

文章编号:1007-9629(2022)12-1300-06

短槽式石材幕墙挂装节点的受力性能

杨士萱¹, 郭子雄^{1,2,*}, 叶 勇^{1,2}, 刘 洋^{1,2}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾
重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:对短槽式石材幕墙面板与单个挂件的组合单元进行单调荷载作用下挂装强度试验,研究了槽内填胶率对节点破坏机理的影响,并基于冲切破坏模型提出了考虑石材胶黏剂影响的短槽式花岗岩石材幕墙挂装节点破坏荷载计算公式.结果表明:填胶率为 0% 时,挂件周围区域的石材沿槽弧形边发生脆性开裂,破坏特征以弯曲破坏为主;填充石材胶黏剂后,石材沿挂件边缘开裂,发生冲切破坏,且随着填胶率的增加,节点破坏荷载明显提升.

关键词:石材幕墙;槽式;石材胶黏剂;力学性能;挂装强度

中图分类号:TU317

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.12.012

Mechanical Performance of Anchorage Joints on Short Kerf Stone Curtain Wall

YANG Shixuan¹, GUO Zixiong^{1,2,*}, YE Yong^{1,2}, LIU Yang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The strength of anchorage test under monotonic load was carried out on the composite unit consists of short kerf stone curtain wall pannel and single hanger connector. The influence of the stone adhesive filling rate in the kerf on the failure mechanism of the joint was investigated. Based on the punching shear failure mode, the calculation formula of the failure load of the anchorage joints on short kerf granite curtain wall considering the influence of stone adhesive was proposed. The results show that when the filling rate is 0%, brittle cracking occurs along the arc edge of the kerf in the stone area around the connector, and the failure mode is mainly bending failure. After filling the stone adhesive, the stone cracks along the edge of the connector and forms the oblique section of the cone. The failure mode is punching shear failure. With the increase of filling rate, the failure load of the joints increases significantly.

Key words: stone curtain wall; short kerf; stone adhesive; mechanical property; strength of anchorage

石材幕墙具有细密耐久、天然质朴和装修效果高端大气等优点,被广泛应用于公共建筑、高档酒店和高端住宅的外围护结构^[1].在过去的几十年中,通过连接节点承载力试验,分析了石材面板^[2]、销钉直径^[3]、钻孔直径^[4]、销钉套管^[5]、孔内砂浆^[6]对销钉式幕墙节点处挂装强度的影响,发现节点的构造尺寸和填充材料对承载力均有影响.填充材料在一定程度上延缓了石

材的开裂破坏^[7].石材幕墙产业蓬勃发展,短槽式干挂法取代了销钉工艺,成为一种新型的施工方法^[8-9],开创了石材幕墙安装技术新纪元,并引起科研工作者的密切关注. Camposinhos^[10]发现槽式连接的试件破坏均为槽口破坏,并提出了考虑槽口尺寸和挂件相对锚入位置的半经验强度公式. Conroy 等^[11]讨论了石材面板、挂件之间的相互作用.但是槽式石材幕墙节点的

收稿日期:2021-09-26; 修订日期:2021-11-30

基金项目:福建省科技计划高校产学研合作项目(2020Y4011); 福建省自然科学基金资助项目(2021J01284)

第一作者:杨士萱(1993—),女,河北保定人,华侨大学博士生. E-mail: yangsxuan@163.com

通讯作者:郭子雄(1967—),男,福建泉州人,华侨大学教授,博士生导师,博士. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn

石材面板和干挂件之间需要填充大量的环氧树脂胶,当前槽内胶黏剂对节点破坏机理和受力性能的影响研究仍然缺乏理论基础和试验依据。

基于此,本文统筹考虑了现有文献和国内外规范^[12-13],对试件尺寸进行设计,分析了不同填胶率对短槽式花岗岩幕墙挂装节点破坏荷载的影响规律,提出考虑石材胶黏剂影响的花岗岩石材幕墙挂装节点破坏荷载计算公式,以期工程中槽式石材幕墙规范化施工提供参考建议。

1 试验

1.1 试件设计

石材采用福建省花岗岩。石材的轴压强度根据JTG E41—2005《公路工程岩石试验规程》进行测试,试件为直径50 mm、高径比1:1的圆柱体,每组5个试件,测得其平均抗压强度为118.3 MPa;Yan等^[14]经过大量试验,得到石材的抗拉强度为其单轴抗压强度的4.0%~5.0%,本文取平均值4.5%,得到石材的单轴

抗拉强度为5.32 MPa;根据GB/T 9966.12—2001《天然饰面石材试验方法》,得到石材弹性模量实测值为45 GPa,并进行四点弯曲加载试验,每组5个试件,测得石材的平均抗弯强度为14.3 MPa;根据JGJ 133—2001《金属与石材幕墙工程技术规范》,取抗弯强度的23%,计算得到石材的抗剪强度为3.28 MPa。

花岗岩面板(GCP)试件尺寸 $L \times B \times H = 300 \text{ mm} \times 270 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,在面板一侧按实际工程要求加工槽口,短槽口厚 $t = 7 \text{ mm}$,槽口处单边板厚 $t_1 = 9 \text{ mm}$,槽深 $b_0 = 20 \text{ mm}$ 。干挂件采用304不锈钢,其锚入深度 $b_s = 10 \text{ mm}$,宽度 $a_0 = 40 \text{ mm}$,厚 $t_s = 3 \text{ mm}$ 。试验中槽内石材胶黏剂选用环氧树脂胶,受力侧的填胶厚度 $\Delta = 2 \text{ mm}$ 。为保证试验操作中石材胶黏剂填胶率 β (石材胶黏剂填充深度 a (基于切口边缘)与 b_0 的百分比)的准确性,采用厚1 mm矩形有机玻璃进行位置隔离,石板槽外和挂件之间按实际工程填充3 mm橡胶垫片。每组制作4个相同试件,结果取平均值。试件示意图见图1,其参数见表1。

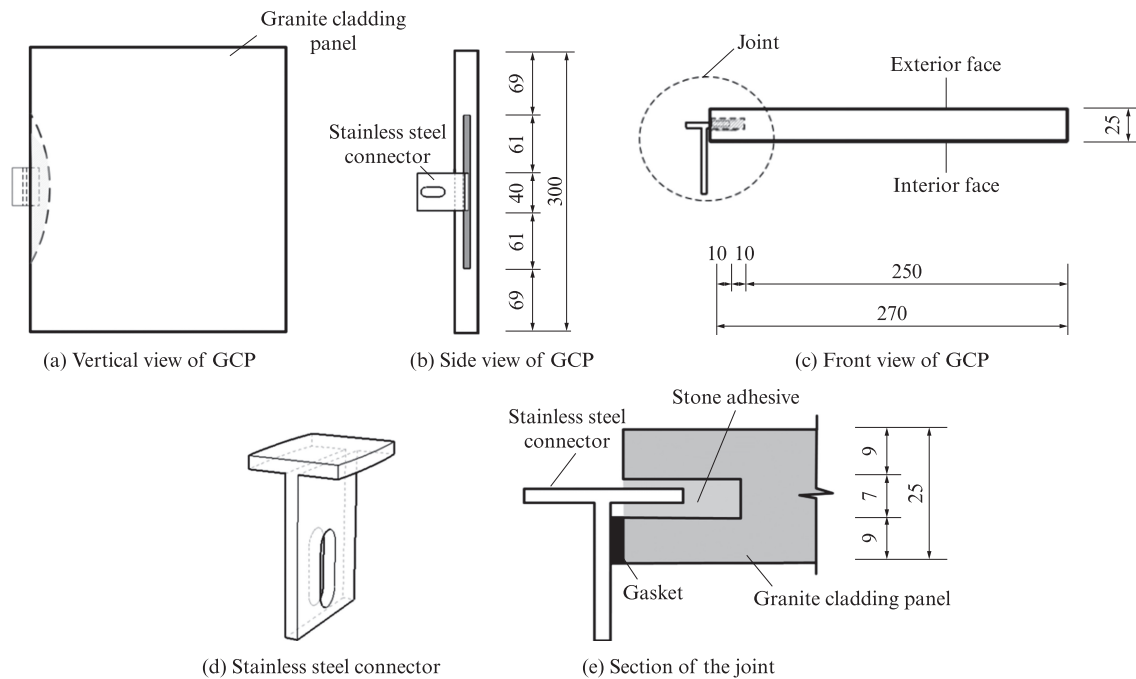


图1 试件示意图

Fig. 1 Diagrams of specimens (size: mm)

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

Specimen	a/mm	$\beta/\%$
DH0	0	0
DH40	8	40
DH60	12	60
DH80	16	80
DH100	20	100

1.2 试验方法

采用可满足尺寸需求的石材幕墙节点承载力试验的自平衡试验架^[15]。干挂件通过螺栓固定在冷成型的阶梯状锚固墩上,且锚固墩使用螺纹杆连接到重型钢制自平衡试验架上;在加载端设置圆柱和钢垫片,将作动器点荷载转为线荷载^[16],两端支座分别为固定支座和半球形铰支座,以模拟石材幕墙节

点处的边界状态^[17].在石板开槽边的2侧设置位移计,用于观察节点侧在加载过程中的位移.采用50 kN液压千斤顶对试件进行单调加载,并用力传感器控制加载进程^[18].随着荷载的增加,在达到最大荷载时,伴随1声巨响,试件承载力迅速下降,试验结束.记录挂装单元的破坏荷载、破坏位置和破坏特征^[19].由于石材胶黏剂的存在提高了节点的强度,但提高的幅度以干挂节点的承载力为参考,因此,试件挂装强度用试件破坏时的最大载荷(即破坏荷载)表示.

2 结果和分析

2.1 试验现象和破坏特征

试件破坏后的表面情况见图2.由图2可见,试件破坏均集中在石板槽口附近,但不同填胶率的节点破坏特征存在明显差异:无胶试件节点破坏沿槽内边进行开裂,破坏顶面面积大且呈半梭形,侧面开裂短边大于挂件宽度,破坏没有预兆,破坏现象与Lammer试验结果^[20]吻合;填充石材胶黏剂后,试件侧面开裂短边等于挂件宽度,此时破坏顶面的面积

明显小于无胶试件,且形状也由半梭形向半圆形过渡.由此可见,当填充石材胶黏剂时,节点的破坏截面位置主要与填胶率有关.

DH100破坏后的三视图见图3.由图3可见:填充石材胶黏剂的节点在破坏时,形成锥台破坏面(见图3(a)),脱落块破坏顶面最大长 l_a 、宽 l_b (图3(b)),破坏顶面弧长 a_b ,且可简化为等腰三角形,挂件连带上侧部分石材胶黏剂和石材一起脱落(见图3(c)),造成节点失效;在板的侧面及斜面形成一定的锥形倾角,包括:斜表面破坏角 θ_1 ,侧面破坏角 θ_2 .由此可见,随着填胶率的增加,试件的破坏状态由弯曲破坏为主转变为冲切破坏为主.

承载力试验结果见表2(表中 U 、 S 分别为位移、破坏顶面表面积; θ 为 θ_1 、 θ_2 的平均值).由表2可见:随着填胶率的增加,试件的破坏顶面表面积降低,脱落块的长宽与表面积成正比;与无胶试件DH0相比,DH100的破坏顶面表面积减小了33.45%;不同填胶率试件的破坏角近似,但均与DH0相差较大;石材胶黏剂的填充对试件 θ_1 影响较大,而填胶率的变化对 θ_2 影响甚微.

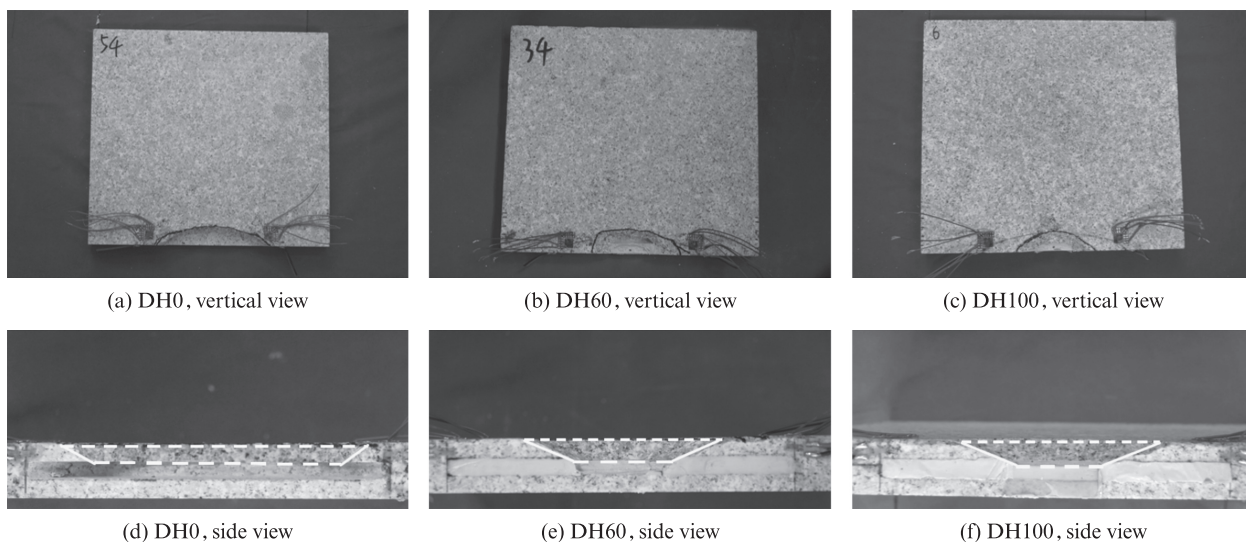


图2 试件破坏后的表面情况
Fig. 2 Surface conditions of specimens after failure

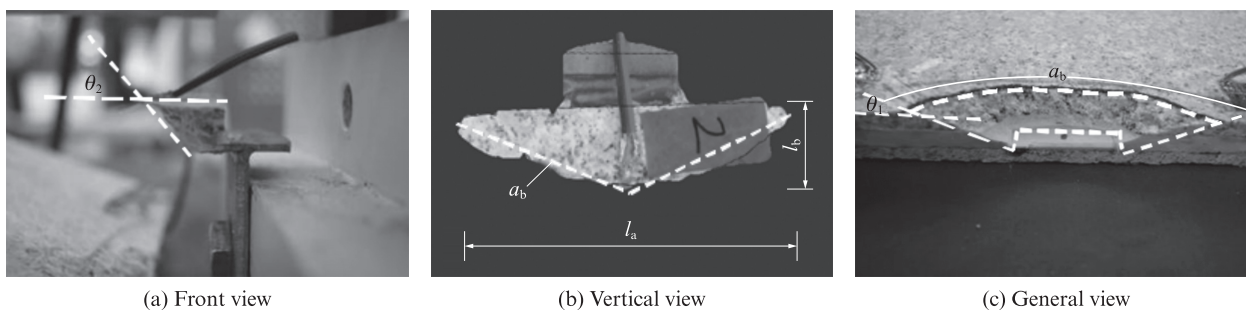


图3 DH100破坏后的三视图
Fig. 3 Three views of DH100 after failure

表2 承载力试验结果

Specimen	U/ mm	S/ mm ²	l_a / mm	l_b / mm	$\theta_1/(^\circ)$	$\theta_2/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$
DH0	0.86	2 128	133	22	79.0	24.0	51.5
DH40	1.13	1 892	81	26	55.0	29.0	42.0
DH60	1.16	1 747	80	22	52.0	31.0	41.5
DH80	1.21	1 372	82	22	47.0	32.0	39.5
DH100	1.25	1 216	80	22	46.0	32.0	39.0
Average					55.8	29.6	40.7

2.2 节点破坏荷载

不同填胶率下节点的破坏荷载试验值 $F_{u,e}$ 见图4。由图4可见:无胶试件DH0破坏荷载较小,随着填胶率的增加,试件破坏荷载试验值随之增大,DH100的最大破坏荷载试验值比DH0增加了2.79倍;填胶率为40%~80%时,节点的破坏荷载试验值提升速率有所降低;填胶率 $\beta > 80\%$ 后,节点的破坏荷载试验值增长速率趋于平稳,如DH80与DH100节点的破坏荷载试验值仅相差5%。由此可见,石材胶黏剂对节点破坏荷载试验值有明显影响,这是因为石材胶黏剂固化后可有效分担部分外荷载,同时其黏接作用可使槽口对称的边槽也起到抵抗外荷载作用,有效增加受力侧厚度。

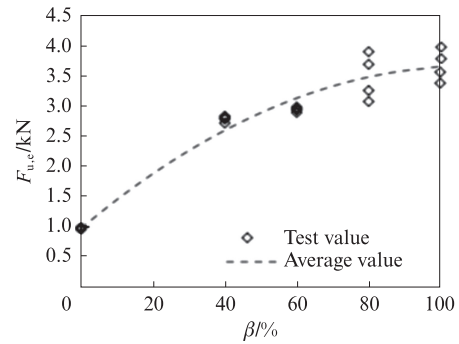


图4 不同填胶率下节点的破坏荷载试验值

Fig. 4 $F_{u,e}$ of joints under different filling rates

3 节点破坏荷载计算

3.1 基于石材材料性质的破坏荷载公式

基于花岗岩的抗剪强度,根据规范 JGJ 133—2001,节点处破坏荷载计算值 $F_{u,cj}$ 为:

$$F_{u,cj} = \frac{(H-t)l_0\tau_k}{2\gamma} \quad (1)$$

式中: l_0 为槽底总长度, mm; τ_k 为石材的抗剪强度, N/mm²; γ 为应力调整系数, 取 1.25。

基于花岗岩的抗弯和抗剪强度,利用第一主应力公式耦合,依据 Camposinhos^[10]经验公式计算短槽式石材幕墙节点处的破坏荷载计算值 $F_{u,cc}$:

$$F_{u,cc} = \frac{\sigma l_0 \left\{ \sqrt{(b_0 - b_s)^2 \left[9(b_0 - b_s)^2 + \left(\frac{H-t}{2} \right)^2 \right]} - 3(b_0 - b_s)^2 \right\}}{(b_0 - b_s) K_{eff}} \quad (2)$$

$$K_{eff} = K_i(1 + \tan\theta) \quad (3)$$

式中: σ 为花岗岩抗弯强度, N/mm²; K_{eff} 为有效应力集中系数; K_i 为应力集中系数, 取 1.58^[21]。

3.2 基于冲切破坏模型的破坏荷载公式

采用最大拉应力理论,对节点冲切破坏机理进行分析,得到冲击破坏模型见图5(图中 h_0 为冲切破坏锥体的有效高度)。随着外荷载的增加,临界截面拉应力和剪应力共同作用,当主应力达到石材抗拉强度时,试件脆性开裂,节点冲切破坏。冲切破坏荷载计算值 $F_{u,c1}$ 为:

$$F_{u,c1} = A\sigma_s \cos\theta_1 \quad (4)$$

式中: A 为锥台侧面积, mm²; σ_s 为花岗岩抗拉强度, N/mm², 极限状态时,锥台开裂面拉应力取石材单轴抗拉强度 $[\sigma_t]$, 即 $\sigma_s = [\sigma_t]$ 。

由图5可知,冲切破坏截面可近似等效为展开后的梯形平面,则锥台面积 A 为:

$$A = \frac{(a_1 + a_2)h_0}{2\sin\theta_1} \quad (5)$$

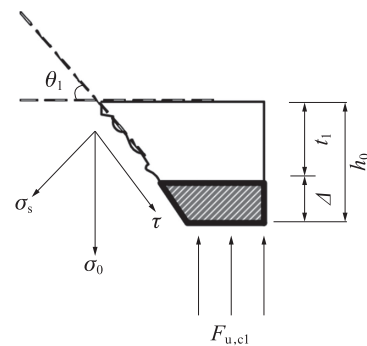


图5 冲切破坏模型

Fig. 5 Punching shear failure model

式中: a_1 为锥台底面弧长, mm。

$$a_1 = 2b_s + a_0 \quad (6)$$

$$a_2 = 2\sqrt{\frac{l_a^2}{4} + l_b^2} \quad (7)$$

$$l_a = a_0 + 2\frac{h_0}{\tan\theta_2} \quad (8)$$

$$l_b = b_s + \frac{h_0}{\tan \theta_1} \quad (9)$$

将破坏角试验数据代入式(4)计算得到 $F_{u,c1}$;分别采用式(1)、(2)计算得到 $F_{u,cj}$ 、 $F_{u,cc}$,结果见表3.由表3可见,填充石材胶黏剂后,节点的 $F_{u,e}$ 与 $F_{u,cj}$ 的偏差为0.092~0.443.由于节点的破坏机理复杂,影响因素较多,式(1)简化了力学模型和计算公式.由计算值 $F_{u,cj}$ 与试验值 $F_{u,e}$ 对比发现,当填胶率不足时,计算值高估了节点的破坏荷载,存在安全隐患.试验值 $F_{u,e}$ 与式(2)计算值 $F_{u,cc}$ 有0.080~0.242的偏差.当槽

$$F_{u,c2} = \left[(\tan \theta_1 - 1) \beta + \tan \theta_2 \right] \left(\frac{H-t}{2} + \Delta \right) \frac{(2b_s + a_0) + \sqrt{(a_0 + 2h_0 \cot \theta_2)^2 + 4(b_s + h_0 \cot \theta_1)^2}}{2 \tan \theta_1} [\sigma_t] \quad (10)$$

短槽式花岗岩幕墙的 θ_1 建议取 46° , θ_2 建议取 32° ,锥台开裂面拉应力取石材单轴抗拉强度 $[\sigma_t]$. $F_{u,c2}$ (见表3)接近试验值,能够很好地确定短槽式石

内填满石材胶黏剂时,计算值 $F_{u,cc}$ 低估了节点处的破坏荷载,式(2)较保守,原因在于计算时认为石板槽口的单边槽承担外荷载作用.式(4)计算值与试验值有0.030~0.066的偏差, $F_{u,c1}$ 接近于试验值,这证明了本文提出的平面外作用下考虑石材胶黏剂短槽式石材幕墙挂装节点破坏模型的合理性.

当 $\beta > 40\%$ 时,为便于公式应用,基于节点处冲切破坏模型,引入施工误差系数 K 与 β 之间的关系 $K = (\tan \theta_1 - 1) \beta + \tan \theta_2$,将其代入式(4),得到考虑填胶率的节点破坏荷载计算值 $F_{u,c2}$ 为:

材幕墙挂装节点的破坏荷载,预测节点处破坏荷载与填胶率之间的关系,为工程中槽式石材幕墙质量控制提供了参考.

表3 试验结果与计算结果的对比
Table 3 Comparison of test results and calculated results

Specimen	$F_{u,e}/N$	$F_{u,c1}/N$	$F_{u,c2}/N$	$F_{u,cj}/N$	$F_{u,cc}/N$	$F_{u,c1}/F_{u,e}$	$F_{u,c2}/F_{u,e}$	$F_{u,cj}/F_{u,e}$	$F_{u,cc}/F_{u,e}$
DH40	2652.67	2828.27	2803.79	4002.05	2995.40	1.066	1.057	1.443	1.080
DH60	2929.40	3055.72	3165.62	4002.05	2939.73	1.043	1.081	1.367	1.004
DH80	3467.22	3689.57	3527.44	4002.05	2939.73	1.064	1.017	1.155	0.848
DH100	3668.35	3776.95	3889.27	4002.05	2780.87	1.030	1.060	1.092	0.758

4 结论

(1)短槽式石材幕墙挂装节点破坏特征受槽内石材胶黏剂的影响,随着填胶率的增加,其破坏状态由弯曲破坏为主转变为冲切破坏为主.

(2)槽内填充石材胶黏剂后,节点破坏荷载比无胶时有明显提高.随着填胶率的增加,节点的破坏荷载增大,且其提升速率呈现出逐渐降低直至平稳的趋势.当填胶率为100%时,节点破坏荷载为无胶试件的3.79倍.

(3)当前研究现状未考虑石材胶黏剂的影响,不能很好地预测节点的破坏荷载,不利于材料的充分利用.基于冲切破坏模型分析了节点的破坏机理,提出了考虑石材胶黏剂影响的短槽式花岗岩石材幕墙挂装节点破坏荷载计算模型.

(4)国内外关于节点的破坏荷载计算缺乏可靠的破坏荷载试验研究,有必要基于当前研究现状进一步通过数值模拟和试验研究短槽式石材幕墙干挂胶种类和挂件锚入位置等因素的影响,确定接近实际幕墙安装工况时的破坏荷载,从而提高材料的使用率.

参考文献:

- [1] NATALIA N, JORGE D B. Validation of an inspection and diagnosis system for anomalies in natural stone cladding [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30:224-236.
- [2] CAMPOSINHOS R S, CAMPOSINHOS R P A. Dimension-stone cladding design with dowel anchorage [J]. Construction Materials, 2009, 162(3):95-104.
- [3] HUANG B F, FU S, LU W S, et al. Experimental investigation of the breaking load of a dowel-pinned connection in granite cladding [J]. Engineering Structures, 2020, 215(2):110642.
- [4] BAEK J W, KANG S M, PARK H G. Direct shear test and cyclic loading test for seismic capacity of dimension stone panel cladding with dowel PIN connection [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 38(2):102205.
- [5] CAMPOSINHOS R S. Stone cladding engineering [M]. Dordrecht:Springer, 2014:119-136.
- [6] PIRES V, ROSA L G, INFANTE V, et al. Effect of dowel fixing conditions on anchorage rupture loads and rupture angles of two portuguese granites [C]// Proceedings of Coimbra. Portugal: The 13th Portuguese Conference of Fracture, 2012:1-11.
- [7] HUANG B F, LU W S. Load bearing capacity test of granite cladding with dowel pin anchorage [J]. PICE Structures and Buildings, 2020, 173(7):501-511.
- [8] 石永久, 马赢, 王元清. 点支式中空夹层玻璃的抗弯设计方法 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6):756-760.

- SHI Yongjiu, MA Ying, WANG Yuanqing. Method of point-supported insulating-laminated glass unit bending loading design[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6):756-760. (in Chinese)
- [9] 曾绪斌,赵成刚,卢国建,等.不同应用的聚氨酯外墙保温系统防火性能研究[J].建筑材料学报,2014,17(5):843-848.
- ZENG Xubin, ZHAO Chenggang, LU Guojian, et al. Evaluation of fire performance of exterior wall cladding systems with rigid polyurethane insulation in different applications[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5):843-848. (in Chinese)
- [10] CAMPOSINHOS R S. Dimension stone design kerf anchorage in limestone and marble [J]. Construction Materials, 2012, 165(3):161-175.
- [11] CONROY K, HOIGARD K R, SCHEFFLER M, et al. Stiffness considerations in dimension stone anchorage design[J]. Journal of ASTM International, 2007, 4(6):101062-101073.
- [12] ASTM Standards. Standard guide for selection, design, and installation of dimension stone anchoring systems:ASTM C1242 [S]. West Conshohocken, PA:ASTM International, 2015.
- [13] 上海市城乡建设和交通委员会.建筑幕墙工程技术规范:DGJ08-56-2012[S].上海:中国建筑工业出版社,2012.
- Shanghai Urban and Rural Development and Transportation Commission. Technical specification for building curtain wall engineering:DGJ08-56-2012 [S]. Shanghai:China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)
- [14] YAN F Z, LIN B Q, XU J, et al. Structural evolution characteristics of middle-high rank coal samples subjected to high-voltage electrical pulse[J]. Energy and Fuel, 2018, 32(3):3263-3271.
- [15] 杨士萱,叶勇,郭子雄.一种多功能石材幕墙节点承载力强度测试架:CN214096900U [P]. 2021-08-31.
- YANG Shixuan, YE Yong, GUO Zixiong. A multi-functional bearing capacity strength test frame of stone curtain wall node: CN214096900U [P]. 2021-08-31. (in Chinese)
- [16] WANG T L, ZHANG X A, LI K, et al. Mechanical performance analysis of a piezoelectric ceramic friction damper and research of its semi-active control strategy[J]. Structures, 2021, 33(3):1510-1531.
- [17] 黄宝锋,吴鹏,卢文胜.半透明混凝土板幕墙能耗分析[J].建筑材料学报,2020,23(6):1488-1495.
- HUANG Baofeng, WU Peng, LU Wensheng. Energy efficient analysis of translucent concrete panel curtain wall[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1488-1495. (in Chinese)
- [18] 尹世平,成帅安,王飞.基于数字图像技术的TRC加固砌体裂缝发展研究[J].建筑材料学报,2022,25(9):953-959.
- YIN Shiping, CHENG Shuaian, WANG Fei. Cracks development of TRC-strengthened masonry walls based on digital image technology[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(9):953-959. (in Chinese)
- [19] LAMMER B T, HOLGAR K R, SCHEFFLE M, et al. Material strength considerations in dimension stone anchorage design [J]. Journal of ASTM International, 2007, 4(6):101102-101120.
- [20] PILKEY W D, PILKEY D F. Peterson's stress concentration factors[M]. New Jersey:John Wiley, 2008:57-134.