

花岗岩石材植筋锚固性能试验

郑奕鹏, 郭子雄, 柴振岭, 叶勇

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 花岗岩石材植入钢筋的锚固性能和最小锚固长度,是石结构植筋加固的关键问题.开展 30 个花岗岩石材植筋锚固性能拔出试验,研究锚固长度、植筋胶种类和钢筋表面特征等因素对花岗岩石材植筋锚固性能的影响.试验结果表明:钢筋与花岗岩石材粘结强度随锚固长度的增大而减小;采用带肋钢筋能够在一定程度上提高锚固钢筋的粘结强度;环氧型植筋胶的锚固性能明显优于水泥基植筋胶的锚固性能.使用环氧型植筋胶对带肋钢筋和花岗岩进行植筋锚固时,建议工程应用的最小锚固长度为 $7d$ (d 为钢筋直径),进行光圆钢筋和花岗岩的植筋锚固时,建议工程应用的最小锚固长度为 $10d$.

关键词: 石结构; 加固; 锚固长度; 锚固性能; 拔出试验

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A

我国东南沿海地区存在着大量石结构房屋,这些独具特色的石结构房屋多数采用了石板楼盖.石板楼盖不仅存在材料脆性的问题^[1],同时也有整体性差和支撑长度不足等抗震薄弱环节,是当前石结构抗震加固改造的重点与难点.本课题组拟通过在石楼板与石墙搭接处增设内圈梁,以此来增加石楼板的支撑长度和整体性^[2].内圈梁通过后锚固植筋技术,将钢筋植入石墙内,通过钢筋的拉力以及混凝土与石墙之间的界面作用力将楼板荷载传递到石墙上.花岗岩和钢筋作为两种不同的建筑材料,二者的植筋锚固性能是内圈梁发挥作用的前提条件.国内外植筋锚固技术已经开展了大量研究,但主要研究集中在钢筋混凝土结构^[3-10].关于石结构的植筋锚固技术,至今仍未见相关的研究报道.为研究花岗岩石材内植入钢筋的粘结锚固性能,以便为石结构的植筋锚固及相关加固应用提供依据,本文花岗岩石材植筋锚固性能试验.

1 试验概况

1.1 试验设计及制作

试验使用的石材为福建省地产花岗岩粗料石,条石尺寸为 $400\text{ mm}\times200\text{ mm}\times200\text{ mm}$.花岗岩石材立方体及圆柱体单轴抗压强度平均值分别为 128.5、101.8 MPa,劈裂抗拉强度为 8.3 MPa,弹性模量为 50.55 GPa.钢筋材料性能如表 1 所示.表 1 中: F_y 为屈服力; f_y 为屈服强度; f_u 为极限强度; E 为弹性模量.试验使用的植筋胶为 SF-100 环氧型植筋胶和 RM-Z 水泥基植筋胶. SF-100 环氧型植筋胶抗剪强度为 60 MPa, RM-Z 水泥基植筋胶立方体试块 28 天单轴抗压强度为 57.8 MPa.

试验共制作 10 组试件,每组 3 个相同参数试件,共 30 个试件.试件主要尺寸如图 1 所示.试验重点

研究钢筋的最小锚固长度,并考察锚固长度、植筋胶种类、钢筋表面特征对锚固性能的影响. 主要研究参数如表 2 所示. 表 2 中: l_a 为锚固长度;E 为环氧型植筋胶;C 为水泥基植筋胶;R 为带肋钢筋;P 为光圆钢筋. 同时为了减少试验误差,每组试件的 3 根植入钢筋均在同一条石材的同一个面上钻孔植入,尽量避免因花岗岩石材的离散性而影响试验结果. 试件制作完成后,由于粗料石表面平整度较差,为了便于加载时荷载的均匀传递,在加载面浇筑一层约 10 mm 厚的自流平砂浆找平层.

表 2 试件参数
Tab. 2 Parameters of specimens

| 试件编号 | l_a /mm | 钢筋型号 | 植筋胶 | 试件编号 | l_a /mm | 钢筋型号 | 植筋胶 |
|---------|-----------|------|-----|----------|-----------|------|-----|
| E-6-R-5 | 30 | Φ 6 | E | E-8-P-5 | 40 | Φ 8 | E |
| E-8-R-5 | 40 | Φ 8 | E | C-6-P-5 | 30 | Φ 6 | C |
| E-6-R-3 | 18 | Φ 6 | E | C-8-P-5 | 40 | Φ 8 | C |
| E-8-R-3 | 24 | Φ 8 | E | C-6-P-10 | 60 | Φ 6 | C |
| E-6-P-5 | 30 | Φ 6 | E | C-8-P-10 | 80 | Φ 8 | C |

1.2 加载制度及测量方案

试验加载装置如图 2 所示. 采用 300 kN 穿孔液压千斤顶加载,并通过压力传感器量测拉拔荷载,用位移计量测加载端位移,加载端位移主要包括锚固段外钢筋受拉变形和锚固段的滑移. 加载过程中,荷载与加载端位移由 DH3816 静态应变采集测试系统进行连续采集,采集间隔时间为 3 s. 每级荷载施加 1 kN,加载速度约为 1 kN · min⁻¹,每级荷载持荷 1 min. 加载中,一旦发生加载端滑移量超过锚固长度一半或钢筋拉断,即停止加载.

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态分析

试验的主要破坏形态有 3 种模式:1) 钢筋锚固失效(S1);2) 胶体滑移(S2);3) 钢筋拉断(P).

1) 钢筋锚固失效(S1). 主要指植筋胶与钢筋界面粘结失效并滑移,其破坏形态如图 3(a)所示. 将试验中钢筋的极限荷载与材性试验时钢筋的屈服荷载的比值定义为 ζ . 当 ζ 大于 1 时,钢筋达到屈服;当 ζ 小于 1 时,钢筋未达到屈服. 因此,该破坏模式包括以下 2 种情况. 第 1 种情况为钢筋达到屈服强度后,在钢筋强化过程中发生粘结滑移. 如试件 E-6-R-5-1,E-6-R-5-3,E-6-P-5-2,E-6-P-5-3,E-8-P-5-1,E-8-P-5-3 和 E-6-R-3-(1~3) 皆为该破坏情况. 该类试件均采用环氧型植筋胶,胶体具有较高的粘结强度. 第 2 种情况为钢筋未达到屈服强度,该试件已发生粘结滑移现象. 如试件 C-6-P-5-(1~3),C-8-P-5-(1~3),C-6-P-10-(1~3)和 C-8-P-10-(1~3),该类试件均采用水泥基植筋胶,该植筋胶具有较高抗压强度,但粘结强度较低. 发生该类破坏形态时,整个破坏过程较为缓慢,荷载随着钢筋滑移逐渐减小. 当荷载低于最大荷载的一半时,结束试验.

2) 胶体滑移(S2). 该破坏形态是指钢筋被拔起,并将植筋胶带起,花岗岩与植筋胶之间为发生粘结滑移,破坏形态如图 3(b)所示. 这种破坏形态主要发生在钢筋带肋且植筋胶粘结强度较高,且钢筋直径较大,如试件 E-8-R-3-(1~3). 在整个加载过程中,荷载不断增大,当达到破坏荷载时,植筋胶与花岗岩之间的界面粘结失效,钢筋带着植筋胶拔起,表面局部找平层砂浆被压碎.

3) 钢筋拉断(P). 该破坏形态是指试验过程中钢筋未滑移直接拉断,破坏形态如图 3(c)所示. 这种破坏形态发生在钢筋带肋和植筋胶粘结强度较高,且锚固长度较长时. 如试件 E-6-R-5-2,E-8-R-5-(1~

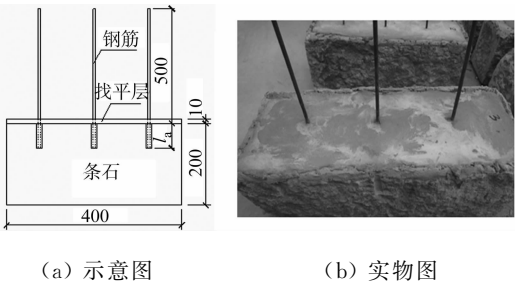


图 1 试件特征(单位:mm)

Fig. 1 Dimension of specimens (unit:mm)

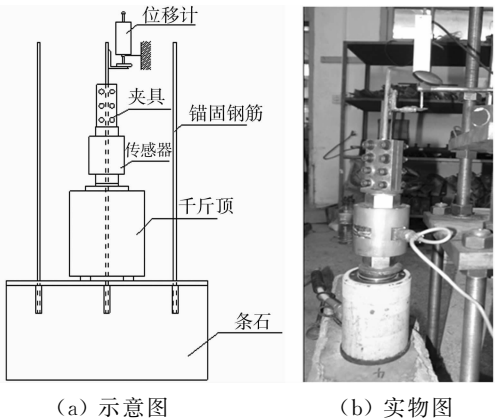
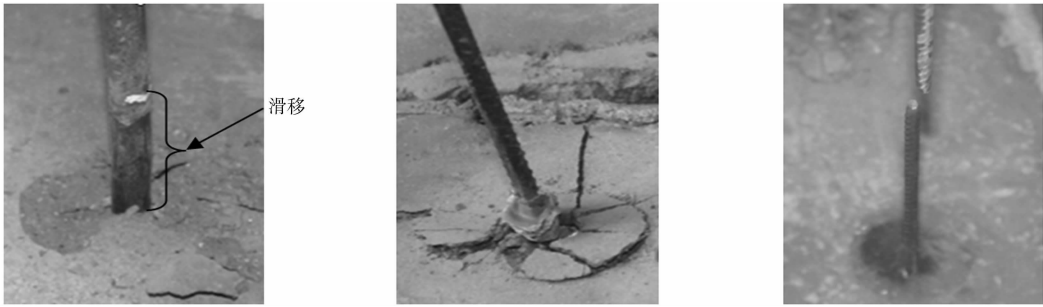


图 2 加载装置

Fig. 2 Test setup

3),加载过程中未出现明显的粘结滑移,当荷载超过钢筋极限拉力后,钢筋被拉断.整个破坏过程较为缓慢钢筋逐渐被拉长,并出现颈缩现象和钢筋断裂.



(a) 钢筋锚固失效 (b) 胶体滑移 (c) 钢筋拉断

图3 典型破坏形态

Fig.3 Typical failure modes

2.2 粘结强度及影响因素分析

2.2.1 粘结强度-滑移关系 由于锚固长度较小,假设粘结应力沿钢筋锚固长度均匀分布,将钢筋的粘结强度定义为锚固长度内粘结应力的平均值.各试件粘结强度 τ 为拉拔力 F 与实际粘结面积 S 的比值,即

$$\tau = \frac{F}{\pi d l_a} \tag{1}$$

式(1)中: τ 为钢筋粘结强度; F 为钢筋拉拔力; d 为钢筋直径; l_a 为钢筋锚固长度.

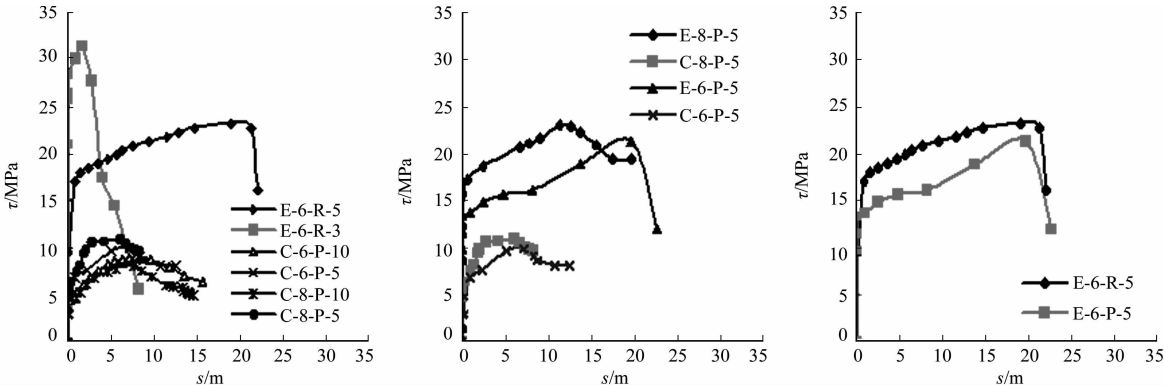
试验过程中,钢筋的滑移值 s 取为试件加载端位移 Δ 与钢筋变形 δ 的差值,即

$$s = \Delta - \delta \tag{2}$$

若试件滑移过程中,钢筋屈服、钢筋变形值 δ 取为同批钢筋材性试验时,三根钢筋相同拉伸长度相同荷载下,钢筋的实际变形值平均值.若试件滑移过程中,钢筋未屈服,钢筋变形值取为 δ ,即

$$\delta = \frac{F}{EA} L \tag{3}$$

式(3)中: δ 为钢筋变形值; F 为钢筋的拉拔力; E 为钢筋弹性模量; A 为钢筋截面面积; L 为未锚固段长度.由式(1)~(3)可以得到滑移试件粘结强度-滑移关系曲线,如图4所示.



(a) 锚固长度 (b) 植筋胶种类 (c) 钢筋表面特征

图4 粘结滑移关系曲线

Fig 4 Relationship of bond and slip

2.2.2 影响因素分析 通过试件的极限粘结强度平均值以及试件粘结滑移曲线可知:钢筋强度、植筋胶种类和锚固长度等因素对钢筋与花岗岩的粘结强度具有一定的影响.试验的主要结果如表3所示.表3中: F_u 为试验极限荷载; ζ 为试验极限荷载与钢筋材性试验屈服荷载的比值;试件编号最后一列表示同组试件的编号; τ_{max} 为平均粘结强度最大值; $\tau_{max,ave}$ 为同组试件最大粘结强度平均值.

1) 锚固长度的影响如图4(a)所示.采用相同强度钢筋和相同植筋胶的情况下,钢筋的锚固长度越

长,试件的粘结强度越低.试件 C-8-P-5 和试件 C-8-P-10 均发生粘结滑移.试件 C-8-P-5 的粘结滑移曲线始终在试件 C-8-P-10 的粘结滑移曲线上方.由表 3 可知:C-8-P-5 的极限粘结强度平均值是试件 C-8-P-10 的极限粘结强度平均值的 1.39 倍.主要原因在于:钢筋粘结应力沿锚固长度呈非线性分布,随锚固深度的增加而逐渐减小.

表 3 试验结果
Tab.3 Test results

| 试件编号 | F_u /kN | ζ | τ_{\max} /MPa | $\tau_{\max,ave}$ /MPa | 破坏 形态 | 试件编号 | F_u /kN | ζ | τ_{\max} /MPa | $\tau_{\max,ave}$ /MPa | 破坏 形态 |
|-----------|-----------|---------|-----------------------|---------------------------|----------|------------|-----------|---------|-----------------------|---------------------------|----------|
| E-6-R-5-1 | 13.97 | 1.26 | 19.29 | | S1 | E-8-P-5-1 | 18.26 | 1.20 | 23.04 | | S1 |
| E-6-R-5-2 | 13.43 | 1.21 | 22.34 | 21.64 | P | E-8-P-5-2 | 14.50 | 0.95 | 14.62 | 18.28 | S1 |
| E-6-R-5-3 | 13.70 | 1.23 | 23.29 | | S1 | E-8-P-5-3 | 16.38 | 1.08 | 17.17 | | S1 |
| E-8-R-5-1 | 31.96 | 1.43 | 29.59 | | P | C-6-P-5-1 | 2.15 | 0.23 | 5.72 | | S1 |
| E-8-R-5-2 | 30.35 | 1.36 | 30.71 | 30.44 | P | C-6-P-5-2 | 4.57 | 0.49 | 9.92 | 8.67 | S1 |
| E-8-R-5-3 | 31.16 | 1.40 | 31.01 | | P | C-6-P-5-3 | 3.76 | 0.40 | 10.36 | | S1 |
| E-6-R-3-1 | 14.24 | 1.28 | 39.00 | | S1 | C-8-P-5-1 | 6.18 | 0.41 | 7.05 | | S1 |
| E-6-R-3-2 | 12.36 | 1.11 | 31.51 | 34.26 | S1 | C-8-P-5-2 | 9.67 | 0.64 | 10.98 | 9.62 | S1 |
| E-6-R-3-3 | 11.82 | 1.06 | 32.27 | | S1 | C-8-P-5-3 | 9.94 | 0.65 | 10.83 | | S1 |
| E-8-R-3-1 | 21.49 | 0.96 | 34.22 | | S2 | C-6-P-10-1 | 9.13 | 0.98 | 9.01 | | S1 |
| E-8-R-3-2 | 17.73 | 0.79 | 31.82 | 29.74 | S2 | C-6-P-10-2 | 4.57 | 0.49 | 5.10 | 6.15 | S1 |
| E-8-R-3-3 | 19.93 | 0.89 | 23.17 | | S2 | C-6-P-10-3 | 4.83 | 0.52 | 4.33 | | S1 |
| E-6-P-5-1 | 8.60 | 0.92 | 12.32 | | S1 | C-8-P-10-1 | 8.06 | 0.53 | 5.23 | | S1 |
| E-6-P-5-2 | 11.28 | 1.21 | 27.97 | 20.55 | S1 | C-8-P-10-2 | 14.77 | 0.97 | 8.09 | 6.94 | S1 |
| E-6-P-5-3 | 9.40 | 1.01 | 21.37 | | S1 | C-8-P-10-3 | 12.62 | 0.83 | 7.51 | | S1 |

2) 植筋胶种类的影响如图 4(b)所示.在钢筋强度和锚固长度相同的情况下,采用环氧型植筋胶的试件,其粘结强度比采用水泥基植筋胶的试件的粘结强度高.试件 E-8-P-5 的粘结强度始终比试件 C-8-P-5 的粘结强度高,并且前者的极限粘结强度平均值是后者的极限粘结强度平均值的 1.90 倍.因此,在进行钢筋植入花岗岩石材中锚固时,应采用粘结强度更高的环氧型植筋胶.

3) 钢筋表面特征的影响如图 4(c)所示.对比试件 E-6-R-5 与试件 E-6-P-5 可以发现,在相同植筋胶和锚固长度的情况下,采用带肋钢筋比采用光圆钢筋的具有更高的粘结强度.同时由表 3 可知:试件 E-6-R-5 的极限粘结强度平均值相对试件 E-6-P-5 提高了 5%,试件 E-8-R-5 的极限粘结强度平均值相对试件 E-8-P-5 提高了 67%.钢筋表面特征对粘结强度有一定的影响,采用带肋钢筋可以提高试件的粘结强度.

2.3 最小锚固长度的确定

ζ 为试验极限荷载与钢筋材性试验屈服荷载的比值.当 ζ 大于 1 时,表明钢筋在滑移前已经达到屈服强度,因此认为试件的锚固长度满足要求;而当 ζ 小于 1 时,则钢筋滑移前钢筋未达到屈服强度.由表 3 可知:采用环氧型植筋胶对带肋钢筋进行锚固时,锚固长度为 $3d$ 的试件,不能保证 ζ 大于 1;而锚固长度为 $5d$ 的试件(E-6-R-5(1~3)和 E-8-R-5(1~3)),其 ζ 值均大于 1.这表明:采用环氧型植筋胶对变形钢筋进行植筋时,锚固长度为 $5d$ 可以满足试件的锚固要求.但同样锚固长度的光圆钢筋(试件 E-6-P-5(1~3)和 E-8-P-5(1~3)),平均 ζ 值均比带肋钢筋的值小,且在 6 个试件中有 2 个试件的 ζ 值(0.92 和 0.95)小于 1,相差不大.当采用水泥基植筋胶进行花岗岩上光圆钢筋的植筋锚固时,锚固长度 $10d$ 的两组试件 C-6-P-10(1~3)和 C-8-P-10(1~3)的 ζ 值均小于 1.可见,水泥基植筋胶的锚固性能明显劣于环氧型植筋胶,若需采用高粘聚力的水泥基植筋胶,应适当增加锚固长度.对水泥基植筋胶进行带肋钢筋植筋锚固性能和最小锚固长度取值,仍有待进一步研究.

鉴于钢筋具有较长的强化段,工程运用中可以适当利用钢筋的强化段,提高钢筋强度利用率.一般光圆钢筋为碳素钢,强屈比为 1.54~1.67;一般带肋钢筋为低碳合金钢,强屈比为 1.33~1.54.将试验临界锚固长度与钢筋的强屈比的乘积定义为最小锚固长度.采用环氧型植筋胶进行花岗岩上光圆钢筋的植筋锚固时,临界锚固长度取为 $6d$,最小锚固长度为 $9.24d\sim10.02d$,取 $10d$.进行花岗岩上带肋钢筋

的植筋时,临界锚固长度为 $5d$,最小锚固长度为 $6.65d\sim7.25d$,取 $7d$. 因此,工程中采用环氧型植筋胶进行植筋时,对于带肋钢筋,建议的最小锚固长度为 $7d$. 对于光圆钢筋,可适当增加锚固长度,建议最小锚固长度取 $10d$.

3 结 论

由花岗岩石材植筋锚固拉拔试验可得出以下 3 点结论.

- 1) 钢筋与花岗岩石材的粘结强度随钢筋的锚固长度的增大而减小. 采用带肋钢筋能够在一定程度上提高锚固钢筋的粘结强度.
- 2) 环氧型植筋胶的粘结性能明显优于水泥基植筋胶的粘结性能,进行花岗岩石材的植筋锚固时,优先采用环氧型植筋胶. 若需采用高粘聚力的水泥基植筋胶时,应适当增加锚固长度.
- 3) 采用环氧型植筋胶进行花岗岩上的带肋钢筋植筋锚固时,建议工程应用的最小锚固长度为 $7d$. 进行花岗岩上光圆钢筋植筋锚固时,建议工程应用的最小锚固长度为 $10d$.

参考文献:

[1] 张楠,郭子雄. 花岗岩石楼板的受弯性能试验[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2012,33(2):184-187.
[2] 郭子雄,黄群贤,柴振岭,等. 石结构房屋抗震防灾关键技术研究 with 展望[J]. 工程抗震与加固改造,2009,31(6):47-51.
[3] 赵羽习,金伟良. 钢筋与混凝土粘结本构关系的试验研究[J]. 建筑结构学报,2002,23(1):32-37.
[4] 周新刚,王尤选,曲淑英. 混凝土植筋锚固极限承载能力分析[J]. 工程力学,2002,19(6):82-86.
[5] 周新刚. 混凝土植筋锚固性能分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(7):1169-1173.
[6] 肖成志,田稳冬,孙文君,等. 影响混凝土植筋锚固性能因素的试验分析[J]. 建筑结构学报,2010(增刊 2):275-278.
[7] 姜丽萍,崔士起,成勃. 无机材料植筋拉拔性能试验研究[J]. 建筑科学,2011,27(11):37-40.
[8] 赵卫平,肖建庄. 带肋钢筋与混凝土间粘结滑移本构模型[J]. 工程力学,2011,28(4):164-171.
[9] BIVIRIDGE R L W. Repairs and extensions to concrete structures using resin anchored bars [J]. Civil Engineering and Public Works Review,1973,15(3):609-617.
[10] ZAVLIARIS K D,KOLLIAS S,SPEARE P R S. An experimental study of adhesively bonded anchorages in concrete [J]. Magazine of Concrete Research,1996,48(175):79-93.

Experimental Study on the Anchorage Performance of
Steel Bar Planted into Granite Stone

ZHENG Yi-peng, GUO Zi-xiong, CHAI Zhen-ling, YE Yong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The anchorage performance and minimum anchorage length are key points of steel planting in strengthening stone members. A total of 30 pull-out tests were conducted to investigate the effect of anchorage length, adhesive type, and characteristic of bar surface on the anchorage performance of steel bars planted into granite stone. Test results show that, the anchorage strength between the steel bar and the stone decreases as the anchorage length increases; the anchorage strength of ribbed steel bars is higher than the one of plain steel bars; the anchorage performance of epoxy adhesive is better than the one of cement adhesive. Based on the test results, a minimum anchorage length of $7d$ (d =bar diameter) is recommended for the ribbed steel bars planted into granite stone using epoxy as the anchorage agent, $10d$ for the plain steel bars.

Keywords: stone structure; strengthening; anchorage length; anchorage performance; pull-out test