

UHPC 加固钢筋混凝土方形桥墩抗震性能参数分析

郑衍磊¹,徐龙伟²,张汉玉¹,王桂梅²,付涛^{2*}

(1.山东省路桥集团有限公司,山东 济南 250014; 2.山东建筑大学交通工程学院,山东 济南 250101)

摘要:为研究超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)加固钢筋混凝土桥墩加固区构造参数对桥墩抗震性能的影响,基于桥墩拟静力试验结果,采用 ABAQUS 有限元软件建立桥墩有限元模型,基于试验数据验证桥墩有限元模型的准确性,采用控制变量法对加固层高度、加固层厚度和墩身配筋等构造参数进行分析。研究表明:随着加固层 UHPC 高度的增大,墩身塑性损伤减少,对墩身抵抗初始变形能力和抗弯承载力的提高产生了积极影响。桥墩在一定加固层厚度下对墩身的约束作用会达到饱和状态,继续增加加固层 UHPC 厚度对墩身损伤及各项指标不会产生明显影响。纵筋强度的增加对 UHPC 加固后桥墩抗震性能影响较大,较大程度地增加了桥墩的水平抗弯承载力,同时使得墩身的位移延性系数降低,不同强度纵筋桥墩骨架曲线整体发展趋势相近,等强度和等体积代换为高强度纵筋后,墩身整体刚度的退化速率延缓,桥墩弹性工作能力增强。

关键词:UHPC; 高强钢筋; 抗震加固; 拟静力试验; 参数分析

中图分类号:TU977 **文献标志码:**A

引用格式:郑衍磊,徐龙伟,张汉玉,等.UHPC 加固钢筋混凝土方形桥墩抗震性能参数分析[J].山东大学学报(工学版),2025,55(3):128-140.

ZHENG Yanlei, XU Longwei, ZHANG Hanyu, et al. The seismic performance parameter analysis of reinforced concrete square bridge piers strengthened with UHPC[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(3):128-140.

The seismic performance parameter analysis of reinforced concrete square bridge piers strengthened with UHPC

ZHENG Yanlei¹, XU Longwei², ZHANG Hanyu¹, WANG Guimei², FU Tao^{2*}

(1. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China; 2. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the structural parameters of the reinforced concrete piers reinforced with ultra-high performance concrete (UHPC) on the seismic performance of the piers, based on the results of the proposed static test of the piers, the finite element model of the piers was established by using the ABAQUS. Based on the test data, the accuracy of the finite element model of the pier was verified, and the structural parameters such as the height of the reinforcement layer, the thickness of the reinforcement layer, and the reinforcement of the pier were analyzed using the control variable method. The results of the research showed that with the increase of the height of the reinforced layer UHPC, the plastic damage of the pier body decreased, which positively affected the improvement of the pier body's ability to resist the initial deformation and flexural load capacity. Under a certain thickness of reinforcement layer, the constraining effect of the abutment reached a saturation state, where further increasing the thickness of the UHPC reinforcement layer did not significantly affect the damage to the abutment or any related indicators. The increase in longitudinal reinforcement strength significantly impacted the seismic performance of bridge piers reinforced with UHPC, notably enhancing the pier's horizontal flexural capacity to a greater extent, while concurrently reducing the displacement ductility coefficient of the pier body. The overall development trends of bridge pier skeleton curves were similar for different strengths of longitudinal reinforcement. Substituting equal strength or equal volume with high-strength longitudinal reinforcement delayed the overall stiffness degradation of the pier body, thereby enhancing the elastic working capacity of the bridge pier.

Keywords: UHPC; high-strength reinforcement; seismic strengthening; quasi-static test; parametric analysis

收稿日期:2024-07-15

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME227);山东省交通运输科技计划资助项目(2024B90)

第一作者简介:郑衍磊(1982—),男,山东东平人,高级工程师,主要研究方向为桥梁道路施工等。E-mail:487897205@qq.com

* 通信作者简介:付涛(1981—),男,山东潍坊人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为桥梁结构抗震与耐久性。

E-mail:greenvillage_17@163.com

0 引言

桥梁是交通线的重要枢纽,也是交通生命线的重要组成部分,其抗震性能对交通安全性具有重要影响,同时也极易遭受地震破坏。桥墩作为承载构件易损性较高,其抗震性能在一定程度上决定桥梁整体抗震能力^[1]。桥墩抗震加固技术是桥梁震后快速修复的有效手段^[2],为快速恢复震损桥墩的性能,确保桥墩结构安全稳固^[3],提出高效便捷的桥墩震后加固方法具有十分重要的现实意义。

文献[4]采用增大截面法将弯曲破坏后的中空装配式桥墩进行加固处理,通过与未加固桥墩对比得出,加固后桥墩滞回曲线更加丰满,承载能力和初始切线刚度显著提高。文献[5]用钢筋和玻璃钢复合材料(fiberglass reinforce plastic, FRP)修复了震损桥墩,恢复了桥墩的水平承载力和位移延性,提高了桥墩的初始刚度、承载能力和滞回能力。文献[6]提出了基于碳纤维增强聚合物和聚对苯二甲酸乙二醇酯材料的预制装配式混凝土桥墩抗震加固方法和采用抗摇摆外金属消散体加固桥墩的抗震加固方法,研究表明:两种方法均能显著降低试件水平位移,有效提高试件的耗能能力和延性。文献[7]采用 Opensees 软件对增大截面加固法、外包 FRP 加固法及外包水泥基增强复合材料(engineered cementitious composite, ECC)加固法3种常见的桥墩加固方法进行数值模拟和对比分析,结果表明:增大截面法可显著增强桥墩的峰值荷载、刚度和耗能能力,加固效果显著优于其他两种加固方法。

增大截面加固法作为桥梁最常见的加固方法之一,在改善墩柱耗能能力、延性和承载力等方面均表现良好^[8-10]。但是采用普通混凝土作为加固层,因自身混凝土强度低,往往加固层厚度较大,导致桥墩质量增大,空间减小。超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)作为一种新型材料,具有良好的韧性、耐久性和延性,较高的抗拉和抗压强度^[11-13],将其用作墩柱的加固材料具有良好的工作性能。文献[14]通过对6根配置高强钢筋的 UHPC 柱开展抗震试验,分析了纵筋配筋率对柱体抗震性能的影响,结果表明:UHPC 柱破坏前具有良好耗能性能,纵筋配筋率能有效改善柱体的损伤容限。文献[15]通过拟静力循环试验研究了 UHPC 对钢筋混凝土桥墩抗震性能的影响,分析和讨论了 UHPC 加固层对滞回曲线、强度、延性、刚

度退化和耗能的影响,结果表明:UHPC 加固后,桥墩的强度和刚度得到明显提高,桥墩的震后性能得到改善。文献[16-17]考虑二次受力进行了素 UHPC 加固桥墩的轴压性能试验,给出了不同极限状态下考虑初始应力水平影响的轴压极限承载力简化公式,研究结果表明:仅用素 UHPC 加固桥墩时,构件表现为明显的脆性破坏,需搭配其他材料进行加固。

依托某城市快速路市政高架桥梁工程,该桥梁墩身截面采用 2 m×2 m 的方形截面型式。本研究针对该典型市政桥梁工程的桥墩进行拟静力试验,对拟静力试验发生弯曲破坏的桥墩,基于增大截面加固法,提出了基于 HTRB600E 高强钢筋和 UHPC 的新型桥墩加固方法。该方法用于桥墩抗弯承载力不足的抗震加固,在发生弯曲破坏的桥墩墩身四周植入 HTRB600E 高强钢筋,并采用耐久性强、流动性好、抗压和抗拉强度高 UHPC 材料包裹在墩身底部区域,与 HTRB600E 高强钢筋共同形成 UHPC 加固层,在减小桥墩加固截面尺寸的同时显著提高了桥墩的抗震性能。

1 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩构造

桥墩作为桥梁结构的主要承重构件,在保障桥梁正常运行中发挥着重要的作用。地震作用下,桥墩极易受到损伤,桥梁丧失正常使用能力,为恢复震损桥墩承载能力和稳定性,保障桥梁正常使用,对桥墩进行加固改造是必要的工程措施,本研究提出采用 UHPC 和 HTRB600E 高强钢筋加固钢筋混凝土桥墩的方法,在震损桥墩墩身混凝土损坏区外围植入竖向钢筋和水平向钢筋,在植入钢筋外围浇筑 UHPC 混凝土,形成 UHPC 加固层,如图 1 所示。通过 UHPC 加固层增强对桥墩混凝土损伤区域的约束作用,提高桥墩抗震性能。

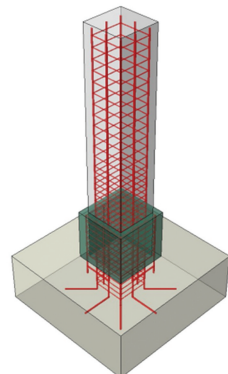


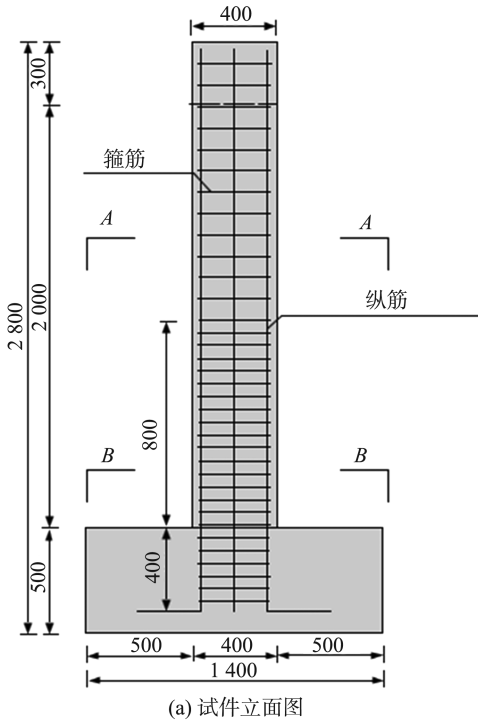
图1 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩构造
Fig.1 UHPC reinforced concrete pier structure

2 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩拟静力试验

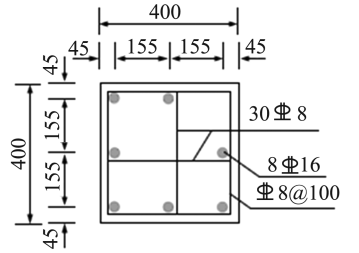
2.1 试件设计

2.1.1 钢筋混凝土桥墩试件

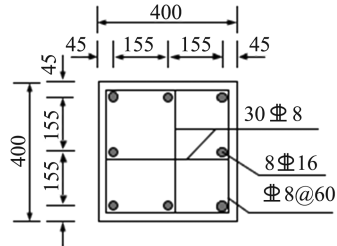
钢筋混凝土方形桥墩(S1试件)尺寸为400 mm×400 mm×2 300 mm,其中自墩顶向下300 mm



范围内为加载段。墩身及承台均采用C40混凝土浇筑。钢筋混凝土桥墩设计纵筋为8根直径为16 mm的HRB400E钢筋,箍筋为35根直径为8 mm的HRB400E钢筋,其中对墩柱塑性铰区箍筋进行加密,间距为60 mm,未加密区域箍筋间距为100 mm。桥墩试件尺寸及截面配筋如图2所示,试件设计参数如表1所示,对S1试件进行拟静力试验直至试件破坏。



(b) A-A断面图



(c) B-B断面图

单位: mm

图2 S1试件截面配筋

Fig.2 Cross-section reinforcement of the S1 specimen

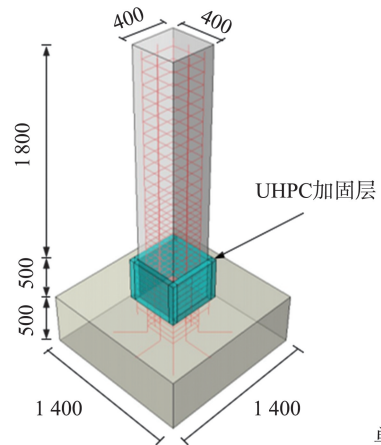
表1 S1试件参数汇总

Table 1 Summary of S1 specimen parameters

试件名称	纵筋		箍筋			混凝土
	种类	直径/mm	种类	直径/mm	间距/mm	
S1试件	HRB400E	16	HRB400E	8	60/100	C40

2.1.2 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩试件

将经过拟静力试验后损坏的混凝土方形桥墩(S1试件)进行抗震加固。按照设计规定的UHPC加固层高度,剥除已损坏的桥墩混凝土部分,并在桥墩和承台预定的设计位置进行钻孔。为清除孔内残留的混凝土粉尘,在钻孔完成后进行清理,并注入植筋胶。将加固钢筋插入孔内,套入箍筋,并进行扎丝绑扎,静置48 h以确保环氧植筋胶达到工作强度。最后,根据加固设计方案,在相应的UHPC加固层位置进行立模,将搅拌好的UHPC浇注进模具,形成UHPC加固层,加固后桥墩如图3所示。



单位: mm

图3 加固示意图

Fig.3 Schematic diagram of reinforcement

依据文献[18]5.5.3规定,新增混凝土层的最小厚度:板不应小于40mm;梁、柱采用现浇混凝土、自密实混凝土或灌浆料施工时,不应小于60mm。UHPC高性能混凝土具有较高的抗拉和抗

压强度,综合考虑其抗震性能提升效果及加固层的经济性,确定UHPC加固层厚度为60mm,结合S2试件拟静力试验塑性损伤破坏区域,确定UHPC加固层高度为500mm,如图4(a)、(b)所示。

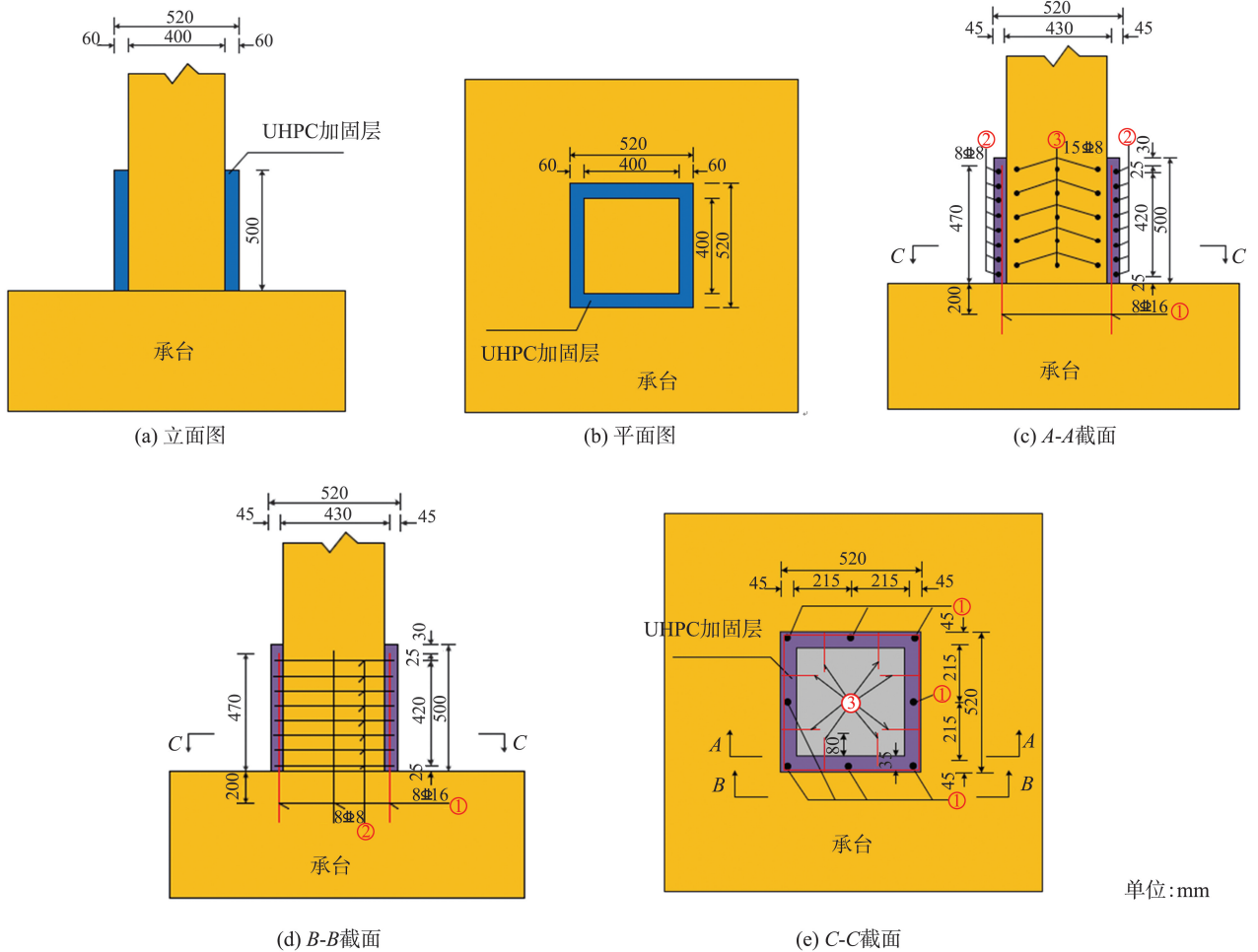


图4 桥墩加固设计图

Fig.4 Design drawing of bridge pier reinforcement

竖向钢筋采用直径为16mm的HTRB600E高强度钢筋,孔径设计为20mm。紧贴原破坏桥墩的墩柱边缘进行钻孔植筋,锚固深度为200mm,每侧布置3根竖向钢筋;水平向钢筋采用直径为8mm的

HRB400E带肋钢筋,孔径设计为12mm,钢筋锚固长度为80mm,抗剪段钢筋长度为40mm,每侧布置15根水平钢筋,水平向、竖向植筋钢筋布置如图4(c)~(e)所示。试件设计参数如表2所示。

表2 S2试件参数汇总

Table 2 Summary of S2 specimen parameters

试件名称	纵筋		箍筋			纵向植筋		横向植筋		混凝土
	种类	直径/mm	种类	直径/mm	间距/mm	种类	直径/mm	种类	直径/mm	
S2试件	HRB400E	16	HRB400E	8	60/100	HTRB600E	16	HRB400E	8	C40

根据文献[19-20],对C40混凝土、钢筋及UHPC高性能材料进行各类材料试验,获得不同材料的性能指标,各力学性能参数如表3所示。

本次试验采用某公司生产的镀铜平直钢纤维,钢纤维掺量为2.3%,其物理性能指标如表4所示。将UHPC浇灌至加固区段后,48h后拆除模具,当UHPC达到28d养护龄期进行后续试验。

表3 材料力学性能参数

Table 3 Mechanical properties of materials

材料类别	屈服强度/ 极限抗压		极限抗拉
	MPa	强度/MPa	
混凝土	C40	45.3	
	UHPC	123.6	7.9
钢筋	HRB400E	437.0	603.9
	HTRB600E	675.2	836.6

表4 钢纤维的物理性能

Table 4 Physical properties of steel fibers

品类	长度/ mm	直径/ mm	长径比	抗拉强度/ MPa
钢纤维	13	0.2	65	2 850

2.2 拟静力试验加载制度

拟静力试验过程中,墩顶轴向力由竖向千斤顶施加,轴压比均保持为0.1。通过位移控制 MTS 作动器对试件施加水平往复荷载,规定作动器向西加载为推,向东加载为拉;施加的位移幅值首先从0 mm开始,0~20 mm 荷载范围位移以2 mm 为单位逐级递增,20~50 mm 荷载范围内位移以5 mm 为单位逐级递增,50 mm 荷载之后位移以10 mm 为单位逐级递增,直至试件破坏。每一级荷载均循环3次,当试件的水平承载力下降到其最大值的85%以下、混凝土压碎或是纵筋拉断时结束试验。试件标记如图5所示,拟静力试验加载制度如图6所示,试验加载装置如图7所示。

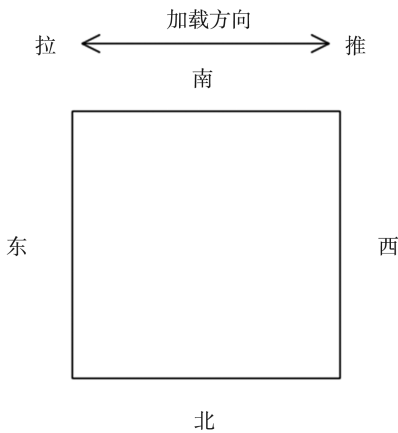


图5 试件标记示意图

Fig.5 Schematic diagram of specimen marking

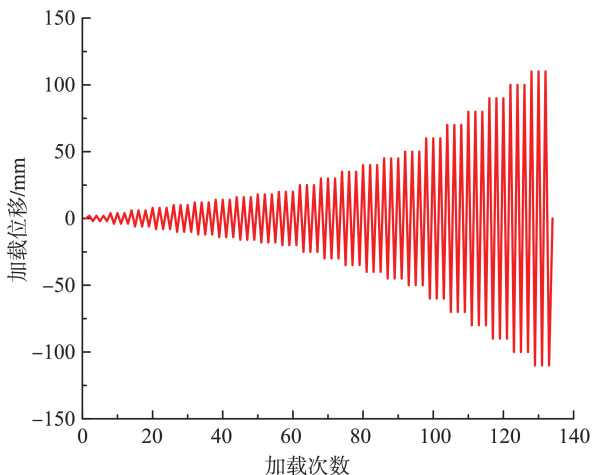
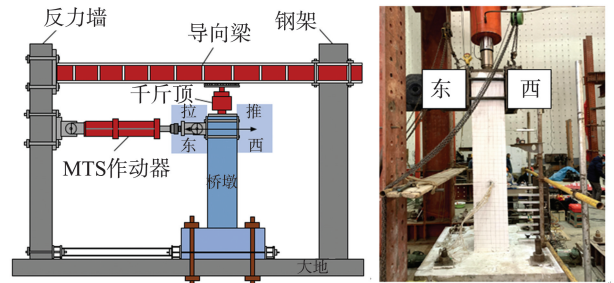


图6 加载制度

Fig.6 Loading system



(a) 加载装置示意图

(b) 加载装置实景图

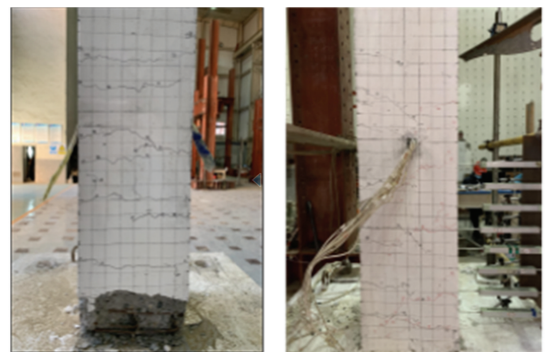
图7 试验加载装置

Fig.7 Experimental loading device

2.3 试验现象

2.3.1 S1 试件试验现象

拟静力试验加载前期,当水平位移为6 mm 时,试件东西两侧墩底产生首条水平贯穿裂缝,裂缝宽度约为0.1 mm,且不断向试件南北两侧的中性轴附近水平延伸。随着加载位移的增大,试件自墩底向上约320 mm 范围内产生多条水平贯穿裂缝,分布间距较均匀,约为15~20 cm,墩底裂缝宽度开展较大。拟静力试验加载中期,加载位移为50 mm 时,试件墩身底部大量混凝土开裂起皮,且墩底柱脚产生多条自下而上发展的劈裂裂缝,发展高度约为8 cm。拟静力试验加载后期,试件墩身损伤逐渐累积,加载位移80 mm 时,试件墩身混凝土大量剥落,最大剥落高度约为50 cm,墩底大量混凝土压碎,墩底区域率先发展成为塑性铰区,最终发展高度约为300 mm,如图8所示。



(a) 箍筋露出

(b) 墩身裂缝分布



(c) 柱脚混凝土压碎

(d) 墩底融合面贯通

图8 S1 试件破坏图

Fig.8 Failure diagram of S1 specimen

2.3.2 S2 试件试验现象

拟静力试验加载前期,当水平位移为 6 mm 时,试件 UHPC 加固层顶面与墩身连接处产生首条裂缝,裂缝宽度为 0.09 mm。随着加载位移的增大,加固后试件自墩底向上约 65 cm 范围内产生多条水平贯穿裂缝,分布间距较均匀,约为 15~20 cm,且不断向试件南北两侧的中性轴附近水平延伸,最大裂缝宽度为 0.24 mm。水平位移继续增大,试件裂缝宽度持续发展,加固段顶面柱脚混凝土出现起皮、剥落现象,墩身产生多条裂缝,北侧中性轴处截面裂缝发展呈现明显的 45°斜向下发展趋势。当水平位移为 20 mm 时,加固后试件 UHPC 加固层顶部墩身柱脚处产生自上而下的劈裂裂缝,发展高度约为

5 cm。当水平位移为 30 mm 时,加固后试件 UHPC 加固层顶面南侧柱脚产生水平裂缝并垂直延伸进 UHPC 加固层,如图 9(a)~(c)所示。拟静力试验中期,当水平位移为 50 mm 时,加固后试件 UHPC 加固层顶部墩身混凝土大面积起皮、部分剥落,墩身柱脚处劈裂裂缝继续向上发展,发展高度约为 7.5 cm,如图 12(d)所示。加固后试件的主要受力纵筋逐渐达到屈服强度,加载初期东西两加载面产生的水平裂缝宽度大于 2 mm,裂缝开展明显,贯穿墩身发展并最终在南北中性轴处交汇。拟静力试验后期,当水平位移为 80 mm 时,加固层顶部柱脚混凝土大量压碎剥落,压碎高度约为 30 cm,箍筋露出,如图 9(a)~(h)所示。

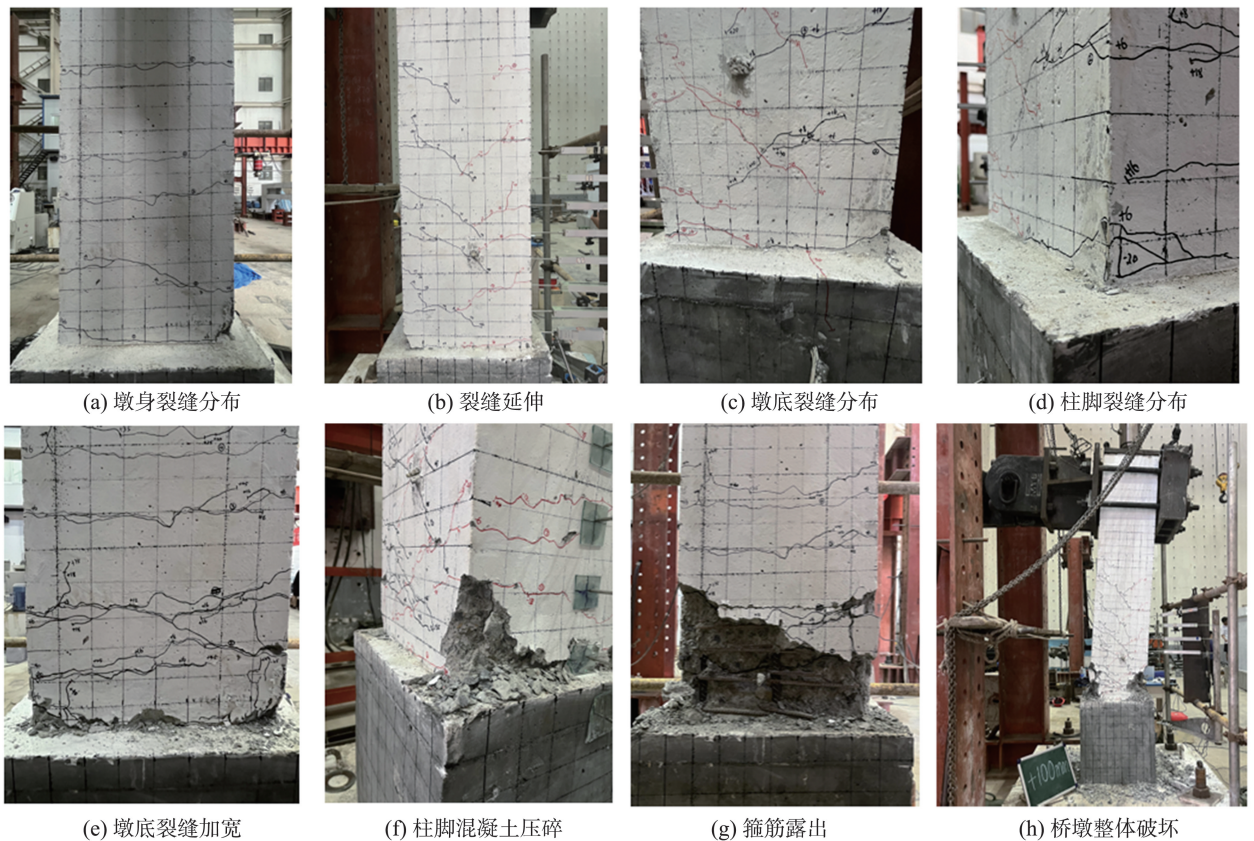


图 9 S2 试件试验现象图

Fig.9 Test phenomenon diagram of S2 specimen

UHPC 加固段墩身刚度明显大于未加固段墩身刚度,在往复荷载作用下加固段未出现明显变形,桥墩试件控制截面为加固段顶部的未加固桥墩截面,裂缝主要集中在未加固墩身段,UHPC 加固墩身段未出现开裂现象。水平向植筋和桥墩凿毛处理等措施极大限制了 UHPC 加固层与墩身之间的相对滑移,保证了加固段与桥墩协同工作,共同承受荷载,在整个拟静力试验过程中 UHPC 加固层与混凝土桥墩之间未发生相对滑移。

加固前后两试件存在 3 点明显的差异:(1)墩身裂缝发展。与加固前试件相比,加固后试件裂缝发展分布较为均匀。(2)塑性铰的产生和塑性铰区高度。加固前试件桥墩底部为薄弱截面并发展为塑性铰区,塑性铰区高度约为 300 mm。加固后试件在 UHPC 加固层顶部刚度突变处率先发展成为薄弱截面,最终发展成为塑性铰区,高度距离 UHPC 加固层顶部约为 270 mm。(3)试件破坏模式。加固前试件墩身裂缝呈现水平发展趋势,塑性铰区混

凝土保护层剥落,属于典型的弯曲破坏;加固后试件由于剪跨比减小,墩身裂缝首先水平发展,后在北侧中性轴截面处呈明显的45°斜向下发展趋势,属于弯剪破坏。

2.4 拟静力试验结果

通过拟静力试验,分别得到 S1 和 S2 试件各自的滞回曲线和骨架曲线,分别如图 10 和图 11 所示。根据两桥墩试验骨架曲线结果,取试件最大荷载 P_{max} 的 85% 为试件的极限荷载 P_u 和极限位移 Δ_u ,使用 Park 法确定试件屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y ,如表 5 所示。

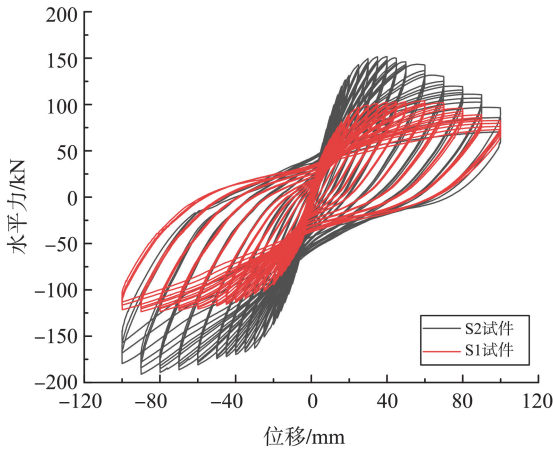


图 10 滞回曲线对比

Fig.10 Comparison of hysteresis curves

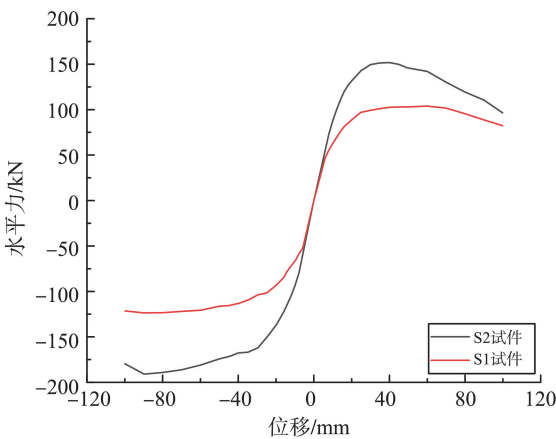


图 11 骨架曲线对比

Fig.11 Comparison of skeleton curves

表 5 试件骨架曲线特征点参数

Table 5 Parameters of the characteristic points of the specimen skeleton curve

试件	$\Delta_y /$ mm	$P_y /$ kN	$\Delta_{max} /$ mm	$P_{max} /$ kN	$\Delta_u /$ mm	$P_u /$ kN	延性 系数
S1 试件	17.95	82.72	33.18	103.91	80.51	88.32	4.99
S2 试件	19.94	134.95	35.62	148.06	84.22	125.85	4.22

注: Δ_y 为屈服位移, P_y 为屈服荷载, Δ_{max} 为峰值位移, P_{max} 为峰值荷载, Δ_u 为极限位移, P_u 为极限荷载。

根据图 11 和表 5 可知,加载位移位于 5 mm 之

前,两桥墩骨架曲线重合,墩身损伤和性能指标没有明显差异。随着加载位移的增大,墩身材料处于弹塑性或塑性阶段,墩身塑性损伤增多,墩身刚度发生退化,骨架曲线斜率减小,水平荷载增长速率减小,直至达到峰值荷载,加固区 UHPC 混凝土和 HTRB600 高强钢筋对墩身约束的促进作用开始显现。与加固前试件相比,加固后试件的抗弯承载力提高了 42.49%,表明通过植入高强钢筋的 UHPC 加固层能够较好地恢复和提高构件的抗弯承载力,桥墩抗震性能显著提升,植入高强钢筋的 UHPC 增大截面法加固效果明显。在加载的后期阶段,墩身塑性损伤大量累积,骨架曲线下落速率逐渐增大,水平抗弯承载力下降明显,墩身刚度退化明显。植入高强钢筋的 UHPC 加固层对墩身混凝土的约束作用延缓了墩身的刚度退化,加固后试件骨架曲线下落段斜率较小。采用 UHPC 混凝土和高强钢筋加固,显著增强了桥墩水平抗弯承载能力,增大了墩身整体刚度,增强桥墩弹性工作能力,延缓墩身进入塑性阶段,减少总变形中塑性变形占比,进而使桥墩位移延性能力有所减弱。相较于加固前试件,加固后试件屈服位移增大了 11.09%、极限位移增大了 4.61%、位移延性系数减小了 15.43%。对于一般有抗震要求的结构,要求延性系数 ≥ 3 ^[21],由表 5 可知,加固后试件延性系数虽小于加固前,但仍满足抗震要求。

整体而言,采用 UHPC 和 HTRB600E 高强钢筋加固,可以显著恢复桥墩抗震能力,滞回耗能水平和抗弯承载力较加固前显著提高,表明植入高强钢筋的 UHPC 增大截面法在桥墩加固应用中可发挥积极效应。

3 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩有限元分析

3.1 桥墩有限元模型

3.1.1 材料本构模型

3.1.1.1 混凝土本构模型

在有限元模型中,往复荷载作用下试件混凝土的非线性行为通过混凝土损伤塑性本构模型来实现。根据文献[22]得到混凝土单向受压和单向受拉应力-应变关系,见式(1)~(8)。在试件重复加卸载作用下,混凝土发生塑性损伤,其应力-应变曲线在卸载和反向加载段的斜率有所减小。根据文献[23],引入混凝土受压、受拉损伤因子 d_i 来减小其应力-应变曲线在卸载和反向加载段的

斜率,见式(9)。在往复荷载作用下,混凝土经历重复加卸载时的塑性损伤本构模型曲线如图12所示。

混凝土受压应力-应变关系为

$$y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, \quad x \leq 1, \quad (1)$$

$$y = \frac{x}{\alpha_d (x-1)^2 + x}, \quad x > 1, \quad (2)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}, \quad (3)$$

$$y = \frac{\sigma}{f_c^*}, \quad (4)$$

式中: α_a 和 α_d 为混凝土单轴受压应力-应变曲线上上升段和下降段参数,分别取 1.90 和 1.94; f_c^* 为混凝土单轴受压时的抗压强度,MPa; ε_c 为混凝土单轴受压时的峰值压应变; σ 为受压混凝土的压应力,MPa; ε 为受压混凝土的压应变,MPa。

混凝土受拉应力-应变关系为

$$y = 1.2x - 0.2x^6, \quad x \leq 1, \quad (5)$$

$$y = \frac{x}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x}, \quad x > 1, \quad (6)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}, \quad (7)$$

$$y = \frac{\sigma}{f_t^*}, \quad (8)$$

式中: α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下下降段参数,取 1.95; f_t^* 为混凝土单轴受拉时的抗拉强度,MPa; ε_t 为混凝土单轴受拉时的峰值拉应变。

$$d_i = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \varepsilon}}, \quad (9)$$

式中: E_0 为峰值应力对应的割线模量,MPa。

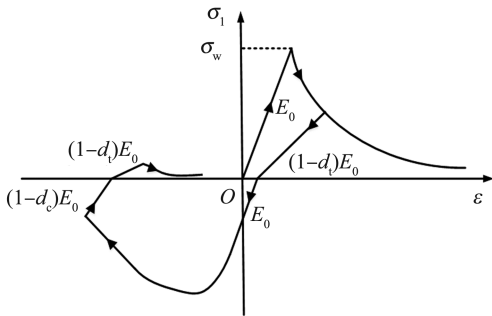


图 12 混凝土损伤塑性本构曲线

Fig.12 Plastic constitutive curve of concrete damage

3.1.1.2 UHPC 本构模型

受压阶段 UHPC 材料应力-应变曲线分为上升段与下降段两部分,见式(10),本构曲线如图13所示。

$$\sigma = \begin{cases} f_c \frac{n\xi - \xi^2}{1 + (n-2)\xi}, & \varepsilon \leq \varepsilon_{c0} \\ f_c \frac{n\xi - \xi^2}{2(\xi-1)^2 + \xi}, & \varepsilon > \varepsilon_{c0} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: f_c 为 UHPC 受压时的抗压强度; $n = E_c/E_s$, E_c 为 UHPC 受压初始弹性模量, GPa; E_s 为 UHPC 受压峰值点的割线模量, GPa; $\xi = \varepsilon/\varepsilon_{c0}$, ε_{c0} 为 UHPC 受压峰值点的压应变。

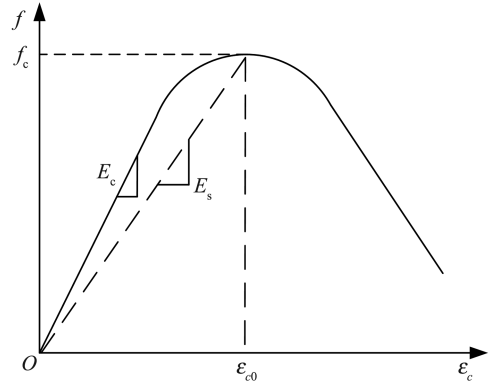


图 13 受压阶段 UHPC 本构曲线

Fig.13 Constitutive curves of UHPC in the compression phase

受拉阶段 UHPC 材料采用应变硬化模型,见式(11),本构曲线如图14所示。

$$\sigma = \begin{cases} \frac{f_{ct}}{\varepsilon_{ca}} \varepsilon, & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{ca} \\ f_{ct}, & \varepsilon_{ca} < \varepsilon \leq \varepsilon_{pc} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: f_{ct} 为应变硬化阶段平均应力,MPa; ε_{ca} 为 UHPC 材料初裂应变; ε_{pc} 为 UHPC 材料极限拉应变。

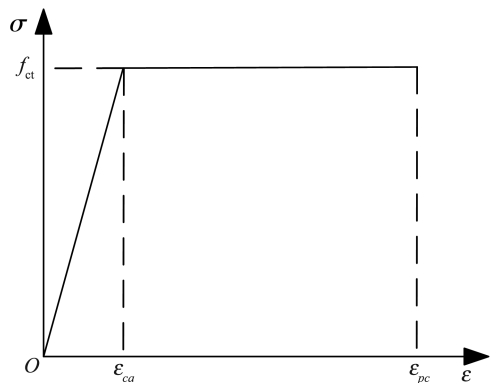


图 14 受拉阶段 UHPC 本构曲线

Fig.14 Constitutive curves of UHPC in the tensile stage

3.1.1.3 钢筋本构模型

在有限元模型中,钢筋选用理想弹塑性双折线本构模型,当钢材应力达到屈服强度后,其二次刚度为一次刚度的 1%,钢材理想弹塑性本构模型曲线如图15所示。

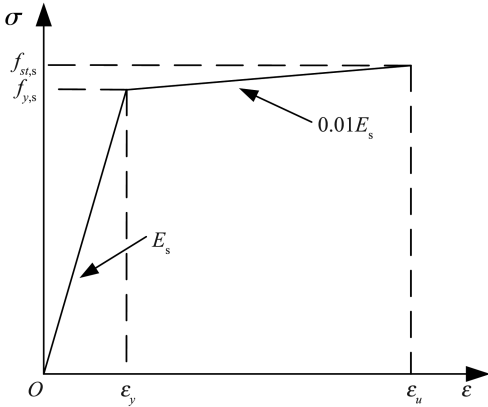


图 15 钢材理想弹塑性本构曲线

Fig.15 Ideal elastoplastic constitutive curve of steel

3.1.2 有限元模型各部分相互作用、边界条件和网格划分

基于 ABAQUS 有限元软件建立 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩有限元模型。钢筋骨架与桥墩墩身、承台混凝土及 UHPC 加固层间的相互作用方式选用内置区域,钢筋线单元与混凝土实体单元间内嵌入零宽度黏结滑移单元,使得钢筋与混凝土之间在往复荷载作用下可以产生有限滑移。墩身、承台混凝土和 UHPC 加固层之间的滑移量较小,不会对模型计算结果产生影响,故三者间的滑移可忽略不计,选用绑定相互作用方式。桥墩底部采用完全固结边界条件。

有限元模型网格划分时,混凝土和 UHPC 加固层网格类型选用 C3D8R,纵筋、箍筋和植筋网格类型选用 T3D2,试件有限元模型如图 16 所示。单元网格的划分对模型计算准确性存在重要影响,本模型中对 UHPC 加固层和其接触的桥墩部分进行网格加密处理,经网格尺寸敏感性分析后,确定 UHPC 加固层单元尺寸为 100 mm×100 mm,承台和墩柱单元尺寸为 200 mm×200 mm,墩身纵筋、箍筋,加固区竖向纵筋、水平植筋单元尺寸为 200 mm×200 mm。

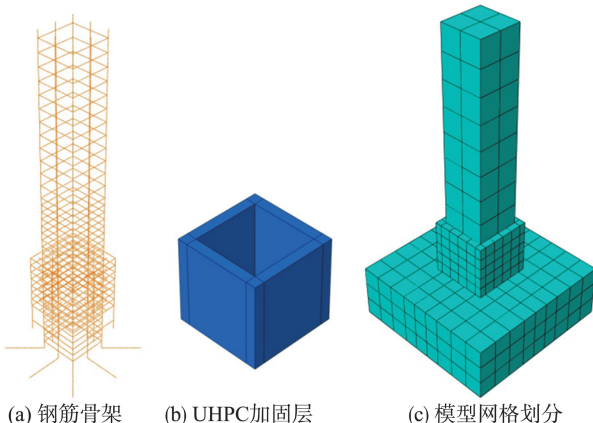


图 16 桥墩有限元模型

Fig.16 Finite element model of the bridge pier

3.2 模型验证

为验证所建立的 UHPC 加固后钢筋混凝土桥墩计算模型的准确性,对其施加与拟静力试验相同的低周循环往复荷载,获得相应的滞回曲线和骨架曲线,并与对应的试验曲线进行对比,如图 17 所示。试验和有限元分析得到的骨架曲线特征点参数如表 6 所示。对比分析各项参数,有限元模拟结果和拟静力试验结果大致吻合,所建立的 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩有限元模型可进行较为准确的模拟。

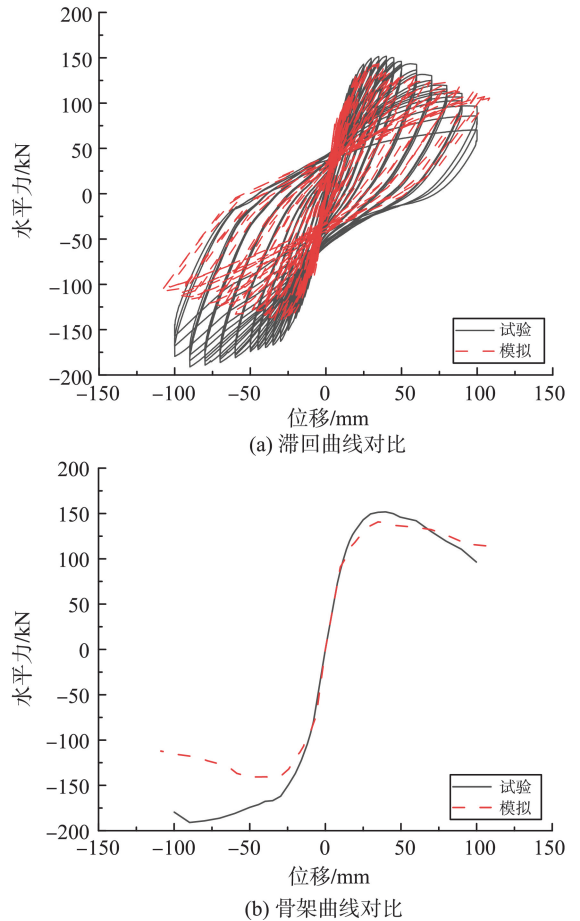


图 17 数值模拟结果对比

Fig.17 Comparison of numerical simulation results

表 6 骨架曲线特征点参数对比

Table 6 Comparison of feature point parameters of skeleton curves

特征点	$\Delta_y /$ mm	$P_y /$ kN	$\Delta_{max} /$ mm	$P_{max} /$ kN	$\Delta_u /$ mm	$P_u /$ kN	延性 系数
试验	19.94	134.95	35.62	148.06	84.22	125.85	4.22
模拟	19.23	130.46	34.83	146.72	85.78	122.61	4.46

4 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩抗震性能参数分析

为进一步研究 UHPC 加固后钢筋混凝土桥墩

墩身设计参数对其抗震性能的影响规律,基于所建立的 S2 试件有限元模型,采用控制变量法对其加固层高度、厚度和墩身配筋参数进行参数分析。对不同工况下的 S2 试件施加往复荷载,得到不同工况下 S2 试件的骨架曲线及特征点参数,总结墩身参数对其抗震性能的影响规律,从而对 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩构造参数进一步优化。

4.1 加固层高度

为研究 UHPC 加固层对桥墩抗震性能的影响,在保证加固层混凝土强度及加固层厚度不变的前提下,将 S2 试件有限元模型内加固层高度由 500 mm 分别减少和增加 100 mm,即加固层高度分别为 400、500 和 600 mm,并对不同加固层高度下的 S2 试件有限元模型施加往复荷载,得到 S2 试件在不同纵筋强度下的骨架曲线,如图 18 所示,骨架曲

线特征点参数如表 7 所示。

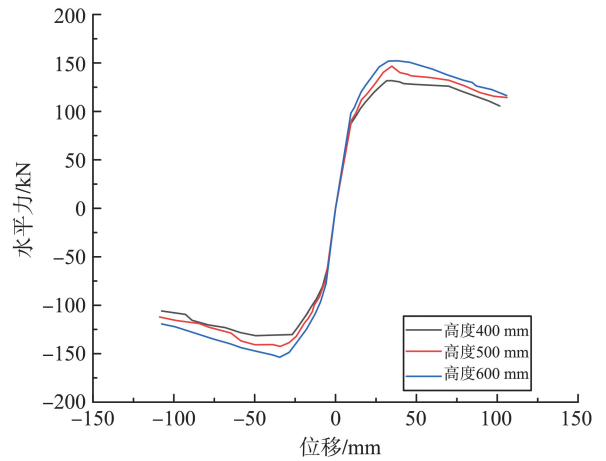


图 18 不同加固层高度试件骨架曲线
Fig.18 Skeleton curves of specimens with different reinforcement layer heights

表 7 不同加固层高度试件骨架曲线特征点参数

加固层高度/mm	Δ_y /mm	P_y /kN	Δ_{max} /mm	P_{max} /kN	Δ_u /mm	P_u /kN	延性系数
400	19.98	109.73	34.60	131.75	84.88	111.99	4.25
500	19.23	130.46	34.83	146.72	85.78	122.61	4.46
600	18.58	127.67	38.39	152.19	92.63	129.36	4.99

根据图 18 和表 7 可知:将 S2 试件加固层高度由 400 mm 增大为 500 mm 和 600 mm,对墩身抵抗初始变形能力和抗弯承载力的提高产生了积极影响。相较于加固层高度 400 mm 的试件,加固层高度 500 mm 和 600 mm 的试件水平承载力峰值分别提高了 11.36% 和 15.51%。随加固层高度的增大,屈服位移逐渐减小,缩短了桥墩墩身弹性阶段,加快墩身进入塑性工作阶段,桥墩塑性工作能力提高,使得总变形中非弹性变形的占比增大,对墩身位移延性的提高起到了促进作用。相较于加固层高度 400 mm 的试件,加固层高度 500 mm 和 600 mm 的试件屈服位移分别减小了 3.75% 和 7%,位移延性系数分别增大了 4.94% 和 17.41%。整体而言,加固层高度的增大对 UHPC 加固后桥墩抗震性能影响显著,较大程度地提高了桥墩抗弯承载力峰值,减小屈服位移使得墩身较早地进入塑性阶段,使得墩身整体位移延性系数有所提高。

4.2 加固层厚度

为研究 UHPC 加固层厚度对桥墩抗震性能的影响,在保证加固层混凝土强度及加固层高度不变

的前提下,将 S2 试件有限元模型内加固层厚度由 60 mm 分别减少和增加 10 mm,即加固层厚度分别为 50、60、70 mm,并对不同加固层厚度下的 S2 试件有限元模型施加往复荷载,得到 S2 试件在不同纵筋强度下的骨架曲线,如图 19 所示,骨架曲线特征点参数如表 8 所示。

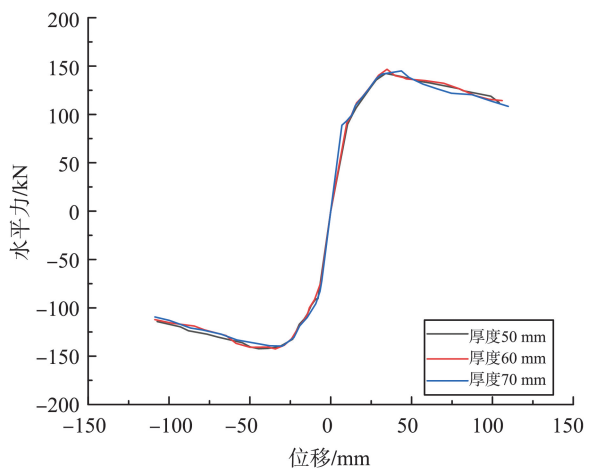


图 19 不同加固层厚度试件骨架曲线
Fig.19 Skeleton curves of specimens with different reinforcing layer thicknesses

表 8 不同加固层厚度试件骨架曲线特征点参数

加固层厚度/mm	Δ_y /mm	P_y /kN	Δ_{max} /mm	P_{max} /kN	Δ_u /mm	P_u /kN	延性系数
50	20.12	119.11	33.99	142.39	82.39	121.03	4.09
60	19.23	120.46	34.83	146.72	85.78	122.61	4.46
70	18.96	129.17	43.70	148.01	91.94	125.81	4.85

根据图 19 和表 8 可知,将 S2 试件加固层厚度由 50 mm 增大为 60 mm 和 70 mm,提高了对墩身的约束作用,不同厚度试件骨架曲线几乎重合,表明加固层厚度的改变对墩身性能影响不大。相较于加固层厚度 50 mm 的试件,加固层厚度 60 mm 和 70 mm 的试件水平承载力峰值分别提高了 3.04% 和 3.95%。屈服位移分别减小了 4.42% 和 5.77%,位移延性系数分别增大了 1.31% 和 3.95%。整体而言,加固层厚度的增大对 UHPC 加固后桥墩抗震性能影响较小,水平抗弯承载力峰值仅有小幅度的增加。加固层厚度为 50 mm 时对墩身的约束作用已达到饱和状态,增加加固层厚度不会使墩身抗震性能发生大幅度改变。

4.3 纵筋等强度代换

基于钢筋等强度代换原则,通过改变纵筋截面面积,使 S2 试件有限元模型内 HRB400E 级纵筋代换为 HRB500E 级纵筋和 HTRB600E 级纵筋,

表 9 钢筋等体积代换试件骨架曲线特征点参数

Table 9 Parameters of the characteristic points of the skeleton curve of the rebar and other volume substitution specimens

纵筋类型	Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_{\max}/mm	P_{\max}/kN	Δ_u/mm	P_u/kN	延性系数
HRB400E	19.23	130.46	34.83	146.72	85.78	122.61	4.46
HRB500E	23.04	131.35	49.16	165.34	91.87	140.54	3.98
HTRB600E	29.25	161.73	49.24	181.97	92.95	154.67	3.18

根据图 20 和表 9 可知,S2 试件墩身纵筋由 HRB400E 级钢筋等强度代换为 HRB500E 级钢筋和 HTRB600E 级钢筋,试件水平抗弯承载力峰值出现明显上升,相较于配置 HRB400E 级纵筋的 S2 试件,配置 HRB500E 级纵筋和 HTRB600E 级纵筋的 S2 试件水平力峰值分别增加了 12.69% 和 24.03%。在低周循环往复荷载作用下,不同强度纵筋桥墩骨架曲线整体发展趋势相近,等强度代换为高强度纵筋后,延缓了墩身整体刚度的退化速率,增强了桥墩的弹性工作能力。相较于配置 HRB400E 级纵筋的 S2 试件,配置 HRB500E 级纵筋和 HTRB600E 级纵筋的试件屈服位移分别增大了 19.21% 和 52.11%,墩身延性系数分别减小了 10.76% 和 28.7%。整体而言,纵筋强度的增大对 UHPC 加固后桥墩抗震性能影响较大,较大程度地增加了桥墩的水平抗弯承载力,但降低了桥墩的位移延性系数,因此在进行桥墩纵筋配筋设计时,需要结合桥墩的各项抗震指标,选择较为合适的纵筋强度。

4.4 纵筋等体积代换

为研究墩身纵筋对桥墩抗震性能的影响,基于

并对不同纵筋强度下的 S2 试件有限元模型施加往复荷载,得到 S2 试件在不同纵筋强度下的骨架曲线,如图 20 所示,骨架曲线特征点参数如表 9 所示。

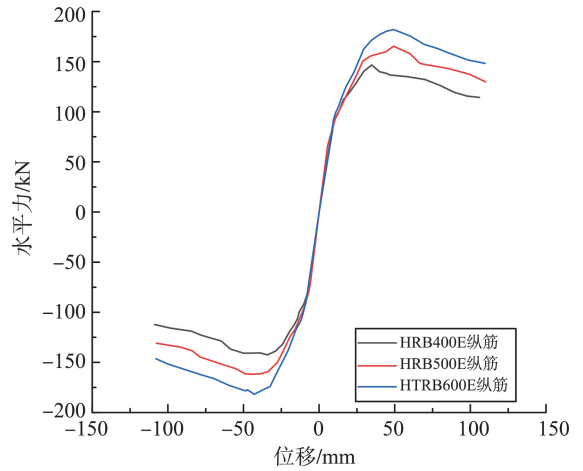


图 20 钢筋等强度代换试件骨架曲线

Fig.20 Skeleton curve of the test piece with equal strength of reinforcement

钢筋等体积代换原则,将 S2 试件有限元模型内 HRB400E 级纵筋代换为 HRB500E 级纵筋和 HTRB600E 级纵筋,并对不同纵筋强度下的 S2 试件有限元模型施加往复荷载,得到 S2 试件在不同纵筋强度下的骨架曲线,如图 21 所示,骨架曲线特征点参数如表 10 所示。

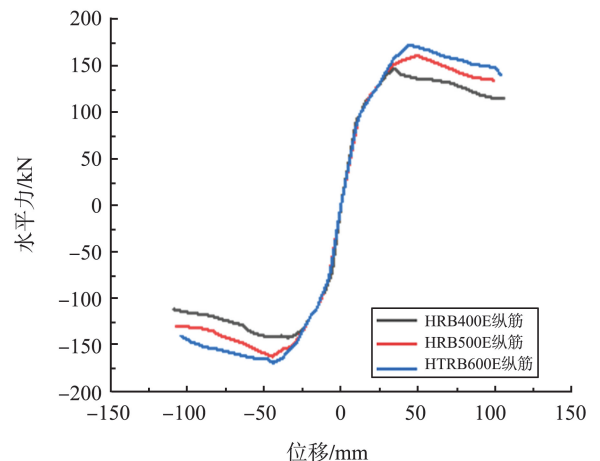


图 21 钢筋等体积代换试件骨架曲线

Fig.21 Skeleton curve of the steel bar equal volume substitution specimen

表 10 钢筋等体积代换试件骨架曲线特征点参数
Table 10 Parameters of the characteristic points of the skeleton curve of the rebar and other volume substitution specimens

纵筋类型	Δ_y/mm	P_y/kN	$\Delta_{\text{max}}/\text{mm}$	P_{max}/kN	Δ_u/mm	P_u/kN	延性系数
HRB400E	19.23	130.46	34.83	146.72	85.78	122.61	4.46
HRB500E	27.13	137.04	49.58	160.75	89.46	136.64	3.29
HTRB600E	32.97	153.94	44.04	172.75	100.52	146.84	3.04

根据图 21 和表 10 可知,不同强度纵筋桥墩骨架曲线整体发展趋势相近,当加载位移小于 30 mm 时,3 条曲线大致重合,表明纵筋强度的改变对桥墩初始刚度影响不大。在低周循环往复荷载作用下,S2 试件墩身纵筋由 HRB400E 级钢筋等体积代换为 HRB500E 级钢筋和 HTRB600E 级钢筋,提高了试件水平抗弯承载力,延缓了墩身屈服,降低了桥墩的塑性变形能力,降低了总变形中非弹性变形的占比,对墩身整体位移延性产生了消极影响。相较于配置 HRB400E 级纵筋的 S2 试件,配置 HRB500E 级纵筋和 HTRB600E 级纵筋的试件水平承载力峰值分别增加了 9.56% 和 17.74,屈服位移分别增大了 41.08% 和 71.45%,墩身延性系数分别减小了 26.23% 和 31.84%。整体而言,纵筋强度的增大对 UHPC 加固后桥墩抗震性能影响较大,较大程度地增加了桥墩的水平抗弯承载力,但降低了桥墩的位移延性系数。

5 结论

基于 UHPC 加固钢筋混凝土桥墩拟静力试验结果,利用有限元软件 ABAQUS 建立了桥墩数值模型,并采用试验结果进行验证,利用桥墩数值模型对墩身设计参数进行参数分析,得到如下结论。

(1) 对墩身底部混凝土损伤严重区域采用 UHPC 混凝土和 HTRB600E 高强钢筋加固可显著增强桥墩水平抗弯承载能力,增大墩身整体刚度,增强桥墩整体耗能水平,延缓墩身进入塑性阶段,减少总变形中塑性变形占比,降低桥墩延性性能但仍可满足抗震要求。证明了在 UHPC 层植入 HTRB600E 高强钢筋的增大截面加固法用于桥墩抗震加固的有效性。桥墩加固改变了桥墩原有的破坏形态,加固前呈现典型弯曲破坏特征,加固后试件剪跨比减小,破坏形态为弯剪破坏。

(2) 通过增加加固层 UHPC 高度,增加了对墩身混凝土的约束作用,减少了墩身塑性损伤,对墩身抵抗初始变形能力和抗弯承载力的提高产生了积极影响。随加固层高度的增大,屈服位移逐渐减

小,加快了墩身进入塑性工作阶段,使得总变形中非弹性变形的占比增大,对墩身位移延性的提高起到了促进作用。相较于增加加固层 UHPC 高度,增加加固层 UHPC 厚度对桥墩墩身影响较小。加固层厚度为 50 mm 时对墩身的约束作用已达到保护状态,继续增加加固层厚度对墩身抗震性能影响不明显。

(3) 将墩身内纵筋等体积、等强度代换为高强度纵筋,在低位移水平下,纵筋强度的改变对桥墩各项参数影响不大。随加载位移的增加,纵筋强度的增大增强了桥墩弹性工作能力,减小了桥墩整体屈速率,增加了桥墩的水平抗弯承载力,降低了桥墩的位移延性系数,在进行桥墩墩身纵筋配筋设计时,需要结合工程实际情况选择较为合适的纵筋强度。相较于纵筋等体积代换,纵筋等强度代换对桥墩水平抗弯承载力的提高更为显著。

参考文献:

- [1] 张望欣. 钢筋混凝土桥墩抗震加固方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
ZHANG Wangxin. Study on seismic strengthening method of reinforced concrete pier[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [2] 王鹏程, 许维炳, 王瑾, 等. 基于 PET 的灌浆套筒-预应力组合连接装配式混凝土桥墩抗震加固研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(3): 139-148.
WANG Pengcheng, XU Weibing, WANG Jin, et al. Study on seismic strengthening method of prefabricated concrete pier with grouting sleeve connection based on PET-AS-EMD[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2022, 44(3): 139-148.
- [3] 赵海松, 魏安辉, 邵江, 等. 浅埋顺层偏压洞口边坡失稳机制及防治研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(3): 253-265.
ZHAO Haisong, WEI Anhui, SHAO Jiang, et al. Study on instability mechanism and prevention of slope instability of shallow buried bedding bias cave opening [J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(3): 253-265.
- [4] FU T, WANG K, ZHU Z X, et al. Seismic performance of prefabricated square hollow section piers strengthened

- by jacketing using UHPC and high-strength steel [J]. Structures, 2023, 47: 449-465.
- [5] KUNWAR B, MCENTEE V, PANTELIDES C P. Seismic repair of deficient and code compliant bridge wall piers[J]. Engineering Structures, 2021, 233: 111595.
- [6] WANG S J, XU W B, WANG J, et al. Experimental research on anti-seismic reinforcement of fabricated concrete pier connected by grouting sleeve based on CFRP and PET materials[J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112838.
- [7] 姚琼, 宋帅, 吴刚, 等. 基于 OpenSees 的桥墩抗震加固方案对比研究[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(5): 46-55.
YAO Qiong, SONG Shuai, WU Gang, et al. Comparative study on the seismic reinforcement schemes of bridge pier based on OpenSees[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(5): 46-55.
- [8] YUAN W T, WANG X T, GUO A X, et al. Cyclic performance of RC bridge piers retrofitted with UHPC jackets: experimental investigation[J]. Engineering Structures, 2022, 259: 114139.
- [9] 施路遥. 基于 UHPC 环箍约束的混凝土桥墩抗震加固研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
SHI Luyao. Study on seismic strengthening of concrete pier based on UHPC hoop constraint [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [10] GUAN D Z, CHEN Z X, LIU J B, et al. Seismic performance of precast concrete columns with prefabricated UHPC jackets in plastic hinge zone [J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112776.
- [11] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48: 53-66.
- [12] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC) [J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 402-411.
- [13] AL-OSTA M A, SHARIF A M, SUHOOTHI A C M, et al. Strengthening of axially and eccentrically compression loaded RC columns with UHPC jacketing system: experimental investigation and finite element modeling [J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112850.
- [14] HUNG C C, CHUEH C Y. Cyclic behavior of UHPFRC flexural members reinforced with high-strength steel rebar [J]. Engineering Structures, 2016, 122: 108-120.
- [15] YUAN W T, WANG X T, GUO A X, et al. Cyclic performance of RC bridge piers retrofitted with UHPC jackets: experimental investigation [J]. Engineering Structures, 2022, 259: 114139.
- [16] 成煜, 谢剑, 于敬海. 二次受力下 UHPC 加固钢筋混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2295-2301.
CHENG Yu, XIE Jian, YU Jinghai. Experimental study on axial compressive behavior of RC columns strengthened by UHPC under secondary load [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2295-2301.
- [17] XIE J, FU Q H, YAN J B. Compressive behaviour of stub concrete column strengthened with ultra-high performance concrete jacket [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 643-658.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [22] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [23] SIDOROFF F. Description of anisotropic damage application to elasticity [M]. Physical Non-Linearities in Structural Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981: 237-244.

(编辑: 宋艳)