

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201909050

## 花岗石幕墙销钉式节点承载力性能试验研究\*

黄宝锋<sup>1</sup>, 符 帅<sup>2</sup>, 卢文胜<sup>3</sup>, 杨 放<sup>2</sup>

(1. 上海师范大学建筑工程学院, 上海 201418; 2. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 211800;  
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**销钉式干挂石材幕墙已经广泛运用于石材幕墙结构体系,由于缺乏相关试验研究和分析工作,其破坏机理尚不明确,国内外对其设计承载力计算方法缺乏理论和试验依据。设计制作了200 mm × 200 mm × 30 mm的花岗岩石材板试件和直径为5、6、7 mm的高强不锈钢销钉试件。在石材试件平面外方向,对销钉进行单调加载试验,以获得该连接节点的承载力和典型破坏模式。试验结果表明,当采用直径为5 mm的销钉时,销钉首先屈服变形,然后销钉孔周围石材发生脆性开裂破坏,且开裂面呈V形;当直径为6、7 mm时,销钉孔周围石材首先发生开裂破坏,随后销钉发生轻微变形。分析表明,采用5 mm直径销钉时的节点破坏模式较为合理,该模式具有一定的弹性,且具备一定的破坏前兆。最后,根据试验结果,对国内外销钉式干挂石材幕墙承载力计算方法进行了对比和讨论,并提出改进意见。

**关键词:** 石材幕墙; 销钉; 承载力; 非结构构件; 试验研究

**中图分类号:** TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1254-10

### Experimental Investigation of the Load-bearing Capacity of Dowel-pinned Granite Cladding

HUANG Baofeng<sup>1</sup>, FU Shuai<sup>2</sup>, LU Wensheng<sup>3</sup>, YANG Fang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China;  
2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;  
3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Dowel-pinned anchorage has been widely used in modern granite cladding system. However, current studies on the load-bearing capacity of the dowel-pinned connections are usually not adequate and its fracture mechanism is not yet clear as a result of insufficient experimental studies. Based on Chinese and foreign standards, monotonic static loading tests were carried out to investigate the load-bearing capacity and failure modes of the dowel-pinned cladding anchorage. The specimens are 200 × 200 × 30 mm granite panel with holes drilled in the middle of each side for steel pins with three different diameters, i.e., 5-, 6-, and 7-mm. Results show that the steel pin with a diameter of

\* 收稿日期:2019-09-23;修回日期:2019-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51608381, 51578405)、科技部国际合作重点项目(2016YFE0105600)、地震工程国际联合试验室项目(ILEE-IJRP-P2-P3-2017)资助

作者简介:黄宝锋(1981—),男,副教授,博士。主要从事建筑非结构构件及体系抗震性能试验与评估方面的研究。

E-mail: baofeng@njtech.edu.cn

通讯作者:卢文胜(1967—),男,教授,博士。主要从事结构性能试验方面的研究。E-mail: wally@tongji.edu.cn

5mm yielded at certain plastic deformation prior to the V-shaped fracture of the granite near the dowel hole. While using the 6- and 7-mm steel pins, the fracture of the granite panel occurred first, then only slight bending deformation of the steel pins were observed. Analytical studies demonstrated that the former failure mode is preferable because it is elastoplastic and provide the owner a certain response time before failure. Finally, the load-bearing capacity computation method was evaluated and revised based on the current code provisions and the experimental results.

**Keywords:** granite cladding; steel dowel pin; load-bearing capacity; nonstructural component; test

## 引言

干挂石材幕墙是目前较为普遍的石材幕墙形式之一,即在石材面板侧面或背面开凿槽孔,通过金属连接件(销钉、T型连接件等)将石材板与主体结构连接。石材干挂法相比传统湿贴法,施工更方便,板面易更换和维护,连接方式和构造简单,在国内外运用广泛。按照连接类型和开槽方式分类,主要包括销钉式、短槽式、通槽式、背栓式石材幕墙等。常用的连接件包括销钉、蝶形挂件、SE型等金属挂件,可将石材面板与建筑主体结构机械连接在一起,相应的施工工艺已经较为成熟<sup>[1]</sup>。其中,销钉式干挂石材幕墙构造简洁、传力明确,并且,每块面板均通过四个节点与主体结构连接(图1),而石材面板仅通过四个销钉传力,有减少热桥的作用,减少了室内外热交换的途径,从而提高了建筑的能效。施工工序一般为:(1)在石材板侧面开孔;(2)将锚固件固定于主体结构;(3)将连接件与锚固件连接;(4)通过销钉将石材面板安装于连接件;(5)打胶、嵌缝。施工质量在一定程度上决定其承载力性能。

由于石材幕墙结构体系的研究落后于工程使用,往往导致在幕墙竣工之初即存在先天缺陷,再

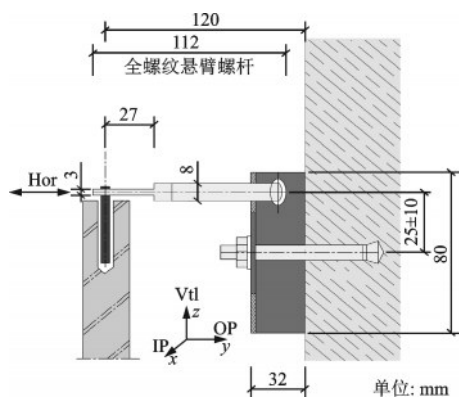


图1 典型销钉式干挂石材幕墙节点

Fig.1 Typical dowel-pinned connection in stone cladding

注:Hor:水平, Vtl: 竖直, OP: 平面外, IP: 平面内

加上不合理的维护和保养措施,石材幕墙破坏案例频繁发生。例如,2004年,北京西站干挂石材幕墙由于安装施工误差使得石材面板受力不均,腰带石板与销钉连接处断裂<sup>[1]</sup>。2018年,某博物馆砂岩幕墙连接节点处石材呈弧状开裂。因此,国内外学者开展了相关研究工作。张正先<sup>[2]</sup>通过对16件建筑陶瓷板的破坏性试验,探讨了扣槽式干挂支承的破坏形态、承载力以及抗剪切和抗弯的计算方法。I. R.Chin<sup>[3]</sup>调查了20余栋建筑的干挂石材幕墙,发现45%的破坏是由连接节点设计不充分、预埋金属件腐蚀以及施工误差导致。对于槽口式连接的花岗岩节点,节点处的承载力与花岗岩的抗弯强度密切相关<sup>[4]</sup>。R.S.Camposinhos等<sup>[5]</sup>开展了销钉式石材幕墙连接节点承载力试验,得到了承载力计算的半经验、半理论公式。通过对各种石材开展抗压强度、抗折强度等材料力学性能试验,总结了常用石材的基本力学特性<sup>[6]</sup>。V.Pires等<sup>[7]</sup>开展了销钉与页岩板连接的承载力以及抗弯试验研究,破坏模式主要为集中于沿页岩纹理的分层断裂。此外,花岗石与销钉连接的承载力试验表明,塑料套和砂浆将对开裂面和破坏荷载产生不同程度的影响<sup>[8]</sup>。M.Patronis等<sup>[9]</sup>通过销钉节点的承载力试验,建立了破坏荷载与石材弯曲强度之间的关系。J.Tan等<sup>[10]</sup>把销钉放置于开有槽孔的相邻两块石材面板之间,并施加与面板垂直方向的荷载,试验结果表明,塑料套对承载力起到了一定的提高作用,在一定程度上延缓了石材的开裂破坏。由于缺乏可靠的试验和分析研究工作,销钉式石材幕墙结构承载力难以得到保障,限制了其在建筑工程中的推广和应用。然而,通过合理的设计和施工,其抗震承载力可以满足设计要求<sup>[11]</sup>。

既有的研究工作聚焦于石材材料力学性能以及节点处的构造措施,如销钉套管、砂浆灌注等,目前尚未确定合理的销钉节点破坏模式和可靠的节点承载力计算方法。本文采用3种直径的销钉开展

了承载力试验,研究节点破坏机理,确定合适的节点破坏模式,并校核节点承载力计算方法,为干挂石材幕墙的设计和使用的提供借鉴。

## 1 规范承载力计算方法

### 1.1 中国规范

根据《金属与石材幕墙工程技术规范》<sup>[12]</sup>,销钉式石材幕墙可在低抗震设防区(6度、7度)采用,幕墙高度不超过20 m。对于销钉式石材幕墙,当销钉连接于石材板两侧时,在垂直于板面方向的荷载作用下,石板剪应力标准值为:

$$\tau_k = \frac{q_k ab \beta}{2n(t-d)h} \quad (1)$$

销钉剪应力标准值为:

$$\tau_k = \frac{q_k ab \beta}{2nA_p} \quad (2)$$

式中, $a$ 、 $b$ 为石材板边长; $n$ 为板面单侧销钉数量; $d$ 为销钉孔直径; $h$ 为销钉入孔长度(图2); $A_p$ 为销钉截面积; $\beta$ 为应力调整系数,根据单块板材所采用的销钉个数确定; $q_k$ 为垂直板面的地震力标准值,可按照公式(3)求得幕墙平面外的水平地震作用<sup>[13]</sup>:

$$q_k = \frac{\beta_0 \alpha_{\max} G}{A} \quad (3)$$

式中, $\beta_0$ 为动力放大系数,根据振动台试验数据取值多为5~8<sup>[13]</sup>; $\alpha_{\max}$ 为水平地震影响系数最大值。

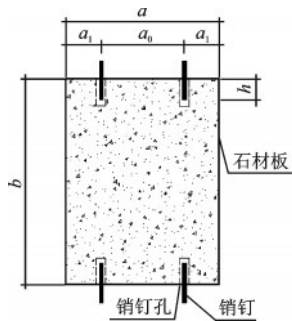


图2 销钉式连接示意

Fig.2 Typical layout of dowel-pinned cladding

### 1.2 Camosinhos推荐方法

R.S.Camosinhos等<sup>[5]</sup>根据销钉式连接的破坏模式,提出了该节点承载力半经验、半理论计算公式:

$$F_{br} = \frac{\sigma_{Rt}}{2K_1} (t \cot \alpha - \phi) l_d \quad (4)$$

式中, $F_{br}$ 为破坏荷载; $\sigma_{Rt}$ 为石材抗拉强度; $K_1$ 为应力集中系数,是最大应力与平均应力的比值,建议取3.0; $\alpha$ 为石材板侧面破坏角; $\phi$ 为销钉孔直径; $t$ 为板厚; $l_d$ 为销钉入孔深度,具体锥形破裂面的几何尺寸如图3所示。

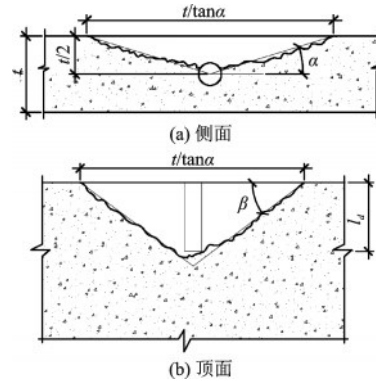


图3 锥形破裂面几何尺寸

Fig.3 Geometrical details of the rupture cone

当销钉采用弹性塑料套管时,应力集中系数将有所提高。此外,由于销钉孔的撬曲效应,引入撬曲系数 $K_2$ 。考虑到石材幕墙的结构安全和老化因素的影响,引入安全分项系数 $\gamma_M$ 和老化系数 $\eta$ ,应力集中系数取为3.0,公式(4)变为<sup>[6]</sup>:

$$F_{br} = \frac{\sigma_{Rtk} l_d (t - \phi \sin \alpha)}{2 \cdot K_1 K_2 \tan \alpha} \cdot \frac{\eta}{\gamma_M} = \frac{\sigma_{Rtk} l_d (t - \phi \sin \alpha)}{6 K_2 \tan \alpha} \cdot \frac{\eta}{\gamma_M} \quad (5)$$

式中, $\sigma_{Rtk}$ 为石材抗拉强度标准值。

## 2 试验概况

为研究销钉式石材节点的承载力与破坏模式,依据欧洲标准<sup>[14]</sup>,设计制作了200 mm × 200 mm × 30 mm的花岗石板材,为便于销钉插入锚固,在石板四个侧面中心位置开凿销钉孔,孔径为10 mm,深度为40 mm。设计加工了5.0、6.0、7.0 mm三种直径的销钉,销钉材料为S460钢,具体参数见表1。加载装置如图4所示。花岗石板固定于承台,销钉一端伸入花岗石板的销钉孔内,另一端由夹具夹

表1 花岗石板和销钉参数

| Table 1 Parameters of granite panels and steel pins |         |            |      |
|---|---------|------------|------|
| 试件类型  | 销钉直径/mm | 石材尺寸/mm    | 试件数量 |
| DP-5  | 5       | 200×200×30 | 12   |
| DP-6  | 6       | 200×200×30 | 12   |
| DP-7  | 7       | 200×200×30 | 12   |

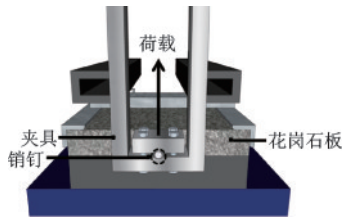


图4 试验概况

Fig.4 Test setup

持,并施以竖直方向的力,依次进行单个节点加载。销钉长70 mm,其中30 mm位于夹具内,35 mm位于销钉孔内,中间空隙为5 mm。

为了再现节点实际破坏状态,试验全程位移控制,加载速率为1.0 mm/min,花岗石板固定不动,销钉相对石材板向上移动(图4),销钉与销钉孔壁接触并承压,直至破坏。在销钉孔可能的锥形开裂面处布置应变片,根据文献[5,15]中的研究成果,石材孔开裂角约为 $30^\circ$ ,应变片沿垂直于开裂面方向布置(图5),以观测石材破裂面附近应力变化情况。另外,在销钉夹具端、石材板处布置位移计(图6),以观测加载过程中销钉与石材相对位移情况。

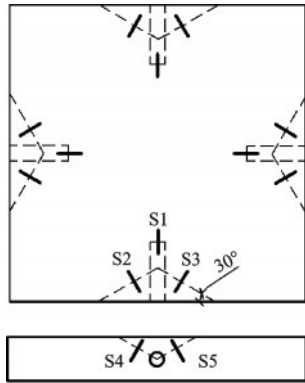


图5 应变片布置

Fig.5 Layout of strain gauges

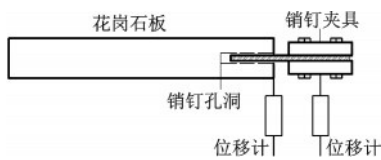


图6 位移计布置

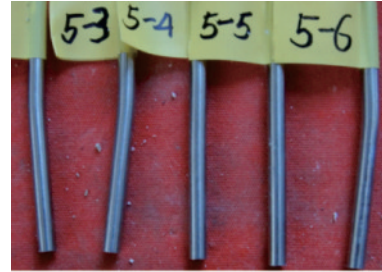
Fig.6 Layout of displacement sensors

### 3 试验结果

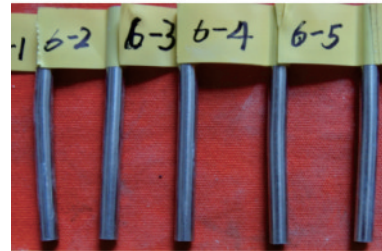
#### 3.1 破坏特征

试验中,从开始加载至石材开裂破坏,采用6

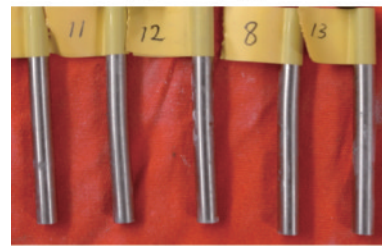
mm和7 mm直径的销钉时,销钉孔周围石材发生突然断裂破坏,并无显著破坏前兆。采用5mm直径销钉时,可以在销钉孔破坏前观测到销钉发生变形。直至试验加载结束,最终销钉有明显变形(图7),该变形相比于6 mm、7 mm直径销钉更为显著,可见销钉刚度越大,其变形越小。与销钉破坏相应的有两类典型石材板锥形破坏面:V形破裂面、U形破裂面,具体如图8、图9所示。



(a) 5 mm直径销钉



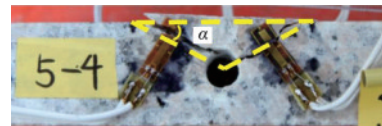
(b) 6 mm直径销钉



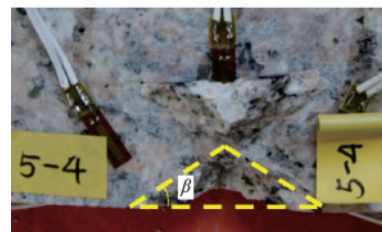
(c) 7 mm直径销钉

图7 销钉变形情况

Fig.7 Bending of the steel pins



(a) 侧面



(b) 顶面

图8 V形破裂面

Fig.8 V-shape fracture

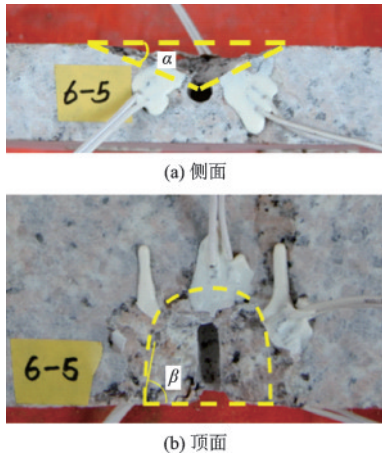


图9 U形破裂面  
Fig.9 U-shape fracture

石材板开裂后以孔洞为中心,在板的侧面及正面形成一定的锥形倾角,包括:上表面破坏角 $\beta$ ,侧面破坏角 $\alpha$ (图10)。根据测量结果,5 mm直径销钉 $\alpha$ 均值为 $33^\circ$ , $\beta$ 均值为 $41^\circ$ ;6 mm直径销钉 $\alpha$ 均值为 $34^\circ$ , $\beta$ 均值为 $45^\circ$ ;7 mm直径销钉 $\alpha$ 均值为 $33^\circ$ , $\beta$ 均值为 $51^\circ$ ,可见销钉直径对 $\alpha$ 角影响甚微,而对 $\beta$ 角影响较大。

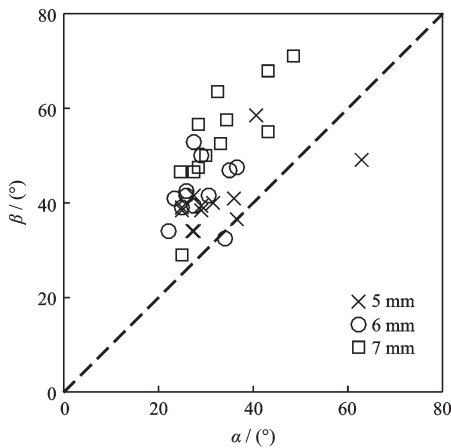


图10 破坏面角度  
Fig.10 Rupture angles

此外,试验观测发现,销钉直径影响破裂深度,直径越大则破裂深度越大(图11)。而破裂深度与破裂面特征相关,破裂深度深则产生U形破裂面(图12)。图中试件编号依次对应5、6、7 mm销钉连接的试件,每组12件。可以看出:采用5 mm和6 mm直径销钉时,销钉孔破坏深度均值分别为21.9 mm和23.7 mm,对应V形破坏面,6 mm直径销钉连接时产生个别U形破坏面。采用7 mm直径销钉时,销钉孔破坏深度较深,均值为31.3 mm,

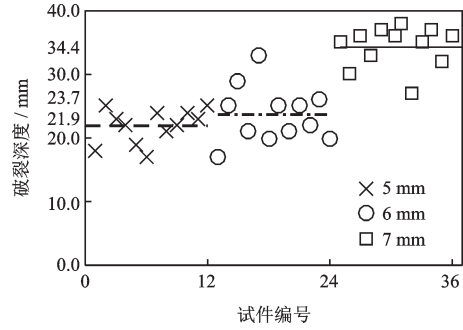


图11 破裂深度与直径的关系

Fig.11 Rupture depth and diameter of the steel pin

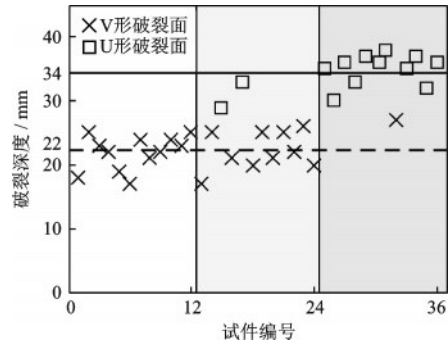


图12 破裂面与直径的关系

Fig.12 Rupture surface and diameter of the steel pin

对应U形破坏面。张芹<sup>[16]</sup>提出销钉孔深度与石材破坏面积相关,本次试验发现影响破坏面的主要因素在于销钉直径,随直径的增长,破坏面由V形过渡到U形。

### 3.2 最大承载力

#### 3.2.1 承载力曲线

试验中,在销钉孔可能的开裂面区域布置应变片(图5),应变片与裂缝扩展方向垂直,以观测石材开裂面应变发展情况,从而根据极限应变计算得到对应的应力。图5中,顶面3个测点,可测得石材表面承压作用而产生的应变,侧面2个测点,石材以受拉为主,可测得对应的拉应变。花岗岩石材板弹性模量50 GPa,将石材应变换算成名义应力,获得石材破裂区域应力、应变情况,如图13所示。石材侧面受拉力,开裂应力在 $5 \text{ N/mm}^2$ 左右,在加载过程中,顶面应变片处受挤压和剪切作用,应力大小约 $3 \text{ N/mm}^2$ 。

加载过程中,销钉与销钉孔壁承压,承载力垂直于板面,发生破坏时承载力达到峰值。5、6、7 mm直径的销钉连接时破坏荷载平均值分别为1.5、1.8、2.0 kN。采用5 mm直径销钉时,销钉与销钉孔接触

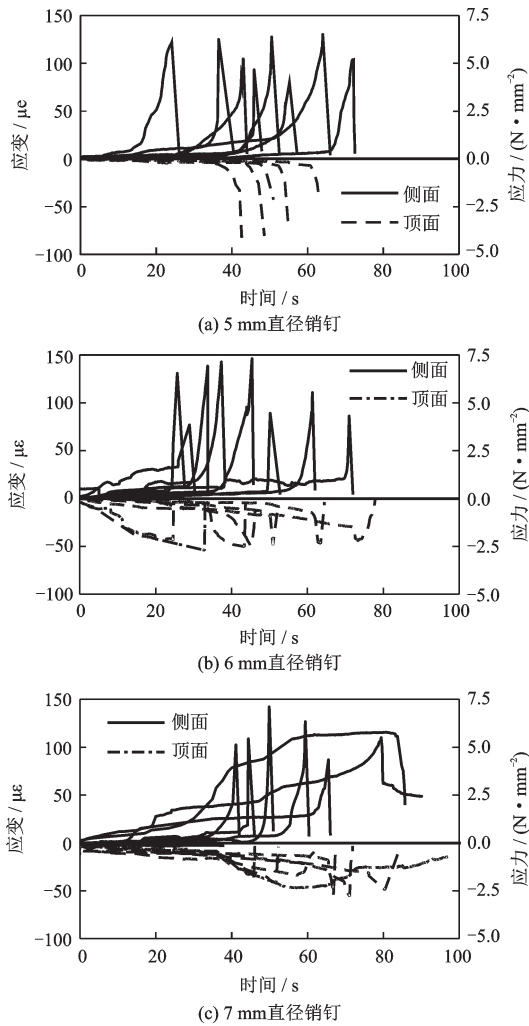


图13 销钉孔石材应力、应变

Fig.13 Stress and strain of the granite near the dowel hole

面积小,因而破坏荷载较小,当销钉直径增加时,接触面积增大,所以破坏荷载也随之增大。根据销钉的力-位移曲线(图14),可以发现:5 mm直径销钉承载力曲线相对较为集中,一般只有一个峰值。而6 mm和7 mm直径的销钉承载力曲线相对较离散,石材属于非均质脆性材料,图中的力值一般有多个峰值。其中每一个峰值对应裂缝发展直至完全开裂,随后,销钉与石材之间力的平衡关系被打破,承载力陡降,随着销钉在孔内达到新的平衡点,承载力又逐渐上升,直到下一次开裂。最终,随着销钉孔破裂深度加大,平衡点更趋近于石材内销钉孔的端部,销钉力臂因而增大,承载力继续上升直至销钉屈服,曲线不再上升而趋于平缓。

对于5 mm直径的销钉,销钉屈服变形略早于销钉孔处石材的开裂,与文献[10]中的现象吻合。采用6、7 mm直径的销钉时,石材的破坏明显早于

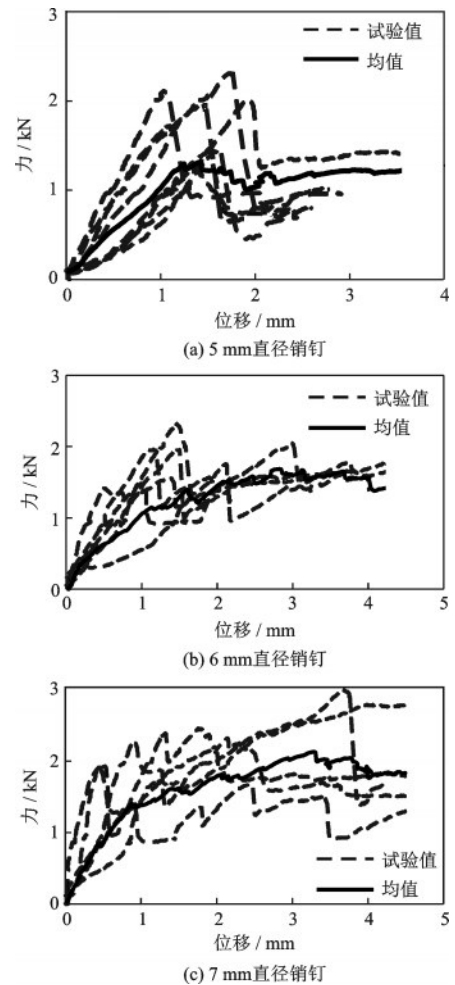


图14 销钉力-位移曲线

Fig.14 Force-displacement relationship of the steel pins

销钉的屈服,伴随的销钉变形也很小。可见,石材开裂、销钉变形两者发生的顺序与销钉自身刚度相关。

### 3.2.2 影响承载力的因素

由试验结果可知,当销钉直径小时,节点破坏主要集中于薄弱部位:销钉。当销钉直径增大时,销钉的强度提高,薄弱部位转移至销钉孔附近的石材,由于石材材性的离散性,其对应的力-位移曲线也较为离散,此时,石材本身强度在很大程度上影响节点承载力,并控制破坏模式。

M.Patronis等<sup>[9]</sup>对53种不同石材开展销钉式连接节点承载力试验,表明节点破坏荷载与石材强度呈直接相关,结合本试验数据(石材抗弯强度为 $8.2 \text{ N/mm}^2$ ,节点承载力为 $1.8 \text{ kN}$ ,图15),由图15可以看出,当销钉强度足够大时,石材强度相对较弱,节点承载力主要由石材决定,当然也与其它参数相关,如销钉孔直径(或槽孔厚度)、销钉自身的材料

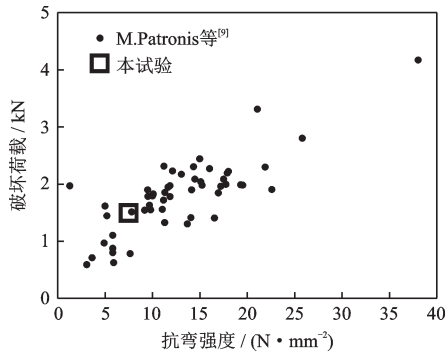


图15 破坏荷载与石材抗弯强度的关系  
Fig.15 Breaking load and flexure strength

强度等。

D.G.West等<sup>[4]</sup>使用Mondariz花岗石板、直径6 mm的销钉进行试验。分别测试了销钉在销钉孔、短槽和通长槽中的破坏荷载,销钉孔直径与槽孔厚度皆为7 mm。采用公式(6)计算名义荷载,以比较在不同开槽情况下节点的承载力。破坏荷载同本试验一致,取力一位移曲线的第一个峰值,定义名义应力为 $\sigma_n$ ,销钉孔(槽孔)开裂一侧厚度为 $(t-\phi)/2$ ,破坏荷载 $F_{br}$ ,得到计算公式:

$$\sigma_n = \frac{F_{br}}{[(t-\phi)/2]^2} \quad (6)$$

由式(6)计算本试验中6 mm直径销钉节点时的名义应力(销钉孔直径为10 mm),结合D.G.West等<sup>[4]</sup>的试验数据,得到图16。D.G.West等<sup>[4]</sup>采用30 mm厚的板材,销钉孔直径及槽孔厚度均为7 mm,即石材板槽孔受挤压侧的厚度一致,因此它们的名义荷载均相近,破坏荷载相近。本试验采用30 mm厚的板材,开孔孔径为10 mm,对石材厚度削弱较多,相应承载力受到削弱,但由于本试验石材强度高于Mondariz花岗石,因此破坏荷载相对略有提高。

此外,当石材板采用两侧销钉连接时,在水平地震作用下,尤其是石材板受到平面内荷载时,由于全螺纹悬臂螺杆(图1)在地震荷载下屈曲容易导

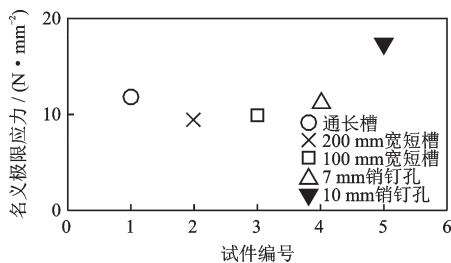


图16 不同槽孔下的名义极限应力

Fig.16 Nominal ultimate stress with various dowel holes

致销钉的滑出,最终削弱承载力,因此,在水平两侧安装销钉可有效缓解该失效模式。

## 4 计算承载力

### 4.1 销钉承载力

本试验所用石材弯曲强度 $8.20 \text{ N/mm}^2$ ,按规范<sup>[12]</sup>计算抗剪强度设计值:

$$f_{g2} = f_{gm}/4.30 \quad (7)$$

式中, $f_{gm}$ 为花岗石抗弯强度平均值;计算得石材抗剪强度 $f_{g2}=1.91 \text{ N/mm}^2$ 。

销钉采用S460高强不锈钢,按欧洲规范<sup>[17]</sup>计算得其抗剪强度为 $265.6 \text{ N/mm}^2$ 。

根据石材幕墙规范<sup>[12]</sup>,石材板面积取 $1.0 \text{ m}^2$ ,花岗石容重为 $28 \text{ kN/m}^3$ ,抗震设防烈度7度时 $\alpha_{max}$ 取0.08,动力放大系数 $\beta_0$ 取5,按公式(3)求得石材板面水平地震作用标准值 $q_k=0.54 \text{ kN/m}^2$ ,石材板一侧连接2个销钉,应力调整系数 $\beta$ 取1.25,在两侧连接最不利设计条件下,根据公式(1)、(2)计算得到石材剪应力标准值为 $0.28 \text{ N/mm}^2$ ,销钉剪应力标准值为 $8.60 \text{ N/mm}^2$ ,远小于其抗剪强度。若以石材剪切破坏为承载力标准,按公式(1)估算单块石材板抗震承载力为 $4.28 \text{ kN}$ ,对应单个节点承载力 $1.1 \text{ kN}$ 。

销钉在销钉孔内的接触力可简化为孔边缘处的集中荷载,夹具施加于销钉的荷载为 $q_c$ (图17),在简化荷载作用下,其最终破坏模式为抗弯破坏。根据试验结果,销钉屈服点在夹具与销钉孔空隙段并靠近夹具一侧,按钢结构规范<sup>[18]</sup>计算销钉承载力。 $l_c$ 和 $l_d$ 分别为销钉在夹具和销钉孔内的长度, $c$ 为夹具与销钉孔空隙, $c'$ 为销钉孔破坏后销钉与石材有效接触点向销钉孔尽头移动的距离。图17中夹具施加在销钉的荷载 $q_c$ 分布不均,且加载中夹具左侧受力更大,可假设 $q_c$ 形如曲线分布,其合力 $F$ 作用点位置在距C点 $l_c/10$ 处。按公式(8)~(10)可计

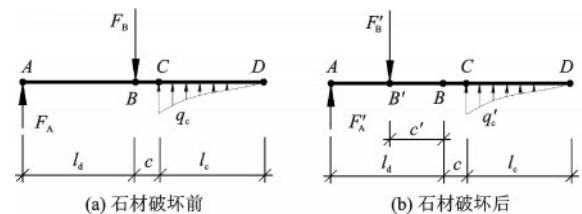


图17 销钉受力简图

Fig.17 Analytical model of the steel pin

算销钉在弯剪作用下的屈服荷载  $F$ 。

$$\sigma = \frac{M}{\gamma W_x} = \frac{F(l_c/2 + c + c')}{\gamma W_x} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{F}{A_p} \quad (9)$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \beta_1 f \quad (10)$$

式中,  $M$  为危险截面弯矩;  $\gamma$  为截面塑性发展系数 1.2;  $W_x$  为截面模量;  $\beta_1$  为强度增大系数 1.1;  $f$  为销钉屈服强度。

依据各试件屈服荷载  $F$ 、销钉孔破坏深度, 按式 (8) 对  $c'$  的取值进行校核, 取值暂定为销钉孔破坏深度的 10%。

石材破坏前, 计算销钉承载力, 将其与节点破坏荷载 (石材开裂时) 对比, 见表 2。可见, 除 7 mm 直径销钉外, 当节点承载力失效时, 销钉已达到屈服强度。销钉孔周围石材开裂后, 按式 (8) 计算销钉屈服荷载  $F$ , 与试验均值对比, 结果列于表 3, 计算值与试验值较接近, 因而可考虑用此方法预估销钉承载力。

表 2 石材开裂前销钉屈服荷载

Table 2 Yield load of steel pin before cracking

| 销钉直径/mm | $c$ /mm | $\sigma$ /(N·mm <sup>-2</sup> ) | $F$ /kN | 石材开裂/kN |
|---------|---------|---------------------------------|---------|---------|
| 5.0     |         |                                 | 0.9     | 1.5     |
| 6.0     | 5       | 460                             | 1.6     | 1.8     |
| 7.0     |         |                                 | 2.5     | 2.0     |

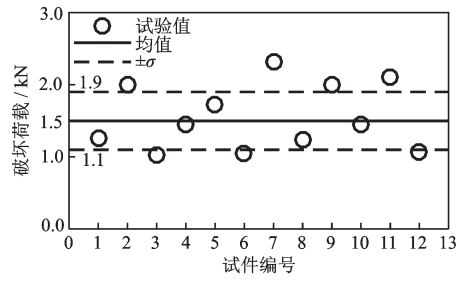
表 3 石材开裂后销钉屈服荷载

Table 3 Yield load of steel pin after cracking

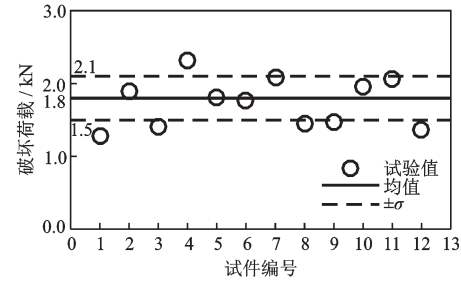
| 销钉直径/mm | $c$ /mm | $c'$ /mm | $\sigma$ /(N·mm <sup>-2</sup> ) | $F$ /kN | 试验均值/kN |
|---------|---------|----------|---------------------------------|---------|---------|
| 5.0     |         | 2.2      |                                 | 0.7     | 0.9     |
| 6.0     | 5       | 2.4      | 460                             | 1.2     | 1.5     |
| 7.0     |         | 3.1      |                                 | 1.8     | 2.1     |

#### 4.2 节点承载力

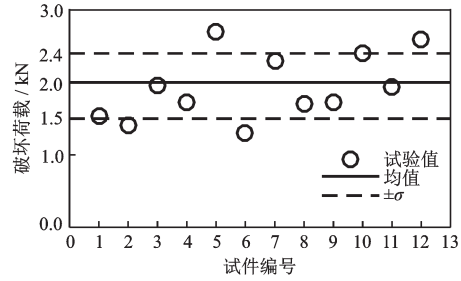
将各试件破坏荷载及其均方差绘于图 18, 由于石材的非均质性, 破坏荷载有一定离散度, 以均值作为节点承载力标准值, 按照公式 (1)~(5) 计算节点承载力并列于表 4。可以看出, 计算承载力均不能很好地预测节点的实际承载力, 并且, 公式 (1)、(2) 过于保守。试验研究表明, 这些公式并未考虑销钉直径和入孔深度的影响。在此, 引入销钉尺寸系数  $\lambda$ , 并将公式 (4) 中  $l_d$  修正为  $\lambda l_d$ , 从而修正公式



(a) 5 mm 直接销钉



(b) 6 mm 直接销钉



(c) 7 mm 直接销钉

图 18 计算承载力与试验值对比

Fig. 18 Experimental and computational breaking loads

表 4 破坏承载力

Table 4 Breaking load

单位: kN

| 销钉直径/mm | 公式(1)、(2) | 公式(4) | 公式(5) | 公式(11) | 试验均值 |
|---------|-----------|-------|-------|--------|------|
| 5.0     |           |       |       | 1.4    | 1.5  |
| 6.0     | 1.1       | 2.3   | 2.4   | 1.7    | 1.8  |
| 7.0     |           |       |       | 1.9    | 2.0  |

(4) 的计算结果为:

$$F_{br} = \frac{\sigma_{Rt} \lambda l_d (t - \phi \cdot \sin \alpha)}{2K_1 \tan \alpha} \quad (11)$$

式中,  $\lambda$  为销钉孔破坏长度与其初始深度比值, 直径为 5、6、7 mm 时, 对应的  $\lambda$  取值分别为 0.6、0.7、0.8。

根据公式 (11) 计算节点承载力与试验值列于表 4, 可以看出, 引入销钉尺寸系数后的计算值略低于试验均值, 相比于修正前公式 (4) 计算结果更接近实际情况。

## 5 破坏模式

### 5.1 简化承载力曲线

销钉节点的受力过程主要分为两阶段:第一阶段,销钉与销钉孔内壁接触,直到石材开裂;第二阶段,销钉孔附近石材破裂后,销钉继续承担大部分荷载直至发生屈服变形。根据这一特点,将试验所得荷载-位移曲线进行简化,得到简化承载力曲线(图19)。对于销钉孔附近石材板破坏阶段,把各试件的力-位移曲线中首个极大值点和极小值点对应的力、位移取均值,将这两点与原点相连得到折线,表示销钉孔石材破坏前后的承载力曲线,即图19中的AB段。试验中,石材破裂瞬间承载力陡降,力-位移曲线通常近似垂直下降,因此,将极小值点对应的位移修正与极大值点位移一致,使得简化承载力曲线符合实际。此后,销钉可简化为悬臂梁,其末端承受等效集中荷载,在持续增加的荷载作用下,销钉达到屈服,即图19中BCD段,最大值点的平均值作为其屈服荷载,也就是节点的极限承载力。极大值点、极小值点、屈服荷载数据列于表5。

通过以上试验结果,推导销钉的特征承载力曲线,可清晰描述平面外荷载作用下,节点处承载力变化过程(图20)。折线OAA'、OABCD、OABC'分

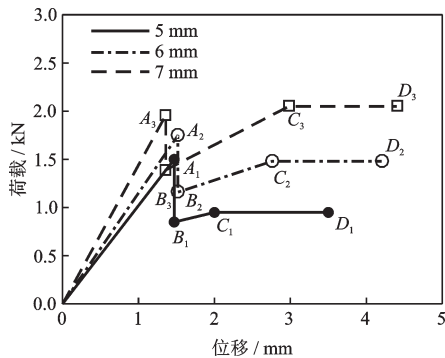


图19 简化承载力曲线

Fig.19 Simplified load-displacement curves  
注:图中□、○、●表示拐点

表5 特征点荷载

Table 5 Representative load

| 销钉直径/mm | 单位:kN |     |     |     |
|---------|-------|-----|-----|-----|
|         | A     | B   | C   | D   |
| 5.0     | 1.5   | 0.9 | 1.0 | 1.0 |
| 6.0     | 1.8   | 1.2 | 1.5 | 1.5 |
| 7.0     | 2.0   | 1.4 | 2.1 | 2.1 |

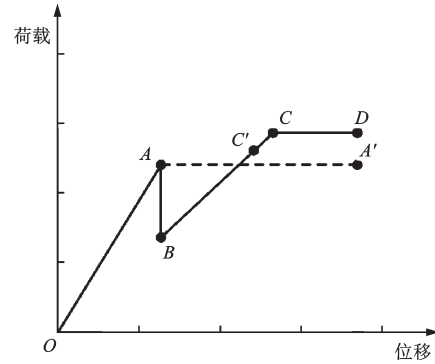


图20 特征承载力曲线

Fig.20 Characteristic load-displacement curve

别对应三种不同的节点失效情况及破坏模式。OAA'指销钉刚度小,荷载达到峰值时,石材未破坏,而销钉屈服,节点因而失效。节点承载力可按销钉弯剪作用下的承载力公式(10)计算,主要由销钉材性决定。OABC'指销钉刚度大,荷载作用下,石材于A点发生脆性破坏,由于力臂增大抗弯刚度降低,BC'斜率相对OA斜率降低,随着荷载继续增加石材破坏更加严重,导致销钉孔于C'处充分破裂以至销钉脱落。而OABCD则代表着理想的破坏模式,当荷载增加至A点,石材发生较小的破坏,但销钉暂未屈服,随着荷载增加承载力逐渐提高,最终屈服,有效避免了因销钉刚度过低,而导致节点承载力不足的情况,也同时避免了因销钉刚度过大、石材破坏严重,而导致销钉脱落节点失效的情况。

### 5.2 临界破坏状态

从试验分析可知,当销钉直径为5、6 mm时,销钉孔破裂面较小,销钉变形较大。直径为7 mm时,销钉孔开裂较大破坏较为严重。不同直径销钉连接下的破坏过程、破坏状态有着明显区分。此前研究发现销钉先于石材板破坏这一破坏模式,并提出将其作为节点设计的理想破坏模式<sup>[15]</sup>。结合本试验破坏模式与以往研究经验可将破坏状态分为三类:

(1) 石材先破坏,销钉再屈服。石材材质不均且为脆性材料,此种破坏具有突发性,存在安全隐患,在设计中应尽量避免。

(2) 销钉先屈服,石材不破坏或破坏程度较轻。由于销钉屈服而使得节点产生平面外变形(1.5~3.0 mm),若在节点失效前及时发现并采取有效补救措施,可以防止石材脱落的安全隐患;但是,在实际工程中这一变形“前兆”难以凭肉眼确认,需要采取有效手段,根据石材面板的平面外变形情况,确认其

破损程度,才能有效利用本破坏状态。

(3) 石材、销钉都不破坏或破坏程度较轻。要保证在一定荷载下销钉式石材幕墙的连接完好无损,就必须保证销钉有足够刚度,并采用更厚、质地更为致密的石材板,石材板重量也增加,不利于抗震和承载,同时也导致材料成本上升,不经济,因此也不值得提倡。

## 6 结 论

(1) 关于销钉式石材幕墙销钉节点破坏类型,采用5、6 mm直径的节点石材破坏面多为V形,破坏深度较浅,其中采用6 mm直径的节点仅个别产生U形破坏面,采用7 mm直径的节点破坏具有突发性,销钉孔破坏较为严重,破坏面为U形,为保障安全性应尽可能避免销钉孔石材先于销钉的破坏模式,并防止U形破坏面的产生。

(2) 增大销钉直径能提高承载力,采用6、7 mm直径销钉的节点承载力较5 mm直径销钉分别提高20%和33%,但是,在销钉孔锥形破坏前的销钉变形也变小,且U形破坏面相对较为严重,实际应用中销钉容易在复杂外力作用下脱落,导致节点失效。理想的破坏模式为销钉屈服早于销钉孔附近石材锥形开裂,且开裂面为破坏程度较轻的V形破坏面,尚有机会采取维护措施,可防止石材跌落。

(3) 根据试验曲线和节点破坏模式总结了特征承载力曲线,并对节点承载力公式进行了修正,结果表明,修正后的公式更加接近试验结果。

(4) 国内外关于销钉式石材节点的计算承载力缺乏可靠的承载力试验研究,对于不同种类的石材幕墙,有必要开展材性试验和承载力试验研究,确定其极限承载力,从而提高其抵御强风、地震等极端自然灾害的能力。

## 参考文献:

[1] 温双义, 繁玉颖. 北京西站干挂石幕墙破损石板的独立式修复[C]//中国铁路客站技术交流会论文集. 北京: 铁道部工程设计鉴定中心, 2012: 454.  
Wen Sh Y, Fan Y Y. Independent repair of damaged stone slabs in stone curtain wall of West Beijing railway station [C]//Proceedings of the Conference on China Railway Passenger Station Technology. Beijing: China Railway Economic and Planning Research Institute,

2012: 454. (in Chinese)

[2] 张正先. 插销式干挂建筑瓷板承载力分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2000, 28(5): 114-118.  
Zhang Zh X. An experimental investigation of the building porcelain curtain wall by the dry-joint with rack [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2000, 28(5): 114-118. (in Chinese)

[3] Chin I R. Common causes of failures of stone claddings on buildings [C]//Dimension Stone Cladding: Design, Construction, Evaluation, and Repair. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Material (ASTM), 2000: 151-160.

[4] West D G, Heinlein M. Anchorage pullout strength in granite: design and fabrication influences [C]//Dimension Stone Cladding: Design, Construction, Evaluation, and Repair, ASTM STP 1394. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM), 2000: 121.

[5] Camposinhos R S, Camposinhos R P A. Dimension-stone cladding design with dowel anchorage [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2009, 162(3): 95-104.

[6] Camposinhos R S. Stone cladding engineering [M]. Dordrecht: Springer, 2014.

[7] Pires V, Amaral P M, Rosa L G, et al. Slate flexural and anchorage strength considerations in cladding design [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 3966-3971.

[8] 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 the 13th Portuguese Conference on Fracture. Coimbra: Portugal, 2012: A04.

[9] Patronis M, Laskaridis K, Niaou M. Relationship between breaking moments at the dowel hole and at flexure under concentrated load of ornamental stones [J]. Key Engineering Materials, 2013, 548: 287-294.

[10] Tan J, Huang B F, Lu W S, et al. Load bearing capacity testing of dowel pin anchorage in granite cladding [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering. Pavia, Italy: EUCENTRE Foundation, 2017:701.

(本文责编:池营营)

(下转第1270页)