

不锈钢筋-FRP 筋混合配筋预制节段桥墩抗震性能研究

陈梦圆¹, 贾俊峰¹, 程寿山², 周述美³, 庞伟⁴

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 旧桥检测与加固交通行业重点实验室(北京), 北京 100088;
3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200112; 4. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730099)

摘要: 为解决沿海环境中钢筋易锈蚀的问题, 结合节段拼装桥墩的快速建造技术, 设计了一种配置 2304 不锈钢筋和 GFRP 筋的混合配筋形式的节段预制拼装桥墩。通过 ABAQUS 有限元软件建立了混合配筋桥墩的数值仿真模型, 分析了其在低周往复荷载作用下的滞回性能, 并通过与试验结果对比验证了有限元模型的正确性。采用该有限元模型进一步探究了 GFRP 筋的无粘结段长度比例、轴压比、剪跨比对节段拼装桥墩抗震性能的影响。数值计算结果表明: 随着 GFRP 筋无粘结段长度减小, 节段拼装桥墩的承载力提高。无粘结段长度越长, GFRP 筋的局部应力越小, 位移延性越好, 但是墩柱的耗能变小。建议 GFRP 筋的无粘结段长度在 40%~80%之间, 以保证桥墩具备良好的抗震性能, 避免 GFRP 筋应力集中发生突然断裂。通过增加轴压比, 试件承载力增幅不明显; 试件剪跨比从 4.5 增大为 9.5, 试件水平承载力降低 63%。为后续后张预应力混合配筋桥墩的抗震性能试验研究奠定基础。

关键词: 预制节段拼装桥墩; GFRP 筋; 不锈钢筋; 无粘结段长度; 抗震性能

中图分类号: TU443.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)03-0368-12

Study on seismic performance of precast segmental pier columns with stainless steel and FRP reinforcements

CHEN Mengyuan¹, JIA Junfeng¹, CHENG Shoushan², ZHOU Shumei³, PANG Wei⁴

(1. Key Laboratory of Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Key Laboratory of Bridge Detection and Reinforcement Technology of the Ministry of Communications (Beijing), Beijing 100088, China;
3. China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200112, China;
4. China Municipal Engineering Northwest design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730099, China)

Abstract: In order to solve the problem that reinforcement is easy to rust in coastal environment, combined with the rapid construction technology of segmental assembled pier, a segmental prefabricated assembled pier with 2304 stainless steel reinforcement and GFRP reinforcement is designed. The numerical simulation model of hybrid reinforced pier is established by ABAQUS finite element software, and its hysteretic performance under low cyclic load is analyzed. The finite element model, the correctness of which is verified by comparing with the test results, is used to further explore the effects of unbonded section length, axial compression ratio and shear span ratio of GFRP reinforcement on the seismic performance of segmental assembled piers. The numerical results show that the bearing capacity of segmental assembled piers increases with the decrease of the length of unbonded GFRP reinforcement. The longer the length of unbonded section, the smaller the local stress of GFRP reinforcement and the better the displacement ductility, but the energy consumption of pier column becomes smaller. It is suggested that the length of unbonded section of GFRP reinforcement should be between 40%~80%, so as to ensure that the pier has good seismic performance and avoid sudden fracture due to stress concentration of GFRP reinforcement. By increasing the axial compression ratio, the increase of the bearing capacity of the specimen is not obvious; the shear

收稿日期: 2022-01-17 修回日期: 2023-05-11

基金项目: 国家国际科技合作专项基金资助(2019YFE0119800), 北京市自然科学基金项目(8202002), 旧桥检测与加固交通行业重点实验室(北京)开放课题基金资助(2020-JQKFKT-7)

第一作者: 陈梦圆(1997—), 女, 硕士生, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: cmy971024@163.com

通信作者: 贾俊峰(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: jiajunfeng@bjut.edu.cn

span ratio of the specimen increases from 4.5 to 9.5, and the horizontal bearing capacity of the specimen decreases by 63%. This study lays a foundation for the subsequent experimental study on the seismic performance of post tensioned prestressed composite reinforced piers.

Key words: precast segmental pier column; GFRP reinforcement; stainless steel reinforcement; length of unbonded section; seismic performance

预制装配式结构因其施工快速、施工质量高、对环境友好等^[1]优点受到国内外学者的广泛关注.按照连接方式,预制桥墩可分为等同现浇桥墩和非等同现浇桥墩^[2].其中合理设计的等同现浇桥墩能够实现与现浇桥墩相同的承载能力、变形能力及耗能能力等抗震性能.波纹管灌浆连接作为等同现浇桥墩的一种连接方式,具有施工速度快、现场湿作业少、施工精度要求较低等优势,广泛应用于桥梁结构中^[3-4].但是这些应用大多集中于低地震区,为了将波纹管连接桥墩应用于中高地震区,仍然需要对该类桥墩的抗震性能进行深入研究.

在沿海环境中,由于氯离子的侵蚀,钢筋混凝土桥墩中钢筋锈蚀问题突出^[5].锈蚀钢筋膨胀后,有效受力面积减小,与混凝土粘结强度降低,协同工作能力下降,从而导致混凝土保护层膨胀脱落,桥墩承载力降低,很难保证混凝土结构的耐久性^[6-7].为改善混凝土结构中钢筋的锈蚀问题,很多学者提出使用纤维增强复合材料筋(FRP筋)代替普通钢筋,有效减少了钢筋的锈蚀.FRP筋具有良好的耐腐蚀能力以及力学性能,被认为可以使用在海洋环境中^[8-9].针对仅配置FRP筋混凝土柱抗震性能已有一些试验研究^[10-11],研究表明,由于FRP筋的本构曲线近似为线弹性,导致仅配置FRP筋的桥墩具有较低的耗能能力和延性性能.因此,王震宇等^[12]提出FRP筋与钢筋混合配筋用来改善构件屈服后刚度,降低构件残余变形.针对FRP筋与钢筋混合配筋,CAI等^[13-14]提出混合配筋节段拼装桥墩(Hybrid Reinforced PSBC, HR-PSBC)的概念,使用FRP筋作为PSBC的自复位筋,同时配置普通钢筋的方式来解决这一问题,并探究了轴压比、水平荷载、FRP筋直径、FRP筋与周围混凝土的粘结状态等因素对墩柱的破坏模式、残余位移、延性等抗震性能的影响.研究表明,采用了HR-PSBC提高了屈服后刚度、自复位能力,承载力比传统PSBC提升43%.王富岭等^[15]对循环荷载下CFRP与混凝土界面的粘结滑移关系进行了研究,研究发现,循环荷载应力水平的增加,界面滑移曲线最大剪应力也随

着增加. IBRAHIM等^[16-17]通过数值仿真和试验方法对FRP筋的粘结参数进行研究,结果表示粘结参数对墩柱的破坏模式、峰值荷载、屈服后刚度以及延性都较大的影响.邓宗才等^[18]、IBRAHIM等^[19]对FRP筋和钢筋混合配筋墩柱中轴压比、体积配箍率、屈服后刚度比等因素进行研究,结果表明,轴压比越小,体积配箍率越大,试件的综合性能越好,抗震性能越好屈服后刚度比对试件刚度、承载能力、耗能均有明显的影响.针对FRP筋和普通钢筋的混合配筋桥墩在一定程度上减小了纵筋的腐蚀,但内部普通钢筋的存在仍然具有被腐蚀的风险.因此, WU等^[20]提出一种将普通钢筋作为内芯,纤维层包裹在普通钢筋外侧的钢-纤维复合筋(Steel-FRP composite bars, SFCB),并对其力学性能进行了研究.研究结果表明,在纤维断裂前SFCB应力-应变曲线为双线性,内部钢筋屈服后,有着稳定的屈服后刚度以及较小的残余变形^[21-22],然而SFCB的制作难度较大,不利于大面积在实际工程中使用.总结上述复材筋与普通配筋混合配筋研究,全FRP筋混凝土结构易发生脆性破坏,且耗能较低,不宜在中高烈度区使用;新材料SFCB制备难度较大且力学性能不够完善;普通钢筋与FRP筋混合配筋,对于普通钢筋仍存在锈蚀问题.因此,提出一种新型混合配筋形式十分有必要.

同时,不锈钢筋也具有较好的耐腐蚀性、抗疲劳性能^[23]且制备方便.沿海环境中也有较广泛的应用.赵勇^[24]在墩柱中配筋采用全不锈钢筋,进行拟静力试验.试验结果表明,使用不锈钢筋的墩柱在耗能能力、位移延性上均比普通墩柱的表现好,减小轴压比和增加纵筋配筋率均对抗震性能有所提高.在不锈钢筋梁中也有相同的结论^[25].然而桥墩中完全使用不锈钢筋代替普通钢筋对设计初期造价较高.另外,由于对配置不锈钢筋的桥墩抗震性能的研究相对较少,限制了其在中高地震区的应用和发展.

为提高中高地震区的沿海桥梁的抗震能力和抗腐蚀能力,提出一种配置2304不锈钢筋(SS筋)

和 GFRP 筋混合配筋形式的节段预制拼装桥墩 (PSBC)。通过墩柱模型的拟静力试验和数值仿真研究桥墩的破坏模式、滞回性能、刚度、耗能等抗震性能,同时验证数值仿真的可行性。进一步采用 ABAQUS 数值仿真方法探究 GFRP 筋的无粘结段长度、试件剪跨比、轴压比对节段拼装桥墩承载力和 GFRP 筋力学性能的影响,本文研究内容可为后张预应力 GFRP 筋的混合配筋节段桥墩的研究奠定基础。

1 不锈钢筋-FRP 筋混合配筋预制节段桥墩结构设计

参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362—2018^[26])规范,依据某钢筋混凝土桥梁单柱式桥墩原型,按照 3:20 的缩尺比例设计制作了 4 个不锈钢筋和 GFRP 筋混合配筋的预制节段拼装桥墩(PSBC)试件,并已开展了缩尺模型的拟静力试验^[27]。每个墩柱均由三个截面尺寸为 267 mm×600 mm,高 675 mm 的节段和基础 (1 400 mm×1 000 mm×450 mm)组成,试件总高为

2 475 mm,加载点至墩底的计算高度为 1 870 mm,沿桥梁纵向剪跨比为 7,桥墩试件的具体尺寸及配筋情况如表 1 和图 1(a)所示。四个试件分别命名为 SS1N1、SG1N1、SG2N1 和 SG2N15。其中:SS1N1 表示纵筋仅配置 $\Phi 20$ S2304 不锈钢筋的试件;SG1N1、SG2N1 及 SG2N15 表示纵筋配置 $\Phi 20$ S2304 不锈钢筋和 $\Phi 20$ GFRP 筋的混合配筋试件。四个试件总配筋率为 1.97%。由于桥梁上部结构荷载为定值,墩顶轴压比一般为 0.05~0.15,因此,选取 SG2N15 试件的轴压比为 0.15,其余三个试件轴压比为 0.1。除通长纵向钢筋不同外,四个试件其余配筋情况相同。每个节段内均配置了直径为 8 mm 的 GFRP 纵筋以及直径 8 mm 的 GFRP 箍筋,上部两个节段箍筋间距为 80 mm,底部节段箍筋间距加密至 50 mm。四个试件中承台和各个节段通过通长纵筋不锈钢筋和 GFRP 筋连接,通长纵筋与混凝土为全粘结。因本文主要以 SS1N1 和 SG2N15 试件为参考,图 1(b)中给出了 SS1N1 和 SG2N15 试件的纵筋配筋情况。

表 1 各个试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of pier models

试件	SS 筋	GFRP 筋	SS 筋配筋率/%	GFRP 筋配筋率/%	SS+GFRP 总配筋率/%	GFRP/SS 配筋率比	箍筋类型	轴压比
SS1N1	10 $\Phi 20$	0	1.97	0	1.97	0	GFRP	0.1
SG1N1	6 $\Phi 20$	4 $\Phi 20$	1.18	0.79	1.97	0.67	GFRP	0.1
SG2N1	4 $\Phi 20$	6 $\Phi 20$	0.79	1.18	1.97	1.5	GFRP	0.1
SG2N15	4 $\Phi 20$	6 $\Phi 20$	0.79	1.18	1.97	1.5	GFRP	0.15

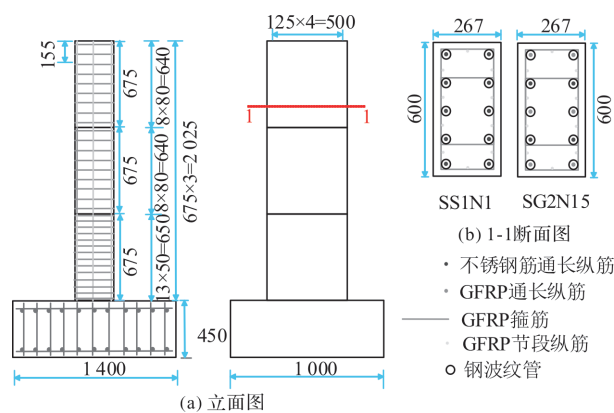


图 1 构件尺寸图(单位:mm)

Fig. 1 Geometric dimensions of the specimen (unit: mm)

该试件采用 C40 商品混凝土,试验测得混凝土立方体标准试块强度 39.3 MPa。20 mm 不锈钢筋和 20 mm GFRP 筋进行材性试验,测得不锈钢

筋名义屈服强度 633 MPa,抗拉强度 806 MPa,拉断伸长率 36.2%;GFRP 筋极限强度 583.2 MPa,伸长率 2.42%,8 mm GFRP 箍筋极限强度 196.8 MPa。

拟静力试验在北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室进行,首先将承台用地锚杆固定在刚性地面;之后通过液压千斤顶对墩顶施加墩顶轴向力 430 kN(轴压比为 0.1)。通过水平助动器对距离墩顶 155 mm 处施加水平往复荷载,侧向力通过位移控制施加,加载方向为纵桥向加载,加载偏移率为 0.125%、0.25%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%、3.5%、4%、4.5%、5%、5.5%,每级循环两次。试件加载布置如图 2,加载制度如图 3。

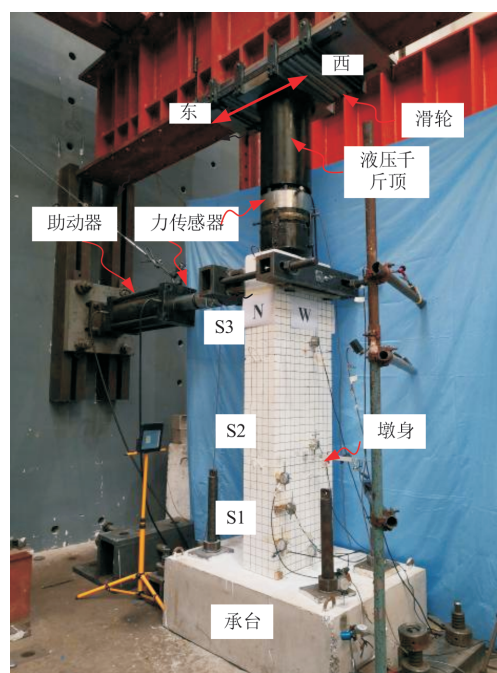


图2 试件加载布置图

Fig. 2 Layout of specimen loading

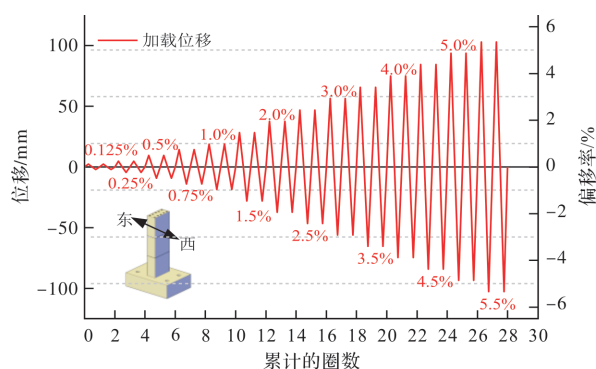


图3 加载制度图

Fig. 3 Loading system diagram

2 不锈钢筋-GFRP 筋混合配筋桥墩拟静力试验

整体上看, 四个试件在偏移率 2% 前主要为横向裂缝, 超过 2% 偏移率后, 出现竖向裂缝, 是典型弯曲破坏模式。图 4 为四个试件的破坏模式和裂缝形态图。试件 SS1N1 在偏移率为 0.5% 时东面出现第一条裂缝, 随后沿着水平向延伸贯通, 并出现微弱的纤维断裂声。偏移率为 1.5% 时, 底部节段 S1 裂缝数量增多且接缝 1 出现明显开口, 大约为 1 mm。偏移率为 2.5% 时, 试件达到峰值承载力 112.88 kN, 底部节段混凝土出现鼓包、起皮现象。加载到偏移率 4.5% 时, 底部节段 S1 有大量混凝土压碎脱落, 脱落高度约为 50 mm, 接缝 1 开口达到 8 mm。试件 SG1N1、SG2N1、SG2N15 破坏趋势与试件 SS1N1 类似, 在偏移率 0.25% 时

东面 S1 节段出现第一条水平裂缝。随着偏移率的增大, 出现较多的水平裂缝且不断延伸贯通。加载到偏移率 2.0% 时, 出现竖向裂缝, 接缝 1 的开口迅速发展。试件 SG1N1 加载到偏移率 2.5% 时, 达到峰值强度 93.27 kN。加载到 4.5% 时, 之前的裂缝不断变宽, 伴随较多纤维断裂声, 底部 S1 节段四角混凝土破坏脱落明显。试件 SG2N1 在偏移率 2.5% 时达到峰值强度 89.9 kN。试件 SG2N15 在偏移率 2.0% 时, 底部节段 S1 出现了混凝土起皮的现象, 并达到峰值承载力 89.23 kN。

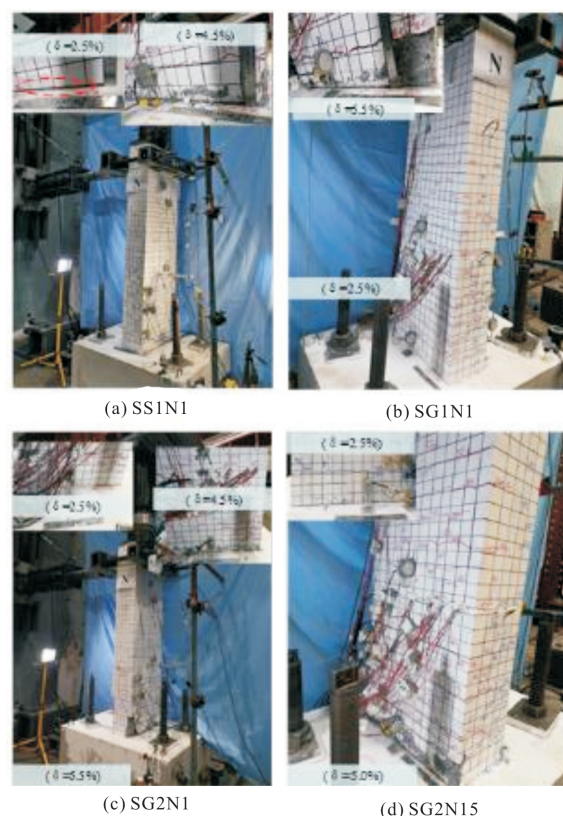


图4 试件破坏图

Fig. 4 Specimen failure diagram

3 混合配筋桥墩有限元模型

3.1 混凝土模型建立

基于上述混合配筋预制节段拼装钢筋混凝土柱试件, 采用有限元软件 ABAQUS 进行建模。在 ABAQUS 中塑性损伤模型主要用于模拟单调、循环以及动态荷载下的钢筋混凝土结构。本文研究是受循环荷载下的钢筋混凝土墩柱, 因此采用塑性损伤模型来模拟墩柱的非弹性行为。单轴拉伸和压缩的应力-应变关系曲线如图 5 所示。混凝土塑性损伤模型中主要参数包括膨胀角、流动势偏移量、双轴受压与单轴受压极限强度比、不变量应力比和粘滞系数, 这些参数依次为 30°、0.1、

1.16、0.667、0.005^[28]。墩柱中所有的混凝土构件,包括节段和基础,均采用减缩积分单元(C3D8R)建模。

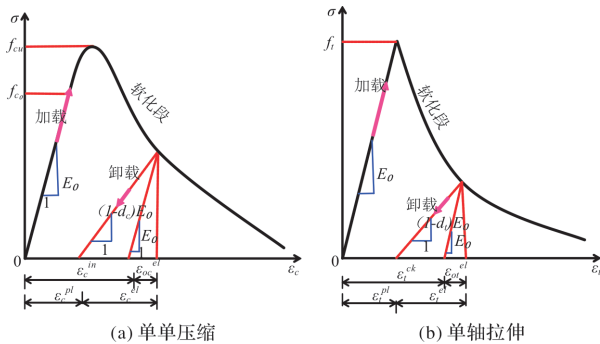


图5 混凝土本构图

Fig. 5 Concrete stress-strain model

3.2 GFRP 筋和不锈钢筋模型建立

通长纵筋、混凝土节段内的纵筋及箍筋采用桁架单元模拟。GFRP 筋在加载过程中不发生断裂,采用线弹性模型。根据不锈钢筋材性试验结果,不锈钢筋属于“无屈服平台”的钢筋,采用了双折线模型。GFRP 筋本构和钢筋本构模型如图 6 (a), (b) 所示。

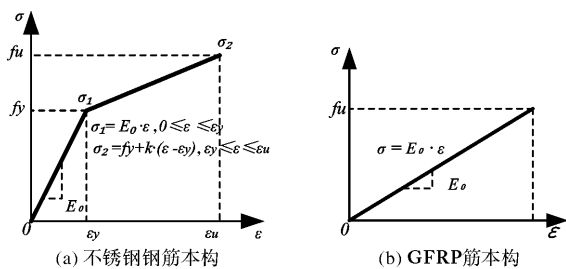


图6 不锈钢筋和 GFRP 筋本构图

Fig. 6 Stainless steel reinforcement and GFRP reinforcement model

3.3 边界条件和相互作用

考虑到实际工程中,节段与节段、节段与承台之间会使用砂浆垫层或环氧树脂来增强节段间的粘结力,因此,在数值模拟中,节段和节段、节段与承台之间采用“面与面相互接触”单元模拟,其中,法向模拟采用硬接触,切向采用罚摩擦,摩擦系数为 0.5^[29]。墩底采用固结。本文主要研究节段拼装桥墩的整体响应,不锈钢筋、GFRP 筋与混凝土间的粘结滑移对结果整体影响不大,因此忽略不锈钢筋、GFRP 筋与混凝土间的粘结滑移。节段与节段内 GFRP 筋骨架之间采用“内置”方式模拟。通长不锈钢筋、GFRP 筋与墩柱整体采用“内置”方式模拟。参数分析中 GFRP 筋有粘结段设置为“内置”到混凝土中,其余无粘结部分不作处理。SG2N15 桥墩参数分析具体有限元分析模型图如图 7。

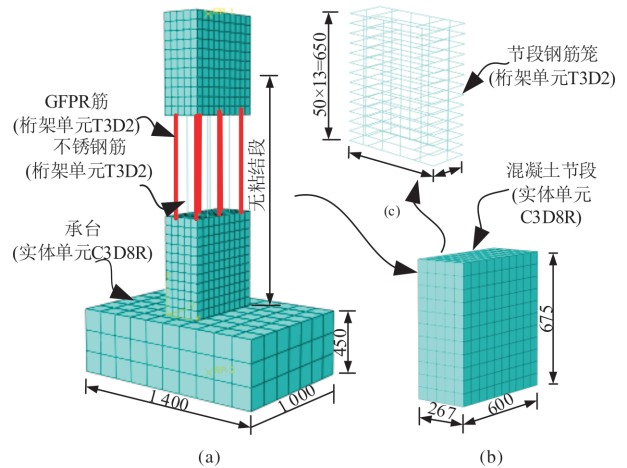


图7 SG2N15 有限元分析模型图(单位: mm)

Fig. 7 Analysis model of SG2N15(Unit: mm)

4 数值模型验证

4.1 混凝土损伤

为了验证有限元模型的准确性,选择 SS1N1 与试验结果损伤情况进行对比。图 8 为 SS1N1 试件在循环荷载下混凝土破坏趋势图。当试件向西加载时,东侧不锈钢筋钢筋受拉,西侧不锈钢筋、混凝土受压。随着试件偏移率增大,试件中不锈钢筋逐渐达到屈服状态,混凝土达到极限压应变,角部混凝土损伤逐渐加重,损伤逐渐由底部节段角部向第二节段 S2 和底部南北侧混凝土延伸。

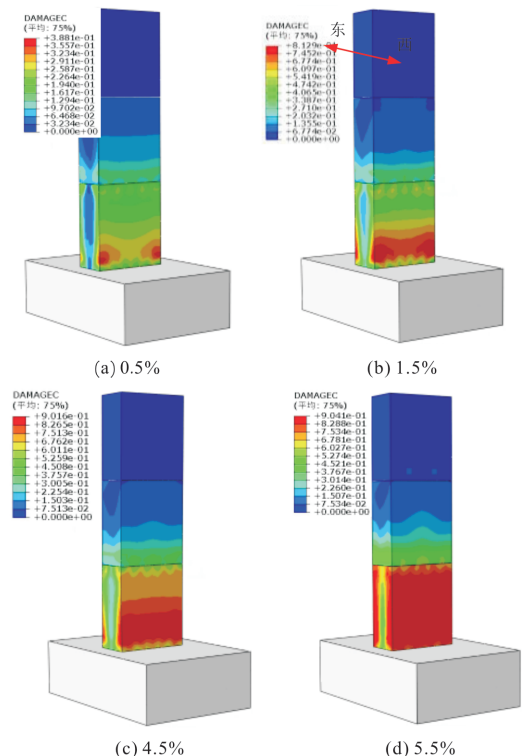


图8 混凝土损伤变化趋势图

Fig. 8 Change trend of concrete damage

从图9为试验混凝土损伤和模拟损伤对比图,可以看出,当桥墩偏移率为4.5%时,柱底塑性铰区混凝土出现明显的裂缝和混凝土剥落现象。同样,从数值模拟结果也可以看到相同的破坏模式,因此从宏观上验证了数值模型的正确性。

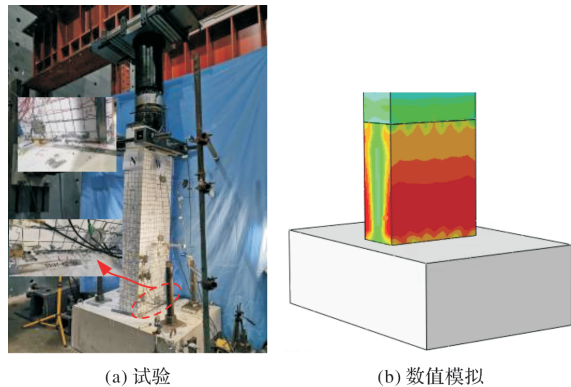


图9 混凝土损伤对比图(偏移率4.5%)

Fig. 9 Comparison diagram of concrete damage
(4.5% drift rate)

4.2 滞回曲线和骨架曲线

为进一步验证数值模拟结果的正确性,将SS1N1和SG2N15试件的滞回曲线和骨架曲线的数值模拟结果与试验结果进行对比,如图10所示。从图10(a)、(c)试件SS1N1和SG2N15滞回曲线中看出,模拟和试验得到的滞回曲线均较为饱满,两者曲线较为吻合。从图10(b)、(d)所示试件SS1N1和SG2N15骨架曲线可以看到,随着加载偏移率的增加,墩柱侧向承载力增加,到达2.0%和2.5%时,试件SG2N15和SS1N1分别达到峰值承载力,表明两者骨架曲线吻合较好。表2为两个试件承载力和残余位移的试验结果和数值模拟结果对比。从表2中可以看出,试件SS1N1正向加载时,模拟结果和试验结果的最大侧向力分别为115.62 kN和112.88 kN,偏差为2.4%。负向加载时存在一定偏差,主要原因可能是试验加载过程中上部轴压不可避免的出现一定的偏心所致,导致试验所得的滞回曲线正负向最大侧向承载力不对称(正负向分别为112.88 kN和105.1 kN),而数值模拟中可以避免这一情况,因此导致负向加载时两者偏差较大。另外,从残余位移上看,试验和模拟得到的正向残余位移分别是73.5 mm和75.29 mm,偏差为2.3%,两者基本吻合,而负向残余位移存在一定差距,原因与负向承载力偏差较大相同。试件SG2N15在正向加载过程中,试验和模拟结果所得正向最大侧向力分别为87.20 kN和88.76 kN,偏差为1.8%,负向最大侧向力

分别为85.85 kN和89.07 kN,偏差为3.6%。

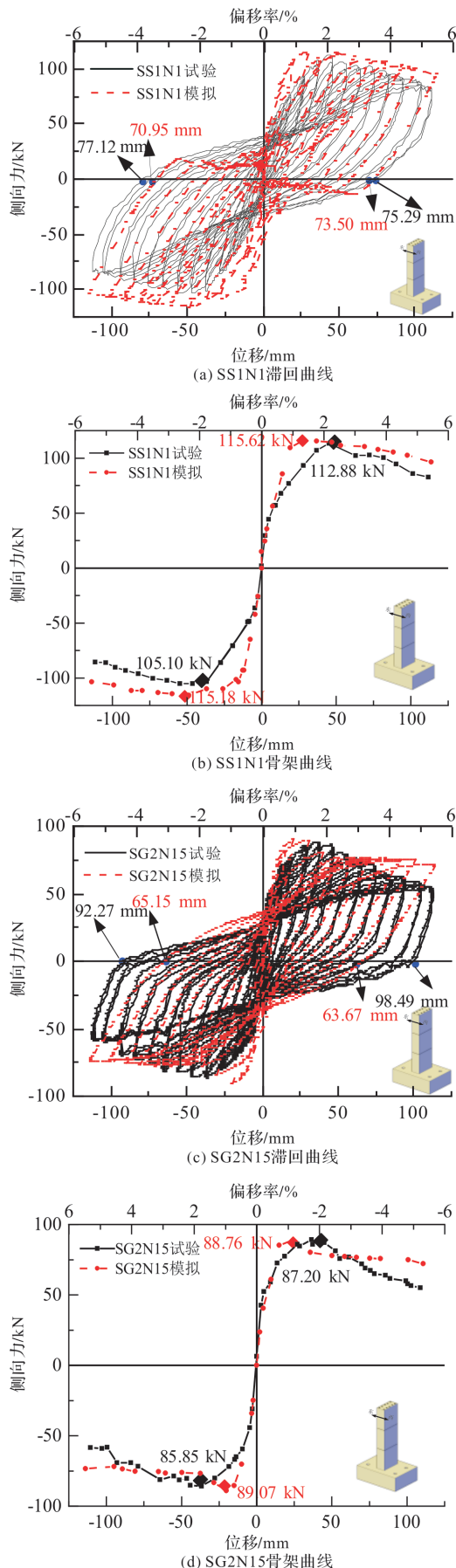


图10 SS1N1和SG2N15滞回曲线与骨架曲线

Fig. 10 Hysteretic curve and skeleton curve of SS1N1 and SG2N15

表2 试验与数值模拟结果对比

Tab. 2 Comparison of test and numerical simulation results

试件编号			承载力/kN	残余位移/mm
SS1N1	数值	正	115.62	73.50
		负	115.18	70.95
	试验	正	112.88	75.29
		负	105.10	77.12
SG2N15	数值	正	88.76	63.67
		负	85.35	65.15
	试验	正	87.20	98.49
		负	89.07	92.27

从上述分析中,可以看出有限元模拟得到的滞回曲线、骨架曲线和墩柱破坏趋势与试验结果吻合较好,基本可以说明有限元模型的正确性。在加载初期,两者加载刚度基本吻合;随着加载偏移率的增加,出现了一定的偏离,主要原因在于不锈钢筋为“无明显屈服点”钢筋,数值模拟中采用本构为双线性本构,与实际不锈钢筋本构存在一定差异。因此,试验与模拟加载刚度有一定

的差异性。总体上看,数值模拟与试验结果吻合的较好。这说明采用有限元软件建立的模型可以对节段拼装桥墩的侧向承载能力以及变形能力较为准确的预测。

5 混合配筋桥墩参数分析

为研究 GFRP 筋无粘结段长度、剪跨比、轴压比对抗震性能的影响,采用上述验证的有限元建模方法,建立不同 GFRP 筋粘结长度、剪跨比和轴压比的有限元模型进行研究。以 SG2N15 试件为基础,分别建立不同无粘结段长度(0%、42%、84%、100%)、轴压比(0.05、0.10、0.15、0.2)、剪跨比(4.5、7、9.5)的有限元模型,其中 SG2N15-S7-42 工况表示轴压比为 0.15,剪跨比为 7,墩底接缝以上 42% 计算高度内为无粘结段,其余几种工况依此类推。桥墩设计参数如表 3 所示,截面尺寸如表 1 所示。对上述 9 种工况进行低周往复加载,加载制度与试验加载制度相同,分析不同参数对桥墩抗震性能的影响。

表3 桥墩模型设计参数

Tab. 3 Design parameters of pier models

编号	试件名称	计算高度/mm	SS 筋配筋率/%	GFRP 筋配筋率/%	SS+GFRP 总配筋率/%	轴压比	无粘结段长度/mm	剪跨比
1	SG2N15-S7.5-0	1 870	0.79	1.18	1.97	0.15	0	7
2	SG2N15-S7.5-42	1 870	0.79	1.18	1.97	0.15	773	7
3	SG2N15-S7.5-84	1 870	0.79	1.18	1.97	0.15	1 575	7
4	SG2N15-S7.5-100	1 870	0.79	1.18	1.97	0.15	1 870	7
5	SG2N15-S5-0	1 195	0.79	1.18	1.97	0.15	0	4.5
6	SG2N15-S10-0	2 545	0.79	1.18	1.97	0.15	0	9.5
7	SG2N05-S7.5-0	1 870	0.79	1.18	1.97	0.05	0	7
8	SG2N10-S7.5-0	1 870	0.79	1.18	1.97	0.10	0	7
9	SG2N20-S7.5-0	1 870	0.79	1.18	1.97	0.20	0	7

5.1 GFRP 筋无粘结段长度

5.1.1 滞回曲线

如表 3 中 1、2、3、4 四种工况的滞回曲线如图 11,根据滞回曲线来判断墩柱的破坏模式以及耗能能力、残余位移等抗震性能。结果显示,整体上看,在加载初期,试件均处于弹性阶段,随着加载位移的增大,出现混凝土发生破坏等现象。从图 11(a)中可以看出,当 GFRP 筋完全粘结时,

滞回曲线较为饱满,耗能能力较强。随着无粘结段长度的增加,如图 11(b)、(c)、(d),滞回曲线发生捏拢现象,说明墩柱的耗能能力有所减小。另外,随着无粘结段长度的增加,墩柱的侧向承载力降低,说明无粘结长度对侧向承载力有一定影响。从试件残余位移上看,四种工况的正负向残余位移相似,集中在 69~76 mm 之间,说明仅改变无粘结段长度对墩柱的残余位移基本没有影响。

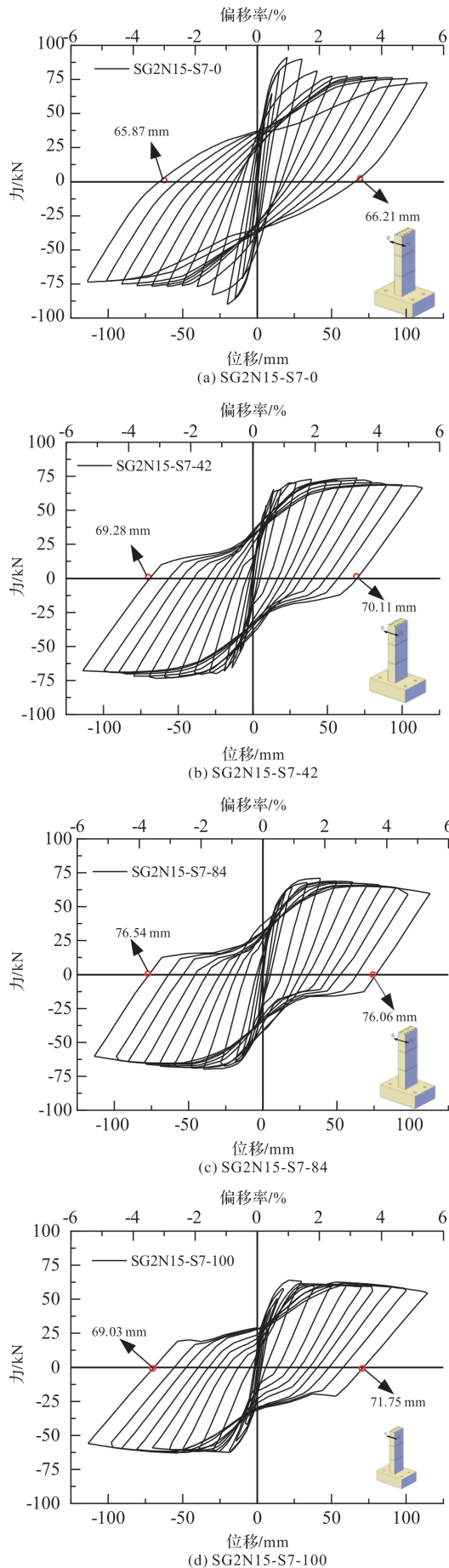


图 11 四种工况滞回曲线

Fig. 11 Hysteretic curves under four working conditions

5.1.2 骨架曲线

如表 3 中 1、2、3、4 四个工况的滞回曲线中每级加载的最大值点连线获得的骨架曲线如图 12 所示。整体上看, 加载初期, 试件处于弹性阶段, 初始刚度大体相同, 随着加载位移的增大, 试件屈服后刚度出现了不同程度的退化。其中, SG2N15-100 的屈服后刚度退化明显, SG2N15-84、SG2N15-42、SG2N15-0 刚度退化依次递减。说明无粘结段长度对桥墩的屈服后有一定影响。加载到最大侧向承载力后, 试件刚度开始下降, 随着无粘结段长度的增加试件的退化刚度逐渐平缓, 表明增大无粘结段长度增加有助于降低桥墩的退化刚度。从承载力上看, SG2N15-100、SG2N15-84、SG2N15-42、SG2N15-0 工况正向加载时的峰值承载力分别为 64.42 kN、71.41 kN、73.99 kN、93.89 kN, 说明随着 GFRP 筋无粘结段长度的减少, 试件的承载力均有不同程度的提高, SG2N15-0、SG2N15-42 和 SG2N15-84 的承载力相对于 SG2N15-100 承载力提高了 46%、15% 和 11%。

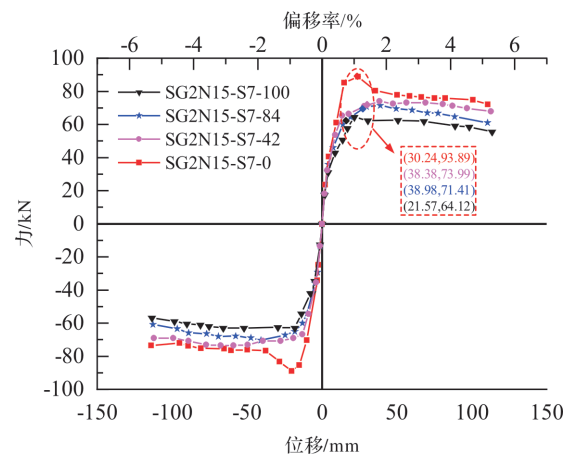


图 12 骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curve

5.1.3 纵筋局部应力

图 13 为表 3 中 1、2、3、4 四种工况在加载偏移率为 5.5% 时通长 GFRP 筋的应力分布情况。从图中可以看出, 当加载到最大偏移率 5.5% 时, 0%、42%、84%、100% 无粘结段的钢筋局部应力最大分别为 496.5 MPa、385.5 MPa、268.7 MPa、209.3 MPa。相比 SG2N15-100 工况, 工况 SG2N15-84、SG2N15-42、SG2N15-0 局部应力分别增加了 28%、84%、137%, 说明当无粘结段长度减小时, 钢筋局部应力增大。当钢筋局部应力较大时, 试件虽然可以得到较大的承载力, 但也

会增加局部混凝土的应力,加速混凝土的损伤.而无粘结段的设置可以将钢筋的局部应力平均分

散在整个无粘结段,有效减小了局部混凝土的破坏.这与文献[30]得到的结论一致.

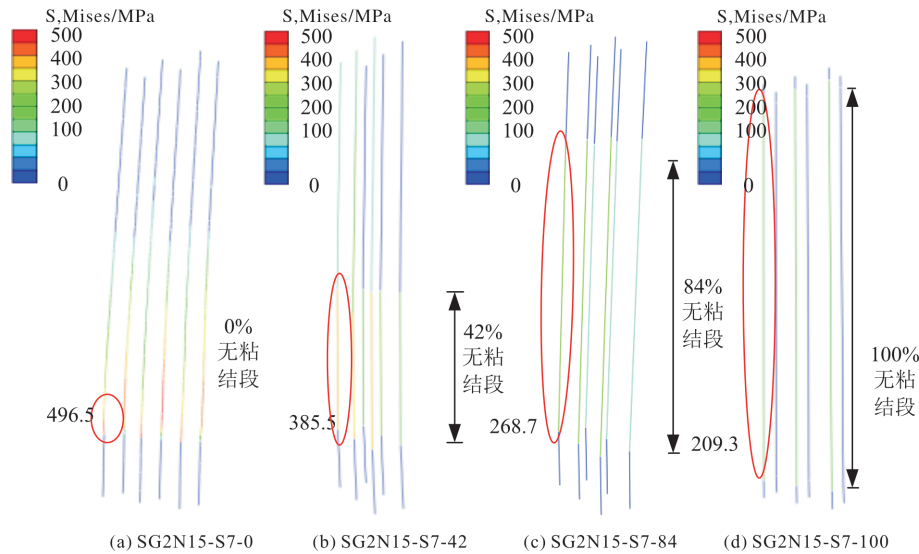


图 13 GFRP 筋布局应力图

Fig. 13 GFRP reinforcement layout stress diagram

5.2 轴压比的影响

5.2.1 滞回曲线

表 3 中 1、7、8、9 四种工况下的滞回曲线如图 14, 根据滞回曲线来判断墩柱的破坏模式以及耗能能力、残余位移等抗震性能.

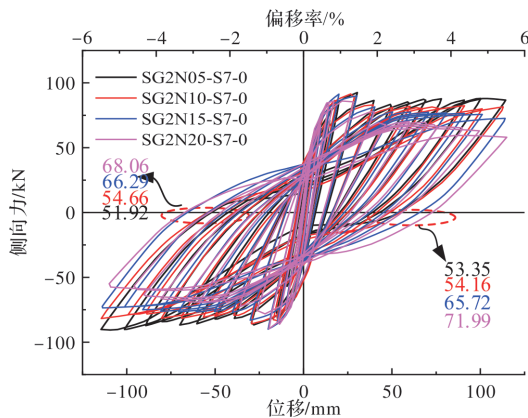


图 14 四种工况滞回曲线

Fig. 14 Hysteretic curves under four working conditions

加载初期,试件处于弹性段,滞回曲线呈现狭长形,卸载后的残余位移较小,随着偏移率的增大,出现了不锈钢筋屈服,混凝土出现开裂等现象,混凝土开裂后,试件的耗能增加.四种工况的滞回曲线均较饱满,耗能能力较强.试件加载到偏移率为 5.5% 时,随着试件的轴压比从 0.05 增加到 0.20,正向残余位移从 53.35 mm 增加到 71.99 mm,增加了 35%,说明增加试件轴压比,加速混凝土塑性铰区的损伤以及位移延性的退化,导致卸载时残余位移增加.此外,随着轴压比的

增大,四种工况下试件的峰值承载力相似,这说明仅通过改变重力轴压比对试件的峰值承载力影响并不明显.

5.2.2 Pushover 曲线

图 15 为轴压比为下墩柱的荷载位移曲线,可以发现,轴压比对荷载-位移曲线影响并不明显.整体上看,试件加载初期处于弹性段,随着轴压比的增大,弹性刚度、承载力基本也呈现增加的趋势.

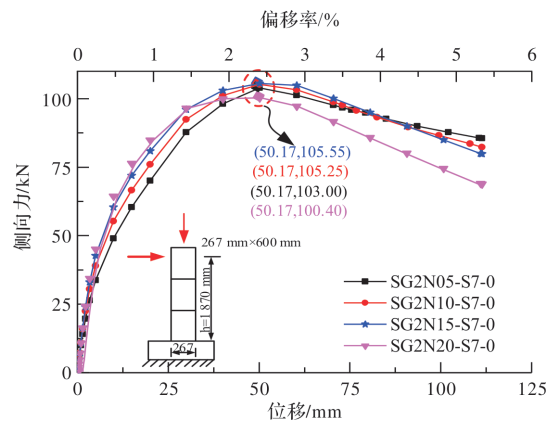


图 15 Pushover 曲线

Fig. 15 Pushover curves

5.3 剪跨比的影响

5.3.1 滞回曲线

表 3 中 1、5、6 三种不同剪跨比情况的滞回曲线如图 16, 剪跨比对节段拼装桥墩的滞回响应较为明显,从滞回曲线来看,三种剪跨比下,试件破坏形式均为弯曲破坏,SG2N15-S4.5-0 试件

滞回曲线较为饱满,耗能能力较强,当偏移率加载到 5.5% 时,随着试件剪跨比从 4.5 增加到 9.5,试件抗侧承载力大幅下降,曲线由相对饱满逐渐变为扁平,残余位移从 47.56 mm 增加至 72.69 mm,增加了 53%,说明滞回曲线卸载刚度逐渐变小。

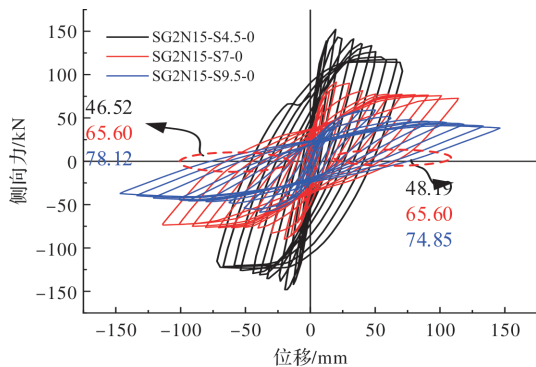


图 16 滞回曲线

Fig. 16 Hysteretic curves conditions

5.3.2 骨架曲线

表 3 中 1、5、6 三种工况下的骨架曲线如图 17 所示。整体上看,加载初期,试件处于弹性阶段,SG2N15-S4.5-0 的刚度最大,SG2N15-S7-0、SG2N15-S9.5-0 刚度一次递减,随着加载位移的增大,试件在屈服后出现了不同程度的退化,同弹性段的规律相似。加载到最大侧向承载力后,试件刚度开始下降,剪跨比越小的试件刚度退化的越快。从承载力上来看,SG2N15-S4.5-0、SG2N15-S7-0、SG2N15-S9.5-0 正向承载力分别为 152.15 kN、91.33 kN、59.31 kN,随着剪跨比的增加,试件的承载能力有不同程度的减小,剪跨比大,桥墩更柔,SG2N15-S7-0、SG2N15-S9.5-0 相比 SG2N15-S4.5-0 承载力分别降低了 40%、61%。

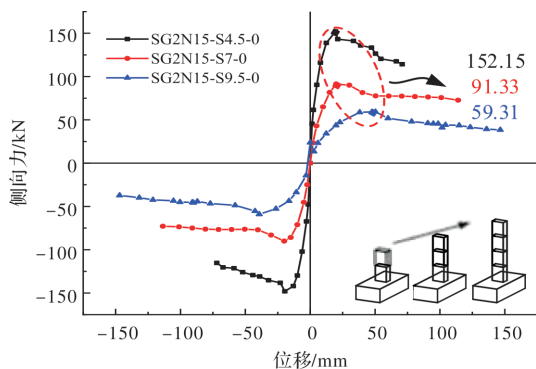


图 17 骨架曲线

Fig. 17 Skeleton curves

6 结论

为解决沿海环境中钢筋易受到环境腐蚀的问题,结合装配式结构的快速建造技术,本文设计了一种配置 2304 不锈钢筋和 GFRP 筋的混合配筋形式的节段预制拼装桥墩。采用 ABAQUS 有限元软件建立有限元模型,并验证了建模的可行性,并探究了不同无粘结段长度、轴压比、剪跨比对混合配筋节段拼装桥墩的影响。通过有限元数值建模分析,从滞回曲线、骨架曲线、位移延性、累计滞回耗能、钢筋的局部应力以及混凝土的局部应变等方面考虑其抗震性能,得到以下结论:

(1)本文建立的有限元模型在破坏形态与试验结果较为吻合,有限元得到的试件滞回曲线、骨架曲线与试验曲线较好吻合,验证了本文采用的有限元建模方法基本可行;

(2)随着 GFRP 筋无粘结段长度减小,节段拼装桥墩的侧向承载力提高,建议 GFRP 筋的无粘结段长度在 40%~80%之间,以保证桥墩具备良好的抗震性能,避免 GFRP 筋应力集中发生突然断裂;

(3)随着试件轴压比的增加,试件的初始刚度、峰值后刚度有所增加,承载能力增幅并不明显。试件剪跨比从 4.5 增大到 9.5,试件的初始刚度减小,水平承载力降低 63%,耗能减小,峰值位移角减小,残余位移增加,剪跨比不宜过大。

参考文献 References

- [1] 邵旭东,邱明红. 基于 UHPC 材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(2):160-167.
SHAO Xudong, QIU Minghong. Research of high performance fabricated bridge structures based on UH-PC[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition). 2019,51(2):160-167.
- [2] 王景全,王震,高玉峰,等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展:新材料、新理念、新应用[J]. 工程力学,2019,36(3):1-23.
WANG Jingquan, WANG Zhen, GAO Yufeng, et al. Review on aseismic behavior of precast piers new material, new concept and new application[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 1-23.
- [3] BRENES F J. Anchorage of grouted vertical duct connections for precast bent caps[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2005.

- [4] KHALEGHI B, SCHULTZ E, SEGUIRANT S, et al. Accelerated bridge construction in Washington State: From research to practice[J]. PCI Journal, 2012, 57(4): 34-49.
- [5] 童申家,黄勇,李红涛,等. 除冰盐环境下在役 RC 桥墩时效地震易损性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3):315-320.
- TONG Shenjia, HUANG Yong, LI Hongtao, et al. Study on aging seismic vulnerability of in-service RC bridge piers in deicing salt environment[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(3):315-320.
- [6] CAPRILI S, SALVATORE W. Cyclic behavior of uncorroded and corroded steel reinforcing bars[J]. Construction and Building Materials, 2015, 76: 168-86.
- [7] JIA Junfeng, ZHAO Lingyun, WU Suiwen, et al. Experimental investigation on the seismic performance of low-level corroded and retrofitted reinforced concrete bridge columns with CFRP fabric [J]. Engineering Structures, 2020, 209: 110225.
- [8] MOHAMED H M, AFIFI M Z, BENMOKRANE B. Performance evaluation of concrete columns reinforced longitudinally with FRP bars and confined with FRP hoops and spirals under axial load [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(7): 04014020.
- [9] ABDELAZIM W, MOHAMED H M, BENMOKRANE B, et al. Strength of bridge high-strength concrete slender compression members reinforced with GFRP bars and spirals: Experiments and Second-Order analysis [J]. Journal of Bridge Engineering. 2020, 25 (9): 04020066.
- [10] 邓宗才,高磊,王献云. GFRP 筋混凝土柱抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 53-61.
- DENG Zongcai, GAO Lei, WANG Xianyun. Experiment on seismic performance of concrete columns reinforced with GFRP bars[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 53-61.
- [11] 江世永,余晗健,姚未来,等. 全 CFRP 筋混凝土柱低周反复荷载试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43 (3): 99-104.
- JIANG Shiyong, YU Hanjian, YAO Weilai, et al. Experimental study on concrete columns reinforced with CFRP bars under low cyclical loading [J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(3): 99-104.
- [12] 王震宇,王旭阳,蔡忠奎. 复材筋与钢筋混合配筋混凝土柱的抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(5): 1-6,101.
- WANG Zhenyu, WANG Xuyang, CAI Zhongkui. Seismic performance analysis of columns reinforced by steel and composite reinforcements[J]. Industrial Construction, 2016, 46(5): 1-6,101.
- [13] CAI Zhongkui, WANG Zhenyu, YANG T Y. Cyclic load tests on precast segmental bridge columns with both steel and basalt FRP reinforcement[J]. Journal of Composites for Construction, 2019, 23(3): 04019014.
- [14] CAI Zhongkui, WANG Zhenyu, YANG T Y. Experimental testing and modeling of precast segmental bridge columns with hybrid normal-and high-strength steel rebars[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 945-955.
- [15] 王富岭,王玉田,姜福香,等. 循环荷载作用下 CFRP-混凝土界面粘结-滑移关系研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(2): 223-228,253.
- WANG Fuling, WANG Yutian, JIANG Fuxiang, et al. Study on the bond-slip relationship of CFRP-concrete interface under cyclic loading[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53 (2): 223-228,253.
- [16] IBRAHIM A M A, MAHMY M F M, WU Zhishen. 3D finite element modeling of bond-controlled behavior of steel and basalt FRP-reinforced concrete square bridge columns under lateral loading [J]. Composite Structures, 2016, 143: 33-52
- [17] IBRAHIM A M A, WU Zhishen, FAHMY M F M, et al. Experimental study on cyclic response of concrete bridge columns reinforced by steel and basalt FRP reinforcements [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(3): 04015062.
- [18] 邓宗才,高磊,王献云. 配置 GFRP 筋的混凝土矩形截面柱抗震试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(5): 1065-1076.
- DENG Zongcai, GAO Lei, WANG Xianyun. Experiments on seismic behavior of rectangular glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete columns [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27 (5): 1065-1076.
- [19] IBRAHIM A I, WU Gang, SUN Zeyang. Experimental study of cyclic behavior of concrete bridge columns reinforced by steel basalt-fiber composite bars and hybrid stirrups[J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(2): 4016091.
- [20] WU Gang, WU Zhishen, LUO Yunbiao, et al. Mechanical properties of steel-FRP composite bar under uniaxial and cyclic tensile loads[J]. Journal of Materi-

- als in Civil Engineering, 2010, 22(10): 1056-1066
- [21] WU Gang, SUN Zeyang, WU Zhishen, et al. Mechanical properties of steel-FRP composite bars (SF-CBs) and performance of SFCB reinforced concrete structures[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(4): 625-635
- [22] SUN Zeyang, WU Gang, WU Zhishen, et al. Nonlinear behavior and simulation of concrete columns reinforced by steel-FRP composite bars[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(2): 220-234.
- [23] 张颖. 不锈钢钢筋混凝土板疲劳性能试验研究[D]. 广州:广东工业大学, 2014.
- ZHANG Ying. Experiment research on the fatigue behavior of stainless steel reinforced concrete slabs[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [24] 赵勇, 张琛, 王晓锋. 配置高延性不锈钢钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 803-810.
- ZHAO Yong, ZHANG Chen, WANG Xiaofeng. Experimental research on seismic behaviors of concrete columns with high-ductility stainless steel reinforcements[J]. Journal of Tongji University(Natural Science) 2020, 48(6): 803-810.
- [25] 张国学, 赵峰, 张志浩等. 不锈钢钢筋混凝土梁抗震性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 35-40.
- ZHANG Guoxue, ZHAO Feng, ZHANG Zhihao, et al. Experimental study on the seismic performance of the stainless steel reinforced concrete beams[J]. China Railway Science, 2010, 31(5): 35-40.
- [26] 中交公路规划院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- CCCC HIGHWAY CONSULTANTS CO., LTD. Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: People's Communications Publishing House Co., Ltd, 2018.
- [27] 刘月丹. 混合配筋预制节段拼装桥墩抗震性能拟静力试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- LIU Yuedan. Experimental study on seismic behavior of prefabricated segmental composite pier with mixed reinforcement[D]. Beijing: Beijing University of technology, 2019.
- [28] LI Chao, BI Kaiming, HAO Hong. Seismic performances of precast segmental column under bidirectional earthquake motions: Shake table test and numerical evaluation[J]. Engineering Structures, 2019, 187(15): 314-328.
- [29] OU Yuchen, CHIEWANICHAKORN M, AREF A J, et al. Seismic performance of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1636-1647.
- [30] LI Chao, HAO Hong, BI Kaiming. Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete columns under cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2017, 148(1): 373-386.

(编辑 吴海西 沈 波)