

文章编号: 1001-1455(2008)03-0283-06

5 级人防口部粘钢封堵接头抗爆实验研究*

吴志平¹, 杨林德²

(1. 上海应用技术学院土木建筑与安全工程学院, 上海 200233;

2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 通过粘钢实现一典型汽车库人防口部封堵的设计方案, 并对原设计方案进行相似设计后, 对粘钢接头结构实验模型在核爆炸压力模拟器中进行模爆实验, 得到沿竖向支座钢板的位移和应变时程曲线, 并和有限元数值解进行了对比, 其结果均较吻合, 通过沿竖向支座钢板的应变分布规律得到钢板-混凝土界面之间的粘结应力; 检验了在 5 级人防爆炸冲击波作用下, 混凝土墙与钢板间粘结面承载力的可靠性; 分析了 5 级人防爆炸荷载作用下支座钢板沿竖向应力的分布规律, 为确定混凝土墙与钢板之间粘结应力的计算方法提供了参考。

关键词: 固体力学; 界面应力分布; 爆炸荷载; 粘钢; 粘结应力; 人防口部

中图分类号: O342; TU311

国标学科代码: 130 · 1565

文献标志码: A

为了探讨人防口部粘钢加固技术的可行性^[1], 本文中采用此技术进行了模爆实验, 以期得到 5 级人防口部粘钢封堵接头在爆炸荷载作用下, 支座钢板-粘接胶界面应力的分布规律。

1 实验模型

实验模型由一块水平钢板和两块竖向支座钢板组成的承载构件, 通过结构胶和混凝土墙粘接连接, 其中水平钢板长 0.8 m、宽 0.3 m、厚 10 mm, 竖向支座钢板均长 0.8 m、高 0.18 m、厚 10 mm, 混凝土墙均长 0.8 m、高 0.8 m、厚 0.1 m。模型放入半径为 0.6 m 的爆炸压力模拟器中, 模型和模拟器之间以黄沙充填, 如图 1 和图 2 所示。

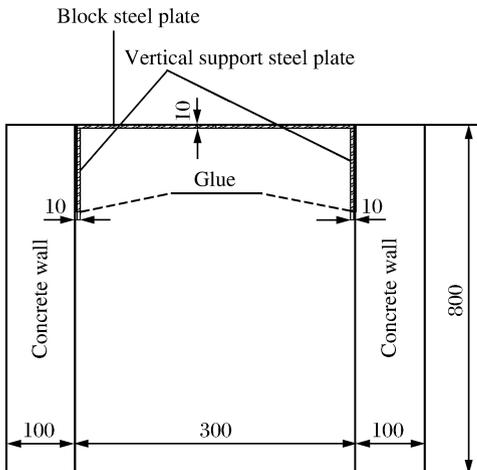


图 1 实验模型

Fig. 1 Experimental model

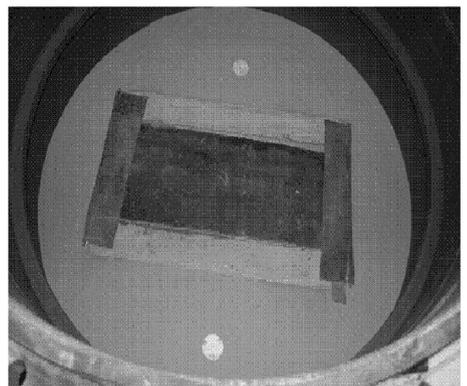


图 2 实验模爆器

Fig. 2 Experimental explosive simulator

* 收稿日期: 2006-12-07; 修回日期: 2007-03-03

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目(j51502)

作者简介: 吴志平(1968—), 男, 副教授。

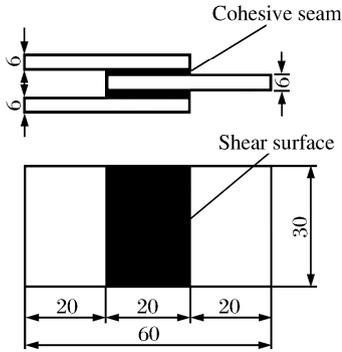


图3 试件的形状和尺寸

Fig. 3 Shape and size of the specimen

模型中的粘接胶强度实验采用双面搭接结构,试件如图3所示,试件共3个,钢板和粘结剂材料均为模型材料。粘钢压缩剪切实验结果:试件1、2、3的最大负荷分别为15.47、16.63、21.11 kN,压剪强度分别为12.89、13.86、17.59 MPa,平均压剪强度为14.78 MPa。

混凝土墙砧强度等级为C30,试块尺寸为150 mm × 150 mm × 150 mm,弹性模量为30.86 GPa,实际立方体抗压强度单块为34.4、33.7、35.4 MPa,平均为34.5 MPa;配筋采用双层双向方式,间隔100 mm,如图4所示。

试件材料细砂的物理学参数分别为:弹性模量为88.9 MPa,密度为1.392 g/cm³,干密度为1.383 g/cm³,含水率为1%,砂的应力应变关系曲线如图5所示。

2 爆炸荷载

假定爆炸荷载产生的压力能同时均匀地作用在封堵钢板上。实验中共布置了2个压力空压传感器,如图2中细砂中白色的两点,在实验中有一个通道数据异常,另一个获得了可靠的数据。依据实验结果,可得到各测点在不同的加载工况下的空气压力反应时程图。根据布置的空压传感器得到5级人防爆炸冲击波型的压力波形见图6所示。

3 测点布置

3.1 竖向钢板应变计

布置原则。量测元件拟布置在靠中间部位以避免边界效应以及其响应变化量较大的部位。

布置位置。布置位置见图7~8,相邻的两排最上部的应变计纵向间距为15 mm,其余间距为45 mm,横向间距为50 mm,量程范围为0~10⁻³。

3.2 封堵钢板位移计

观测封堵钢板位移响应的位移计的量程范围为0.01~5 mm,布置见图9。

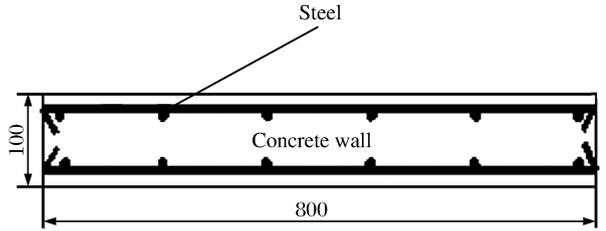


图4 混凝土墙配筋图

Fig. 4 Concrete wall with reinforcing steel

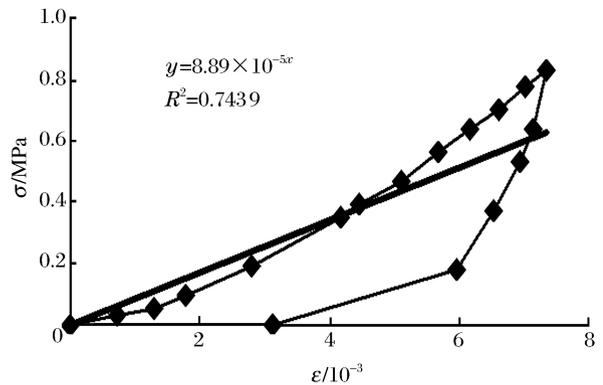


图5 砂的实测应力应变关系

Fig. 5 Experimental stress-strain relation curve of sand

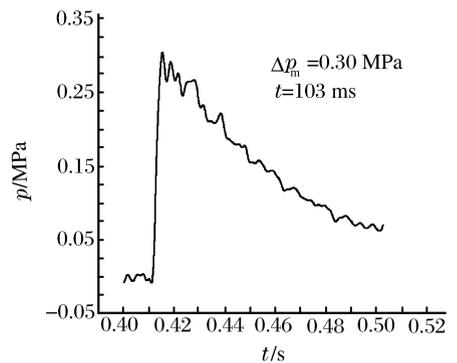


图6 冲击波荷载

Fig. 6 Impact wave load

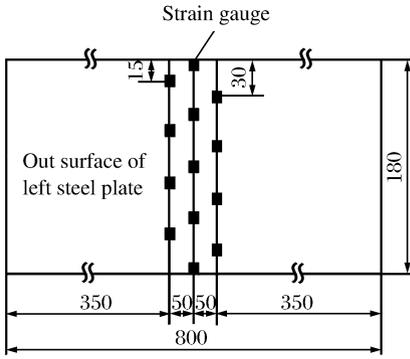


图 7 左侧竖向钢板应变计布置图

Fig. 7 The strain gauge arrangement on the left vertical steel plate

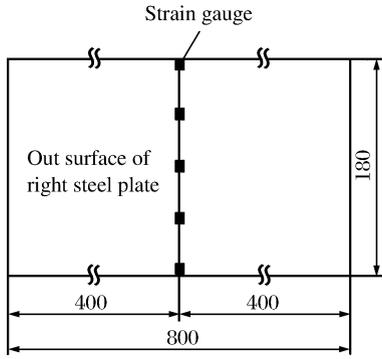


图 8 右侧竖向钢板应变计布置图

Fig. 8 The strain gauge arrangement on the right vertical steel plate

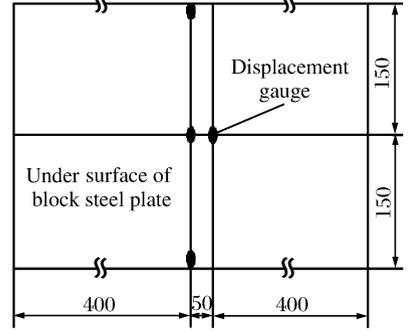


图 9 封堵钢板位移计布置图

Fig. 9 The displacement gauge arrangement on the block steel plate

3.3 数据采集系统

应具备自动采集功能,类型待定。空压传感器通道数 2 个,应变计通道数 18 个左右,位移计通道数 4 个,总计约 24 个通道。

4 实验结果

5 级人防爆炸实验结束后,将过渡段内的栅板打开后的结构模型如图 10 所示。用放大镜进行了观察,发现沿混凝土-粘结胶界面有一条细小的裂缝,长约 30 cm,在图示数字 1~6 之间。经过对混凝土表面凿毛后检测未见裂缝沿深度方向发展,如图 11 所示。可见粘钢接头结构在 5 级人防爆炸冲击波下可安全使用。

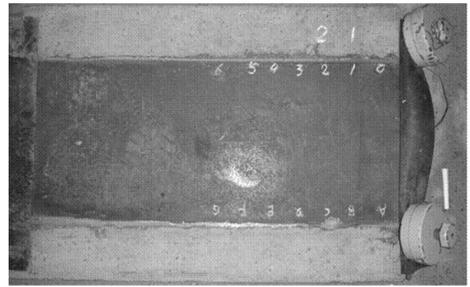


图 10 实验后的粘钢接头结构

Fig. 10 The structure of steel reinforced plate after experiment

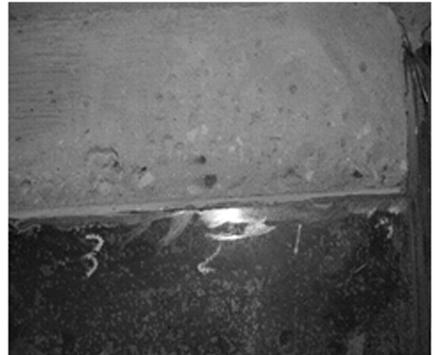
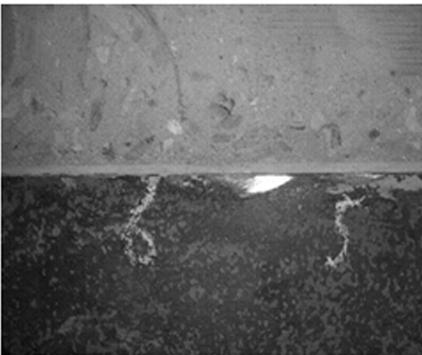


图 11 凿毛后混凝土表面

Fig. 11 Concrete surfaces after treatment

4.1 封堵钢板位移响应

封堵钢板跨中和支座位移响应分别如图 12~13 所示, d 为竖向位移。实验跨中的最大位移发生在 0.419 s,最大峰值位移为 4.37 mm,有限元计算结果跨中的最大位移发生在 0.416 s,最大峰值位移为 3.70 mm,达到峰值后实验值比有限元值衰减速度快。实验支座的最大位移发生在 0.416 s,最大峰值位移为 1.90 mm,有限元计算结果支座的最大位移发生在 0.425 s,最大峰值位移为 1.59 mm,达到峰值后实验值比有限元值衰减速度快。

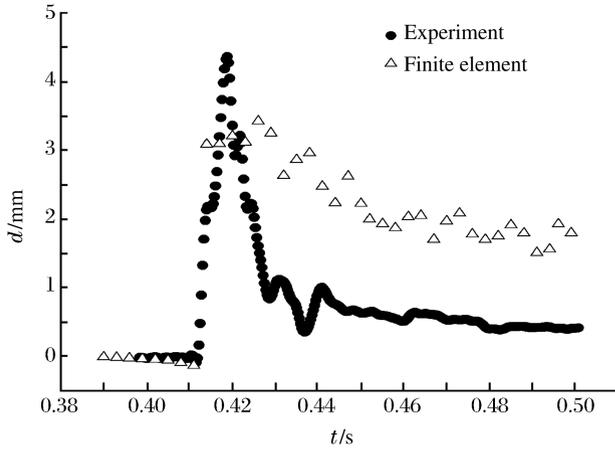


图 12 封堵钢板跨中位移时程曲线

Fig. 12 The displacement-time curves of the medium node of block steel plate

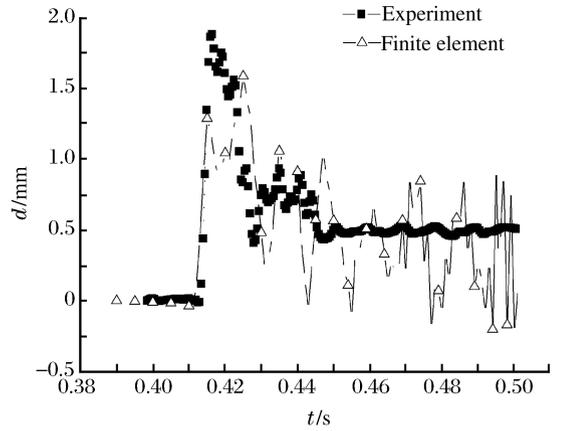


图 13 封堵钢板支座位移时程曲线

Fig. 13 The displacement-time curves of the abutment node of block steel plate

4.2 竖向钢板应变响应

沿竖向钢板布置的各测点的应变时程曲线分别如图 14~15 所示, l 为测点离上端的距离。实验最大应变峰值在竖向钢板的上端, 左侧钢板最大应变发生在 0.415 s, 为 404×10^{-6} , 右侧钢板最大应变发生在 0.415 s, 为 512×10^{-6} , 有限元计算结果最大应变发生在 0.415 s, 为 348×10^{-6} 。

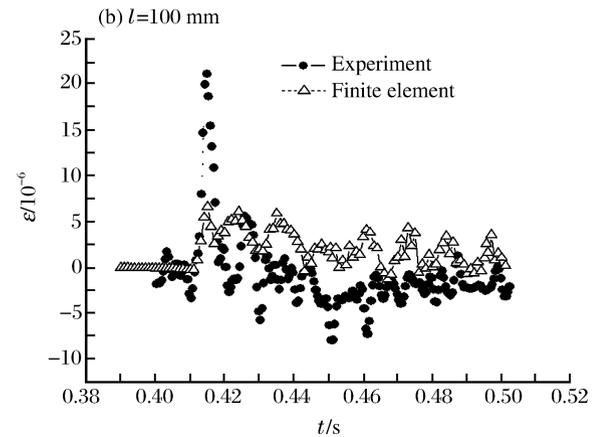
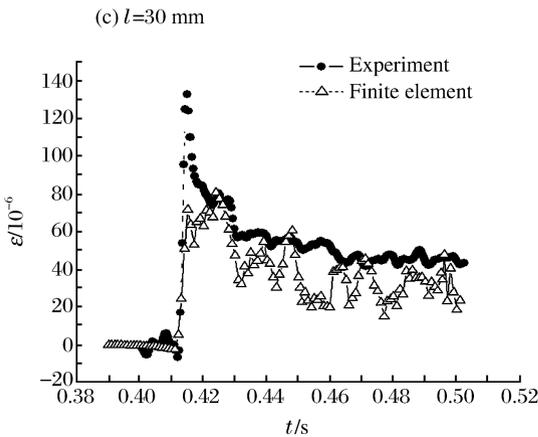
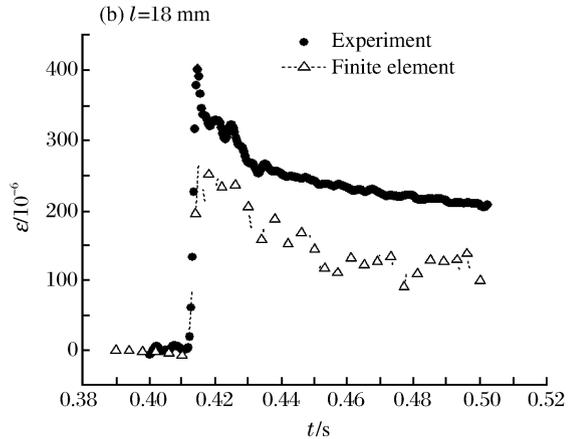
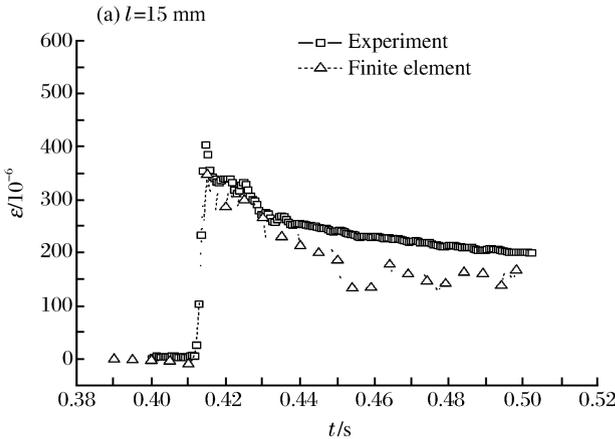


图 14 左侧竖向钢板应变时程曲线

Fig. 14 The strain-time curves of the left vertical steel plate

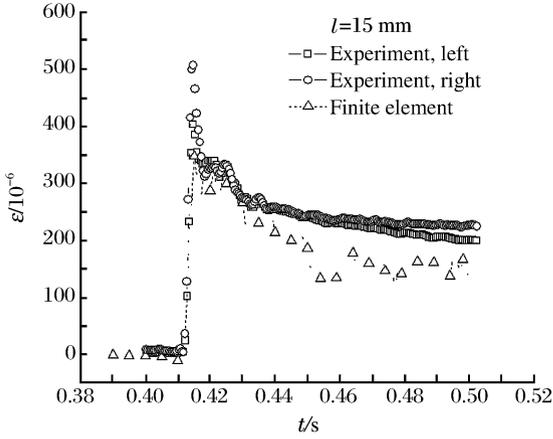


图 15 右侧竖向钢板应变时程曲线
Fig. 15 The strain-time curves of the right vertical steel plate

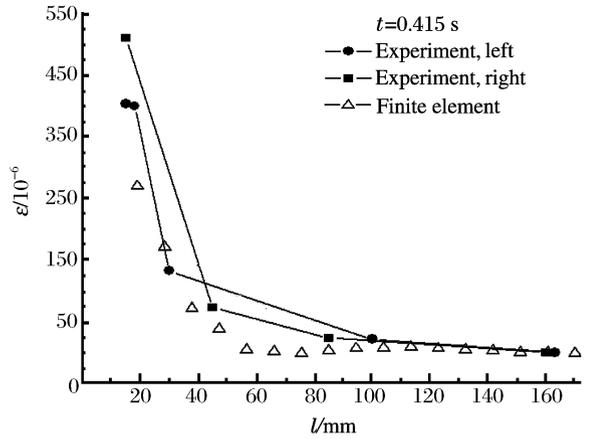


图 16 沿竖向钢板的最大应变分布
Fig. 16 The maximum strain distribution along the vertical steel plate

5 结果分析

5.1 竖向钢板最大应变分布

根据前面分析,竖向钢板最大应变发生在 0.415 s,因此可得到 0.415 s 时沿竖向钢板的最大应变分布如图 16 所示。有限元计算结果最大应变为 348×10^{-6} ,左侧钢板最大应变为 404×10^{-6} ,右侧钢板最大应变为 512×10^{-6} ,有限元结果比左侧实验值偏小 16%,比右侧实验值偏小 47%,其他离上端距离较远位置则吻合较好。

5.2 竖向钢板-粘接胶界面剪应力分布

如图 17 所示,对于沿钢板竖向截取的任意一微段 Δx ,根据截面的平衡关系式可以得到

$$\tau b dx + \sigma bt = (\sigma + d\sigma)bt \tag{1}$$

$$\sigma = E\epsilon \tag{2}$$

式中: τ 为钢板-粘接胶界面剪应力, σ 为钢板竖向正应力, E 为钢板弹性模量, ϵ 为钢板竖向正应变, t 为钢板厚度, b 为钢板宽度。

由式(1)~(2)可得

$$\tau = tE \frac{d\epsilon}{dx} \tag{3}$$

由式(3)可求得钢板-粘接胶界面的剪应力分布如图 18 所示。

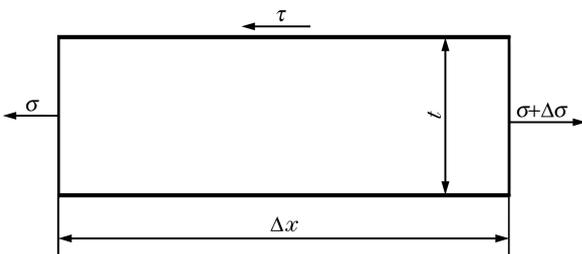


图 17 任意微分段的应力分布
Fig. 17 The stress distribution of arbitrarily differential calculus segment

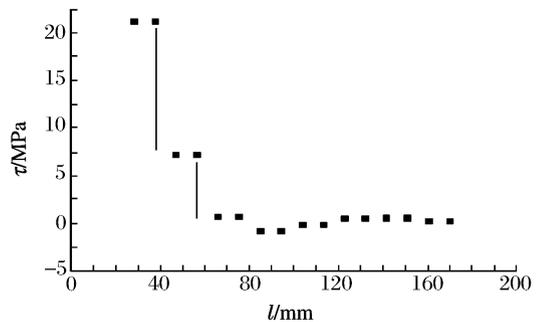


图 18 钢板-粘接胶界面的剪应力分布
Fig. 18 The shear-stress distribution along the surface of steel plate and glue

6 结 论

(1)通过对原设计方案进行相似设计得到了实验模型后,对粘钢接头结构实验模型在核爆炸压力模拟器中进行模爆实验,得到沿竖向支座钢板的位移和应变时程曲线,并和有限元数值解进行了对比,结果均较吻合。

(2)在爆炸压力模拟器中对粘钢接头结构进行了现场实验,验证了粘钢接头结构在 5 级人防爆炸冲击波下可安全使用,由此证明了粘钢技术用于平战功能转换的可能性和优越性。

(3)竖向钢板最大应变分布的实验与有限元分析的比较研究表明,粘接界面由于钢板端部形状变化而在钢板端部附近产生的应力集中现象,是造成粘接裂缝的主要原因。

参考文献:

- [1] 吴志平,杨林德.人防口部粘钢封堵接头抗爆试验研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(3):424-429.
WU Zhi-ping, YANG Lin-de. Anti-blast experimental study on the gateway of civil defence structure strengthened by steel plate[J]. Chinese Journal of Underground Spase and Engineering, 2007,3(3):424-429.

Anti-blast capabilities of the gateway of a grade-5 civil defense structure closed up by bonded steel plates

WU Zhi-ping^{1*}, YANG Lin-de²

(1. School of Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200233, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The study aimed to explore the gateway design plan for civil defense structure of a typical garage closed up by bonded steel plates. According to this design plan, an experimental model for the steel plate-to-concrete bonded joint structure was proposed to perform an on-site test in an imitated nuclear blast pressure container. The displacement-time curves and the strain-time curves along the vertical supporting steel plates were obtained, which are in agreement with the numerical results by the finite element method. And the bond stresses on the interfaces between the steel plates and the concrete were achieved from the strain distributions along the vertical supporting steel plates. The study examined the supporting reliability of the contact surface between the concrete wall and the steel plate, analyzed the bond-stress distribution along the vertical supporting steel plate subjected to the grade-5 civil defense blast shock wave. The researched results provide a reference to calculate bond stresses between concrete walls and steel plates.

Key words: solid mechanics; interface stress distribution; explosive load; steel reinforced plate; cohesive stress; gateway of defense structure

* Corresponding author: WU Zhi-ping
E-mail address: wuzp2003@yahoo.com.cn