宏观剥离裂纹.当载荷增加非常缓慢的时,这个宏观剥离裂纹逐渐沿粘结长度方向发展,此时有效粘结应力分布区域的长度就是有效粘结长度,界面处于弹性-塑性-剥离状态.5) 载荷保持为 10.354 kN,剥离继续发展,有效粘结区域将逐步向自由端移动,直至试件发生剥离破坏.

4 结 论

- 1) 基于 ABAQUS 建立的 FRP-砖界面有限元分析模型,成功模拟了 FRP-砖界面粘结应力分布、加载端荷载-位移曲线和粘结应力的传递过程,并与试验结果进行对比,吻合较好.
- 2) 粘结承载力随着 FRP 与砖粘结长度的增加而增加,当粘结长度达到某一定值后,粘结承载力基本不再增长.由荷载-位移曲线可知:此时增加粘结长度可以改善试件的延性,增加试件的极限位移.

参考文献:

[1] MICHAEL L A,ALAA E E,CHENG J J R,et al. Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs[J]. Journal of Composites for Construction,2001,5(2):76-84.

[2] 王全凤,柴振岭,黄奕辉,等. GFRP 复合材料加固砖墙抗震抗剪承载力[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(2):186-190.

[3] 王欣. 纤维复合材料加固砌体墙片的抗震试验研究[D]. 上海:同济大学,2003:10-50.

[4] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京:清华大学,2004:1-79.

[5] 王全凤,陈凡,黄奕辉,等. GFRP 加固带壁柱砖墙平面外受荷性能试验[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2007,28(2):182-187.

[6] CAMANHO P P,DAVILA C G. Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials[J]. National Aeronautics and Space Administration,2002(6):1-37.

[7] 蒋超. 有限元加筋实体单元求解预应力混凝土梁自振频率方法[J]. 安徽建筑,2012,4(2):204-205.

[8] 张建华,丁磊. ABAQUS 基础入门与案例精通[M]. 北京:电子工业出版社,2012:6.

[9] 马东华. 基于 ABAQUS 中 Cohesive Element 对钢筋混凝土粘结性能的研究[J]. 城市建设理论研究,2012(8):7-11.

[10] 马晓峰. 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2013:2.

[11] 刘桂秋,施楚贤. 砌体弹性模量的研究[C]// 全国砌体结构与墙体材料基本理论及其工程应用学术会议. 长沙:[出版者不详],2007:122-124.

[12] 黄奕辉. FRP 与砖界面行为及其应用研究[D]. 厦门:华侨大学,2008:8-34.

Numerical Analysis of Interface Bonding between
Fiber Reinforced Polymer and Clay Brick

HUANG Yi-hui¹, LUO Cai-song², HUANG Tian-liang¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 362021, China;
2. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A numerical model is proposed to this paper to simulate the bonding stress distribution on the interface between fiber reinforced polymer (FRP) and brick based on finite element software ABAQUS. Using the numerical model, the load-displacement curve and the bonding stress distributions of FRP-brick interface are obtained, which shows the model is feasible. Bond bearing capacity increases with the increase of FRP's bond length. When the bond length reaches a certain value, bond bearing capacity does not increased, but it can improve the ductility of the specimens, and raise the limit displacement.

Keywords: fiber reinforced polymer; brick; interface; numerical analysis