【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

不同边界条件下玻璃桥面板承载力试验研究

唐 鹏^{1,2,3}, 宫 赛^{1,2,3}, 梁 鹏^{1,3}, 程 高^{1,3}, 苏巨峰^{1,3}

1) 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2) 南阳理工学院, 河南南阳 473004;

3) 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西西安 710064

摘 要: 为研究车行玻璃桥面板结构的承载力性能, 以位移传感器测量玻璃板的变形量, 以应变计测试玻璃板外表面应变变化, 分析车轮荷载在不同边界条件和最不利荷载位置时玻璃板的破坏形态、荷载-位移曲线、安全性能及刚度要求。结果表明: 单层玻璃在两边简支玻璃板的极限承载力约为四边简支玻璃板极限承载力的 53.7%; 夹层玻璃在两边简支玻璃板的极限承载力约为四边简支玻璃板极限承载力的 66.7%; 荷载作用在板中央时玻璃板的变形最大, 作用在板角时玻璃板的应力最大; 从满足结构强度要求的角度出发, 荷载作用于板角部是最不利工况; 从满足结构刚度要求的角度出发, 荷载作用于板中央是最不利工况; 在板角和板中央位置两种最不利工况下施分别加 0.8、1.0、1.2、1.5、1.8 和 2.0 倍的车轮荷载, 所得夹层玻璃板的最大应变值、最大变形值均满足规范规定值及试验结果可为车行玻璃桥面板用于实际工程提供参考。

关键词: 桥梁工程; 玻璃桥面板; 夹层玻璃; 边界条件; 轮压荷载; 承载性能

中图分类号: TU382

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.01084

Experimental study on bearing capacity of glass bridge deck under different boundary conditions

TANG Peng^{1, 2, 3}, GONG Sai^{1, 2, 3}, LIANG Peng^{1, 3},
CHENG Gao^{1, 3}, and SU Jufeng^{1, 3}

1) School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi Province, P. R. China

2) Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, Henan Province, P. R. China

3) Shaanxi Provincial Major Laboratory for Highway Bridge & Tunnel, Xi'an 710064, Shaanxi Province, P. R. China

Abstract: In order to study the bearing capacity of the vehicle glass bridge deck structure, the displacement sensor is used to measure the deformation of the glass panel, and the strain gauge is used to measure the change rule of the strain on the outer surface of the glass panel, and the failure mode, the load-displacement curve, safety performance and stiffness requirements of the glass plate under different boundary conditions and the most unfavorable load position are analyzed. The results show that the ultimate bearing capacity of a single glass plate supported on both sides is about 53.7% of that of a simple glass plate supported on four sides, and that of laminated glass plate supported on both sides is about 66.7% of that of a simple glass plate supported on four sides. The deformation of the glass plate is the largest when the load acts on the center of the plate, and the stress of the glass plate is the largest when the

Received: 2019-02-26; **Revised:** 2019-06-27; **Accepted:** 2019-09-19

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51878059); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2018JQ5219)

Corresponding author: Professor LIANG Peng. E-mail: bridgedoctor@qq.com

Citation: TANG Peng, GONG Sai, LIANG Peng, et al. Experimental study on bearing capacity of glass bridge deck under different boundary conditions [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(1): 84-90. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

load acts on the corner of the plate. From the perspective of meeting the structural strength requirements, the load acting on the corner of the plate is the most unfavorable working condition, and from the perspective of meeting the structural stiffness requirements, the load acting on the center of the plate is the most unfavorable working condition. Under the two most unfavorable conditions of plate angle and plate center position, applied 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8 and 2.0 times of wheel load, the maximum strain and deformation of laminated glass plate can meet the requirements of the code. The test results can provide a reference for the practical engineering of vehicle glass bridge plate.

Key words: bridge engineering; glass bridge deck; sandwich glass; boundary conditions; wheel load; bearing capacity

随着现代科学技术的发展及人民生活水平的提高, 建筑玻璃的功能不再局限于满足采光要求, 而要具有安全、承重、艺术装饰、调节光线和保温隔热等特性^[1]. 近年来, 玻璃桥面板以结构自重轻、强度高、透光性好和节能环保等诸多优点, 被应用于人行景观桥梁中, 并很快吸引了国内外学者、桥梁工程师和新闻媒体的关注^[2]. 但玻璃板的强度因荷载、边界条件及厚度的不同而各异, 且具有一定的离散性^[3]. 很多学者对景观区域人行玻璃桥面板进行了受力分析. 王勋等^[4]给出了四边简支板在均布荷载作用下的应力和变形解析表达式. 王元清等^[5-8]将面内受弯玻璃板等效为两边简支或固支的板梁, 指出面内受弯玻璃板的承载力与板厚和高跨比呈正相关关系. 刘强等^[9]分析夹层玻璃梁在短期及长期荷载作用下的受弯性能. 殷永炜等^[10]在均布荷载作用下, 对点支式中空和夹层玻璃的短期和长期荷载性能进行试验研究. 张杨梅等^[11-13]认为四边简支夹层玻璃在静力荷载作用下的荷载位移曲线接近于线性分布. 现阶段研究主要集中于四边简支板和单向板在均布荷载作用下的理论计算, 目前尚未见将玻璃板应用于车行桥面板中的试验研究和理论分析, 且注重荷载施加持续性的研究较少. 为研究玻璃桥面板适用车辆行驶的技术可行性, 本研究从车行桥面板受力特性的边界条件及轮压面积出发, 对车轮荷载作用在不同边界条件下3层聚乙烯醇缩丁醛 (polyvinyl butyral, PVB) 夹层玻璃板和单层玻璃板的承载力进行试验研究, 分析了车轮荷载在不同边界条件和最不利荷载位置时玻璃板的破坏形态、荷载-位移曲线、安全性能及刚度, 为实际工程提供参考.

1 试验概况

1.1 试件设计

确定单层钢化玻璃试件设计尺寸为 120 cm ×

120 cm, 厚度为 12 mm, 具体参数如表 1. 玻璃板试件根据主流车型车重统计, 载重一般小于 30 kN, 即单轮最大轮重为 7.5 kN. 轮胎与地面的接触面呈椭圆形分布, 为便于计算, 按矩形简化处理, 接触面积与汽车总质量和轮胎宽度均呈正比.

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

序号	类型	规格	编号	数量/块
1	夹层玻璃	12 mm 钢化玻璃 + 1.56 mm PVB + 12 mm 钢化玻璃 + 1.56 mm PVB + 12 mm 钢化玻璃	JG001 ~ JG0016	16
2	单层玻璃	12 mm 钢化玻璃 (与夹层玻璃同批次)	DJ001 ~ DJ008	8

1.2 试验内容与方法

为分析玻璃板边界条件对玻璃板破坏形态和极限承载力的影响, 分别进行了四边简支和两边简支的玻璃板承载力试验. 试验中轮压荷载位于玻璃板中央, 轮压面积分别为 200 mm × 100 mm 和 200 mm × 200 mm, 采用橡胶垫模拟车轮作用于玻璃板. 车行桥面板用玻璃进行承载能力性能检测. 根据玻璃生产批次, 每批次按照总数的 5% 且不少于 5 块随机抽样, 进行正常使用承载能力检测 (非破坏试验). 在上述抽样中, 每批次随机选取 3 块玻璃, 进行极限承载能力检测 (破坏试验). 共选取 8 块夹层玻璃, 其中, 3 块用于极限承载力破坏性试验, 5 块用于正常使用状态的非破坏性试验^[14].

轮压荷载施加采用单调分级加载, 先用荷载控制分级加至 70% 预估极限荷载, 再改为位移加载. 当荷载施加到峰值的 95% 时, 停止加载, 以加载过程中的荷载最大值作为试件的极限承载力, 直至玻璃破坏.

1.3 试验设备

本研究采用陕西省桥梁结构实验室的 1 000 kN

微机控制电液伺服压力试验机进行承载力试验, 采用位移传感器测量玻璃板的变形量, 采用应变计测试玻璃板外表面应变变化, 采用日本 TDS-302 静态数据采集仪进行位移和应变数据采集测试, 采用高清摄像机记录破坏过程和破坏结果。

1.4 试验测点布置

分别沿玻璃板的长度和宽度方向等间距布置 4 列应变片, 单层玻璃测点布置如图 1, 试验温度为 25 ℃. 夹层玻璃的位移和应变测点布置与单层玻璃相同。

图 1 单层玻璃测点布置 (单位: mm)

Fig. 1 Survey point arrangement of single layer (unit: mm)

2 试验结果与分析

2.1 四边简支玻璃板

荷载位于板中央, 试验组包括 4 块夹层玻璃和 1 块单层玻璃。其中, 夹层玻璃试件编号分别为 JG001、JG002、JG003 和 JG008, 单层玻璃试件编号为 DG001。夹层玻璃及单层玻璃的受力及破坏形态分别如图 2 和图 3。由图 2 可知, 夹层玻璃试件达到极限荷载后, 出现脆性破坏, 受力处出现细小裂纹, 最下层玻璃瞬间破坏, 地面上仅有数片碎小玻璃渣, 但直径均小于 1 cm, 其余部位呈现大面积网状裂纹。单层玻璃试件达到极限荷载后, 伴随

“啪”的响声, 呈脆性破坏, 声响明显较夹层玻璃大, 玻璃板从开裂到破碎在 1/24 s 内完成, 玻璃破碎后大部分碎块呈立方体状, 长宽尺寸约为 2 ~ 5 cm。

图 2 四边简支夹层玻璃破坏形态

Fig. 2 (Color online) Laminated glass failure form supported on four sides

图 3 四边简支单层玻璃破坏形态

Fig. 3 (Color online) Single layer glass failure form supported on four sides

取玻璃板破坏前的荷载作为结构的极限承载力, 夹层玻璃的极限承载力分别为 49.6、58.5 和 72.1 kN, 均值为 60.1 kN, 单层玻璃的极限承载力为 21.6 kN。JG008 试件加载垫块尺寸为 200 mm × 200 mm, 极限承载力为 58.1 kN。

2.2 两边简支玻璃板

当荷载位于板中央, 两边简支玻璃板试验组包括 1 块夹层玻璃和 2 块单层玻璃。夹层玻璃板试件编号为 JG007, 单层玻璃板试件编号为 DG004 和 DG005。其中, 单层玻璃 DG004 的加载垫块尺寸为 200 mm × 100 mm, 单层玻璃 DG005 的加载垫块尺寸为 200 mm × 200 mm。各类试件的破坏形态分别如图 4 和图 5。由图 4 可知, 夹层玻璃试件 JG007 和 JG008 达到极限荷载时, 玻璃板向下弯曲变形明显, 玻璃板支承边翘起, 破坏时出现脆性破坏, 最底层玻璃发生瞬间破坏, 地面上仅有数片碎小玻璃渣, 但直径都不足 1 cm。由图 5 可知, 单层玻璃试

件 DG004 和 DG005 达到极限荷载后, 玻璃板弯曲变形明显, 玻璃板支承边翘起, 破坏时伴随“啪”的响声, 呈脆性破坏, 声响明显较夹层玻璃大, 玻璃板从开裂到破碎在 1/24 s 内完成, 玻璃破碎后大部分碎块呈立方体状, 边长尺寸约为 2~5 cm.

图 4 两边简支夹层玻璃破坏形态
Fig. 4 (Color online) Laminated glass failure form supported on two sides

图 5 两边简支单层玻璃破坏形态
Fig. 5 (Color online) Single layer glass failure form supported on two sides

图 6 给出了两边简支情况下玻璃板的荷载-位移曲线. 由图 6 可知, 夹层玻璃的极限承载力为 42.0 kN, 单层玻璃的极限承载力分别为 11.1 kN 和 11.7 kN.

2.3 试验结果分析

从极限承载力上看, 玻璃板的边界条件显著影响玻璃板的极限承载力, 不同边界条件的对比如表 2. 由表 2 可知, 对于单层玻璃, 两边简支玻璃板的极限承载力约为四边简支玻璃板极限承载力的 53.7%; 对于夹层玻璃, 两边简支玻璃板的极限承载力约为四边简支玻璃板极限承载力的 66.7%; 通过对比 100 mm×200 mm 和 200 mm×200 mm 两种加载面积下玻璃板的承载力, 发现单层玻璃和夹层玻璃的极限承载力相差不大.

图 6 荷载-位移曲线
Fig. 6 Load-displacement curve

表 2 极限承载力结果比较

Table 2 Comparison of ultimate bearing capacity				
试件编号	玻璃类型	边界条件	轮压尺寸	极限承载力/kN
DG001	单层玻璃	四边简支	100 mm × 200 mm	21.6
DG004	单层玻璃	两边简支	100 mm × 200 mm	11.1
DG005	单层玻璃	两边简支	200 mm × 200 mm	11.7
JG001	夹层玻璃	四边简支	100 mm × 200 mm	49.6
JG002	夹层玻璃	四边简支	100 mm × 200 mm	58.5
JG003	夹层玻璃	四边简支	100 mm × 200 mm	72.1
JG007	夹层玻璃	两边简支	100 mm × 200 mm	42.0
JG008	夹层玻璃	四边简支	200 mm × 200 mm	58.1

3 结构受力验证性试验

3.1 车轮荷载

通过多组轮压荷载作用分析夹层玻璃板的承载力. 试验中轮压接触面尺寸为 100 mm×200 mm, 玻璃板的边界条件为四边简支. 从满足结构强度要

求的角度出发, 荷载作用于板角部是最不利工况; 从满足结构刚度要求的角度出发, 荷载作用于板中央是最不利工况. 因此, 在以上两种最不利工况下, 分别以 0.8、1.0、1.2、1.5、1.8 和 2.0 倍的车轮荷载对夹层玻璃进行加载, 得到夹层玻璃板的最大应变值和最大变形量, 如表 3 和表 4. 其中, 玻璃材料的弹性模量为 8.8×10^4 MPa. 《建筑玻璃应用技术规程》(JGJ 113—2015) 中规定了长期荷载作用下玻璃强度的设计值, 12 mm 钢化玻璃在板中部强度为 42 MPa, 边缘强度为 34 MPa, 在端面强度为 30 MPa. 可见, 正常使用状态下玻璃桥面板的最大拉应力满足规范强度要求^[15-18].

表 3 荷载作用在板中央时应变、应力及最大变形量与荷载的对应关系

Table 3 Strain, stress and maximum deformation under different load acting on the center of the plate

序号	荷 载	$10^6 \times$ 最大拉应变	最大拉应力/MPa	最大变形量/mm
1	0.8 倍的车轮荷载	197	17.3	2.75
2	1.0 倍的车轮荷载	249	21.9	3.44
3	1.2 倍的车轮荷载	306	26.9	4.13
4	1.5 倍的车轮荷载	369	32.5	4.82
5	1.8 倍的车轮荷载	459	40.4	5.89
6	2.0 倍的车轮荷载	517	45.5	6.59

3.2 承载能力试验

为验证汽车轮压荷载作用下玻璃桥面板的承载力和刚度是否满足使用功能要求, 进行破坏性试验和非破坏性试验. 破坏性试验试件编号分别为 JG009、JG010 和 JG011. 采用 200 mm $\times$ 100 mm 的橡胶垫模拟车轮作用, 将荷载布置于玻璃板中央, 加载至玻璃板开裂破碎为止. 各试件的破坏形态基本一致. 试件达到极限荷载后, 均出现脆性破坏, 最底层玻璃瞬间破坏, 地面上仅有数片碎小玻璃渣, 但直径都不足 1 cm. 试验的破坏形态如图 7.

表 4 荷载作用在板角部时应变、应力及最大变形量与荷载的对应关系

Table 4 Strain, stress and maximum deformation under different load acting on the corner of the plate

序号	荷 载	$10^6 \times$ 最大拉应变	最大拉应力/MPa	最大变形量/mm
1	0.8 倍的车轮荷载	221	19.5	1.62
2	1.0 倍的车轮荷载	312	27.5	1.89
3	1.2 倍的车轮荷载	416	36.6	2.30
4	1.5 倍的车轮荷载	493	43.4	2.71
5	1.8 倍的车轮荷载	603	53.1	3.31
6	2.0 倍的车轮荷载	658	57.9	3.57

图 7 试验破坏形态

Fig. 7 (Color online) Test failure form

3.3 试验结果分析

实测的荷载-板中央挠度曲线如图 8. 玻璃板在达到极限荷载前, 荷载与板中央挠度基本呈线性变化. 玻璃板的极限承载力分别为 38.2、38.6 和 43.7 kN, 达到极限承载力时对应的板中央挠度分别为 10.41、10.83 和 12.54 mm. 令玻璃板的极限承载力与汽车的轮压荷载之比为结构的安全系数, 可算得各玻璃板的安全系数分别为 5.09、5.14 和 5.82, 均大于 5, 可见, 玻璃桥面板能够满足结构承重的要求.

非破坏试验是剔除非弹性变形, 得到玻璃桥面板轮压荷载为 7.5 kN 时的板中央挠度, 从而评价桥面板的刚度是否满足相关规范要求. 根据试验结

图8 荷载-板中央挠度曲线

Fig.8 Load-plate center deflection curve

果, 5个玻璃板达到7.5 kN时对应的板中央挠度值分别为1.695、1.775、2.241、1.824和2.145 mm。由于玻璃板在轮压荷载作用下板中央挠度值相对较小, 实测挠度受支承方式和结构偏心等因素影响, 试验值具有一定的离散性, 按照最不利原则取最大挠度值进行结构刚度的评价。在轮压荷载为7.5 kN时, 结构板中央最大变形量为2.241 mm, 约为板宽边长度的1/446, 小于《玻璃幕墙工程技术规范》(JTJ 102—2003)规定的1/200, 能够满足正常使用状态下玻璃板的刚度要求。

4 结 论

综上所述可知:

1) 单层玻璃破坏前, 玻璃板4个角向上明显翘起, 但未见有裂纹或可见损伤。破坏过程非常迅速, 破坏过程在1/24 s以内完成, 玻璃瞬间开裂, 裂纹遍布整个板面, 并迅速向四周喷射。破坏后, 玻璃板整体破碎严重, 玻璃碎块基本保持为钝角, 大大减少人员伤害程度。夹层玻璃破坏前, 玻璃板4个角向上微微翘起, 但未见有裂纹或可见损伤。破坏过程非常迅速, 最底层玻璃板瞬间开裂, 裂纹遍布整块玻璃, 但破坏时未有玻璃碎片飞出, 仅有细微玻璃碎渣脱落。

2) 单块玻璃板受支承条件和轮压作用位置影响显著, 两边简支玻璃板极限承载力约为四边简支玻璃板的一半。

3) 夹层玻璃板受边界条件和轮压作用位置影响显著, 两边简支玻璃板的极限承载力约为四边简支玻璃板极限承载力的66.7%。轮压荷载作用于板

中时玻璃板变形最大, 轮压荷载作用于板角时玻璃板应力最大。

4) 根据随机抽取的玻璃板受压试验, 玻璃板的极限承载力分别为38.2、38.6和43.7 kN。玻璃板的结构安全系数大于5, 玻璃桥面板能够满足结构承重的要求。正常使用状态下, 即汽车车轮荷载为7.5 kN时, 荷载作用在玻璃板中央产生最大变形量2.241 mm, 与玻璃宽度比为1/446, 能够满足结构刚度的要求。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878059); 陕西省自然科学基金资助项目(2018JQ5219)

作者简介: 唐 鹏(1987—), 长安大学博士研究生, 研究方向: 钢桥与组合结构桥梁。E-mail: 381543326@qq.com

引 文: 唐 鹏, 宫 赛, 梁 鹏, 等. 不同边界条件下玻璃桥面板承载力试验研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(1): 84-90.

参考文献 / References:

- [1] JGJ 102—2003 玻璃幕墙工程技术规范[S].
JGJ 102—2003 Glass curtain wall engineering technical specification [S]. (in Chinese)
- [2] ASIK M Z, TEZCAN S. A mathematical model for the behavior of laminated glass beams [J]. Computers & Structures, 2005, 83(21/22): 1742-1753.
- [3] SHAO Xiao. Review on studies on mechanical properties of SGP [J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2015, 4(3): 143-150.
- [4] 王 勋, 张其林, 陶志雄, 等. 四边简支夹层玻璃承载性能理论和试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(2): 173-175.
WANG Xun, ZHANG Qilin, TAO Zhixiong, et al. Theoretical and experimental study on bearing capacity of four-sided simply supported laminated glass [J]. Building Structure, 2012, 42(2): 173-175. (in Chinese)
- [5] 王元清, 张恒秋, 石永久. 玻璃承重结构的设计计算方法分析[J]. 建筑科学, 2005, 21(6): 26-30.
WANG Yuanqing, ZHANG Hengqiu, SHI Yongjiu. Analysis of design calculation method for glass load-bearing structure [J]. Building Science, 2005, 21(6): 26-30. (in Chinese)
- [6] 王元清, 石永久, 张恒秋. 玻璃承重结构的工程应用及其设计分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(2): 6-10.
WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, ZHANG Hengqiu. Engineering application and design analysis of glass load-bearing structure [J]. Industrial Construction, 2005,

- 35(2): 6-10. (in Chinese)
- [7] 王元清, 张恒秋, 石永久. 面内受弯玻璃板的承载及稳定性试验研究[J]. 清华大学学报自然科学版, 2006, 46(6): 773-776.
- WANG Yuanqing, ZHANG Hengqiu, SHI Yongjiu. Experimental study on bearing and stability of in-plane curved glass sheets [J]. Journal of Tsinghua University Natural Science, 2006, 46(6): 773-776. (in Chinese)
- [8] 王元清, 张恒秋, 石永久. 面内受弯玻璃板承载性能的有限元分析[J]. 建筑结构, 2008, 38(2): 120-122.
- WANG Yuanqing, ZHANG Hengqiu, SHI Yongjiu. Finite element analysis of bearing performance of in-plane curved glass sheets [J]. Building Structure, 2008, 38(2): 120-122. (in Chinese)
- [9] 刘 强, 黄小坤, 韩伟涛, 等. 夹层玻璃梁受弯性能研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(5): 44-49.
- LIU Qiang, HUANG Xiaokun, HAN Weitao, et al. Study on the bending behavior of laminated glass beams [J]. Building Science, 2018, 34(5): 44-49. (in Chinese)
- [10] 殷永伟, 张其林, 黄庆文. 点支式中空和夹层玻璃承载性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 93-98.
- YIN Yongwei, ZHANG Qilin, HUANG Qingwen. Experimental study on bearing properties of point-supported hollow and laminated glass [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 93-98. (in Chinese)
- [11] 张杨梅, 王星尔, 杨 建. 多层 SGP 夹层玻璃受刚体冲击作用的实验研究 [J]. 无机材料学报, 2018, 33(10): 1110-1117.
- ZHANG Yangmei, WANG Xing'er, YANG Jian. Experimental study on the impact of rigid body on multi-layer SGP laminated glass [J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(10): 1110-1117. (in Chinese)
- [12] 张宗恒, 张 红, 姚小虎, 等. 低速冲击下 PVB 夹层玻璃的破坏模式受验试验研究 [J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 113-119.
- ZHANG Zongheng, ZHANG Hong, YAO Xiaohu, et al. Experimental study on failure mode of PVB laminated glass under low velocity impact [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2017, 38(1): 113-119. (in Chinese)
- [13] 陶志雄, 张其林, 陈 俊, 等. 四边兼夹夹层玻璃受弯承载力试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 114-119.
- TAO Zhixiong, ZHANG Qilin, CHEN Jun, et al. Experimental study and finite element analysis of flexural bearing capacity of four-sided part-time laminated glass [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(10): 114-119. (in Chinese)
- [14] 程 高, 张正琦, 刘永健, 等. 界面状态对椭圆钢管混凝土轴压短柱影响分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2018, 35(5): 444-452.
- CHENG Gao, ZHANG Zhengqi, LIU Yongjian, et al. Analysis of influence of interface state on elliptical steel tube concrete axial compression short column [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2018, 35(5): 444-452. (in Chinese)
- [15] 陈 歆, 郑秀华, 韩 凯. 玄武岩纤维掺杂混凝土材料特性的研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2019, 36(1): 61-66.
- CHEN Xin, ZHENG Xiuhua, HAN Kai. Characterization of basalt fiber doped concrete materials [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2019, 36(1): 61-66. (in Chinese)
- [16] 朱文正. 多跨简支梁桥加固措施的抗震性能评估[J]. 深圳大学学报理工版, 2015, 32(2): 152-161.
- ZHU Wenzheng. Seismic performance evaluation of retrofit measures for multi-span simple-supported bridges [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2015, 32(2): 152-161. (in Chinese)
- [17] GB 15763.3—2009 建筑用安全玻璃第 3 部分夹层玻璃[S].
- GB 15763.3—2009 Safety glass for building part 3 Laminated glass [S]. (in Chinese)
- [18] JGJ 113—2015 建筑玻璃应用技术规程[S].
- JGJ 113—2015 Technical regulations for the application of architectural glass [S]. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】