

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202201033



CFRP 筋复合增强板加固石梁 受力性能有限元分析

邱锦华¹, 苗伟¹, 郭子雄^{1,2}, 叶勇^{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: 采用有限元程序 ABAQUS, 对碳纤维增强复合材料(CFRP)筋复合增强板加固石梁的受弯性能进行数值建模. 利用已有的荷载-挠度曲线、荷载-CFRP 筋应变曲线数据对建立的模型进行可靠性验证, 结果表明: 有限元模拟结果和试验结果吻合良好. 在此基础上, 对加固后的石梁进行受力全过程截面应力分析, 归纳得出荷载-变形特征曲线. 基于平截面假定, 提出采用 CFRP 筋复合增强板加固石梁的受弯承载力计算公式, 计算得出的开裂弯矩与试验结果和有限元模拟结果吻合较好.

关键词: 石梁; 加固; 有限元模拟; CFRP 筋; 受弯性能

中图分类号: TU 363

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)04-0432-08

Finite Element Analysis of Flexural Behavior of Stone Beams Strengthened With CFRP-Reinforced Stone Sheets

QIU Jinhua¹, MIAO Wei¹, GUO Zixiong^{1,2}, YE Yong^{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: Using finite element program ABAQUS, the numerical modeling of flexural behavior of stone beams strengthened with prefabricated carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-reinforced stone sheets is carried out. The reliability of the model is verified by the existing data of load-deflection curves and load-CFRP strain curves. The results show that: the finite element simulation results are in good agreement with the experimental results. On this basis, the cross-section stress analysis of the strengthened stone beam is carried out in the whole process, the load-deformation characteristic curve is summarized. Based on the plane section assumption, a formula calculating the flexural bearing capacity of stone beams strengthened with prefabricated CFRP-reinforced stone sheets is proposed. The calculated cracking moment is in good agreement with the experimental results and the finite element simulation results.

Keywords: stone beam; strengthening; finite element simulation; CFRP bar; flexural performance

石材具有抗压强度高、美观、耐久等特点, 是人类最早使用并沿用至今的建筑材料之一. 在我国闽南沿海一带, 花岗岩资源丰富、品质优良, 是 20 世纪 60—90 年代当地主要的民房建材. 至今, 闽南沿海地区仍存在大量石结构民房, 这部分建筑的主要结构构件(包括基础和上部主体结构的梁、板、柱、墙等)皆

收稿日期: 2022-01-14

通信作者: 郭子雄(1967-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事抗震防灾的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178485); 福建省科技计划项目(2020Y4011)

由石材砌筑而成. 花岗岩石材抗压强度高, 当用于以受压为主的构件时, 一般不存在承载力不足的问题; 然而, 石材受拉脆断的特性使得石结构民房中普遍采用的石梁、石板构件存在脆性断裂的潜在危险.

为了改善这类石结构受弯构件的脆性破坏形态, 提高石梁、石板在正常使用荷载和偶然荷载作用下的受力性能, 且考虑到碳纤维增强复合材料(CFRP)筋材较玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋材有较高的弹性模量, 已有学者开展了 CFRP 筋加固结构构件的相关研究. 郭子雄等^[1]开展了表层嵌埋 CFRP 筋石材试件的直接拔出试验, 研究 CFRP 筋直径、锚固长度和保护层厚度对石材、粘结剂与 CFRP 筋之间粘结性能的影响. 刘阳等^[2]提出表层嵌埋 CFRP 筋组合石梁这一新型加固技术, 进行了表层嵌埋 CFRP 筋组合石梁和未加固素石梁的受弯性能试验, 验证了该技术可有效提高石梁的受弯承载能力. 张兴虎等^[3]对 1/2 缩尺比例石梁中的钢筋施加纵向预应力并进行静载试验, 结果表明, 施加预应力能有效提高石梁的受弯承载力和抗裂能力. 张楠等^[4]对石板试件进行受弯性能试验, 研究石板的破坏形态, 通过石板沿截面高度的应变分布规律, 提出石板的受弯承载力计算公式. Ye 等^[5-6]进行表层嵌埋预应力 CFRP 筋加固石梁和石板的弯曲加载试验, 验证了该技术对提高石梁、石板受弯性能的有效性. 武晓敏等^[7]进行了 CFRP 布加固石梁的受弯性能试验研究, 研究表明, 采用 CFRP 布加固后的石梁具有更好的极限承载能力和变形能力, 并且根据试验结果提出了极限受弯承载力的简化计算公式. 谢剑等^[8]进行了体外预应力加固足尺石梁构件受弯性能的试验研究, 结果表明, 体外预应力加固技术能提高石梁的极限承载能力和变形能力. Miao 等^[9]提出了一种表层嵌埋预应力钢丝绳增强石板技术, 试验结果表明, 该技术可显著改善石板的弯曲性能; 相比于素石板, 增强后石板的承载力明显提高. Ceroni^[10]进行了外贴 CFRP 布和表层嵌埋 CFRP 加固钢筋混凝土梁在单调和循环荷载作用下的试验, 并对比了试验破坏载荷与理论计算结果. Kotynia^[11]研究了外贴(EB)和表层嵌埋(NSM)加固技术中纤维增强复合材料(FRP)与混凝土的粘结性能, 分析 6 个不同参数对粘结机理的影响, 获得内部钢筋对 FRP-混凝土粘结破坏模式的影响规律.

基于表层嵌埋 CFRP 增强技术, 张世江等^[12]进一步提出了预制 CFRP 筋增强板加固技术, 通过将 FRP 材料预先嵌埋于与被加固石梁相同材质的薄板形成增强板, 再粘贴增强板进行加固的方法, 有效克服了表层嵌埋 FRP 技术施工操作不易的缺陷. 为了验证该技术的可行性和有效性, 文献[12-14]开展了 CFRP 筋复合增强板加固石梁、石板受弯性能的试验研究, 并对比了 CFRP 筋复合增强板加固技术与表层嵌埋 CFRP 筋加固技术的区别. 已有研究结果表明, CFRP 筋复合增强板可有效改善素石梁、石板的破坏形态, 即由脆性断裂破坏形态转变为具有一定变形能力的多裂缝弯曲破坏形态, 且承载力得到显著提高. 同时, 采用 CFRP 筋复合增强板加固技术提高了石梁、石板的横截面高度, 故 CFRP 筋复合增强板加固石梁、石板的承载力高于表层嵌埋 CFRP 筋增强后的构件.

已有试验研究验证了 CFRP 筋复合增强板加固石梁、石板的有效性, 但关于该技术加固后构件的受力全过程性能和承载力计算模型方面仍有研究空间. 因此, 本文采用有限元程序对 CFRP 筋复合增强板加固石梁的受弯性能进行建模, 利用已有的试验数据对模型的可靠性进行验证; 然后, 基于验证后的有限元模型对加固石梁进行受力全过程分析, 并推导其承载力计算模型.

1 有限元建模及验证

1.1 建模信息

采用通用有限元程序 ABAQUS 进行非线性有限元建模. 选取文献[12]中的两个组合石梁试件 B-2d5-II 和 B-2d7-I 进行有限元建模. 内嵌 CFRP 筋增强板加固技术示意图, 如图 1 所示. 图 1 中: 在增强板的上表面沿着板长度方向开槽, 槽深与槽宽均为嵌入的 CFRP 筋直径的两倍; 加固石梁两端无锚固.

试件参数, 如表 1 所示. 表 1 中: D_f , n , A_f , ρ_f 分别为 CFRP 筋的直径、根数、总横截面面积和配筋率. 加固前石梁的截面尺寸(宽(b) \times 高(h))均为 150 mm \times

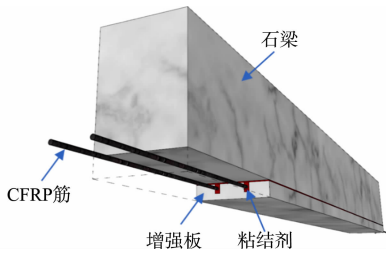


图 1 内嵌 CFRP 筋增强板加固技术示意图
Fig. 1 Schematic diagram of stone beams strengthened with prefabricated CFRP-reinforced stone sheet

200 mm, 石梁长度为 2 000 mm. 增强板的厚度为 20 mm, 长度和宽度与被加固石梁相等. 模型中考虑了 CFRP 筋与增强板及增强板与被加固石梁间的粘结剂, 其中, 增强板与被加固石梁间的粘结剂厚度为 2 mm. 采用 ABAQUS 软件的嵌入(embed)功能将 CFRP 筋嵌入粘结剂中, 根据试验结果可知, 该植筋锚固胶粘接效果良好, 加载过程中试件未发生剥离破坏, 故石梁与粘结剂、粘结剂与增强板之间采用绑定(tie)功能, 使这三部分材料形成整体. 为防止在石梁上的两个加载点和两个支座处发生局部破坏, 在模型中设置了刚度较大的垫板, 放在其对应位置.

1.2 材料属性

1.2.1 石材 石材的受压和受拉应力-应变本构关系参照文献[15], 其受压应力-应变本构关系为

$$\sigma_{bc} = E_s \epsilon_{bc}, \quad \epsilon \leq \epsilon_0 \text{ (上升阶段)}, \tag{1}$$

$$\sigma_{bc} = f_{sc} \frac{\zeta}{20(\zeta - 1)^2 + \zeta}, \quad \epsilon > \epsilon_0 \text{ (下降阶段)}. \tag{2}$$

式(1),(2)中: σ_{bc} , ϵ_{bc} 分别为石材的受压应力、受压应变; E_s 为石材弹性模量, 取为 45 GPa; f_{sc} 为石材抗压强度; $\zeta = \epsilon_c / \epsilon_0$, ϵ_c 为石材的受压应变. 石材的峰值应变 ϵ_0 取 $3\,000 \times 10^{-6}$, 极限应变 ϵ_{cu} 取 $3\,300 \times 10^{-6}$, 泊松比取 0.2.

受拉应力-应变本构关系为

$$\sigma_{bt} = E_s \epsilon_{st}, \quad \epsilon_{st} \leq f_{st} / E_s \text{ (破坏前)}, \tag{3}$$

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

式(3),(4)中: σ_{bt} , ϵ_{st} , f_{st} 分别为石材的受拉应力、受拉应变和受拉强度.

1.2.2 CFRP 筋 根据文献[15], 采用线弹性模型定义 CFRP 筋的应力-应变本构关系, 即

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

式(5)中: σ_f , ϵ_f , E_f 分别为 CFRP 筋的受拉应力、受拉应变和弹性模量.

1.2.3 粘结剂 粘结剂采用 HIT-RE500 植筋锚固胶, 根据试验结果将其设定为达到屈服强度即失效的弹塑性模型. 根据该植筋锚固胶的力学性能测试报告, 设置其弹性模量为 5.0 GPa, 劈裂抗拉强度为 20.1 MPa.

1.3 单元选取

石梁、增强板和粘结剂采用实体单元(C3D8R)进行模拟, CFRP 筋采用三维线性桁架单元(T3D2)进行模拟. CFRP 筋复合增强板加固石梁的有限元模型, 如图 2 所示.

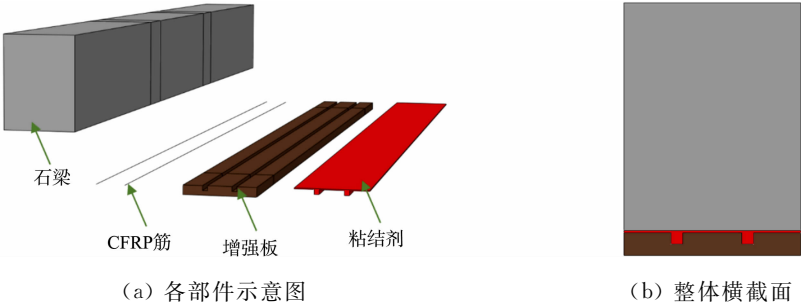


图 2 CFRP 筋复合增强板加固石梁的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of stone beams strengthened with CFRP-reinforced stone sheets

1.4 网格划分

采用 ABAQUS 软件的结构化技术对建立的模型进行有限元网格划分, 以实现模型较好的可收敛性和计算效率. 石梁和 CFRP 筋的网格尺寸统一划分为 30 mm. 因为增强板内嵌了两种直径的 CFRP 筋, 增强板开槽宽度分别为 10 和 14 mm, 对应内嵌直径 5 和 7 mm 的 CFRP 筋, 所以增强板及与其粘结的粘结剂的网格尺寸不能过大, 否则划分完后的单元质量较差, 会导致计算结果不理想. 因此, 将试件 B-2d5-II 增强板和粘结剂的网格尺寸划分为 10 mm, 试件 B-2d7-I 增强板和粘结剂的网格尺寸划分为 14 mm.

1.5 边界条件设置

在实际试验中,加载装置使用一端为固定的铰支座、另一端为可水平滑动的铰支座的简支梁模型。因此,在有限元模拟中,将两端支座的垫板设置一定的边界条件,以达到模拟试验中简支梁的边界条件。一端垫板约束 3 个方向的平动自由度、竖向和水平向的转动自由度,以模拟固定铰支座;另一端垫板约束横向和竖向的平动自由度、竖向和水平向的转动自由度,以模拟滑动铰支座。

1.6 施加载荷

实际试验中,采用力-位移混合控制的分级加载制度,考虑到变形过大会发生试件的突然断裂破坏,试验中当试件跨中挠度达到约 12 mm 时,终止试验并卸去荷载。为了提高有限元计算的收敛性,采用位移控制对 CFRP 筋复合增强板加固的石梁进行加载模拟。在加载位置垫板的上表面中心建立 1 个参考点,采用软件的耦合作用(Coupling)将垫板的上表面耦合至该参考点并约束该参考点 3 个方向的转动自由度和平动自由度,最后在参考点施加与试验大致相同的位移。

2 有限元模型的验证与分析

2.1 有限元模型的验证

2.1.1 荷载-挠度曲线 加固石梁(试件 B-2d5-Ⅱ和 B-2d7-Ⅰ)的荷载(P)-挠度(Δ)曲线的有限元模拟结果与试验结果对比,如图 3 所示。由图 3 可知:数值计算和试验得到的试件初始刚度较为接近,达到初始开裂时对应的荷载和变形值基本吻合,且石梁开裂后数值计算和试验得到的荷载-变形曲线均出现锯齿形波动现象。值得注意的是,数值模拟得到的曲线波动幅度小于试验结果,主要原因在于所建立的有限元模型是基于连续体假设,石梁达到开裂时并未如真实试验中出现的裂缝开展现象,故荷载的下降幅度较小。总体而言,数值计算得到曲线与试验结果吻合较好。

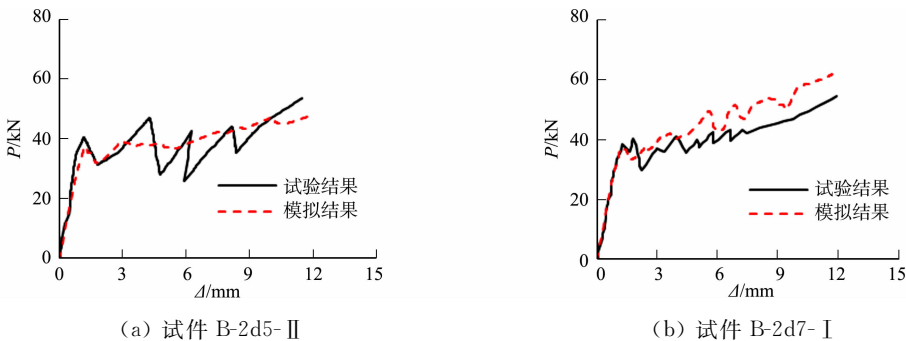


图 3 加固石梁的荷载-挠度曲线的有限元模拟结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparison between finite element simulation results and experimental results of load-deflection curves of strengthened stone beams

2.1.2 荷载-CFRP 筋应变曲线 加固石梁(试件 B-2d5-Ⅱ和 B-2d7-Ⅰ)的荷载-CFRP 筋应变(ϵ_f)曲线的有限元模拟结果与试验结果对比,如图 4 所示。由图 4 可知:对于试件 B-2d5-Ⅱ,开裂荷载和对应

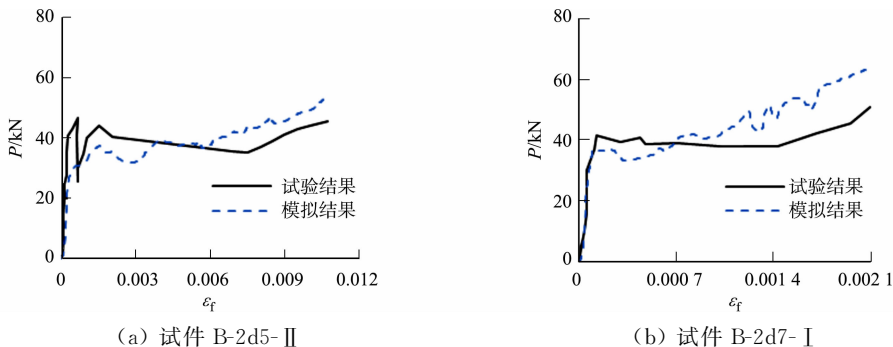


图 4 加固石梁的荷载-CFRP 筋应变曲线的有限元模拟结果与试验结果对比

Fig. 4 Comparison between finite element simulation results and experimental results of load-CFRP bar strain curves of strengthened stone beams

CFRP 筋应变的数值模拟结果与试验结果略有误差,但曲线总体发展趋势相近;对于试件 B-2d7-I,数值计算结果与试验结果吻合较好.

2.2 典型加固石梁的受力全过程分析

2.2.1 加固石梁的全过程截面应力分布 加固石梁试件 B-2d5-II 的荷载-挠度曲线,如图 5 所示. 选取该曲线中的石梁初始开裂时、开裂后、进入强化阶段和加载结束 4 个时刻(分别对应图 5 中 A,B,C,D 4 个特征点),进行跨中截面的应力分布图分析. 加固石梁各阶段的截面应力分布图,如图 6 所示. 图 6 中: h 为石梁和增强板截面高度之和; h_0 为 CFRP 筋形心到截面顶端的距离;阴影部分为石梁的受压区域,其余为受拉区域.

由图 6(a)可知:加固石梁开裂瞬间,受压区高度为 101.5 mm,接近加固石梁截面高度的一半,表明开裂前外荷载主要由石材承载,内嵌 CFRP 筋的作用相对较小.

由图 6(b)可知:试件出现第一条裂缝后,截面受拉区上移,受压区高度减小了 25 mm,但仍然有足够的受压区域. 对比图 6(a)开裂瞬间截面应力分布图的最大拉应力 $0.82f_{st}$,开裂后跨中截面的最大拉应力减小,为 $0.68f_{st}$,拉应力最大区域出现在增强石板与石梁粘结的部位,且该区域占比较小.

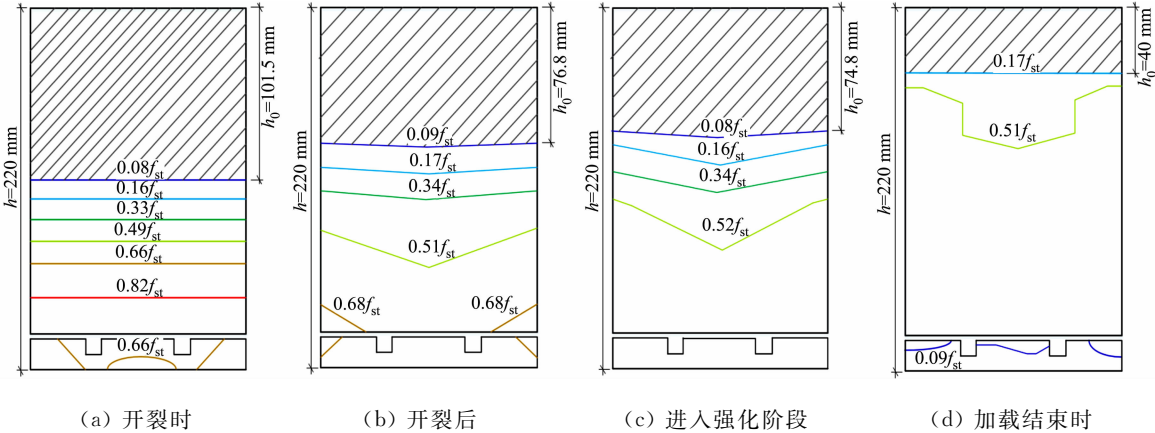


Fig. 6 Section stress distribution diagrams of strengthened stone beam at each stage

由图 6(c)可知:进入强化阶段的截面应力云图和截面开裂后的应力云图接近,受压区高度减小 2 mm. 从图 6(a)~(c)可发现,增强石板通过粘结剂与石梁构成一个良好的整体,并未出现增强石板与石梁应力突变的情况,并且在粘结剂周边也无明显的应力差异.

由图 6(d)可知:此时受压区高度减小为 40 mm,跨中截面最大拉应力接近 $0.51f_{st}$,表明该加固石梁还可继续承载.

2.2.2 特征曲线 采用 CFRP 筋复合增强板加固石梁的荷载-挠度曲线均呈现出典型的三阶段发展趋势,如图 7 所示. 图 7 中: P_{cr} , Δ_{cr} 分别为开裂荷载和开裂荷载对应的挠度; P_u , Δ_u 分别为最终荷载和最终荷载对应的挠度.

阶段 1 为开裂前的弹性阶段,此阶段荷载与挠度的关系近似呈线性发展,直至达到开裂荷载时,形成第 1 条裂缝,该阶段的挠度变化很小. 阶段 2 为裂缝发展阶段,随着挠度的增大,加固石梁产生多条裂缝,荷载整体略微有所上升但上升得不明显,此阶段的荷载-挠度曲线呈锯齿形上下波动,曲线的每次下降对应一条新裂缝的产生,荷载下降到一定程度时又恢

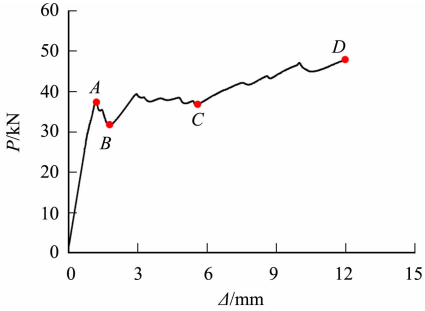


图 5 试件 B-2d5-II 的荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curve of specimen B-2d5-II

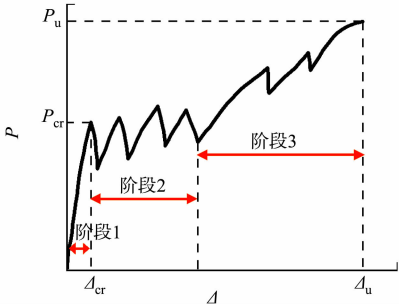


图 7 加固石梁典型的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Typical load-deflection curve of strengthened stone beam

复上升趋势,这是由于石梁开裂时,原本由石材承担的拉力传递至内嵌于增强板中的 CFRP 筋,该阶段 CFRP 筋提供足够的拉力,因此,荷载出现先急降后上升的趋势. 阶段 3 为类强化阶段,即纯弯段裂缝充分发展后一直到加载结束,此阶段 CFRP 筋充分发挥受拉强度高的特性,荷载呈上升趋势直至加载结束,最终荷载较开裂荷载有较大幅度的提高,从最终挠度也可看出加固石梁呈现出了良好的延性.

2.2.3 荷载-CFRP 筋应变曲线 加固石梁的荷载-CFRP 筋应变曲线,如图 8 所示. 由图 8 可知:应变发展规律同荷载-挠度曲线类似,符合典型荷载-挠度曲线的三阶段发展趋势. 第 1 条裂缝产生(A 点)前,荷载-CFRP 筋应变增长近似呈线性,CFRP 筋应变变化较小,分别为 0.001 5 和 0.000 1;开裂后(ABC 段),CFRP 筋的应变快速增长,2 个模拟结果中应变分别增加了 0.004 2 和 0.000 8;在类强化阶段(CD 段)时,荷载和 CFRP 筋应变近似呈线性增长,新裂缝产生时荷载的降幅较小,直至加载结束时,CFRP 筋的应变未达到其极限应变.

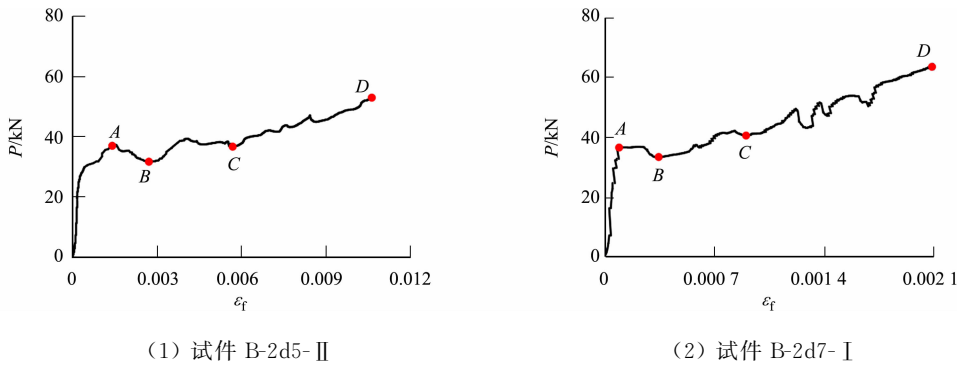


图 8 加固石梁的荷载-CFRP 筋应变曲线

Fig. 8 Load-CFRP bar strain curves of strengthened stone beams

3 承载力计算模型

3.1 基本假定

由试验可知,素石梁受弯脆断,而采用 CFRP 筋复合增强板加固后的石梁破坏前产生了多条裂缝,变形能力较好. 因此,素石梁的开裂弯矩即为极限承载力,而 CFRP 筋复合增强板加固石梁的极限受弯承载力大于其开裂弯矩. 在进行加固石梁受弯承载力计算时,做了如下 4 点假定:

- 1) 假设石材的应力-应变关系为线性;
- 2) CFRP 筋受拉应力-应变关系为线性;
- 3) 各部分材料之间的粘结良好,没有发生相对滑移,石材和 CFRP 筋之间变形协调;
- 4) 截面变形符合平截面假定.

3.2 开裂弯矩

对于采用 CFRP 筋复合增强板加固后的石梁,由于增强板的存在,石梁的抗弯截面模量增大,加固石梁的开裂荷载随之增大. 开裂荷载下载面的受力示意图,如图 9 所示. 图 9 中: c_1 为开裂时中性轴到顶部的距离; $\epsilon_{bc,1}$, $\sigma_{bc,1}$ 分别为开裂荷载下石梁横截面顶部的受压应变、受压应力; $\epsilon_{f,1}$, $\sigma_{f,1}$, $F_{f,1}$ 分别为开裂荷载下 CFRP 筋的受拉应变、受拉应力和拉力; $F_{bc,1}$, $F_{bt,1}$ 分别为开裂状态下石材的压力和拉力.

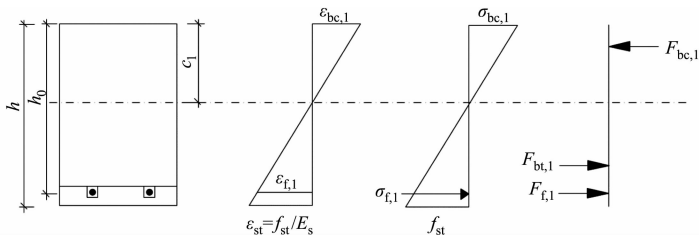


图 9 开裂荷载下载面的受力示意图

Fig. 9 Schematic diagram of section force under cracking load

由于石梁开裂前 CFRP 筋的应力较小,因此,忽略开裂前 CFRP 筋的贡献,加固石梁的开裂弯矩近

似采用计算式为

$$M_{cr}=\gamma_s f_{st} W.$$

(6)

式(6)中: M_{cr} 为开裂弯矩; γ_s 为考虑石材塑性发展的系数,取自文献[6]建议的 1.05; W 为截面抗弯模量, $W=bh^2/6$.

3.3 极限弯矩

对于采用 CFRP 筋复合增强板加固后的石梁,当 CFRP 筋配筋率适中且石梁最终破坏由 CFRP 筋断裂引起时,加固石梁的截面受力和变形情况,如图 10 所示.图 10 中: c_2 为极限状态下受压区所剩高度; $\sigma_{bc,2}$, $\epsilon_{bc,2}$ 为极限荷载下石梁横截面顶部的压应力、压应变; $\sigma_{f,2}$, $\epsilon_{f,2}$, $F_{f,2}$ 为极限荷载下 CFRP 筋的受拉应力、受拉应变、拉力; $F_{bc,2}$ 为极限状态下石材的压力.

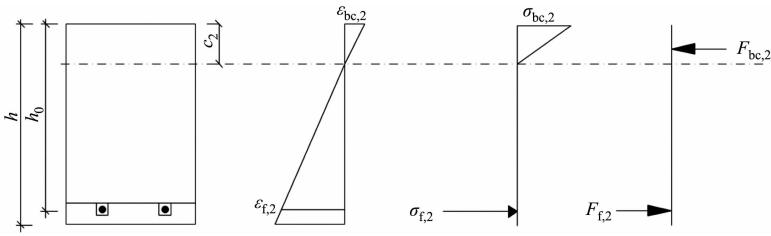


图 10 极限荷载下截面的受力示意图

Fig. 10 Schematic diagram of section force under ultimate load

当 CFRP 筋应变达到极限应变时,CFRP 筋断裂,此时,加固石梁达到极限受弯承载力,即

$$\frac{1}{2}\sigma_{bc,2}bc_2-A_f f_f=0,$$

(7)

$$M_p=A_f f_f\left(h-\frac{c_2}{3}\right),$$

(8)

$$\frac{\epsilon_{bc,2}}{\epsilon_{f,2}}=\frac{c_2}{h_0-c_2}.$$

(9)

式(7)~(9)中: f_f 为 CFRP 筋的极限抗拉强度; M_p 为极限弯矩.

比较 CFRP 筋复合增强板加固石梁的开裂弯矩和极限弯矩的计算值、试验值和有限元模拟值,结果如表 2 所示.表 2 中: $M_{cr,cal}$, $M_{cr,exp}$, $M_{cr,fin}$ 分别为开裂弯矩的计算值、试验值和模拟值; $M_{p,cal}$, $M_{p,exp}$, $M_{p,fin}$ 分别为极限弯矩的计算值、试验值和模拟值.由表 2 可知:开裂弯矩的计算值与试验值和有限元模拟值均吻合较好,而极限弯矩的计算值较试验值和有限元模拟值偏高,主要原因在于试验和有限元模拟在 CFRP 筋断裂前便停止加载,加固后的石梁并未达到真正的极限状态,导致试验得到的极限弯矩值和有限元模拟值偏低.

表 2 开裂弯矩和极限弯矩的计算值、试验值与有限元模拟值的比较

Tab. 2 Comparison among calculated, experimental and finite element simulation values of cracking moment and ultimate moment

试件编号	$M_{cr,cal}$ / kN·m	$M_{cr,exp}$ / kN·m	$M_{cr,fin}$ / kN·m	$M_{p,cal}$ / kN·m	$M_{p,exp}$ / kN·m	$M_{p,fin}$ / kN·m	$\frac{M_{cr,cal}}{M_{cr,exp}}$	$\frac{M_{cr,cal}}{M_{cr,fin}}$	$\frac{M_{p,cal}}{M_{p,exp}}$	$\frac{M_{p,cal}}{M_{p,fin}}$
B-2d5-Ⅱ	10.61	12.19	11.18	18.67	16.12	13.98	0.87	0.95	1.16	1.34
B-2d7-Ⅰ	10.61	11.69	11.05	26.61	16.43	18.73	0.91	0.96	1.62	1.42

4 结论

- 1) 建立的非线性有限元模型可较好地模拟 CFRP 筋复合增强板加固石梁的受力性能,预测的荷载-挠度曲线、荷载-CFRP 筋应变曲线与试验结果吻合良好.
- 2) 提取并分析了受力全过程中 CFRP 筋复合增强板加固石梁的横截面应力,得到了石梁开裂和截面应力发展规律.
- 3) 归纳了 CFRP 筋复合增强板加固石梁受力过程的荷载-挠度三阶段典型特征曲线,即开裂前的弹性阶段、裂缝发展阶段和类强化阶段.

4) 提出 CFRP 筋复合增强板加固石梁的开裂弯矩和极限弯矩计算模型,其中,开裂弯矩的计算值与试验值和有限元模拟值吻合良好。

考虑到预应力可延缓和限制试件裂缝的发展,后续有必要开展预应力 CFRP 筋复合增强板加固石梁、石板的研究工作。对于试验所用植筋锚固胶存在的老化问题,在后续试验工作中,可考虑在裸露的胶外侧涂上一层保护层避免胶与阳光的直接接触。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘阳,郭子雄,刘宝成,等. 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.
- [3] 张兴虎,蔺宝钢,焦海洲,等. 预应力大跨度石梁构件的抗弯试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2011,43(2):172-177. DOI:10.3969/j.issn.1006-7930.2011.02.004.
- [4] 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. DOI:10.11830/issn.1000-5013.2012.02.0184.
- [5] 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(4):466-476. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.060.
- [6] 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(1-12). DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000458.
- [7] 武晓敏,谢剑,徐福泉,等. CFRP 加固青白石梁受弯性能试验研究[J]. 工程力学,2015(增刊1):215-220. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2014.04.s057.
- [8] 谢剑,李柔,武晓敏,等. 体外预应力加固石梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构,2015,45(16):96-100.
- [9] MIAO Wei, GUO Zixiong, YE Yong, *et al.* Flexural behavior of stone slabs strengthened with prestressed NSM steel wire ropes[J]. Engineering Structures, 2020, 222(1):1-14. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.111046.
- [10] CERONI F. Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(9):1547-1559. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.03.008.
- [11] KOTYNIA R. Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2012, 32:41-54. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.104.
- [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] YE Yong, MIAO Wei, GUO Zixiong. Strengthening stone beams with prefabricated polymer-reinforced stone plates [J/OL]. Structures and Buildings, 2020. (2020-07-23)[2022-01-03]. <https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00165>.
- [14] 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.
- [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)