

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202201032



# 预制 CFRP 筋增强条加固素石板 受弯性能有限元分析

陈志新<sup>1</sup>, 苗伟<sup>1</sup>, 叶勇<sup>1,2</sup>

(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:** 为研究预制碳纤维增强复合材料(CFRP)筋增强条加固石板受弯承载力的影响机理,并基于理论提出加固石板的受弯承载力计算公式,采用有限元程序对预制 CFRP 筋增强条加固石板受弯性能进行非线性数值模拟.在验证有限元模型可靠性的基础上,进一步开展参数分析,研究 CFRP 筋直径及配筋率、增强条宽度及厚度对预制 CFRP 筋增强条加固石板受弯承载力的影响规律.模拟结果表明:加固石板的极限承载力随 CFRP 筋配筋率的增大而增大,对开裂荷载的影响较小;开裂荷载随增强条宽度及厚度的增大而增大,对极限承载力的影响较小;有限元模型能模拟构件的开裂及破坏形态,且提出的计算公式能预测构件的开裂弯矩和极限弯矩.

**关键词:** 石结构;石板;CFRP 筋;加固;受弯性能;有限元模拟

**中图分类号:** TU 363 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)05-0570-09

## Finite Element Analysis of Flexural Performance of Stone Slabs Strengthened With Prefabricated CFRP-Reinforced Stone Strips

CHEN Zhixin<sup>1</sup>, MIAO Wei<sup>1</sup>, YE Yong<sup>1,2</sup>

(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:** In order to study the mechanism of bending capacity of stone slabs strengthened with prefabricated carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-reinforced stone strips, based on the theory, a formula for calculating the bending capacity of the strengthened stone slabs was proposed. The finite element program was used to carry out nonlinear numerical analysis on the flexural performance of the slabs with prefabricated CFRP-reinforced stone strips. The reliability of the finite element model was validated, and then parametric analysis was carried out to investigate the influence of the diameter and reinforcement ratio of CFRP bars and width and thickness of the prefabricated stone strips on the flexural performance of the strengthened stone slabs. The simulation results show that the increase of reinforcement ratio of CFRP bars improves the ultimate bearing capacity of the strengthened stone slabs, and influences little on the cracking load. The increase of the width and thickness of the reinforcing strips improves the cracking load increases, and influences little on the ultimate

bearing capacity. The finite element model can simulate the cracking and failure modes of the members, and the proposed calculation formula can predict the cracking and ultimate bending moment of the members.

**Keywords:** stone structure; stone slab; carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bar; strengthening; flexural performance; finite element modelling

石材是人类最早使用并沿用至今的建筑材料之一,具有抗压强度高、耐久性能好、取材方便等特点。在我国东南沿海地区,目前仍有大量的石结构民居建筑在役,构成独特的区域建筑特色<sup>[1]</sup>。在这部分石结构建筑中,主要的结构构件包括承重墙、柱、梁、板等,均由当地出产的天然石材制作而成。天然石材属于脆性材料,且抗拉强度远小于其抗压强度,故石梁、石板这类石结构受弯构件的变形能力较弱,如不采取必要的增强措施则容易出现脆性破坏。为提高石结构建筑在正常使用和意外作用下的安全性,在尽可能保护建筑特色的前提下对石梁、石板进行加固十分重要。另一方面,石材是我国部分地区的重要产业,在不影响外观的前提下提高石材制品的开裂性能,对于扩大石材产业的应用范围具有显著意义。

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳性好等特点,近年来在结构加固领域得到越来越多的关注和应用<sup>[2]</sup>。武晓敏等<sup>[3]</sup>对 4 根未加固石梁和 4 根 CFRP 加固石梁试件进行受弯性能试验,研究 CFRP 对改善石梁承载能力和破坏形态的作用。Wei 等<sup>[4]</sup>对 CFRP 加固石材构件的受弯性能进行研究,结果表明,采用 CFRP 布进行加固可提高石梁的受弯性能,破坏形态由脆性破坏转变为具有一定变形能力的破坏。戴泉玉<sup>[5]</sup>的研究结果表明,CFRP 布能有效提高石梁的承载力和变形能力。Fayala 等<sup>[6]</sup>研究不同层数玻璃纤维增强复合材料(GFRP)条带加固石砌体梁的效果,并通过数值模型分析加固后石砌体梁的破坏形态和承载力。Shrive<sup>[7]</sup>的研究结果表明,纤维增强复合材料(FRP)可提高石结构构件的抗裂性,从而有效增强石结构的整体性。郭子雄等<sup>[8]</sup>进行了 26 个花岗岩石材表层嵌埋 CFRP 筋试件的拔出试验,研究 CFRP 筋直径、锚固长度和粘结材料厚度对石材-CFRP 筋粘结性能的影响。刘阳等<sup>[9]</sup>基于表层嵌埋加固法,提出在石梁受拉区开槽并嵌埋 CFRP 筋的组合石梁技术。Ye 等<sup>[10-11]</sup>将表层嵌埋预应力 CFRP 筋技术与石结构受弯构件结合,提出表层嵌埋预应力 CFRP 筋组合石梁/板,并通过试验研究这一组合结构构件的力学性能。文献[12-14]采用预制 CFRP 筋增强板、增强条分别对石梁、石板进行加固,并开展了试验研究,结果表明,预制 CFRP 筋增强板、增强条可显著提高石板的承载力和变形性能。

上述的石结构受弯构件加固技术中,预制 CFRP 筋增强板/条加固技术具有现场操作简便、加固效果良好等特点,且对石结构受弯构件原有外观的影响较小,可用于对既有石结构尤其是历史风貌石结构进行加固。与此同时,目前的研究仅停留在模型试验阶段,对于加固机理和定量化效果仍有待进一步深入探讨。为此,本文采用通用非线性有限元程序对预制 CFRP 筋增强条加固石板的受弯性能进行建模,开展了参数分析,研究不同参数对加固石板受力性能的影响规律,并提出对应的承载力计算模型。

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of specimens

试件编号	$b_r/\text{mm}$	$D_b/\text{mm}$	$n$	$\rho/\%$
P-1	—	—	0	0
S-1d5-50	50	5	1	0.10
S-1d5-70	70	5	1	0.10
S-1d7-70	70	7	1	0.19
S-2d5-50	50	5	2	0.19
S-2d5-300	300	5	2	0.15

1.1 已有试验的试件参数

有限元分析模型参照文献[13]中的 6 个预制 CFRP 筋增强条加固素石板试件,试件参数,如表 1 所示。表 1 中: $b_r$  为增强条的横截面宽度; $D_b, n, \rho$  分别为 CFRP 筋的直径、数量和配筋率。石板的长×宽×高为 2 000 mm×300 mm×60 mm,试验段长度为 1 800 mm。预制 CFRP 筋增强条的长度与被加固石板相同,均为 25 mm;增强条的宽度有 50,70 mm 两种,每块增强条内嵌 1 根 CFRP 筋,CFRP 筋的直径有 5,7 mm 两种;CFRP 筋配筋率为 0.10%~0.19%。

1.2 有限元模型

预制 CFRP 筋增强条加固石板有限元模型,如图 1 所示。采用有限元程序 ABAQUS 进行预制 CFRP 筋增强条加固石板受弯性能的有限元建模分析,有限元模型的几何参数与实际试件相同。文献[13]的研究表明,所用的粘结剂可有效粘结 CFRP 筋、增强条与被加固石板,加载试验过程中未发现各

部件间的滑移现象. 因此, 采用 ABAQUS 软件中自带的嵌埋功能将 CFRP 筋嵌在粘结剂中, 忽略 CFRP 筋与粘结剂之间的相对滑移; 粘结剂与石板之间采用绑定定义其接触行为, 假定两者的变形完全同步.

1.3 有限元单元选取与网格划分

有限元模型中, 石板、增强条与粘结剂采用三维减缩积分实体单元(C3D8R)进行模拟, CFRP 筋则采用三维桁架单元(T3D2)进行模拟. 为提高有限元计算的收敛性, 采用结构化网格划分技术对所建立的有限元模型进行网格划分, 其中, 所有部件的网格尺寸均设置为 20 mm 左右.

1.4 边界条件与荷载施加方法

为模拟实际试验中 4 点弯曲加载的边界条件, 将有限元模型的一端设置为固定铰支座, 即约束所有平动自由度和除平面之外的转动自由度, 另一端设置为滑动铰支座, 即约束除石板长度方向之外的平动自由度和除平面之外的转动自由度. 设置参考点, 并将加载面耦合至参考点进行位移加载, 最大加载位移为 60 mm.

1.5 材料本构关系模型

材料本构关系模型, 如图 2 所示. 图 2 中:  $\epsilon_{tu}, \epsilon_{cu}$  为石材极限受拉应变、受压应变;  $\sigma_s, \epsilon_s$  分别为石材应力、应变;  $f_{st}, f_{sc}$  分别为石材抗拉强度、抗压强度;  $\sigma_f, \epsilon_f$  分别为 CFRP 筋的受拉应力、受拉应变;  $\sigma_{fu}, \epsilon_{fu}$  分别为 CFRP 筋极限受拉应力、受拉应变;  $\sigma_w, \epsilon_w$  分别为粘结剂的受拉应力、受拉应变;  $\sigma_{wu}, \epsilon_{wu}$  分别为粘结剂极限受拉应力、受拉应变.

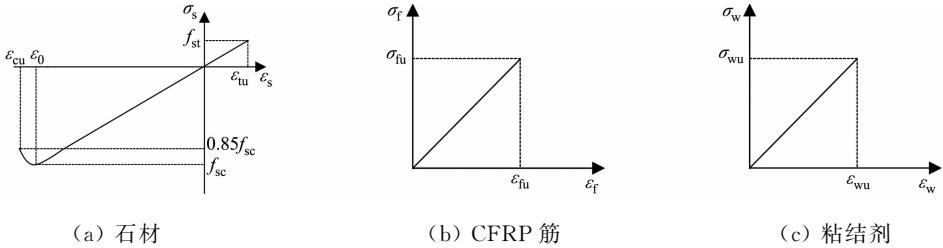


图 2 材料本构关系模型

Fig. 2 Material constitutive relation models

石材与混凝土的材性相近, 具有受压强度高和容易开裂等特性. 采用 ABAQUS 软件中的混凝土损伤塑性模型模拟石材, 石材的受压应力( $\sigma_c$ )-受压应变( $\epsilon_c$ )关系采用文献[15]提出的模型(图 2(a)). 该模型将石材受压分为上升和下降两个过程, 上升阶段呈线性, 石材的峰值受压应变( $\epsilon_0$ )取为  $3\,000 \times 10^{-6}$ , 极限受压应变( $\epsilon_{cu}$ )取为  $3\,300 \times 10^{-6}$ . 石材单轴受压模型表达式为

$$\sigma_c = E_s \epsilon_c, \quad \epsilon_c \leq \epsilon_0 \text{ (上升阶段)}, \tag{1}$$

$$\sigma_c = f_{sc} \frac{\xi}{20(\xi - 1)^2 + \xi}, \quad \epsilon_c > \epsilon_0 \text{ (下降阶段)}. \tag{2}$$

石材单轴受拉模型表达式为

$$\sigma_t = E_s \epsilon_t, \quad \epsilon_t \leq f_{st}/E_s \text{ (破坏前)}, \tag{3}$$

$$\sigma_t = 0, \quad \epsilon_t > f_{st}/E_s \text{ (破坏后)}. \tag{4}$$

式(1)~(4)中:  $E_s$  为石材弹性模量;  $\xi = \epsilon_c/\epsilon_0$ ;  $\sigma_t, \epsilon_t$  分别为石材受拉应力、受拉应变.

定义 CFRP 筋为线弹性材料, 其应力( $\sigma_f$ )-应变( $\epsilon_f$ )关系, 如图 2(b)所示. CFRP 筋模型表达式为

$$\sigma_f = E_f \epsilon_f. \tag{5}$$

式(5)中:  $E_f$  为 CFRP 筋的弹性模量.

定义粘结剂近似为线弹性材料, 其应力( $\sigma_w$ )-应变( $\epsilon_w$ )关系, 如图 2(c)所示. 粘结剂模型表达式为

$$\sigma_w = E_w \epsilon_w. \tag{6}$$

式(6)中:  $E_w$  为粘结剂的弹性模量.

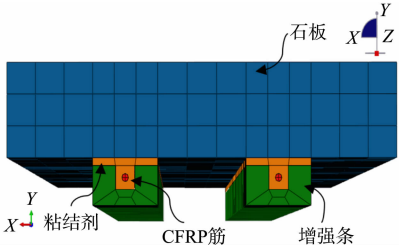


图 1 预制 CFRP 筋增强条加固石板有限元模型  
Fig. 1 Finite element model of slab strengthened with prefabricated CFRP-reinforced stone strips

## 2 数值模型验证及分析

### 2.1 破坏模式

有限元计算得到的石板应力分布与试验破坏模式的对比,如图 3 所示。由图 3 可知:素石板试件 P-1 最终在纯弯段出现一条裂缝并突然发生断裂破坏,试件破坏前变形不明显,一裂即断,为典型的脆性破坏;其他预制 CFRP 筋增强条加固石板试件在弯曲加载过程中均产生多条裂缝,挠曲变形明显,破坏模式从脆性断裂转变为弯曲破坏,且破坏前的挠曲变形明显。在加固石板试件中,有限元模拟和试验得

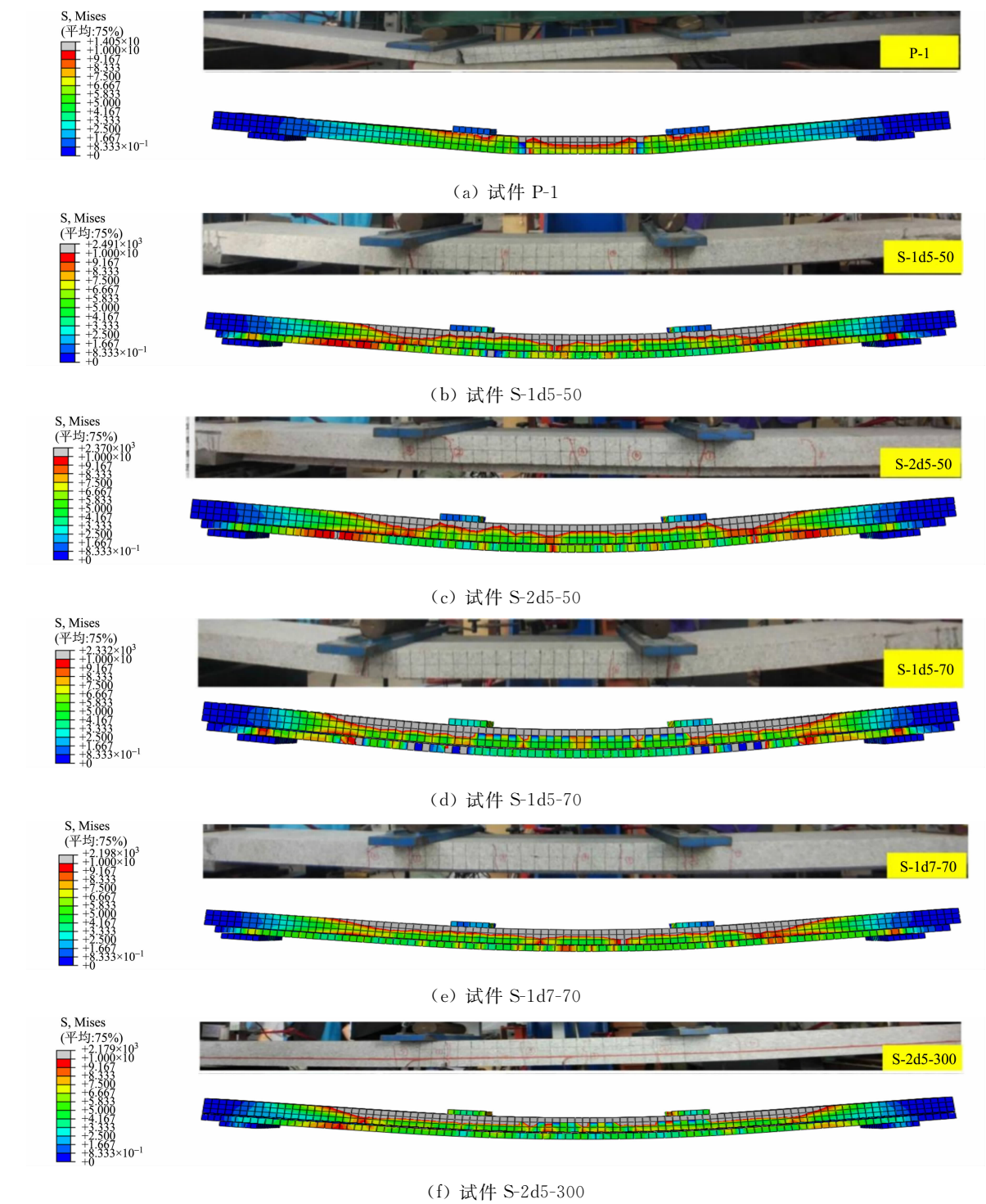


图 3 有限元计算得到的石板应力分布与试验破坏模式的对比

Fig. 3 Comparison between stress distribution of slabs calculated by finite element method and experimental failure modes

到的开裂截面受压区高度接近. 总体而言,有限元模拟得到的石板变形、破坏形态与试验结果相近.

2.2 荷载-挠度曲线

试件的荷载( $P$ )-挠度( $\Delta$ )曲线的有限元模拟结果和试验结果对比,如图 4 所示. 由图 4 可知:有限元模拟结果和试验结果总体吻合较好. 其中,有限元模拟和试验得到的初始刚度接近,试件开裂时对应的荷载和挠度基本一致. 除素石板试件 P-1 和 CFRP 筋配置较少的试件 S-1d5-50 外,有限元模拟和试验均获得了加固石板明显的裂缝开展阶段和类强化阶段.

此外,石板开裂后的荷载-挠度曲线均呈现锯齿形波动,对应新裂缝的产生及受拉区石材退出工作. 有限元模拟得到的曲线波动幅度小于试验结果,主要原因在于有限元模型基于连续体假设,石板开裂时模型并未真正断开,故荷载的下降幅度较小.

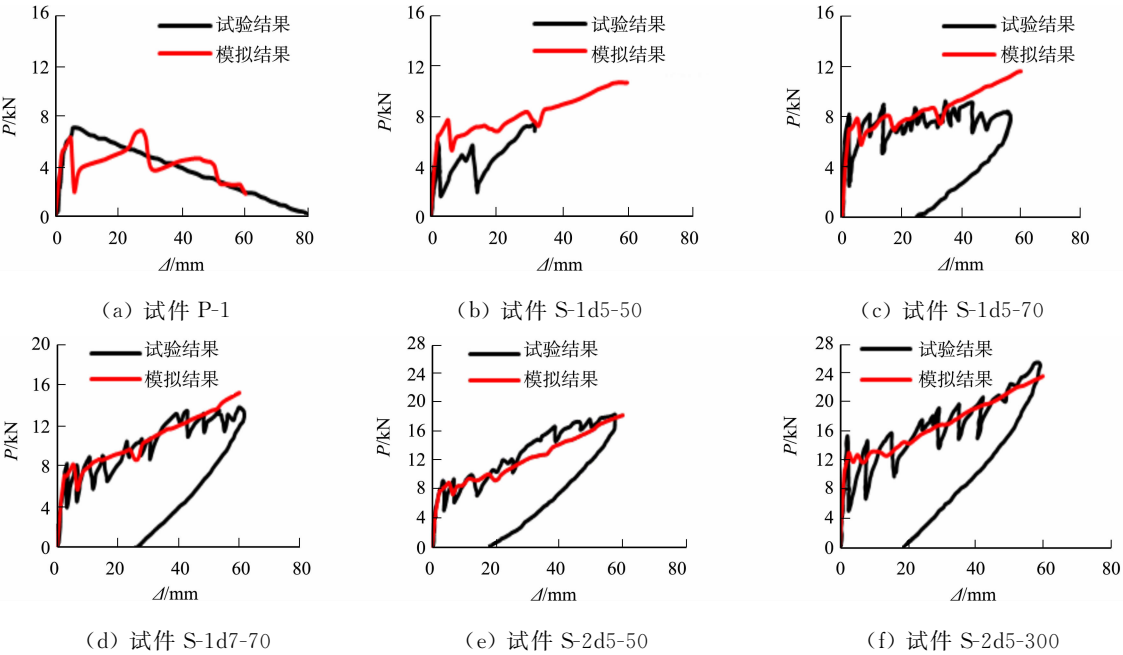


Fig. 4 荷载-挠度曲线的有限元模拟结果和试验结果对比

Fig. 4 Comparison of load-deflection curves between finite element simulated results and experimental results

2.3 加固石板截面高度-跨中应变曲线

加固石板截面高度( $h$ )-跨中应变( $\epsilon_s$ )曲线的有限元模拟结果和试验结果对比,如图 5 所示. 图 5 中: $P_{cr}$ 为开裂荷载. 由图 5 可知:石板开裂前,跨中应变沿截面高度基本呈线性分布,中性轴位于截面高度中部. 由于加固石板的受拉弹性模量( $E_t$ )略小于其受压弹性模量( $E_c$ ),中性轴随荷载的增大逐渐上移,且随着荷载增大,加固石板受拉区逐渐产生细小裂缝,受拉弹性模量( $E_t$ )进一步降低.

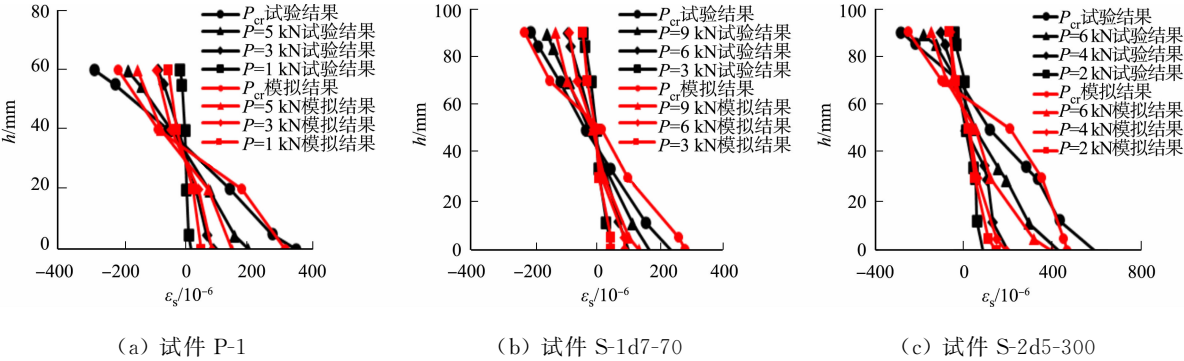


Fig. 5 加固石板截面高度-跨中应变曲线的有限元模拟结果和试验结果对比

Fig. 5 Comparison of height-midspan strain curves of strengthened stone slabs between finite element simulation results and experimental results

2.4 CFRP 筋应变

荷载-跨中位置 CFRP 筋应变有限元模拟结果与试验结果对比,如图 6 所示. 由图 6 可知:当荷载小



于石板的开裂荷载时,有限元模拟得到的曲线与试验曲线较吻合;石板开裂后,两者略有差异,但整体趋势基本吻合.由于试验中部分试件的 CFRP 筋应变计过早发生破坏,使有限元模拟得到的 CFRP 筋应变最大值大于试验结果.

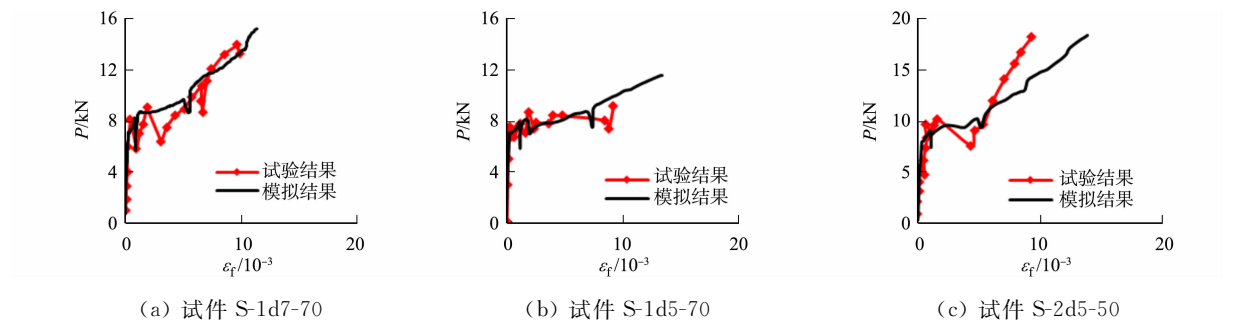


Fig. 6 CFRP 筋应变有限元模拟结果和试验结果对比

Fig. 6 Comparison of CFRP bar strain between finite element simulation results and experimental results

2.5 典型荷载-挠度曲线

预制 CFRP 筋增强条加固石板的典型荷载-挠度曲线,如图 7 所示.图 7 中:A,B,C 点分别对应试件达到开裂荷载、进入类强化、达到极限荷载的时刻.由图 7 可知:预制 CFRP 筋增强条加固石板的荷载-挠度曲线呈现典型的三阶段发展趋势,第 1 阶段为开裂前的弹性阶段,此阶段荷载主要由石材承担,荷载与挠度呈线性发展关系,到达开裂荷载时,试件开裂,荷载突然下降;第 2 阶段为裂缝开展阶段,随着荷载增大,试件跨中挠度增大,加固石板沿纯弯段范围内出现多条裂缝,荷载-挠度曲线呈锯齿状发展;第 3 阶段为类强化阶段,纯弯段的裂缝充分发展后,受拉区石材退出工作,拉力完全由 CFRP 筋承担,随着 CFRP 筋应力增大,荷载呈上升趋势,直至加载结束.不同点(A,B,C)状态对应的应力云图,如图 8 所示.

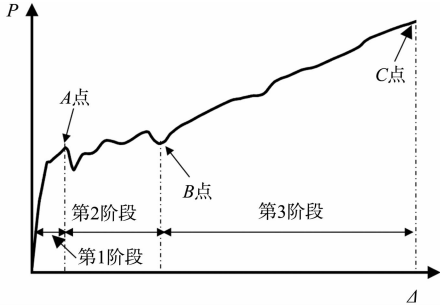


图 7 典型荷载-挠度曲线

Fig. 7 Typical load-deflection curve

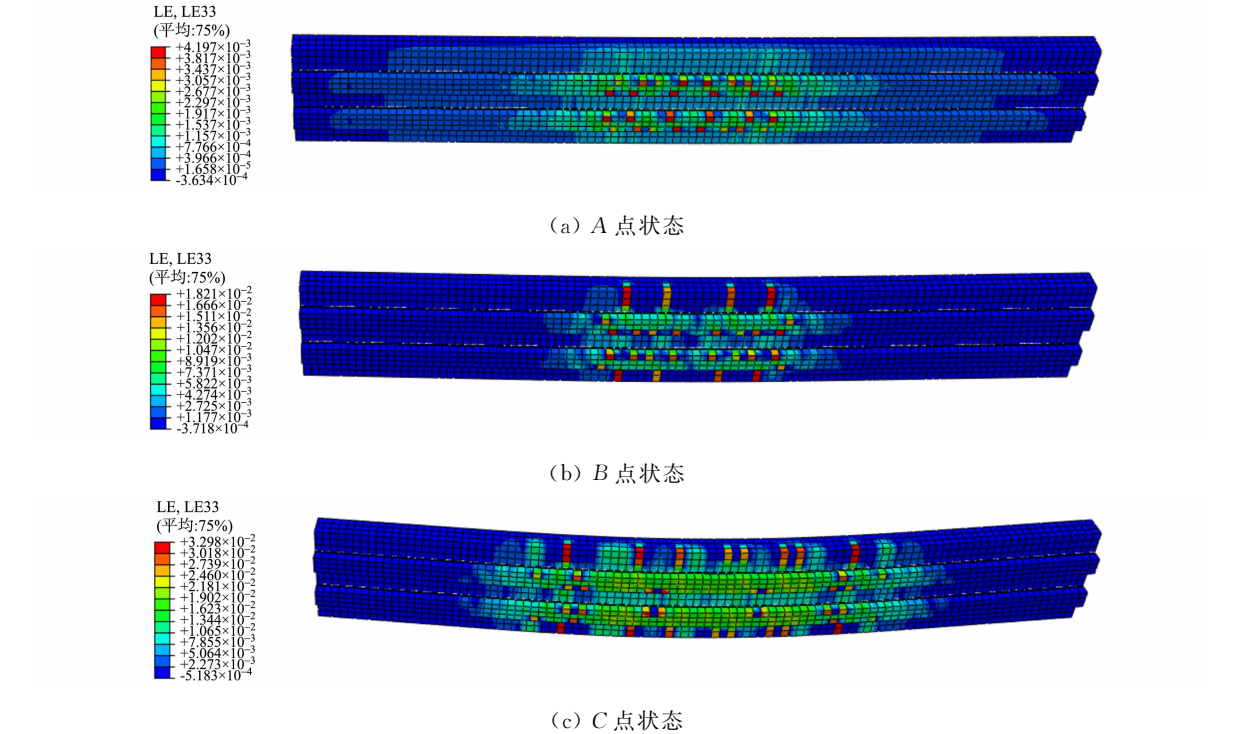


图 8 不同点状态对应的应力云图

Fig. 8 Stress nephograms corresponding to different point states

3 参数分析

3.1 有限元模型参数

由上述内容分析可知,有限元模型可较准确地模拟预制 CFRP 筋增强条加固石板的受弯力学性能. 基于文中建立的有限元模型,研究不同 CFRP 筋直径、CFRP 筋配筋率、增强条宽度及厚度( $c_r$ )对加固石板受力性能的影响. 有限元模型参数,如表 2 所示.

表 2 有限元模型参数  
Tab.2 Parameters of finite element model

试件编号	$b_r$ /mm	$c_r$ /mm	$D_b$ /mm	$n$	$\rho$ /%	试件编号	$b_r$ /mm	$c_r$ /mm	$D_b$ /mm	$n$	$\rho$ /%
S-2d5-300	300	25	5	2	0.15	S-3d5-300	300	25	5	3	0.22
S-2d7-300	300	25	7	2	0.28	S-4d5-300	300	25	5	4	0.29
S-2d9-300	300	25	9	2	0.47	S-5d5-300	300	25	5	5	0.36
S-2d11-300	300	25	11	2	0.70	S-2d5-50-35	50	35	5	2	0.20
S-2d5-50	50	25	5	2	0.19	S-2d5-50-45	50	45	5	2	0.20
S-2d5-150	150	25	5	2	0.19	S-2d5-50-55	50	55	5	2	0.20
S-2d5-250	250	25	5	2	0.16						

3.2 不同参数对承载力的影响

有限元模拟得到的不同参数对加固石板荷载-挠度曲线的影响,如图 9 所示. 由图 9(a),(b)可知:随着 CFRP 筋直径和配筋率的增大,加固石板的极限承载力均有明显提高,由于开裂前荷载主要由石材承担,石板的开裂荷载较为接近;此外,CRPP 筋用量的增加使石板开裂后筋材产生的应变增量减小,故试件的荷载-挠度曲线主要呈两阶段形式,曲线的锯齿状波动较少. 由图 9(c),(d)可知:加固石板的开裂荷载和极限荷载均随增强条厚度和宽度的增大而提高,且曲线呈三阶段发展形式.

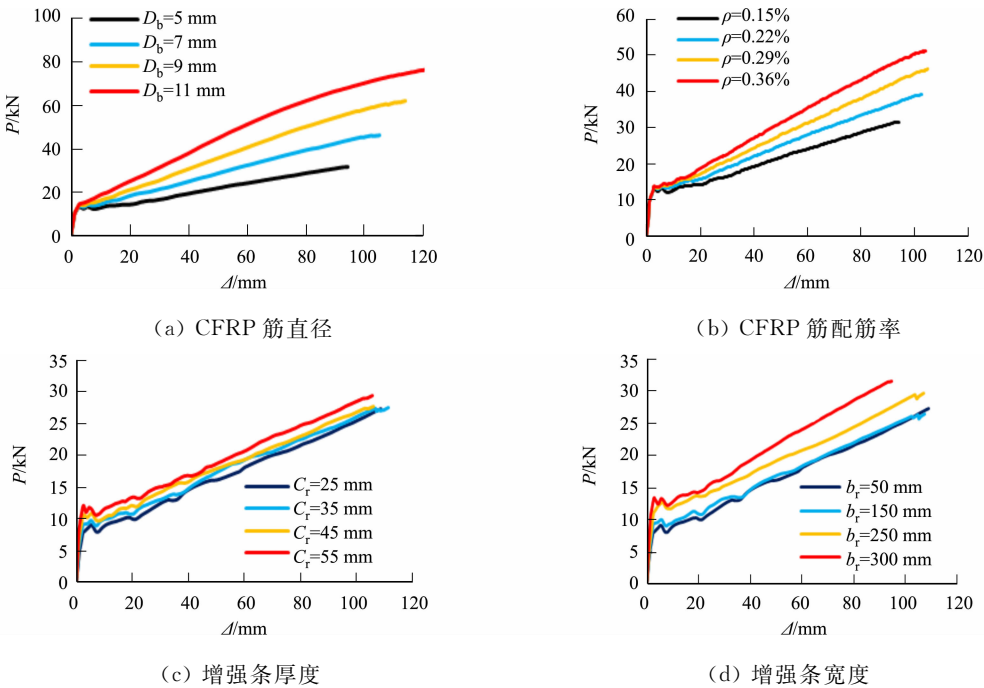


图 9 不同参数对加固石板荷载-挠度曲线的影响

Fig. 9 Influence of different parameters on the load-deflection curves of strengthened stone slabs

3.3 开裂荷载

受力过程中,当受拉区石材达到其抗拉强度时,石板发生开裂. 对于素石板,其截面惯性矩全部由素石板提供. 对于加固石板,考虑到试件中 CFRP 筋的截面与素石板和增强条相比较小,故忽略 CFRP 筋,只考虑增强条对被加固石板抗弯截面惯性矩的增大作用. 故石板的开裂弯矩( $M_{cr}$ )为

$$M_{cr}=I_zf_{st}/\alpha_t y_c.$$
(7)

式(7)中: $f_{st}=10.0\text{ MPa}$ ;  $I_z$  为截面惯性矩;  $\alpha_t$  为折减系数;  $y_c$  为受拉区石材边缘至中性轴的距离.

当增强条宽度较小时, 需要考虑折减系数. 折减系数  $\alpha_t$  根据增强条宽度与石板宽度( $b$ )的比值确定: 当  $b_r \leq b/3$  时,  $\alpha_t$  取 0.90; 当  $b/3 < b_r \leq b/2$  时,  $\alpha_t$  取 0.95; 当  $b_r > b/2$  时,  $\alpha_t$  取 1.00.

开裂弯矩计算值( $M_{cr,c}$ )与有限元模拟值( $M_{cr,FEA}$ )的对比, 如表 3 所示. 由表 3 可知: 公式计算结果与有限元模拟结果总体吻合良好,  $M_{cr,c}/M_{cr,FEA}$  的平均值为 0.99, 均方差为 0.001.

表 3 开裂弯矩计算值与有限元模拟值的对比

Tab. 3 Comparison between calculated values and finite element simulation values of cracking bending moment

试件编号	$M_{cr,c}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{cr,FEA}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{cr,c}/M_{cr,FEA}$	试件编号	$M_{cr,c}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{cr,FEA}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{cr,c}/M_{cr,FEA}$
S-2d5-300	4.05	3.93	1.03	S-3d5-300	4.05	3.93	1.03
S-2d7-300	4.05	4.03	1.01	S-4d5-300	4.05	4.02	1.01
S-2d9-300	4.05	4.10	0.99	S-5d5-300	4.05	4.07	1.00
S-2d11-300	4.05	4.24	0.95	S-2d5-50-35	2.57	2.73	0.94
S-2d5-50	2.13	2.13	1.00	S-2d5-50-45	2.98	3.08	0.97
S-2d5-150	2.55	2.64	0.97	S-2d5-50-55	3.47	3.45	1.01
S-2d5-250	3.57	3.56	1.00				

3.4 极限承载力

对于采用预制 CFRP 筋增强条加固的石板而言, 可能产生两种破坏状态, 即受压区石材边缘压溃或受拉区 CFRP 筋达到极限应变而断裂. 由于石材抗压强度较高, 考虑 CFRP 筋达到极限应变而发生断裂破坏. 根据截面受力平衡条件, 可得

$$F_{sc} - F_f = 0. \tag{8}$$

式(8)中:  $F_{sc}$  为石材截面受压区合力,  $F_{sc} = \frac{1}{2} \sigma_{stc} bc$ ,  $\sigma_{stc}$  为石材受压边缘应力,  $c$  为受压区高度;  $F_f$  为 CFRP 筋所受拉力,  $F_f = A_f E_f \epsilon_{fu}$ ,  $A_f$  为 CFRP 筋截面面积.

根据截面变形协调关系, 可得

$$\frac{\epsilon_{stc}}{\epsilon_{fu}} = \frac{c}{h_0 - c}. \tag{9}$$

式(9)中:  $\epsilon_{stc}$  为石材受压边缘应变,  $\epsilon_{stc} = \sigma_{stc}/E_s$ ;  $h_0$  为石材受压边缘至 CFRP 筋的距离.

由式(8)可得

$$c = \left[ -A_f E_f \epsilon_{fu} + \sqrt{(A_f E_f \epsilon_{fu})^2 + 2 E_s \epsilon_{fu}^2 b A_f E_f h_0} \right] / E_s \epsilon_{fu} b. \tag{10}$$

根据受力平衡, 得到加固石板的极限弯矩( $M_{pf}$ )为

$$M_{pf} = \frac{1}{3} E_s \epsilon_{stc} b c^2 + A_f E_f \epsilon_{fu} (h_0 - c). \tag{11}$$

极限弯矩计算值( $M_{pf,c}$ )与有限元模拟值( $M_{pf,FEA}$ )的对比, 如表 4 所示. 由表 4 可知: 公式计算结果与有限元模拟结果总体吻合良好,  $M_{pf,c}/M_{pf,FEA}$  的平均值为 0.99, 均方差为 0.010.

表 4 极限弯矩计算值与有限元模拟值的对比

Tab. 4 Comparison between calculated values and finite element simulation values of ultimate bending moment

试件编号	$M_{pf,c}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{pf,FEA}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{pf,c}/M_{pf,FEA}$	试件编号	$M_{pf,c}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{pf,FEA}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{pf,c}/M_{pf,FEA}$
S-2d5-300	7.85	9.47	0.83	S-3d5-300	11.50	11.76	0.98
S-2d7-300	14.03	13.77	1.02	S-4d5-300	15.05	13.85	1.09
S-2d9-300	19.97	18.54	1.08	S-5d5-300	18.50	15.33	1.21
S-2d11-300	27.01	24.43	1.11	S-2d5-50-35	7.85	8.23	0.95
S-2d5-50	7.85	8.19	0.96	S-2d5-50-45	7.85	8.33	0.94
S-2d5-150	7.85	7.97	0.98	S-2d5-50-55	7.85	8.81	0.89
S-2d5-250	7.85	8.84	0.89				

4 结论

1) 建立的有限元模型得出的荷载-应变曲线和破坏形态均符合试验结果, 表明文中建立的有限元模型适用于模拟分析预制 CFRP 筋增强条加固石板的受力情况.



- 2) 全过程受力分析发现,试件最初由石板承受拉力,达到开裂荷载时,试件的承载力下降,产生较多的裂缝;随着荷载的逐渐增大,增强条的受拉应力逐渐变小;由 CFRP 筋受拉,CFRP 筋应变逐渐增大. 预制 CFRP 筋增强条加固石板在一定程度上能提高试件的开裂荷载和极限荷载.
- 3) 参数分析发现,CFRP 筋的直径和配筋率、增强条的宽度和厚度会影响石板的承载能力. CFRP 筋的直径和配筋率对试件的开裂荷载影响不大,但是会对极限承载力造成影响;增强条的宽度和厚度对试件的开裂荷载具有较大的影响,但对极限承载力影响不大.
- 4) 提出的计算模型符合试验结果,对比计算模型和有限元模型的计算结果可知,提出的计算模型能够较好地分析预制 CFRP 筋增强条加固石板的开裂荷载、破坏形态及试件的抗弯承载力.

参考文献:

[1] 郭子雄,黄群贤,柴振岭. 石结构房屋抗震防灾关键技术研究与发展[J]. 工程抗震与加固改造,2009,31(6):47-51, 68. DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2009.06.013.

[2] 叶勇,郭子雄. CFRP 筋夹板式锚具锚固性能试验研究[J]. 工程力学,2012,29(8):172-179. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2010.11.0806.

[3] 武晓敏,谢剑,徐福泉. CFRP 加固青白石梁受弯性能试验研究[J]. 工程力学,2015,32(增刊1):215-220. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2014.04.s057.

[4] WEI Xi,ZHAO Dong,ZHANG Weixi. Testing study on the bending capacity of stone beam reinforced with CFRP [J]. Applied Mechanics and Materials,2013,2544(703):1542-1547. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.351-352.1542.

[5] 戴泉玉. CFRP 布加固石梁抗弯性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2016.

[6] FAYALA I,LIMAM O,STEFANO I. Experimental and numerical analysis of reinforced stone block masonry beams using GFRP reinforcement[J]. Composite Structures,2016,152:994-1006. DOI:10.1016/j.compstruct.2016.06.046.

[7] SHRIVE N G. The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of masonry[J]. Construction and Building Materials,2006,20:269-277. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.030.

[8] 郭子雄,刘宝成,刘阳. 石材表层嵌埋 CFRP 筋粘结性能试验研究[J]. 工程力学,2011,28(7):59-64.

[9] 刘阳,郭子雄,刘宝成. 嵌埋 CFRP 筋组合石梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):75-81. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2011.03.011.

[10] YE Yong,GUO Zixiong,CHAI Zhenling. Flexural behavior of stone slabs reinforced with prestressed NSM CFRP bars[J]. Journal of Composites for Construction,2014,18(4):04014004. DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000458.

[11] YE Yong,GUO Zixiong,LIU Yang,et al. Flexural behavior of stone beams reinforced with prestressed NSM CFRP bars[J]. Construction and Building Materials,2014,54:466-476. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.060.

[12] 张世江,郭子雄,叶勇. CFRP 筋增强板加固石梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(6):189-194,204. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0349.

[13] 叶勇,苗伟,郭子雄,等. 预制 CFRP 筋增强板加固素石板受弯性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(2):589-598. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2021.02.027.

[14] YE Yong,MIAO Wei,GUO Zixiong. Strengthening stone beams with prefabricated polymer-reinforced stone plates [J/OL]. Structures and Buildings,2020. (2020-07-23)[2022-01-08]. https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00165.

[15] 叶勇. 表层嵌埋预应力 CFRP 筋组合石梁/板受弯性能研究[D]. 厦门:华侨大学,2014.

(责任编辑:黄晓楠      英文审校:方德平)