

CFRP加固的承插式桥墩抗震性能分析

李谦¹, 吕文舒²

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京市 100020)

摘要: 相比传统现浇混凝土墩, 承插式预制拼装墩具有易于施工等优势, 但在地震作用下更易损坏, 为优化其抗震性能, 采用CFRP加固法对承插式桥墩进行加固处理。该文基于既有试验, 利用Abaqus软件建立三维有限元模型, 分析承插式桥墩在轴压荷载与低周往复荷载共同作用下的滞回性能及残余变形等抗震性能指标, 并与箍筋加密后的试件进行对比分析。研究表明: CFRP布在加载位移等级较低时优势并不明显, 而加载位移等级较高时, 采用CFRP布加固试件的滞回性能、残余变形等均有较大幅度提升, CFRP可提高承插式桥墩的承载能力与变形能力, 有利于桥墩震后的继续运营及震后整体修复。

关键词: 承插式桥墩; CFRP布; 低周往复荷载; 抗震性能

中图分类号: U442.55

文献标志码: A

0 引言

随着中国基础建设的飞速发展, 新型建筑工业化已成为中国建筑业必然发展方向, 预制拼装桥梁施工技术是实现桥梁快速施工的重要途径之一^[1-5]。预制拼装桥墩在推广应用的同时也遇到了阻碍, 与传统现浇墩在地震作用下的响应并不相同, 地震作用下预制拼装桥墩的塑性铰区域可能会由于纵向压应变导致该区域保护层混凝土开裂, 对桥梁整体安全造成威胁^[6-13]。

常用的桥墩加固方法很多, 如加大截面法、注浆加固法、粘贴钢板法、体外预应力加固法、桥面补强层加固法、复合材料加固法等^[14-16]。其中, 碳纤维增强复合材料(CFRP)加固技术能较大幅度提高旧桥承载能力, 加固施工简单高效、人力投入少、绿色环保, 经济效益明显, 加固过程中可实现不中断交通和短期限制交通, 而且对原桥结构损伤较小, 是一种切实可行的加固方法, 具有广阔的发展前景^[17-18]。

欧佳灵等^[19]对CFRP加固下的圆钢管混凝土短柱进行了承载力分析, 并建立了理论公式, 结果表明: 增加CFRP层数与环向抗拉强度会提高墩柱

极限承载力, 但对屈服承载力影响较小; Chang等^[20]以现浇混凝土墩为研究对象, 采用静力加载试验对CFRP加固后桥墩的累积耗能、延性等进行分析; 司炳君等^[21]对一已破坏的现浇混凝土桥墩分别采用环氧树脂加固、CFRP布包裹加固、早强混凝土加固方法进行加固, 对比了加固后桥墩的破坏形态及承载力等, 并通过有限元建模研究3种方法加固下的桥墩破坏形态、承载力等抗震指标。

由上可知, 目前对于CFRP加固法的研究多集中于现浇混凝土墩, 而CFRP加固法对预制拼装墩的研究较少。研究表明地震作用下, 预制拼装桥墩在墩柱与承台连接部位最易发生损坏^[22], 因此本文采用CFRP布包裹该区域进行加固处理, 并与采用增加配箍率与不进行加固两种方案进行对比, 分析CFRP加固法对承插式桥墩抗震性能的影响。

1 试验概况和试件设计

为研究CFRP加固方法对承插式预制拼装桥墩抗震性能的影响, 本文基于江北高速公路东延伸项目离心预制高强管墩与承台连接力学性能试验中设计的缩尺比为1:2的承插式连接试件, 利用有限元软件Abaqus进行数值模拟, 分析不同加固

收稿日期: 2023-01-04(修改稿)

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0806000)

作者简介: 李谦, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 75387715@qq.com

方法的差异。

试验加载设备是 10 000 kN 电液伺服大型多功能结构试验系统,最大行程 ± 300 mm。采用分级加载控制试件的破坏进展。选取的试件为未考虑承台与预制墩柱接触面上的锯齿波纹状结构的对比试件。该试件表现为大偏心受压破坏,其滞回曲线、骨架曲线、耗能能力等与现浇试件相差不大。但由于其未考虑锯齿波纹构造,峰值位移和极限位移均有所下降,延性系数有一定程度降低。

根据上述试验中承插式预制拼装墩试件尺寸建立三维有限元模型,试件均为预制拼装桥墩与承台试件(图 1),其构造特点是承台施工时预埋墩柱预埋段及相关预埋钢筋,承台中心预埋波纹管。墩柱外径 700 mm,内径 450 mm。

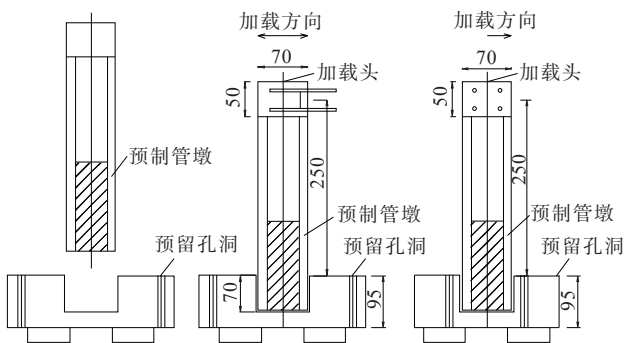


图 1 试件构造图(单位:cm)

承台尺寸为 $210\text{ cm} \times 238\text{ cm} \times 75\text{ cm}$,承台底部布置和桩基础相同数量和尺寸的钢筋混凝土圆柱,伸出承台 20 cm。

混凝土管墩采用 C70 混凝土,各试件墩身配筋形式相同(图 2),外层布置 18 根直径为 20 mm 的 HRB400 纵筋,内层布置 9 根 10 mm 的 HRB400 纵筋,螺旋箍筋直径为 6 mm,箍筋间距 7.5 cm。

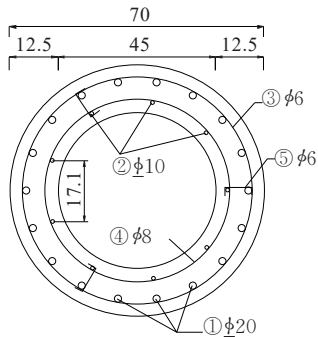


图 2 墩身截面配筋设计(单位:钢筋直径为 mm,其余为 cm)

4 个试件分别为 S1~S4。试件 S3 为离心预制高强管墩与承台连接力学性能试验中的对比试件,试件 S4 为不采取任何加固措施的数值模拟比较基准,试件 S2 在 S4 的基础上增加墩柱配箍率,将箍筋间距由 7.5 cm 调整为 5 cm,以验证增加节段配箍率对墩柱抗震性能的影响,试件 S1 在墩身与承台连接部位包裹 CFRP 布加固,以验证 CFRP 布对墩柱抗震性能的影响。

2 有限元模型建立

2.1 单元及本构选择

混凝土单元采用 C3D8R 单元,使用塑性损伤本构模型。钢筋单元采用 T3D2 单元,本构选用可考虑滞回曲线捏缩效应及刚度退化的双折线模型。

CFRP 布采用 M3D4R 单元,这种单元不具备平面外抗弯刚度,更适合模拟结构受力与变形特性。CFRP 布为线弹性材料,沿纤维方向抗拉强度较大,而正交方向抗拉强度极小,由于其正交异性的特点,可将其弹性属性定义为复合材料单层板。CFRP 布材料密度为 1.76 g/cm^3 ,抗拉强度为 3 765 MPa,弹性模量为 240 GPa。

2.2 接缝设置

灌浆料连接方式类似于桩-土相互作用^[23],灌浆料与管墩的约束作用和土与桩的约束作用相似,因此其模拟方式也可借鉴桩-土相互作用的模拟方式。即将受水平荷载的桩视为由水平弹簧组成的竖直梁。

灌浆料与管墩间的约束作用采用水平弹簧模拟,水平弹簧具有水平轴向刚度与竖向剪切刚度两个参数,分别用来模拟孔壁的水平约束作用与剪力键及摩擦力的竖向约束作用;竖向弹簧仅具有竖向轴向刚度一个参数以模拟墩柱端部支撑作用。

弹簧刚度数值大小参考文献^[23],竖向刚度为竖向弹簧的轴向刚度与水平弹簧的剪切刚度,分别为 $1.9 \times 10^2\text{ kN/mm}$ 与 $1.3 \times 10^2\text{ kN/mm}$,水平轴向刚度为 $1.5 \times 10^3\text{ kN/mm}$ 。

有限元模型如图 3 所示,其中 CFRP 布包裹部分即墩柱与承台连接部分网格做加密处理。

2.3 加载方式

采用压弯加载方式,在轴压恒载的基础上施加水平循环荷载,其中轴压力为 1 933.5 kN;水平加载

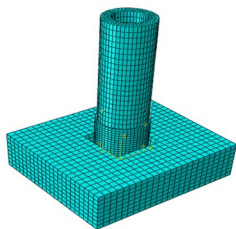
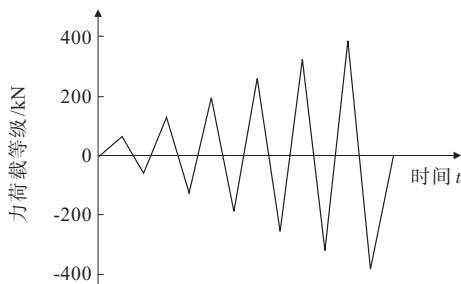


图3 有限元模型示意

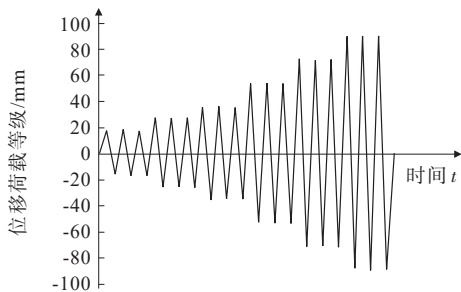
共两个阶段,分别为力加载阶段和位移加载阶段,各阶段加载具体描述如下:

(1) 力加载阶段:钢筋首次屈服前,按最小水平力 65 kN 的倍数分级循环加载直至钢筋首次屈服,同时观测并记录开裂荷载和裂缝开展情况,该阶段重点研究运营期间正常使用状态的特征。

(2) 位移加载阶段:试件在轴压和单轴弯曲组合作用循环加载方式下直至破坏。以 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍、3 倍、4 倍、5 倍、6 倍……屈服位移分级加载,每个等级循环 3 次(2 次该等级循环+1 次前 1 个荷载等级循环),直至荷载下降至最大荷载的 85% 或构件达到指定位移,该阶段重点研究地震破坏状态下的特征,加载曲线如图 4 所示。



(a) 力加载过程



(b) 位移加载过程

图4 加载方案

3 有限元结果对比分析

3.1 滞回曲线

4 种试件的水平力-位移滞回曲线见图 5。

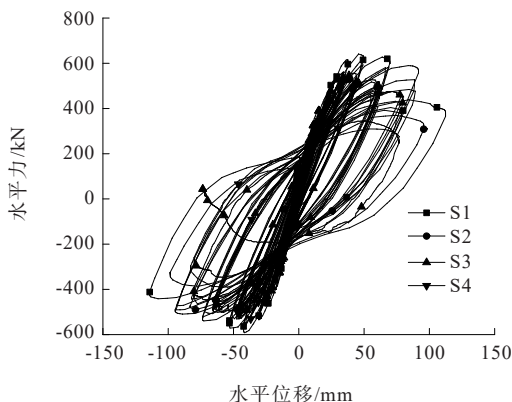


图5 水平力-位移滞回曲线

由图 5 可知:

(1) 4 种试件中 S1 试件的滞回曲线形状类似弓形,具有明显的捏缩效应,表示滞回曲线受到了一定的滑移影响。S3 与 S4 试件的滞回曲线拟合良好。虽然加载后期 S3 试件刚度退化导致模拟值和试验值有所偏差,这是由于在试验加载过程中墩身混凝土会逐渐剥落,而数值模拟中无法准确模拟由于材料损伤造成的刚度退化,但并不影响试件整体滞回特性的模拟。因此,对于本文中采用承插式的预制墩柱连接,文中的模拟结果较为可靠。

(2) S4 试件作为不做任何加固措施的数值模拟比较基准,其墩顶水平力峰值为 535.4 kN,墩顶水平位移峰值为 82.8 mm;增加配箍率后(S2 试件),墩顶水平力峰值与墩顶水平位移峰值分别为 530.5 kN 与 98.5 mm,增加配箍率后试件的承载能力基本不变,但变形能力略有增大。S1 试件的墩顶水平力峰值为 640.9 kN,墩顶水平位移峰值为 114.2 mm,试件的变形能力与承载能力都有一定程度增强,且试件的软化速度变快。

3.2 骨架曲线

骨架曲线为往复加载时各次滞回曲线峰点的连线,即滞回曲线的包络线。骨架曲线的形状大致与单调加载得到的荷载-位移曲线相似,主要区别在于极限荷载略低一些,能较明显地反映结构或构件的最大荷载、初始刚度、屈后刚度等抗震指标,各试件的骨架曲线如图 6 所示。各试件骨架曲线的特征点如表 1 所示。

由图 6 可知:S3 与 S4 试件的骨架曲线基本重合,S2 试件相比 S4 并无明显变化,而 S1 相比 S4,承

载力与变形能力均有提升,前者的极限承载能力大约为后者的 1.18 倍。

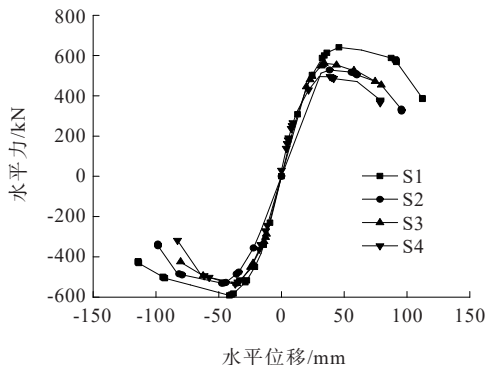


图 6 骨架曲线

表 1 骨架曲线关键指标

试件	屈服位移/ mm	峰值位移/ mm	屈服荷载/ kN	峰值荷载/ kN
S1	30.4	45.8	565.9	640.9
S2	28.5	47.5	466.8	530.5
S3	25.3	34.2	496.1	561.8
S4	27.3	36.9	472.2	535.4

3.3 耗能能力

累计滞回耗能是指结构在循环荷载作用下从开始加载到破坏滞回耗能的总量,即每个滞回曲线的面积之和。各试件在每一个位移加载等级对应的耗能能力如图 7 所示。

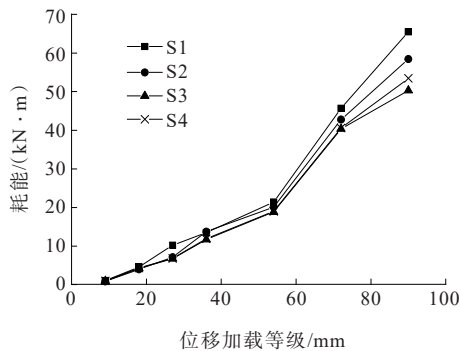


图 7 各试件累积滞回耗能曲线

由图 7 可知:S1 试件的累积耗能能力明显强于 S2、S3 与 S4 试件,这是由于 S1 试件的变形能力更强,使得耗散能量更多,即最终的耗能水平高于其余试件。同理,在位移加载等级为 90 mm 时,S1、S2 和 S4 试件的单次加载耗能增量均大于 S3,原因在于 S3 试件加载至 90 mm 只反复一周就已经发生

结构破坏,而 S1、S2 和 S4 试件完整地循环反复加载 3 周。对比可知,在位移等级为 72 mm 前,各试件的耗能水平相近,这与滞回曲线基本重合的结论相吻合。然后,由于 S1 试件具备更强的变形能力,因此其滞回环面积和滞回圈数多于其余试件,即最终耗能水平较高。

3.4 残余变形

各试件水平残余变形曲线如图 8 所示。

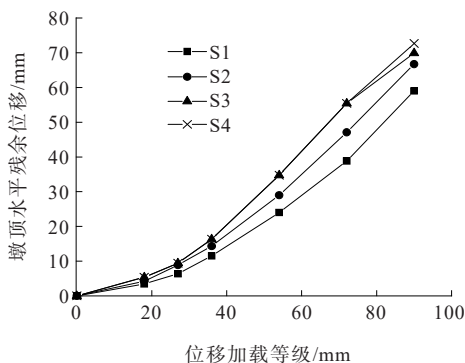


图 8 各试件残余变形曲线

由图 8 可知:在位移荷载等级较低阶段,各试件的残余位移相差无几,随着位移荷载等级的增大,各试件的残余位移开始表现出差异。S1~S4 试件在加载等级为 72 mm 时,残余位移分别为 38.8 mm、47.1 mm、55.4 mm、55.5 mm;在加载等级为 90 mm 时,残余位移分别为 59.0 mm、66.7 mm、69.9 mm、72.7 mm;桥墩的残余变形保持在较低水平,不仅有利于桥梁震后继续运营,保障救援工作的开展,而且对于震后桥墩的整体修复工作也有重要意义,整体而言,S1 试件相对优于其余试件。

4 结论

通过 Abaqus 建立预制拼装桥墩有限元模型,对比分析 CFRP 加固法对承插式桥墩抗震性能的影响,得到以下主要结论:

(1) CFRP 布加固使得承插式桥墩墩柱与承台的连接部分受到环向约束,地震作用下可有效减少混凝土压碎破坏。

(2) 4 个试件中,使用 CFRP 布加固的 S1 试件承载能力与变形能力均有较大提升,使用 CFRP 布加固后,试件承载力提升约 1.18 倍。

(3) S1试件的残余变形在位移加载等级较大时明显低于S2、S3与S4试件,不仅有利于桥梁震后的运营,对震后整体修复也有重要意义。

(4) CFRP布加固对桥墩的承载能力与变形能力提升较大,而增加配箍率对于本文承插式桥墩的抗震性能影响并不显著。

参考文献:

- [1] 葛继平,夏樟华,江恒. 灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验[J]. 中国公路学报,2018,31(12):221-230,266.
- [2] 郑永峰,郭正兴. 变形灌浆套筒连接性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报,2016,37(3):94-102.
- [3] 薛俊青,DAVIDE Lavorato,聂尚杰,等. 带小直径纵筋并外包CFRP的RC圆墩抗震性能研究[J]. 中国公路学报,2022,35(2):124-135.
- [4] 龚婉婷,徐望喜,韦翔,等. 预应力CFRP加固损伤钢筋混凝土墩柱的抗震性能试验研究[J]. 铁道建筑,2022,62(5):106-111.
- [5] 龚婉婷,钱永久,徐望喜,等. 初应力不同CFRP修复损伤RC墩柱抗震性能研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(10):3035-3045.
- [6] 岳文超. 承插式离心管墩与承台连接力学特性研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2020.
- [7] 王贺鑫. 预应力混凝土装配式双柱桥墩抗震性能试验研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2018.
- [8] 樊泽,曾明辉,胡志坚. 预制拼装桥墩连接构造抗震性能分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(2):357-362.
- [9] 何通. 预制节段拼装混凝土桥墩抗震性能研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- [10] 黄邦本. 抗震工程学 第十二章 桥梁抗震[J]. 国外公路,1977(3):66-120.
- [11] 邵淑营. 灌浆波纹管连接装配式桥墩抗震性能研究[D]. 福州:福州大学,2018.
- [12] 张哲铭. 预应力CFRP布-RPC增大截面法复合加固钢筋混凝土方柱抗震性能[D]. 桂林:桂林理工大学,2020.
- [13] 邓明科,张阳玺,陈尚城. 高延性混凝土加固框架柱抗震性能试验研究及其轴压比限值分析[J]. 土木工程学报,2019,52(2):22-31,65.
- [14] 汪泉清. 高烈度区装配式公路桥梁抗震性能研究[J]. 中外公路,2020,40(6):132-135.
- [15] 唐黎明,严升威,曹政,等. 基于反应谱法的高墩连续刚构桥地震响应特性分析[J]. 中外公路,2017,37(2):98-101.
- [16] 肖龙,冯仲仁,陈百奔,等. 基于修正反应谱高墩连续刚构桥地震响应研究[J]. 中外公路,2022,42(1):115-122.
- [17] 马振霄,贾少敏. 基于简化数值模型的高墩桥梁减隔震性能研究[J]. 中外公路,2019,39(4):131-138.
- [18] 王强,张亚州. 纵向墩高差对桥梁抗震响应的影响研究[J]. 中外公路,2022,42(6):152-156.
- [19] 欧佳灵,邵永波. 轴压作用下CFRP加固圆钢管混凝土短柱的承载力分析[J]. 工程力学,2019,36(10):112-180.
- [20] CHANG S Y, LI Y F, LOH C H. Experimental study of seismic behaviors of as-built and carbon fiber reinforced plastics repaired reinforced concrete bridge columns[J]. Journal of Bridge Engineering,2004,9(4).
- [21] 司炳君,黄照南,孙治国,等. 利用FRP材料的钢筋混凝土桥墩震后修复效果影响因素分析[J]. 世界地震工程,2009,25(3):8-14.
- [22] 王志强,张杨宾,蒋仕持,等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗剪性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(6):767-775.
- [23] 徐艳,曾增,葛继平,等. 承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(12):1706-1711.