

BFRP 模壳不排水加固桥墩的延性设计方法

吴凤英¹, 杨纪豪², 陈 晖², 夏樟华²

(1. 厦门城市职业学院, 福建 厦门 361005;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 针对桥梁桥墩受到水流冲刷发生损坏的问题, BFRP 模壳加固桥墩是一种新型的不排水加固桥墩的方法, 但缺乏针对 BFRP 模壳加固后桥墩抗震性能的分析方法。因此, 在试验的基础上, 建立了 BFRP 模壳加固桥墩位移和延性系数、材料性能参数, 包括 BFRP 约束混凝土的极限压应变、BFRP 配箍率、BFRP 有效极限抗拉强度和 BFRP 有效极限抗拉应变等之间的力学计算模型, 提出了基于目标延性系数提高指标的 BFRP 模壳抗震延性加固设计方法, 通过试验结果验证了所提出方法的可靠性。以位于福建省某简支梁桥 2 号墩的桩基作为现场例证, 介绍了加固设计的过程。

关键词: BFRP 模壳; 延性设计方法; 力学计算模型; 现场试验; 受力性能

中图分类号: U443.22

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0074-07

Design Method for Ductility of Bridge Piers Strengthened by BFRP Formwork

WU Fengying¹, YANG Jihao², CHEN Hui², XIA Zhanghua²

(1. Xiamen City University, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Aiming at the problem that bridge piers are damaged by water erosion, BFRP formwork reinforced bridge piers are a new type of undrained reinforced bridge piers, but there is no analysis method for the seismic performance of bridge piers strengthened by BFRP formwork reinforcement method. Therefore, based on experiments, the displacement and ductility coefficient and material performance parameters of BFRP formwork reinforced bridge piers was established, which include the ultimate compressive strain of BFRP-confined concrete, BFRP hoop ratio, BFRP effective ultimate tensile strength and BFRP effective limit based on the mechanical calculation model between tensile strain and other factors, a design method for seismic ductility reinforcement of BFRP formwork based on the target ductility coefficient improvement index is proposed, and the reliability of the proposed method is verified by the test results. A pile foundation of the No.2 pier of a simply supported girder bridge in Fujian Province is selected as a field example, and the reinforcement design process is introduced.

Keywords: BFRP formwork; ductility design method; mechanical calculation model; field test; force performance

桥墩受到水流冲刷、磨损、地震荷载和桥梁上部结构传递的工作荷载(超载)等因素长期作用下, 发生不同严重程度的损坏, 甚至可能引起桥梁垮塌。因此, 需要采用合理的补救措施来加固这些损坏桥

墩, 特别是提高桥墩的抗震性能。目前, 纤维增强复合材料(FRP)加固技术以其不改变截面形式、不增加结构重量、施工速度快和耐久性好等优势, 在 RC 墩柱修复加固中已得到广泛应用^[1]。其中, 多种类

型的纤维复合材料中玄武岩纤维 (BFRP) 具备的优势较为突出,力学性能好耐久性也较好,具有其他类型的 FRP 无法替代的地位^[2]。

国内外研究学者通过一系列丰富的试验对 FRP 加固桥墩抗震性能进行研究,得出了 FRP 加固柱模型和抗震性能参数的一系列成果,主要研究了 FRP 加固对于墩柱的轴压承载力、轴向变形和延性等的影响^[3-10]。Wu^[11]曾对 CFRP 加固的矩形空心柱和方形柱进行了模拟地震试验,试验结果表明通过 CFRP 加固的墩柱在将柱的脆性破坏转变为弯曲延性破坏的同时,有效提高了墩柱的抗震延性。单波^[12]对 FRP 加固横向钢筋配置不足的桥墩柱和损伤柱进行试验,发现 FRP 加固墩柱提高了试验墩柱的延性。吴刚等^[13]和 Ouyang Lijun 等^[14]通过试验发现外包 BFRP 可有效改善钢筋混凝土柱的强度、变形和耗能能力,对极限位移的提高幅度可达峰值承载力的 4~8 倍。唐协波^[15]、Ma Gao 等^[16]则分别基于试验结果对 BFRP 加固柱进行了抗震性能参数分析,验证了 BFRP 约束能够显著提高钢筋混凝土柱的延性性能。黄镜淳等^[17]基于试验,发现随着剪跨比的减小及轴压比的增大,加固柱延性性能明显降低,且 BFRP 对低剪跨比加固柱变形能力的提高效果最好。孙兴武等^[18]通过建立 ABAQUS 有限元模型,研究了双层 1 mm 厚和 3 mm 厚 BFRP 网格加固混凝土梁的延性分别提高 102.56% 与 220.09%。

在实际中基于经济性考虑,CFRP 成本偏高,高强 CFRP 获得途径主要来源于进口;而基于力学性能、耐久性能考虑,AFRP 和 GFRP 相对较差。BFRP 具有密度小、强度高、耐腐蚀性强、耐疲劳和价格低廉等特点,这些优点使得其在混凝土结构加固方面的应用更加广阔,同时我国已经拥有了 BFRP 核心制作技术和自主知识产权。但是,对于 BFRP 加固桥墩延性的研究只是停留在试验的基础上,缺少对延性性能指标的具体量化,在 BFRP 约束混凝土提高结构的抗震性能方面还有很多问题亟待解决。因此,应对 RC 墩柱的玄武岩纤维 (BFRP) 基于目标延性系数提高指标的抗震延性加固设计方法以及相应材料力学模型进行研究^[19]。

基于 RC 墩柱的 BFRP 模壳加固技术的基本原理,本文提出了基于目标延性系数提高指标的 BFRP 模壳抗震延性加固设计方法,并建立了 BFRP 模壳加固桥墩的宏观变形性能指标(位移和延性系数)、材料力学参数(BFRP 约束混凝土的极限压应

变、BFRP 配箍率、BFRP 有效极限抗拉强度和抗拉应变)之间的力学关系计算模型。运用 XTRACT 软件进行建模分析,结合力学关系计算模型,得到 BFRP 模壳现场实际工程中加固桥墩柱受力性能分析结果。

1 BFRP 模壳加固 RC 墩试验模型设计

试验方案包含 2 根桥墩模型试件,包括 1 根未加固模型试件(LRC-1)和 1 根 BFRP 模壳加固模型试件(BRC-2)。试件的直径为 250 mm,经 BFRP 模壳加固后直径为 330 mm,试件的具体参数见表 1,其中 LRC 代表未加固柱对比柱,BRC 代表 BFRP 加固柱。试验主要研究的是同轴压比状态下未加固试件和 BFRP 模壳加固试件的抗震性能差异,BFRP 模壳加固高度分别为 850 mm。

表 1 试验构件分组及主要设计参数

构件编号	高度/m	轴压比	长细比	纵筋配筋率/%	备注
LRC-1	1.0	0.20	4.00	0.96	无膨胀、未加固、作为对比构件
BRC-2	1.0	0.20	4.00	0.96	无损伤、加膨胀

根据试验加载的需要,将试件顶部加载端为实心构件,且尺寸设计为 500 mm×500 mm×400 mm;试件承台的设计尺寸为 1000 mm×700 mm×500 mm。试验墩身纵筋直径为 10 mm,型号为 HRB400 热轧带肋钢筋,总计 6 根。柱身箍筋型号为 HPB300,非加密区箍筋直径为 6 mm,间距为 80 mm;加密区直径为 6 mm,间距为 40 mm。加载端、承台纵筋均采用直径 20 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋,箍筋采用直径 10 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋。加载端、墩身、承台均采用 C30 商品混凝土,填充层混凝土为特制的水下自应力不分散混凝土,配合比见表 2。试件保护层混凝土厚度均为 20 mm。试件尺寸见图 1。

表 2 水下自应力不分散混凝土配合比 单位:kg/m³

水泥	膨胀剂	抗分散剂	砂	石	减水剂	水
460.98	51.22	15.37	623.28	923.92	7.68	210.00

BFRP 模壳是两片厚约 5 mm 的半圆形套筒,它是由 6 层浸胶 BFRP 布、间距为 100 mm×100 mm 规格的 BFRP 网格制成,再通过压花钢板与 M8 螺栓连接而成,BFRP 模壳示意图见图 2。其中 BFRP 网格位于模壳最内侧,可以增强填充层混凝土和柱身混凝土的粘结;采用压花钢板可以增强连接处的

摩阻力。图 3 是 BFEP 模壳加固后的墩柱。表 3 给出了 BFRP 片材的材料特性。

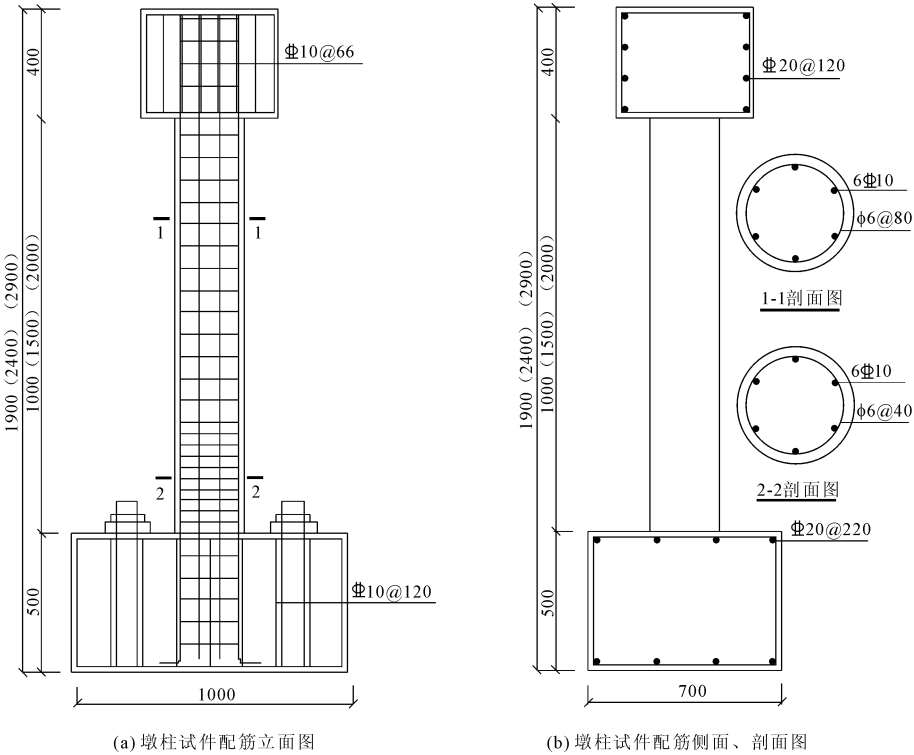
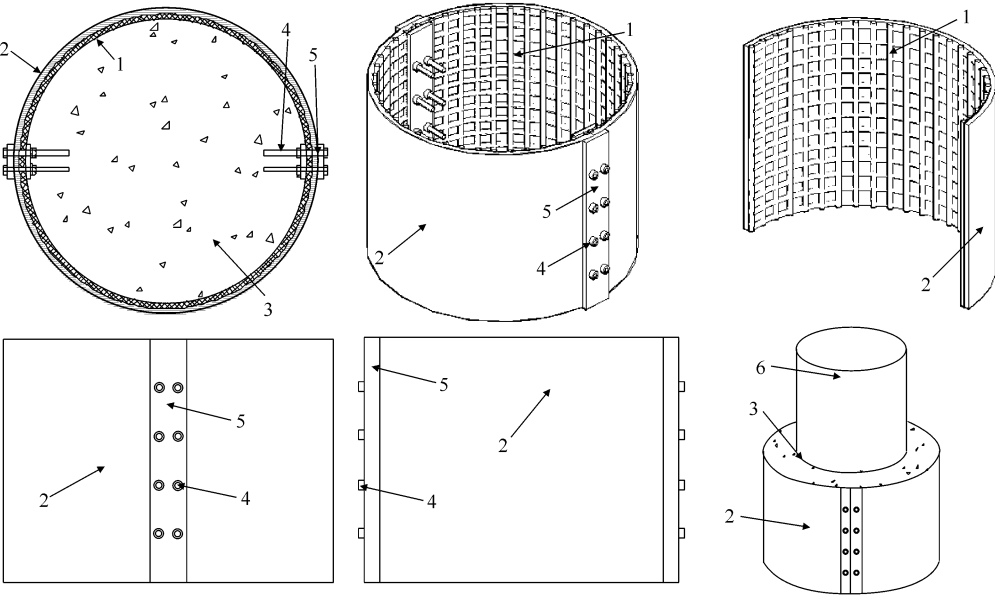


图 1 墩柱试件配筋图



注：1 - BFRP 网格；2 - 6 层 BFRP 通过树脂胶合而成；3 - 水下自应力不分散混凝土；
4 - M8 螺栓；5 - 压花不锈钢板；6 - 被加固墩柱

图 2 BFRP 模壳示意图

表 3 BFRP 片材材料特性

拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	计算厚度/mm	极限变形/%
2026	76.46	0.156	2.73

数据采集中所采用的钢筋应变片规格为 5 mm × 3 mm,混凝土应变片规格为 80 mm × 3 mm;位移计采用 π 型位移计,布置时首先定位位移计的位

置,然后使用 AB 胶固定螺栓粘于试件表面,最后把 π 型位移计架与螺栓上并拧紧螺栓帽;采用 TDS530 快速应力应变测试分析系统对应变片、 π 型位移计试验数据进行采集。



图 3 BFRP 模壳加固墩柱

2 BFRP 模壳加固柱抗震延性加固设计方法

2.1 BFRP 模壳加固桥墩性能提高指标

为了建立桥墩柱的抗震性能提高指标和加固参数之间的力学关系分析模型,通常将改善桥墩的刚度、延性、强度等作为相应的目标。当单向 BFRP 织物被用作桥墩的加固材料时,相比之下,抗弯强度通常平均增加不到 10%,而两个桥墩的初始侧向刚度保持不变,加固桥墩的延展性得到更明显的改善。因此,延性指标是衡量 FRP 加固桥墩性能的一个重要参数。

假定悬臂墩墩柱高度为 L_c ,塑性铰区长度为 L_p ,采用 BFRP 加固塑性铰区范围和关键危险截面时,其目标位移延性系数与曲率延性的提高指标表达式^[1]为:

$$\chi_\phi = \frac{\mu_{\phi F}}{\mu_{\phi UF}} \quad (1)$$

式中: $\mu_{\phi F}$ 为约束截面的曲率延性系数; $\mu_{\phi UF}$ 为未约束截面曲率延性系数。

$$\chi_\Delta = \frac{\mu_{\Delta F}}{\mu_{\Delta UF}} \quad (2)$$

式中: $\mu_{\Delta F}$ 为约束墩柱的位移延性系数; $\mu_{\Delta UF}$ 为未约束墩柱的位移延性系数。而 Priestley 等^[20]提出塑性铰区的长度 L_p 应和 L 、纵向钢筋设计屈服强度 f_y 、钢筋的直径 d_b 、截面高度 h (直径 D) 有关。因此提出按照下式或者取为 $0.5D$ ($0.5h$) 来确定塑性铰区等效长度:

$$L_p = 0.08L + 0.22f_y d_b \geq 0.044f_y d_b \quad (3)$$

式中: L 取 L_c 。

对 BFRP 加固柱,塑性铰长度 L_p 可取为^[21]:

$$L_p = m + 0.044f_y d_b \quad (4)$$

式中: m 为 FRP 距离柱底部间距。

叶爱君等^[22]研究提出曲率延性系数与位移延性系数之间存在着以下的关系:

$$u_\Delta = \frac{\Delta_y + \Delta_p}{\Delta_y} = 1 + \frac{\Delta_p}{\Delta_y} = 1 + 3(\mu_{\phi F} - 1) \frac{L_p}{L} \cdot \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L}\right) \quad (5)$$

式中: u_Δ 为位移延性系数; $\mu_{\phi F}$ 为曲率延性系数。

由上述公式可知,若要确定 BFRP 模壳加固柱的延性指标,可以先通过确定相应的目标延性系数提高指标。根据未约束墩柱的延性指标,就可以求出相应的目标延性系数提高指标。

2.2 BFRP 模壳加固桥墩性能提高指标力学模型

墩柱通过 BFRP 加固,其变形能力和延性可以得到一定的提高。为了避免加固墩柱的核心混凝土崩塌以及纵筋拉断等一系列的破坏问题,同时又能满足桥墩柱对于延性的需求,应合理确定其延性提高指标。

由此可以确定加固桥墩柱的曲率延性提高指标表达式为:

$$\chi_\phi = \frac{\phi_{\mu F}/\phi_{yF}}{\phi_{\mu UF}/\phi_{yUF}} \quad (6)$$

$$\chi_\Delta = \frac{\Delta_{\mu F}/\Delta_{yF}}{\Delta_{\mu UF}/\Delta_{yUF}} \quad (7)$$

式中: $\phi_{\mu F}$ 、 $\phi_{\mu UF}$ 分别为加固柱和未加固柱的极限曲率; $\Delta_{\mu F}$ 、 $\Delta_{\mu UF}$ 分别为加固柱和未加固柱的极限位移; ϕ_{yF} 、 ϕ_{yUF} 分别为加固柱和未加固柱的屈服曲率; Δ_{yF} 、 Δ_{yUF} 分别为加固柱和未加固柱的屈服位移。

假设不考虑 BFRP 模壳加固桥墩的屈服曲率和位移影响,上述公式可以简化成以下公式:

$$\chi_\phi \approx \frac{\phi_{\mu F}}{\phi_{\mu UF}} \quad (8)$$

$$\chi_\Delta \approx \frac{\Delta_{\mu F}}{\Delta_{\mu UF}} \quad (9)$$

关于上式未约束柱和 BFRP 模壳约束柱都符合平截面假定。曲率、材料力学性能的计算关系式:

$$\chi_\phi = \frac{\varepsilon_{cuF}/x_F}{\varepsilon_{cuUF}/x_{UF}} = \frac{\varepsilon_{cuF}}{\varepsilon_{cuUF}} \frac{x_{UF}}{x_F} \quad (10)$$

假设 $\chi_c = \frac{x_F}{x_{UF}}$, 则:

$$\varepsilon_{cuF} = \chi_\phi \chi_c \varepsilon_{cuUF} \quad (11)$$

式中: ε_{cu} 为核心混凝土极限压应变; χ 为截面受压区高度。

依据 Pantelides 对 210 根矩形截面墩柱、126 根方形截面墩柱和 70 根圆形截面墩柱进行弯矩-曲率参数分析,得出受压区高度和截面曲率的关系式如下^[23]:

$$\chi_c = 1.08 - 0.2(\chi_\phi - 1)^{0.38} \leq 1.0 \quad (12)$$

式中: χ_c 为中性轴提升指数。

2.3 BFRP 模壳约束混凝土模型计算公式

从 BFRP 加固柱的抗震原理可以得出,正确评估 BFRP 加固柱性能关键是使用合理的模型来计算 BFRP 约束混凝土的极限压应变计算模型、BFRP 侧向约束压力或 BFRP 加固模型。

Mander 约束混凝土模型是目前计算箍筋约束混凝土采用较多的方法^[24]。其极限压应变为 ε_{cu} 、峰值强度为 f'_c 的表达式分别如下:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{kh} \varepsilon_{su}^R}{f'_c} \quad (13)$$

$$f'_c = f'_c \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c}} - 2 \frac{f'_l}{f'_c} \right) \quad (14)$$

$$f_l = f_{ls} = k_{se} \rho_s f_{yh} \quad (15)$$

式中: f_{kh} 为箍筋抗拉强度; ε_{su}^R 为箍筋折减极限拉应变; ρ_s 为箍筋体积配箍率; f_{yh} 为箍筋屈服强度设计值; k_{se} 为有效侧向约束系数; f'_{ls} 为箍筋提供的侧向约束力; f'_c 为素混凝土的峰值强度。

在 Mander 箍筋约束混凝土模型基础上,考虑箍筋和 BFRP 环箍对核心混凝土的共同侧向约束作用可以得到加固桥墩的侧向约束表达式^[25]:

$$f_l = f_{ls} + f_{lb} \quad (16)$$

式中: f_{lb} 是 BFRP 模壳环箍提供的侧向约束力。

BFRP 模壳环箍的侧向约束压力式为:

$$f_l = k_{fe} \rho_{frp} f_{frp} \quad (17)$$

$$f_{frp} = E_f \varepsilon_{ju} \quad (18)$$

式中: k_{fe} 为 BFRP 加固截面的有效侧向约束系数,同 k_{se} ; ρ_{frp} 为 BFRP 箍筋配筋率; f_{frp} 为 BFRP 的有效极限强度; ε_{ju} 为 BFRP 的有效极限抗拉应变; E_f 为 BFRP 的弹性模量。

在水平拉伸试验中得到的 BFRP 的极限抗拉应变是大于其有效极限抗拉应变。因此 BFRP 的有效极限抗拉应变应在其极限抗拉应变前乘以有效应变系数 k_e 求得。延性变形较好的纤维复合材料的有效

极限大约是材料极限拉应变 30% ~ 50%,对于玄武岩纤维(BFRP)的抗震加固研究取有效应变系数为 0.35^[26]。

关于 BFRP 的体积配筋率公式可表达为:

圆形墩柱为:

$$\rho_{frp} = \frac{4t_j}{D} \quad (19)$$

式中: t_j 为 BFRP 箍厚度; D 为圆形墩柱直径。

为了验证 BFRP 模壳加固墩柱极限压应变简化公式的合理性和使用范围。本文选用 Seible^[21]提出的 FRP 加固柱极限压应变计算模型,公式如(20)所示。该模型同时考虑了箍筋和 FRP 的共同约束作用。

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.8\rho_{frp} f_{frp} \varepsilon_{frp, rup}}{f'_c} \quad (20)$$

$$\rho_{frp} = \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{frp}} \quad (21)$$

式中: $\varepsilon_{frp, rup}$ 为 FRP 断裂拉应变; $f'_c = 1.5f'_c$, f'_c 为约束混凝土的抗压强度, f'_c 为未约束混凝土的抗压强度。

2.4 BFRP 模壳加固柱抗震延性加固设计方法验证

选取 1.0 m 未加固柱 LRC-1 和 BFRP 模壳加固柱 BRC-2,依据上述计算公式确定 BFRP 模壳的加固参数,之后与试验值加以比较,验证公式的正确性。依据上述试验计算模型的设计要点,对于墩柱的截面,采用 XTRACT 软件来进行分析,通过纤维截面模型将截面离散为一系列的纤维单元,对保护层混凝土则采用无约束混凝土模型,对核心混凝土采用 BFRP 模壳和箍筋共同约束混凝土模型,钢筋采用考虑应变硬化的双线性模型,此外不考虑混凝土的抗拉强度^[27]。首先建立相应的纤维模型单元,进行弯矩-曲率分析,然后计算出墩柱的水平力和水平位移,最后和试验结果进行对比。

将采用设计模型公式和弯矩曲率分析方法得到的结果如表 4 所示,从中可以得到,采用 Seible 混凝土压应变计算模型,通过目标位移延性提高指标得到的 BFRP 模壳片材厚度为 0.953 mm,试验值为 0.936 mm,两者数据基本一致。而由 XTRACT 软件分析计算的 BFRP 厚度 1.303 mm,其结果与计算值相比偏大。BFRP 模壳加固墩柱的试验极限位移为 69.07 mm,采用 Seible 混凝土压应变计算模型得到的加固柱的极限位移为 70.06 mm,两者非常接近。但是,由 XTRACT 软件分析计算的加固柱的极限位移为 62.43 mm 与试验值误差约为 10%。

表 4 设计模型公式和弯矩曲率分析方法计算结果对比

	χ_{Δ}	$\Delta_{\mu F}/\text{mm}$	χ_{ϕ}	χ_c	ε_{cu}	f_{frp}/MPa	$\rho_{frp}/\%$	t_j/mm
采用设计模型公式计算结果	1.08	70.06	1.19	0.98	0.0130	730.00	1.09	0.953
采用弯矩曲率分析方法的计算值	1.11	62.43	1.20	1.16	0.0163	730.00	1.58	1.303
试验值	—	69.07	—	—	—	730.00	1.13	0.936

注: $\Delta_{\mu F}$ 为加固柱的极限位移; χ_{Δ} 为目标位移延性提高指标; χ_{ϕ} 为目标曲率延性系数提高指标; ε_{cu} 为约束混凝土极限压应变; f_{frp} 为 BFRP 的有效极限强度; ρ_{frp} 为 BFRP 的配箍率。

3 BFRP 模壳加固桥墩现场试验延性设计

3.1 工程概况

为了验证基于目标延性系数提高指标的 BFRP 模壳抗震延性加固设计方法的可行性,特选位于福建省福清市城头镇首溪村的溪子港桥 2 号墩的一根桩基作为现场试验例证。该桥路线编号为 G228,路线名称为丹东 - 东兴。桥梁中心桩号为 K463 + 143。图 4 为溪子港桥 2 号墩。

首先是搭建施工平台,对被加固墩柱进行底部淤泥清理和墩身混凝土表面清理工作,淤泥清理是使用污泥泵放在桩基根部抽水和污泥来实现的;墩身混凝土表面处理时通过高压水枪清洗被加固墩身表面的剥落、输送、蜂窝等及附生在混凝土表面的水生物;安装 BFRP 模壳,将导管插入膜壳底部,导管保持在混凝土内部,不断向上浇筑防水混凝土,直到浇筑完成。



图 4 溪子港桥 2 号墩

图 5 为溪子港桥 2 号墩桩基础编号图,BFRP 模壳加固试验桩为编号 2-5 号桩。图 6 为 2 号墩桩基础立面图。施工前,首先检查 2-5 号桩水下桩基病害的情况,并根据病害实际情况、水位实际情况,进行施工。之后通过 MS-1000 声呐,将 2-5 号桩的病害进行检测。

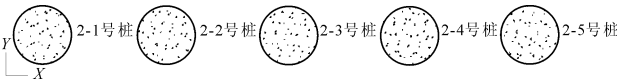


图 5 溪子港桥 2 号墩桩基础编号

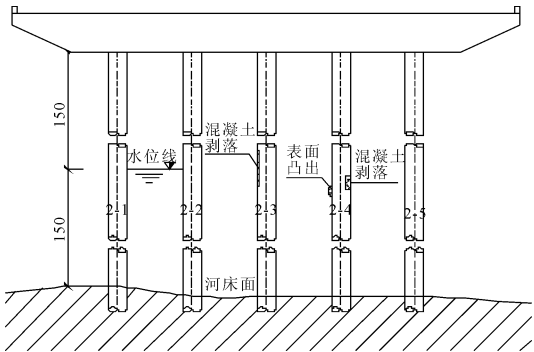


图 6 溪子港桥 2 号墩桩基础立面图

3.2 BFRP 膜壳加固桥墩柱延性设计

在实际工程中,通过以下步骤对受损桥墩柱进行 BFRP 加固:

- (1) 根据实际需要,确定此工程加固的目标位移延性系数提高指标 χ_{Δ} 或者所要达到的目标位移延性系数 $\mu_{\Delta F}$ 。
- (2) 确定被加固结构桥墩柱的混凝土强度,钢筋直径、强度和数量,箍筋直径、强度和间距等设计情况,计算得出被加固柱的位移延性系数 $\mu_{\Delta UF}$,若 $\mu_{\Delta F} \leq \mu_{\Delta UF}$,说明原柱的延性能够满足需求,不需要加固;若 $\mu_{\Delta F} \geq \mu_{\Delta UF}$,说明原柱的延性不能够满足需求,需要进行抗震加固。
- (3) 根据式(3)、式(4)和式(5)可得原柱、加固柱的曲率延性系数 $\mu_{\phi UF}$ 、 $\mu_{\phi F}$,从而确定目标位移延性提高指标 χ_{Δ} 和目标曲率延性提高指标 χ_{ϕ} 。
- (4) 根据式(11)可确定 FRP 约束混凝土的极限应变 ε_{cu} 。
- (5) 根据所选 BFRP 材料力学性能和式(18)、式(20)可确定 FRP 的体积配箍率。
- (6) 最后根据式(19)可确定处加固所需 FRP 的厚度,从而确定加固层数。

该桥相应的尺寸以及被加固墩柱的配筋特性如表 5 所示。

表 5 编号 2-5 墩柱设计资料

墩高 /m	直径 /m	混凝土强度/MPa	纵筋屈服强度/MPa	纵筋配筋率	箍筋屈服强度/MPa	箍筋配筋率	轴压比
3.0	1.1	34.45	303.2	0.0088	275.8	0.00176	0.177

图 7 为该墩柱的截面模型,运用 XTRACT 软件进行建模计算,可以得到编号 2-5 号墩的弯矩-曲率分析关系如图 8 所示。由图 8 可知,其极限弯矩为 2 240 kN·m,极限曲率为 0.061 38 m⁻¹。有效屈服曲率为 0.002 995 m⁻¹,有效屈服弯矩为 2 061 kN·m。

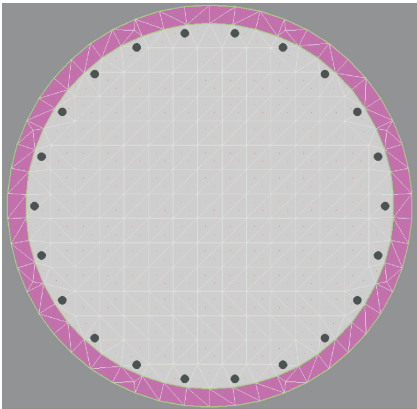


图 7 编号 2-5 号墩柱截面模型

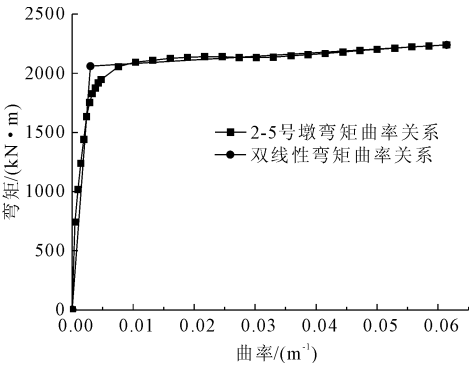


图 8 编号 2-5 号墩柱弯矩曲率分析

对受损墩柱进行 BFRP 加固的设计方法,计算得到的数据如表 6 所示。

表 6 采用延性设计方法得到的计算值							
χ_{Δ}	$\mu_{\Delta UF/mm}$	χ_{ϕ}	$\mu_{\phi F}$	ε_{cuUF}	f_{frp}/MPa	$\rho_{frp}/\%$	t_j/mm
1.08	6.43	1.09	22.31	0.0184	730.00	2.35	6.47

依据延性设计方法计算得出现场试验加固使用 BFRP 布材厚度需要 6.47 mm。

4 结 论

- (1) 依据提出的加固桥墩柱延性设计方法,建立了加固墩柱位移、延性、约束混凝土应力-应变、BFRP 模壳配箍率和 BFRP 厚度之间的力学关系计算模型。
- (2) 采用力学计算模型公式得到的 BFRP 模壳片材厚度 0.953 mm 与试验值 0.936 mm 基本一致,

得到的加固柱的极限位移为 70.06 mm 与试验结果 69.07 mm 基本吻合。采用 XTRACT 软件进行墩柱截面弯矩-曲率分析,并与试验值和计算值作比较,得出的 BFRP 模壳片材厚度 1.303 mm 与试验值 0.936 mm 偏大,得到的加固柱的极限位移为 62.43 mm 与试验结果 69.07 mm 误差在 10% 以下。

(3) 将基于目标延性系数的 BFRP 模壳加固桥墩柱延性设计方法用于实际工程的抗震设计中,得到的 BFRP 模壳计算厚度可供设计和施工参考。

参考文献:

- [1] 董振华,王克海,刁波. RC 桥墩的 FRP 延性加固设计方法研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(12):48-52.
- [2] 胡显奇,申屠年. 连续玄武岩纤维(CBF)在军工及民用领域的应用[J]. 高科技纤维与应用,2005,30(6):7-13.
- [3] 于清,陶忠,高献. FRP 约束混凝土柱抗震性能若干问题的探讨[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(4):75-82.
- [4] 张剑,徐广兴. CFRP 约束混凝土柱的抗震性能[J]. 材料工程,2007(2):54-57.
- [5] 叶列平,赵树红,李全旺,等. 碳纤维布加固混凝土柱的斜截面受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报,2000,21(2):59-67.
- [6] Kumutha R, Vaidyanathan R, Palanichamy M S. Behavior of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP[J]. Cement & Concrete Composites, 2007,29(8):609-615.
- [7] Rousakisa T C, Karabinisa A I, Kioussisb P D. FRP-confined concrete members: axial compression experiments and plasticity modeling[J]. Engineering Structures, 2007,29(7):1343-1353.
- [8] 顾冬生,吴刚,吴智深,等. FRP 加固混凝土圆柱侧向变形能力研究[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(1):17-23,30.
- [9] Gergely I, Pantelides C P, Nuismer R J. Bridge pier retrofit using fiber-reinforced plastic composites[J]. Journal of Composites for Construction, 1998,2(4):165-174.
- [10] Brena S F, Schlick B M. Hysteretic behavior of bridge columns with FRP-jacketed lap splices designed for moderate ductility enhancement[J]. Journal of Composites for Construction, 2007,11(6):565-574.
- [11] Wu Yufei, Liu Tao, Wang Leiming. Experimental investigation on seismic retrofitting of square RC columns by carbon FRP sheet confinement combined with transverse short glass FRP bars in bored holes[J]. Journal of Composites for Construction, 2008,12(1):53-60.
- [12] 单波. FRP 加固钢筋混凝土柱考虑地震及使用损伤的长期性能和修复[D]. 长沙:湖南大学,2006.

统研究[D]. 成都:成都理工大学,2009.

[4] 刘 玮. 基于 BP 神经网络下的深长隧道突水预测分析与数值模拟研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[5] 李利平,李术才,陈 军,等. 基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1345-1355.

[6] 李术才,李 貅,薛翊国,等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(7):1297-1307.

[7] 吴毅江,陈 波,阮 航,等. 基于改进属性识别模型的塔基山坡稳定性评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3138-3146.

[8] 秦胜伍,吕江峰,陈剑平,等. 基于最大熵-属性区间识别的隧道塌方风险评价[J]. 人民长江,2017,48(19):91-96.

[9] 殷 颖,田 军,张永杰. 岩溶隧道灾害案例统计分析研究[J]. 公路工程,2018,43(4):210-214,273.

[10] 王亚萍. 超长深埋隧洞(道)突涌水灾害危险性评价及水量预测方法[D]. 西安:西安理工大学,2019.

[11] 沙 鹏,赵逸文,高书宇,等. 隧道层状岩体质量评价的 BQ 分级改进[J]. 工程地质学报,2020,28(5):942-950.

[12] 李志山,蒲 端,钟 鸣. 公路隧道岩溶构造地质雷达正演与探测实例波形特征对比研究[J]. 公路交通技术,2019,35(2):110-117.

[13] 郭永春,周其健,屈智辉,等. 水岩相互作用下钙芒硝盐岩强度衰减机理[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(4):1045-1051.

[14] 徐建强,阎宗岭,李海平,等. 黔西岩溶区公路土岩混合边坡致灾模式及调控技术[J]. 公路交通技术,2019,35(6):25-30,42.

[15] 杨新庆,张善从. 基于模糊层次分析法-粒子群算法的载人航天工程项目重要工序识别研究[J]. 科技管理研究,2019,39(24):217-224.

[16] 靳 昊,陈彦好,周宗青,等. 基于属性识别理论的金属矿山采空区塌陷灾害风险评估[J]. 金属矿山,2021(3):184-190.

[17] 阎锡东,高 军,韩 翡,等. 隧道穿越活动断裂带风险评价研究及工程应用[J]. 现代隧道技术,2020,57(5):10-22,60.

~~~~~

(上接第 80 页)

[13] 吴 刚,顾冬生,蒋剑彪,等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土圆柱抗震性能比较研究[J]. 工业建筑,2007(6):19-23.

[14] Ouyang Lijun, Gao Wanyang, Zhen Bin, et al. Seismic retrofit of square reinforced concrete columns using basalt and carbon fiber-reinforced polymer sheets: A comparative study[J]. Composite Structures, 2017, 162: 294-307.

[15] 唐协波. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土方柱抗震性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

[16] Ma Gao, Li Hui. Experimental study of the seismic behavior of predamaged reinforced-concrete columns retrofitted with basalt fiber-reinforced polymer[J]. Journal of Composites for Construction, 2015,19(6):04015016.

[17] 黄镜淳,高 鹏,马翠玲,等. BFRP 布加固钢筋混凝土圆柱的抗震性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(2):291-297.

[18] 孙兴武,倪国葳,董 卓,等. 基于 ABAQUS 预应力 BFRP 网格加固混凝土梁的力学行为研究[J]. 混凝土,2022(7):59-62,73.

[19] 张景杭,姜绍飞,吴兆旗,等. BFRP 模壳不排水加固墩柱轴压性能有限元分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2020,48(4):517-524.

[20] Priestley M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic Design and Retrofit of Bridge[M]. John Wiley and Sons, 1996. 北京:人民交通出版社,桥梁抗震设计与加固(中译本). 1997:226-230.

[21] Seible F, Priestley M J N, Hegemier G A, et al. Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets[J]. Journal of Composites for Construction, 1997,1(2):55-62.

[22] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

[23] Pantelides C P, Moran D A. Design of FRP jackets for plastic hinge confinement of RC columns[J]. Journal of Composites for Construction, 2013,17(4):443-442.

[24] Mander J B, Priestley M J N. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988,114(8):1804-1826.

[25] 董振华,韩 强,杜修力. FRP 约束矩形空心截面桥墩分析模型及试验验证[J]. 工业力学,2013,30(12):57-64.

[26] 欧阳利君,许 峰. 多因素影响下 FRP 约束柱 FRP 有效极限拉应变研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2017(10):94-103.

[27] 杜修力,董振华,韩 强,等. FRP 约束 RC 矩形空心截面桥墩抗震性能[J]. 北京工业大学学报,2014,40(2):214-222.