

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.031



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



“套筒-预应力筋”混合连接三节段预制拼装桥墩的抗震性能

李卫¹, 易博², 宋书一³, 吴桐⁴, 唐海涛², 赵宁雨²

(1. 重庆巨能建设集团路桥工程有限公司, 重庆 401329; 2. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074;
3. 重庆高速巨能建设集团有限公司, 重庆 401120; 4. 重庆市设计院有限公司, 重庆 400015)

摘要:装配式桥墩凭借施工高效、绿色环保的优势在工程中得到广泛应用,但山区复杂的地形与受限的施工空间严重制约了大节段预制桥墩的运输与吊装。为解决该问题,提出采用“套筒-预应力筋”混合连接的三节段预制拼装桥墩(PSC-GSPT),依托重庆北环立交改造工程,设计制作缩尺比为1:5的桥墩试件,通过拟静力试验对比研究该拼装桥墩与现浇桥墩(CIP)的抗震性能,而后通过数值模拟分析预应力参数对拼装桥墩的抗震性能影响。研究表明,相较于CIP,由于引入了无黏结预应力筋,PSC-GSPT的峰值荷载与极限位移分别提升了28.6%和41.3%,位移延性系数提高了20.7%;虽然其等效粘滞阻尼比略低,但累计耗能增加了27%,且残余位移显著减小,展现出良好的震后可恢复性。参数分析结果表明,为了避免预应力筋过早屈服并确保结构延性,预应力筋应优先采用中心布置方式,且初始预应力度应控制在30%~50%。研究证实,PSC-GSPT具有优越的综合抗震性能,能够满足抗震设防区对装配式桥墩的受力性能要求,具有良好的工程应用价值。

关键词: 预制拼装桥墩; 灌浆套筒; 预应力筋; 混合连接; 抗震性能

中图分类号: U442.55; U443.22 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Seismic performance of three-segment precast bridge piers with grouted sleeve-prestressed tendon connections

LI Wei¹, YI Bo², SONG Shuyi³, WU Tong⁴, TANG Haitao², ZHAO Ningyu²

(1. Chongqing Juneng Construction Group Highway & Bridge Engineering Co., Ltd., Chongqing 401329, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 3. Chongqing Expressway Juneng Construction Group Co., Ltd., Chongqing 401120, P. R. China; 4. Chongqing Architectural Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400015, P. R. China)

收稿日期: 2026-01-13

基金项目: 重庆建设科技计划(城科字2024第3-5号); 中国交通运输协会科技项目(2023-JN2024-25); 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2024TIAD-GPX0009); 重庆设计集团课题(2023-C9)

作者简介: 李卫(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事桥梁抗震与施工研究, E-mail: awei929@126.com。

易博(通信作者), 男, 博士生, E-mail: ybybyb1213@163.com。

Received: 2026-01-13

Foundation items: Chongqing Construction Science and Technology Plan (No. Chengkezi 2024 3-5); Science and Technology Project of China Communications and Transportation Association (No. 2023-JN2024-25); Chongqing Technology Innovation and Application Development Special Project (No. CSTB2024TIAD-GPX0009); Research Project of Chongqing Design Group (No. 2023-C9)

Author brief: LI Wei (1977-), senior engineer, main research interest: bridge construction management, E-mail: awei929@126.com.

YI Bo (corresponding author), PhD candidate, E-mail: ybybyb1213@163.com.

Abstract: Prefabricated bridge piers are widely adopted for their high construction efficiency and environmental benefits. However, complex terrain and restricted construction space in mountainous regions severely constrain the transportation and hoisting of large precast segments. To address this, a three-segment precast segmental pier system utilizing a hybrid connection of “grouted sleeves and prestressed tendons” (PSC-GSPT) is proposed. Relying on the Chongqing North Ring Interchange Renovation Project, 1:5 scale specimens were fabricated. Quasi-static tests compared the seismic performance of PSC-GSPT and a cast-in-place (CIP) pier, followed by numerical simulations analyzing the influence of prestressing parameters. Results indicate that, due to the addition of unbonded prestressed tendons, the PSC-GSPT exhibited increases of 28.6% in peak load, 41.3% in ultimate displacement, and 20.7% in displacement ductility compared to the CIP pier. Despite a slightly lower equivalent viscous damping ratio, cumulative energy dissipation increased by 27%, accompanied by significantly smaller residual displacement and good post-earthquake recoverability. Parametric analysis suggests that to prevent premature yielding and ensure ductility, a central layout for prestressed tendons is preferred, with the initial prestress level controlled within 30% to 50%. The study confirms that PSC-GSPT possesses excellent seismic performance, meets requirements for seismic fortification zones, and holds significant engineering application value.

Keywords: precast segmental bridge pier; grouted sleeve; prestressed tendon; hybrid connection; seismic performance

装配式桥墩体系因其施工方便快捷且绿色环保而常应用于平原地区的工程中^[1-3]。中国西南地区地形崎岖,道路蜿蜒且城市道路错综复杂,严重制约了传统大节段预制桥墩在复杂地形下的运输与吊装能力,故将桥墩沿高度方向划分为多节段拼装的方案成为选择。由于多节段拼装将连续的桥墩转化为离散体系,接缝处的连接设计便成为决定结构整体性与抗震安全的核心要素,节段连接方式包括灌浆套筒连接、灌浆金属波纹管连接、后张预应力筋连接和混凝土湿接缝连接^[4-8]。在各类装配式连接方案中,灌浆套筒因其显著的承载能力、经济性及施工便捷性,在实际工程中广泛应用。

现有研究^[9-13]通过试验与数值手段,详细探讨了套筒刚度及其布置方式等因素的影响。普遍认为,套筒本身刚度大的特性,会在接缝处形成局部刚域,导致该类桥墩的位移延性弱于现浇构件,且震后伴随较大的残余变形;而将灌浆套筒埋入基础内能有效避免局部刚度突变,从而使预制拼装桥墩获得几乎等同于现浇构件的抗震性能。学者^[6,14]对灌浆套筒连接两节段预制桥墩的抗震性能进行研究,发现,两节段预制桥墩的抗震性能普遍优于单节段预制桥墩,但延性和耗能能力较现浇桥墩略低。针对该问题,学者^[15-16]引入无黏结预应力构建“灌浆套筒-预应力”混合连接体系,可显著增强构件的自复位能力与极限承载力,并大幅抑制残余变形,使得延性与耗能能力得到显著提升。综合现有混合连接预制装配式桥墩抗震性能研究^[15-22]可知,混合连接桥墩在保持与灌浆套筒连接相当抗震能力的同

时,利用预应力显著推迟了开裂并提升了自恢复性能,残余位移仅为现浇的 58.7%^[16];且预应力筋的初始预应力度、配筋率及布置位置等参数对结构性能的影响显著^[16,23]。需要指出的是,既有成果主要聚焦于单节段或两节段,针对三节段及以上的多节段拼装体系的研究鲜有涉及。随着节段数量的增加,多重接缝的存在对结构抗震性能的影响研究尚不清晰,亟待开展相关抗震分析。

为解决装配式桥墩体系在山区复杂地形环境下的应用难点,笔者提出一种适用于受限施工环境的“套筒-预应力筋”混合连接三节段预制拼装桥墩,如图 1 所示。通过开展拟静力试验和数值模拟,对混合连接多节段预制桥墩的抗震性能进行评价,揭示预应力筋初始预应力度、配筋率及布置位置等关键设计参数的影响规律。

1 拟静力试验方案

1.1 试件设计

以重庆北环立交改造项目 9 m 高的方形墩为原型,考虑实际场地和加载条件,试验设计 2 个缩尺比 1:5 的试件。CIP(Cast-In-Place)试件为整体现浇桥墩,PSC-GSPT(Precast Segmental Bridge Columns-Grout Sleeves and Prestressing Tendons)试件为套筒-预应力筋混合连接的三节段预制拼装桥墩。

缩尺后试件尺寸轮廓和配筋设计如图 2 所示(图中数据单位均以 mm 计),在墩顶增设了一个尺寸为 500 mm×500 mm×400 mm 的加载端,试件混凝土等级与原型桥墩一致,采用 C40 混凝土,试件纵

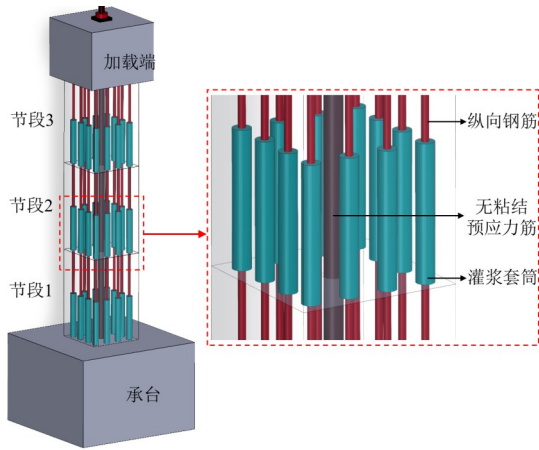


图1 混合连接三节段预制拼装桥墩

Fig.1 Three-segment precast segmental pier with hybrid connections

筋配筋率均为 1.86%，轴压比为 10%，剪跨比为 5.56；纵筋采用直径 16 mm 的 HRB400 钢筋，箍筋采用直径 8 mm 的 HRB300 钢筋，采用 5 根公称直径 15.2 mm 的 1 860 钢绞线作为预应力筋，预应力张拉为 558 MPa，灌浆套筒为铸铁材质，配套 C80 高强灌浆料，主要材料实测力学性能见表 1。

1.2 加载方案

两个试件的承台均按固结边界设置，在加载端顶部设置滚珠排以形成滑动边界条件。试验过程

中，对试件施加轴向压力及单向水平往复荷载，并持续加载直至试件达到破坏状态，其加载装置布置及示意如图 3(a)、(b)所示。

试件有效桥墩高度为 2 000 mm，采用位移控制加载方式。初始位移率依次为 0.1%、0.4%、1%，此后以 0.5% 的梯度递增至 4.0%，再以 1% 的梯度递增至 6%，每一级位移施加 2 个循环，具体加载程序见图 3(c)。

1.3 测试方案

墩顶水平位移通过 MTS 系统采集获取，同时，采用 LVDT 同步测量，在墩身-承台连接处、墩身连接处、墩帽-墩身连接处的接缝布置 LVDT 来测量接缝间张开宽度。纵筋沿高度方向布置应变测点，采用 DH3818Y 静态应力应变测试分析系统获取主筋应变。钢筋应变、接缝张开宽度和墩顶位移测点布置如图 4 所示。

2 试验结果与分析

2.1 试验破坏特征

1) 开裂阶段

CIP 试件在加载初期，位移加载至 3 mm 时，墩底角部率先出现微细裂缝，随着荷载增加，裂缝逐渐向截面中部及上方延伸，最后在墩身底 0~200

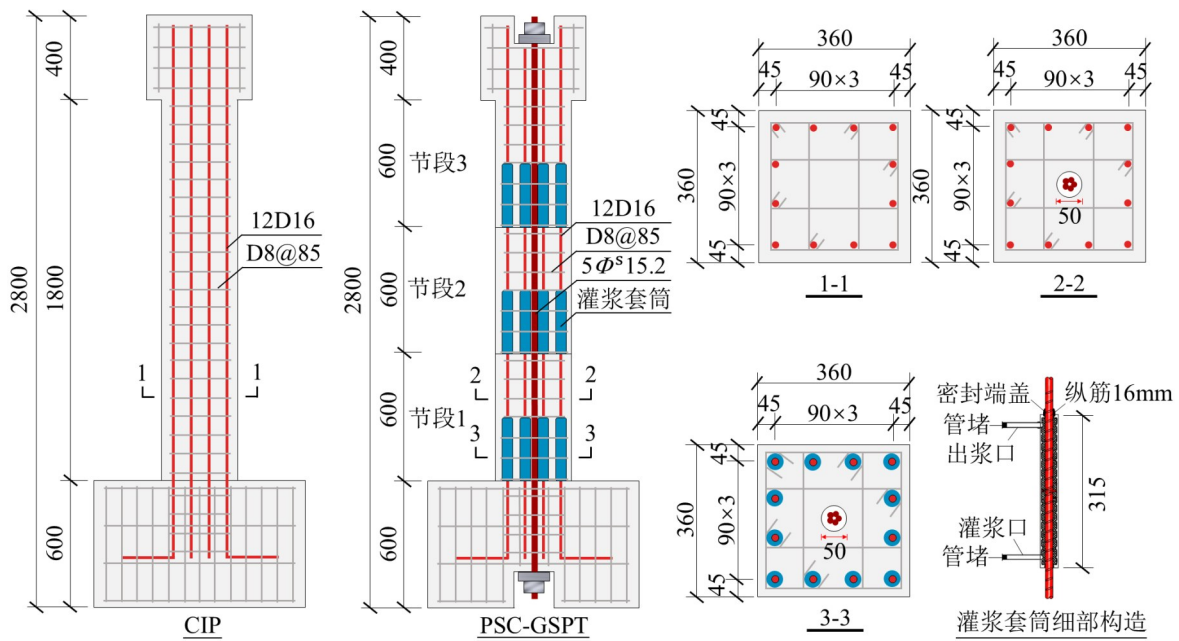


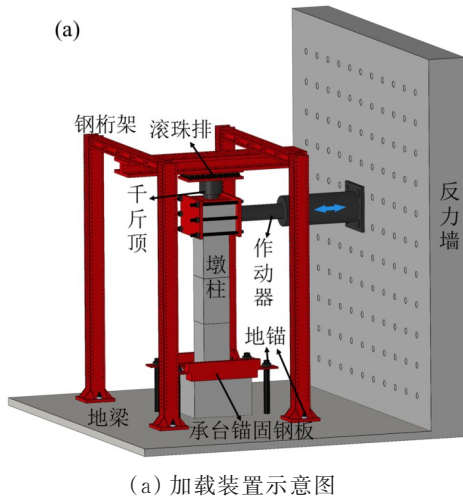
图2 CIP与PSC-GSPT试件尺寸及连接构造

Fig.2 Dimensions and connection details of CIP and PSC-GSPT specimens

表1 主要材料实测力学性能

Table 1 Measured mechanical properties of main materials

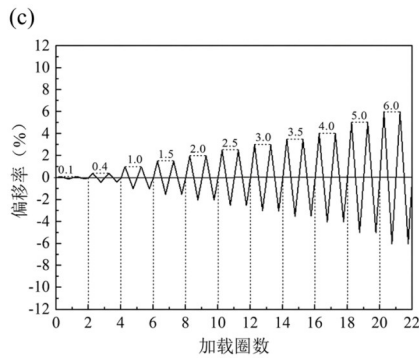
C40混凝土立方体强度/MPa	HRB400钢筋		预应力筋		C80灌浆料立方体强度/MPa
	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	
48.5	432	585	1 832	1 960	87



(a) 加载装置示意图



(b) 试验加载实况



(c) 试验加载制度

图3 试验加载装置及加载制度

Fig.3 Test loading setup and loading protocol

mm 区域内形成分布较均匀的横向弯曲裂缝网。PSC-GSPT 试件由于预应力作用,其开裂明显滞后。位移加载至 6 mm 时,节段 1 的灌浆套筒顶端位置出现微细裂缝,且其余部位未见明显裂缝。两组试件在卸载后裂缝均能闭合。

2) 屈服阶段

CIP 试件在位移达到 15.2 mm 时,受拉纵筋屈服,此时墩底主裂缝宽度扩展至 0.25 mm 左右,且裂缝分布高度向上延伸至 350 mm,水平裂缝末端

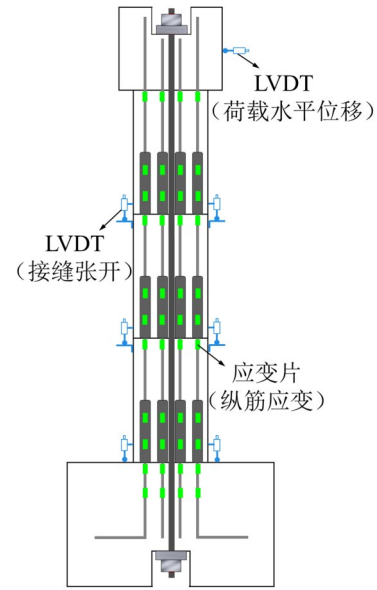


图4 测点布置图

Fig.4 Layout of measuring points

开始出现向下的斜向延伸趋势,表现出弯剪耦合特征。

PSC-GSPT 试件在位移达到 17.3 mm 时,受拉纵筋屈服。与现浇墩不同,该试件的裂缝呈现显著的局部化特征。其弯曲裂缝主要集中在节段 1 内、底层套筒顶端上方 0~100 mm 区域内,套筒区域内几乎无新裂缝产生,损伤主要集中在套筒与普通钢筋混凝土的交界面,主裂缝宽度达到 0.4 mm。

3) 峰值与塑性发展阶段

CIP 试件加载至 20.2 mm 时,墩底 0~200 mm 高度范围内的混凝土保护层开始起皮、剥落,裂缝最宽处达到 1.5 mm,损伤累积较快,核心区混凝土开始受到剪切挤压。

PSC-GSPT 试件加载至 28.2 mm 时,试件达到峰值荷载,表现出良好的延性。损伤模式表现为套筒上方截面的摇摆行为,套筒区域混凝土完好,而套筒上方截面的主裂缝张开宽度显著,达到 2.0 mm 左右,通过裂缝的大幅张开与闭合耗能,并未出现大面积的混凝土压碎。

4) 极限破坏阶段(强度退化)

CIP 试件加载至 77.2 mm 时,承载力已降至峰值荷载的 85% 以下,墩底塑性铰区域(高度约 300 mm)混凝土压碎、剥落,纵筋屈曲外露。PSC-GSPT 试件强度退化缓慢,直至加载至 113 mm 时,承载力才降至峰值荷载的 85% 以下。此时,破坏形态主要为节段 1 的套筒上方截面(高度约 320~450 mm 处)的混凝土压溃。相较于现浇试件,其塑性较明显上移,极限位移大幅提升,验证了更好的抗震延性。

5) 最终形态

由图5的试件最终破坏图可知,PSC-GSPT试件的塑性铰区域与CIP试件存在显著差异。CIP试件表现为墩底塑性铰区域(0~300 mm)的混凝土压溃;而PSC-GSPT试件由于灌浆套筒极大的局部刚度,迫使塑性铰区域上移至节段1套筒顶部的区域(320~450 mm),其下方仅出现保护层混凝土部分剥离。

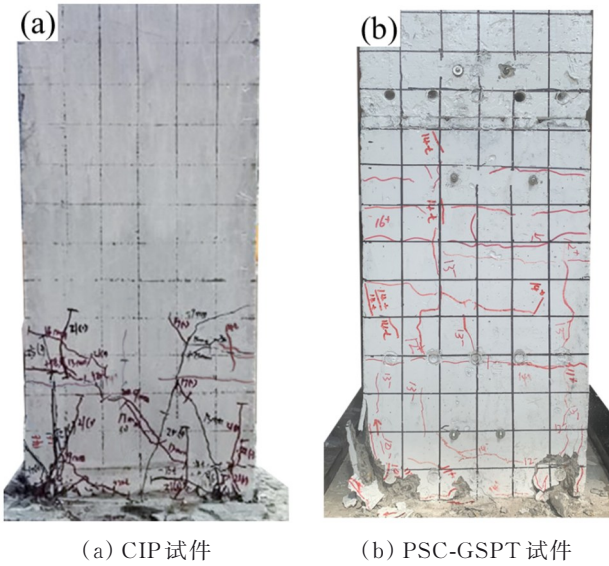


图5 试件最终破坏
Fig.5 Final failure of specimens

试验结果表明,预应力筋较高的初始预应力确保节段间接缝处基本保持弹性,节段1、2与节段2、3之间的接缝未出现明显张开,灌浆套筒由于其刚度和强度高于相邻的钢筋混凝土,起到了刚性连接件的作用,将塑性铰区域上移至套筒正上方的截面。同时,锚固于顶底的无黏结预应力筋跨越了这一局部塑性区域,提供了适应移位塑性较转动的整体回复力。有效验证了PSC-GSPT具有卓越的抗震性能,确保了预制节段接缝间在极大变形下的安全性优于现浇构件。

2.2 滞回曲线

由图6可知,在加载初期,两试件均处于弹性阶段,初始刚度相近且残余变形极小;随着位移率增大,CIP试件滞回曲线呈现出饱满的梭形特征,表明存在明显的残余变形与强度退化,反映了其以累积损伤为主的耗能机制;相比之下,PSC-GSPT试件得益于灌浆套筒与预应力的混合连接效应,展现出更优越的综合抗震性能:其峰值承载力显著高于现浇试件,因其高承载力基础以及纵筋的充分屈服,实现了高效且稳定的能量耗散,同时预应力筋提供的回复力使其在大位移卸载后具备极佳的自复位能力,强度退化平缓。

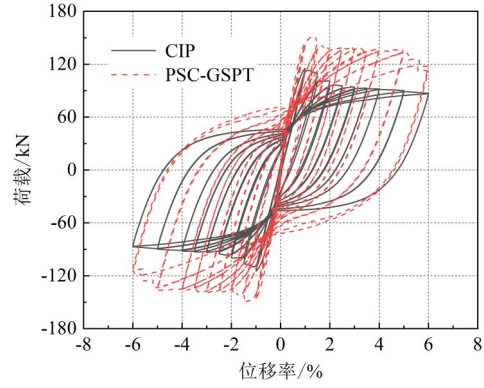


图6 CIP与PSC-GSPT滞回曲线
Fig.6 Hysteresis curves of CIP and PSC-GSPT

2.3 骨架曲线

从图7骨架曲线对比图可以看出,两试件在加载初期均表现出明显的线弹性特征,初始刚度数值相近;随着荷载增加,PSC-GSPT试件的曲线轨迹始终包围CIP试件,展现出显著更高的承载力峰值。特别是在峰值后的破坏阶段,CIP试件曲线呈现出较明显的下降趋势,反映出随着累积损伤增加其强度退化较快;而PSC-GSPT试件则表现出更宽的水平持荷平台与更平缓的下降斜率,说明得益于预应力筋的回复力与套筒连接的可靠性,该装配式构件在大变形下具备更好的强度稳定性。

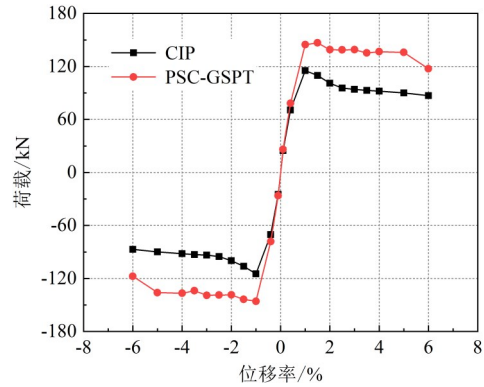


图7 CIP与PSC-GSPT骨架曲线
Fig.7 Skeleton curves of CIP and PSC-GSPT

由表2两条骨架曲线力学性能参数的对比可知,因高强度灌浆料增强基础截面约束与预应力筋提供的主动轴向压力所产生的协同效应延缓了裂缝扩展和钢筋屈服的发生,PSC-GSPT试件的屈服荷载与峰值荷载较现浇试件分别提升了35.3%和28.6%,说明在额外引入预应力筋的加持下,PSC-GSPT试件承载力显著优于CIP试件;极限位移高于现浇试件41.3%,受接缝张开及转动变形的影响,PSC-GSPT试件的屈服位移略高于CIP试件。通过图8所示的能量法计算对比位移延性可知,PSC-GSPT试件的延性系数高于CIP试件20.7%,说明PSC-GSPT试件的预应力筋可以提供有效回

复力,提高试件延性性能。

表 2 试件强度与变形特征数值

Table 2 Strength and deformation characteristics of specimens

试件	$+\Delta_y$	$+P_y$	$+\Delta_u$	$+P_p$	$-\Delta_y$	$-P_y$	$-\Delta_u$	$-P_p$	μ
CIP	15.2	97.6	77.2	115.7	-14.1	-93.1	-82.1	-114.8	5.45
PSC-GSPT	17.3	129.6	112.1	150.7	-16.9	-128.5	-113	-145.8	6.58

注:符号含义见图8,表中位移单位均以 mm 计,力单位均以 kN 计。

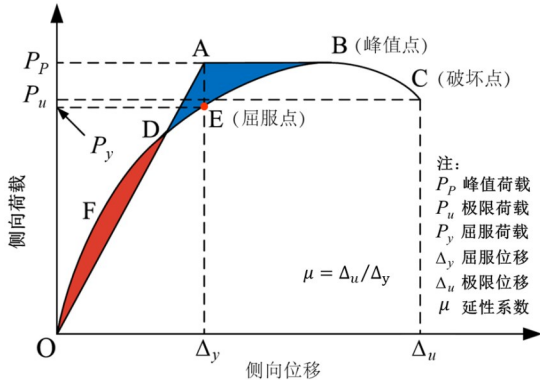


图 8 能量法示意

Fig.8 Schematic of energy method

2.4 刚度退化

由图 9 刚度退化曲线可知,随着位移率的增加,两试件的等效刚度均呈现“前期急剧下降、后期趋于平缓”的非线性衰减特征,反映了混凝土开裂与钢筋屈服对试件刚度的削弱过程;得益于预应力筋提供的轴向压力与自复位能力以及灌浆套筒刚度大的特性,PSC-GSPT 试件的等效刚度始终高于现浇试件,其不仅初始刚度优势明显,且在经历大位移塑性损伤后仍保有更高的残余刚度,表明该 PSC-GSPT 试件虽然无法改变混凝土开裂导致的刚度衰减规律,但能通过限制裂缝宽度有效提升结构在全过程中的抗侧刚度储备,保证结构在震后具有更优的抗侧稳定性。

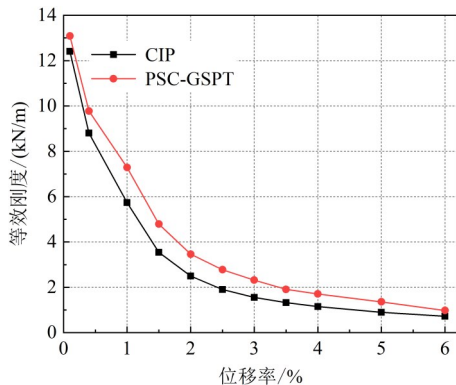


图 9 CIP 与 PSC-GSPT 刚度退化曲线

Fig.9 Stiffness degradation curves of CIP and PSC-GSPT

2.5 耗能能力

从图 10 等效粘滞阻尼比的变化趋势来看,CIP 试件在绝大多数位移级下均高于 PSC-GSPT 试件,

体现了其“梭形”滞回曲线饱满、单周耗能效率高的特点。随着位移率的增加,CIP 试件在经历充分的塑性变形并不断累积损伤的过程中,其等效阻尼比迅速增加,体现出以延性变形为主的传统耗能机制;而 PSC-GSPT 试件受预应力筋自复位机制及接缝张开的影响^[24],滞回环呈现明显的“捏拢”特征,导致其同位移下的等效黏滞阻尼比均低于现浇,反映了该结构在提升自复位能力的同时,牺牲了部分单圈耗能效率。

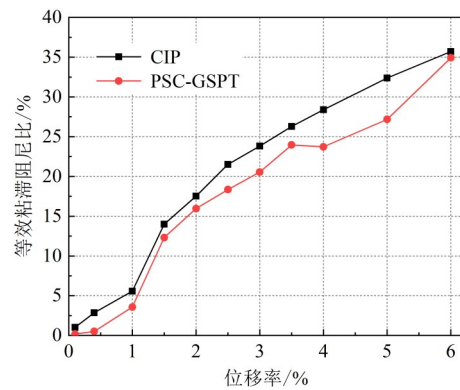


图 10 CIP 与 PSC-GSPT 等效粘滞阻尼比

Fig.10 Equivalent damping ratio of CIP and PSC-GSPT

如图 6 的滞回特性所示,尽管 PSC-GSPT 试件的滞回环相对狭窄,但由图 11 的累计耗能曲线可知,因其混合连接带来的超高承载力,PSC-GSPT 试件在同位移下的做功总量依然高于 CIP 试件。随着位移增加,PSC-GSPT 试件的累积耗能始终高于 CIP 试件,最终累积耗能较 CIP 试件提升了 27%,说明 PSC-GSPT 试件在保证优异自复位性能的前提下,依然实现了超越传统现浇构件的地震能量耗散能力。

2.6 自复位能力

为定量评估试件的自复位能力,采用残余位移比 ξ_{res} 作为评价指标^[25],其公式为

$$\xi_{res} = \frac{\Delta_{res}}{\Delta_{max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Δ_{res} 为单个循环中,外部荷载为零时的不可恢复位移; Δ_{max} 为在该加载循环中达到的峰值位移。

图 12 相对残余位移显示,尽管受接缝张开与剪切滑移影响,PSC-GSPT 试件仍表现出优于 CIP 试

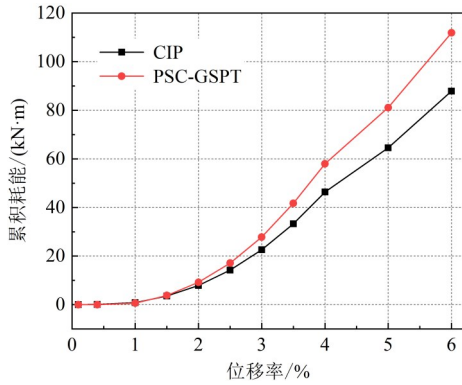


图 11 CIP与PSC-GSPT累计耗能曲线

Fig.11 Cumulative energy dissipation curves of CIP and PSC-GSPT

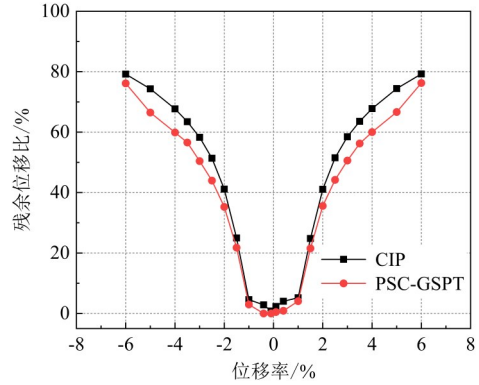


图 12 CIP与PSC-GSPT残余位移比

Fig.12 Residual displacement curves of CIP and PSC-GSPT

件的自复位能力。其机理在于,无黏结预应力筋提供的弹性回复力能够有效抵消多接缝体系因几何非线性与界面摩擦耗能产生的残余位移^[26]。反观CIP试件,其抗震性能主要依赖材料的弹塑性变形耗能,钢筋屈服后的塑性铰区域累积了不可恢复的永久变形。因此,采用PSC-GSPT连接构造显著提升了装配式桥墩的震后功能可恢复能力。

3 混合连接试件数值仿真研究

3.1 数值模拟

用OpenSees程序进行PSC-GSPT试件的抗震性能影响参数分析,参考文献[6, 27-28]对PSC-

GSPT试件进行建模,采用如图13所示的基于位移的纤维梁柱单元柱体模型,混凝土采用具有卸载加载刚度退化的Kent-Scott-Park模型;纵筋采用Giuffre-Menegotto-Pinto材料模型;预应力钢筋采用理想弹塑性模型。灌浆套筒区域通过等效钢筋面积法处理以反映其对刚度的贡献;节段间的接缝则采用忽略混凝土抗拉强度的零长度截面单元进行模拟;在墩底和接缝处使用Bond_SP01材料模型赋予零长度单元中的钢筋纤维,以精确模拟钢筋的黏结滑移效应;无黏结预应力钢筋采用杆单元模拟,用初始应变模拟预张力,顶部预应力锚固端与柱顶刚臂连接,底部与地面固结,中部与其他单元节点无连接以模拟无黏结效果。

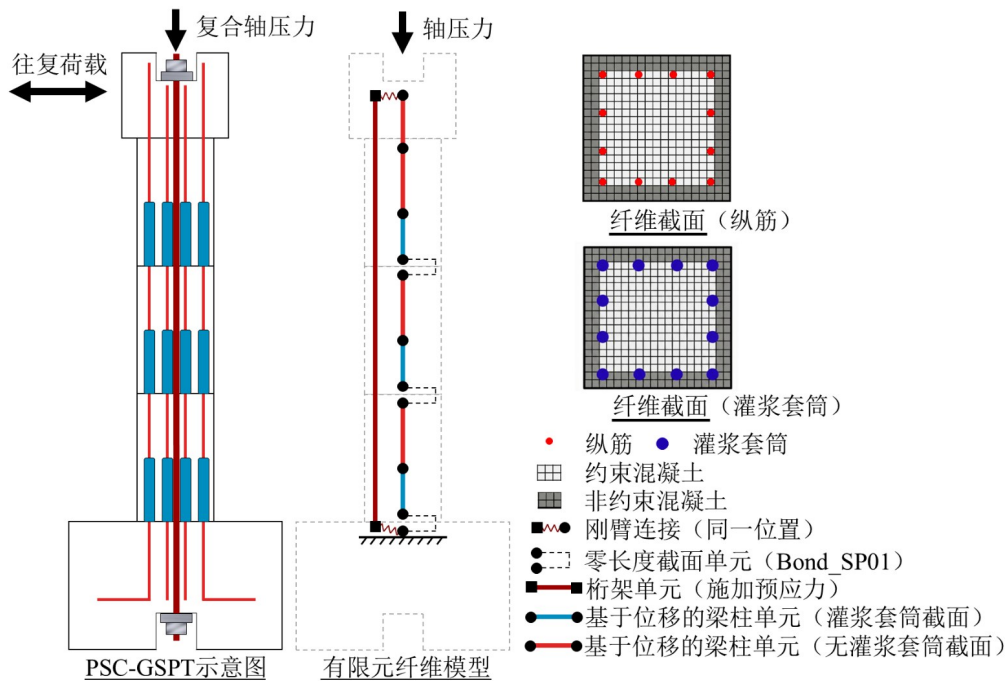


图 13 PSC-GSPT有限元模型

Fig. 13 Finite element model of PSC-GSPT

3.2 模型验证

PSC-GSPT试件拟静力的有限元模拟结果和试验结果的比较如图14所示。相应抗震性能指标

的对比值列于表3。从滞回曲线、骨架曲线及残余位移比来看,计算结果与实测结果整体吻合较好;在位移率小于2%的范围内,各滞回环等效粘滞阻

尼比的计算值与试验值接近,而在位移率增大后,计算得到的等效阻尼比低于实测值,主要与大位移(约5%及以上)下试件实际损伤程度高于模型预测

有关。由此可见,该有限元模型能够在循环加载条件下较为合理地再现混合连接节段拼装桥墩的拟静力响应特征,可作为设计参数分析的工具。

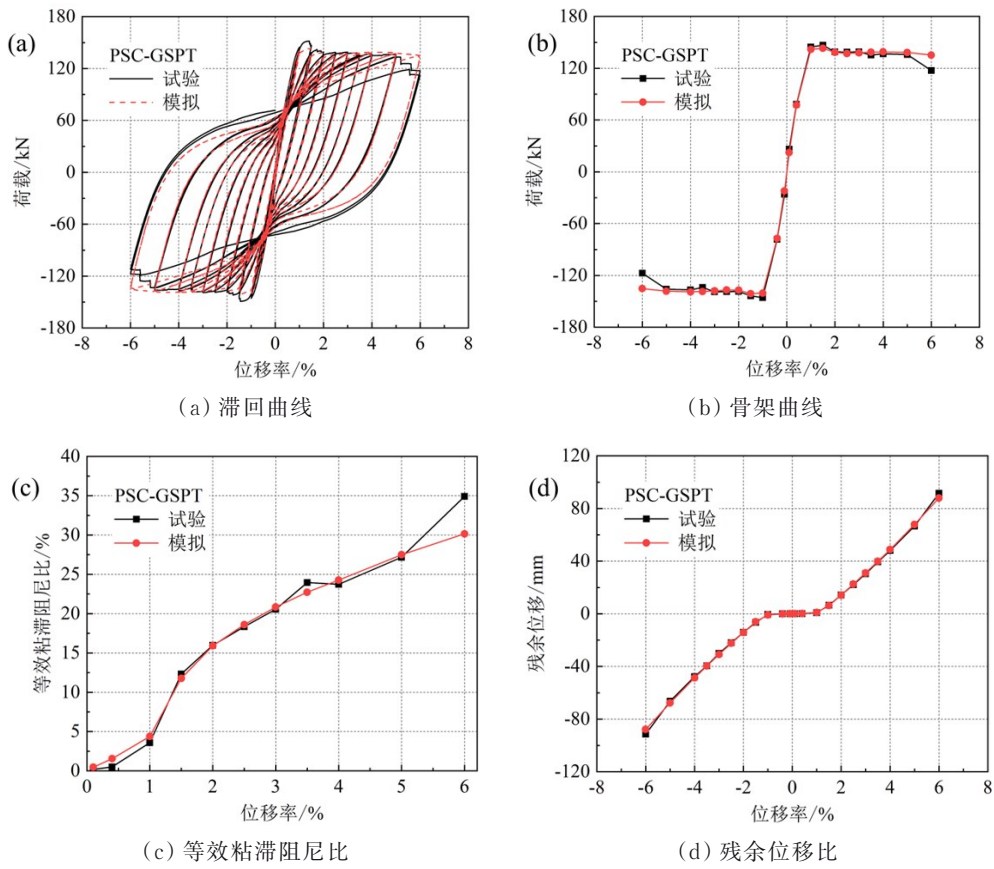


图 14 PSC-GSPT 试验与模拟结果对比

Fig. 14 Comparison of experimental and simulated results for PSC-GSPT

表 3 PSC-GSPT 试件抗震性能指标对比

Table 3 Comparison of seismic performance parameters of PSC-GSPT specimen

试件	类型	$+\Delta_y$	$+P_y$	$+\Delta_u$	$+P_p$	$-\Delta_y$	$-P_y$	$-\Delta_u$	$-P_p$
PSC-GSPT	实测值	17.3	129.6	112.1	150.7	-16.9	-128.5	-113	-145.8
	计算值	17.2	127	120	143.2	-17	-124.6	-120	-141.1

3.3 预应力筋设计参数的影响

在参数影响分析中,预应力筋统一采用试验中使用的标准型号,即直径为 15.2 mm 的 1 860 级高强低松弛钢绞线(单根公称截面积约 140 mm²)。为研究预应力筋初始预应力度、配筋率及布置位置对

混合连接三节段预制拼装桥墩抗震性能的影响,分别改变 PSC-GSPT 试件的上述参数,进行拟静力加载过程的有限元模拟。试件工况及计算结果见表 4。

表 4 数值模拟工况及计算结果

Table 4 Numerical simulation cases and calculation results

试件	预应力度/%	配筋率/%	排布形式	P_p	Δ_y	Δ_u	μ	μ 变化率/%
PSC-GSPT	30	0.54	中心	142.2	17.1	120	7.02	0
A1	50	0.54	中心	148.9	17.4	117.1	6.73	-4.13
A2	70	0.54	中心	153.5	18.1	116.6	6.44	-8.26
B1	30	0.324	中心	137.6	16.8	119.8	7.13	+1.57
B2	30	0.76	中心	146.6	17.5	119.1	6.81	-3.00
C1	30	0.54	边缘	141.5	16.9	100.1	5.92	-15.6
C2	30	0.54	边缘+中心	140.6	16.9	94.3	5.59	-20.4

3.3.1 预应力筋初始预应力度

依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)及相关研究,选取 $0.3f_{ptk}$ (PSC-GSPT)、 $0.5f_{ptk}$ (A1) 及接近规范上限的 $0.7f_{ptk}$ (A2) 3个水平进行对比分析。图 15 给出了预应力筋初始预应力度参数下的有限元分析结果。结合表 4 可知,预应力度由 30% 提高至 70% 时,峰值荷载提高了 7.9%,对残余位移影响甚微,但延性系数下降了 8.26%,这表明过高的初始张力会加速混凝土的损伤积累,从而限制了结构的变形能力。因此,在设计时建议初始预应力度宜控制在 30%~50% 范围内。

3.3.2 预应力筋配筋率

图 16 为预应力筋配筋率参数下的有限元分析

结果。结合表 4 可知,随着配筋率由 0.325% (B1) 增大至 0.76% (B2) 时,峰值荷载提高了 6.5%,残余位移比变化不大,延性系数变化率小于 5%。但考虑到当预应力配筋率偏小时,为满足足够的预压力需提高初始张力,这将使结构在地震作用下面临更大的预应力损失风险^[29],因此,建议设计时应适当提高预应力筋配筋率。

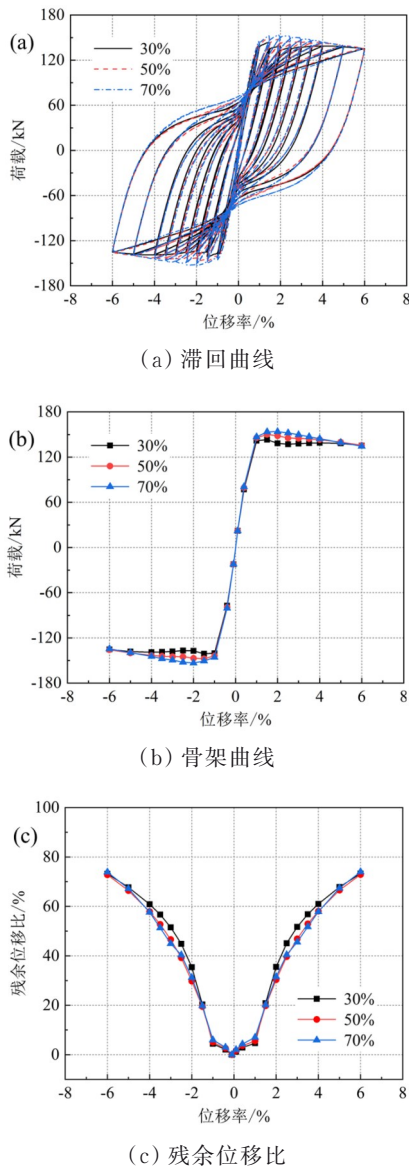


图 15 预应力筋初始预应力度对 PSC-GSPT 抗震性能影响
Fig.15 Effect of initial prestress level on seismic performance of PSC-GSPT

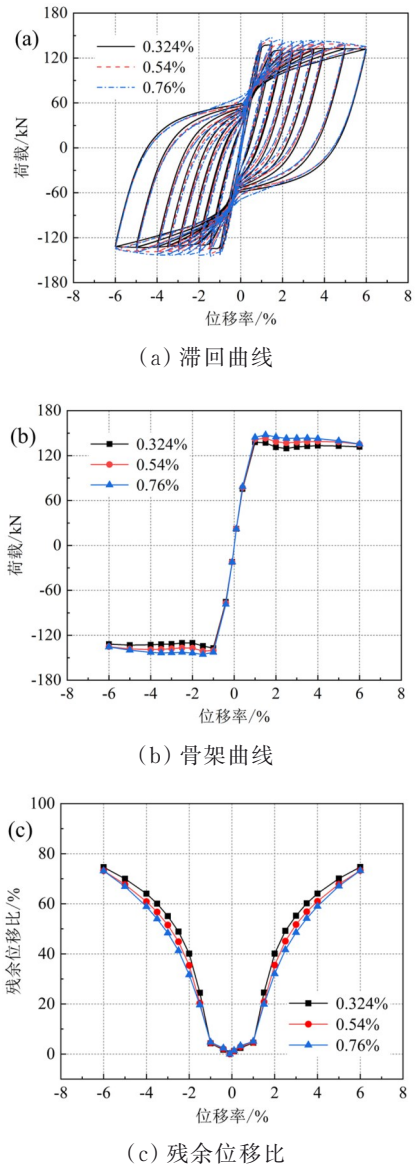


图 16 预应力筋配筋率对 PSC-GSPT 抗震性能影响
Fig.16 Effect of prestressed tendon reinforcement ratio on seismic performance of PSC-GSPT

3.3.3 预应力筋布置位置

图 17 所示为预应力筋布置位置图,其中边缘布置采用面积均等的形式布置,图 18 为不同预应力筋布置位置下的有限元分析结果。结合表 4 可知,不同布筋方式的初始刚度和残余位移差异较小,但 PSC-GSPT 在屈服后的刚度保持方面表现最为优越。相比之下,由于在桥墩摇摆变形过程中,截面

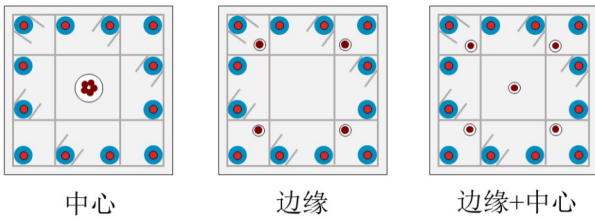


图 17 预应力筋布置位置图

Fig.17 Layout of prestressed tendons

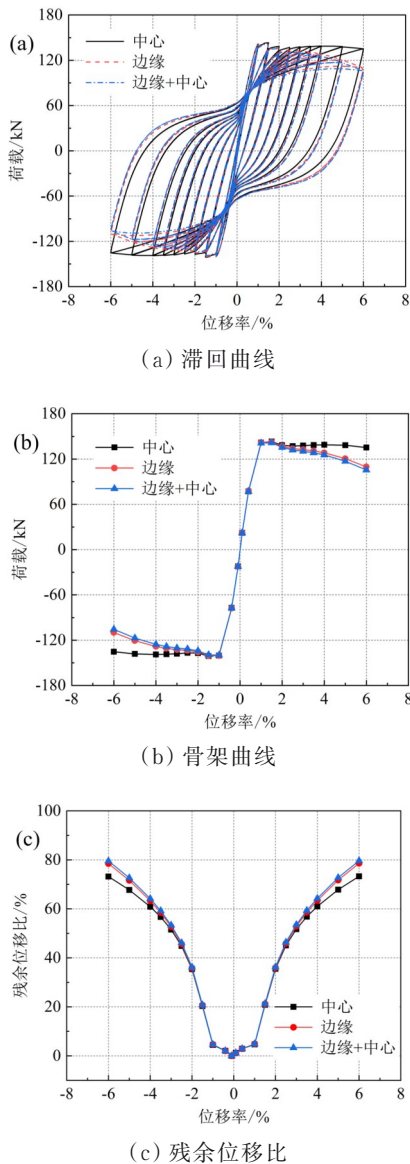


图 18 预应力筋位置对 PSC-GSPT 抗震性能影响

Fig.18 Effect of prestressed tendon position on seismic performance of PSC-GSPT

边缘的预应力筋距离中性轴较远,其应变增量显著大于中心预应力筋,因此带有边缘布置形式的 C1 和 C2 试件均发生了预应力筋的过早屈服。这也解释了在图 18(b)中,C1 与 C2 的骨架曲线在位移率超过 2% 后高度重合,并同步出现明显强度退化的原因。这种过早屈服最终导致 C1 和 C2 的位移延性系数较完全中心布置的 PSC-GSPT 分别降低了 15.6% 和

20.4%。因此,从延性和屈服后承载性能综合考虑,预应力筋布置宜优先采用中心布置形式。

4 结论

针对受限施工环境下预制拼装桥墩的应用需求,提出了一种“套筒-预应力筋”混合连接的三节段预制拼装桥墩(PSC-GSPT)体系。通过 1:5 缩尺模型拟静力试验,对比揭示了 PSC-GSPT 与现浇桥墩(CIP)在破坏形态及抗震性能上的差异;在此基础上,建立了经过试验验证的有限元模型,进一步开展了预应力关键参数的敏感性分析。主要结论如下:

1) PSC-GSPT 试件与 CIP 试件均呈现典型的弯曲破坏特征,但塑性铰分布存在显著差异。因预应力筋的弹性恢复力与套筒的高刚度特性,PSC-GSPT 试件的塑性铰转移至墩身底部套筒上方区域,接缝处未发生破坏。无黏结预应力筋跨越该塑性区域提供的弹性回复力,确保了节段接缝在大变形下仍保持弹性闭合状态,这表明混合连接体系能有效保证预制构件连接节点的完整性。

2) 与传统现浇构件(CIP)相比,引入无黏结预应力筋的 PSC-GSPT 试件整体上表现出更为有利的抗震性能。试验结果显示,PSC-GSPT 的峰值荷载较现浇试件提高 28.6%,极限位移提高 41.3%,位移延性系数提高 20.7%。受预应力自复位机制影响,其滞回曲线呈现一定“捏拢”特征,等效粘滞阻尼比略低于现浇构件,但在较高承载力和较大变形能力的共同作用下,其累积总耗能较现浇试件增加 27%。此外,混合连接显著减小了残余位移,提升了桥墩的震后可恢复性。

3) 基于 OpenSees 建立的有限元模型,精确模拟了试件的滞回特征、骨架曲线及残余位移发展规律,验证了模型的可靠性。基于该模型的预应力筋参数分析建议:在设计三节段 PSC-GSPT 桥墩时,预应力度宜控制在 30%~50%,过高的预应力度(如 70%)会导致构件延性系数显著下降;在满足张拉控制的前提下,适当提高预应力筋配筋率有利于抗震;在布筋形式上,建议采用中心集中布置方式,以避免边缘布置导致的预应力筋过早屈服及延性降低问题。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering re-

- search: 2024[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(12): 1-160. (in Chinese)
- [2] 林上顺, 张建帅, 夏樟华, 等. 装配式 RC 桥墩研究现状及展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(6): 135-147.
Lin S S, Zhang J S, Xia Z H, et al. Research status and prospect of assembled RC piers[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(6): 135-147. (in Chinese)
- [3] 张凯迪, 贾俊峰, 程寿山, 等. 等同现浇预制装配桥墩抗震性能研究综述[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(12): 1248-1259.
Zhang K D, Jia J F, Cheng S S, et al. Seismic performance of emulative cast-in-place precast bridge columns-state of the art review[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(12): 1248-1259. (in Chinese)
- [4] 袁万城, 钟海强, 党新志, 等. 装配式桥墩连接形式抗震性能研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 609-622.
Yuan W C, Zhong H Q, Dang X Z, et al. Research progress on seismic performance of precast piers with different connection forms[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 53(3): 609-622. (in Chinese)
- [5] 刘斌, 黄永福, 宋彦臣, 等. 高烈度区波纹管连接预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(2): 123-137.
Liu B, Huang Y F, Song Y C, et al. Seismic performances of prefabricated assembled piers connected with corrugated pipes in high intensity seismic areas[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(2): 123-137. (in Chinese)
- [6] Su H X, Yang C C, Sun C J, et al. Seismic performance of precast multi-segment columns with grouted sleeves: experimental and numerical investigations[J]. Engineering Structures, 2024, 301: 117239.
- [7] Li C, Hao H, Zhang X H, et al. Experimental study of precast segmental columns with unbonded tendons under cyclic loading[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(3): 319-334.
- [8] 巩茂康, 米家禾, 亓兴军, 等. UHPC 连接预制节段桥墩抗震性能拟静力试验研究[J]. 结构工程师, 2023, 39(5): 148-156.
Gong M K, Mi J H, Qi X J, et al. Quasi-static experimental study on seismic behavior of UHPC connecting prefabricated segmental piers[J]. Structural Engineers, 2023, 39(5): 148-156. (in Chinese)
- [9] Qu H Y, Fu J X, Li T T, et al. Experimental and numerical assessment of precast bridge columns with different grouted splice sleeve coupler designs based on shake table test[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(8): 04021055.
- [10] Ameli M J, Parks J E, Brown D N, et al. Seismic evaluation of grouted splice sleeve connections for reinforced precast concrete column-to-cap beam joints in accelerated bridge construction[J]. PCI Journal, 2015, 60(2): 80-103.
- [11] Liu Y, Li X P, Zheng X H, et al. Experimental study on seismic response of precast bridge piers with double-grouted sleeve connections[J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111023.
- [12] 汪劲丰, 王宇同, 向华伟, 等. 采用大直径灌浆套筒连接的预制桥墩抗震性能研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(3): 39-45.
Wang J F, Wang Y T, Xiang H W, et al. Study on seismic performance of precast segmental piers with large-diameter grouted sleeve connections[J]. Bridge Construction, 2024, 54(3): 39-45. (in Chinese)
- [13] 徐文靖, 马磊, 黄虹, 等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 93-104.
Xu W J, Ma B, Huang H, et al. The seismic performance of precast bridge piers with grouted sleeves[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 93-104. (in Chinese)
- [14] Su H X, Yang C C, Fan W, et al. Hysteresis characteristics of multi-segment precast columns with ultra-high performance concrete-based grouted sleeve connections: an experimental and analytical approach[J]. Engineering Structures, 2025, 322: 119157.
- [15] 葛继平, 闫兴非, 王志强. 灌浆套筒和预应力筋连接的预制拼装桥墩的抗震性能[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 42-52.
Ge J P, Yan X F, Wang Z Q. Seismic performance of prefabricated assembled pier with grouted sleeve and prestressed reinforcements[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 42-52. (in Chinese)
- [16] 陈亮, 郭敏, 侯文崎, 等. “灌浆套筒+预应力筋”混合连接预制装配桥墩拟静力试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(10): 3814-3832.
Chen L, Guo M, Hou W Q, et al. Experimental study on quasi-static of prefabricated and assembled bridge pier with “grouting sleeve+prestressing tendons” hybrid connection[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(10): 3814-3832. (in Chinese)
- [17] Tong T, Zhuo S Y, Liu Z, et al. Improving seismic behaviors of precast segmental piers with bonded prestressed tendons[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2024, 20(2): 179-198.
- [18] Wang J, Xu W B, Du X L, et al. Seismic performance of fabricated continuous girder bridge with grouting sleeve-prestressed tendon composite connections[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2023, 17

- (6): 827-854.
- [19] Xin G T, Xu W B, Wang J, et al. Seismic performance of fabricated concrete piers with grouted sleeve joints and bearing-capacity estimation method[J]. Structures, 2021, 33: 169-186.
- [20] 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.
- [21] Wang Z Q, Song W, Wang Y Y, et al. Numerical analytical model for seismic behavior of prestressing concrete bridge column systems[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 2333-2340.
- [22] Wang Z Q, Qu H Y, Li T T, et al. Quasi-static cyclic tests of precast bridge columns with different connection details for high seismic zones[J]. Engineering Structures, 2018, 158: 13-27.
- [23] 邱发强, 夏樟华, 朱三凡, 等. 预应力灌浆波纹管预制拼装桥墩抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(1): 144-153.
- Qiu F Q, Xia Z H, Zhu S F, et al. Seismic performance analysis of prestressing prefabricated bridge piers with grouting bellows[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(1): 144-153. (in Chinese)
- [24] 司炳君, 李宏男, 王东升, 等. 基于位移设计的钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究(I): 拟静力试验[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 123-129.
- Si B J, Li H N, Wang D S, et al. Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge piers designed on the basis of displacement (I): Quasi-static test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 123-129. (in Chinese)
- [25] Zhong C Y, Christopoulos C. Self-centering seismic-resistant structures: Historical overview and state-of-the-art[J]. Earthquake Spectra, 2022, 38(2): 1321-1356.
- [26] 司炳君, 陈灿, 孙治国, 等. 无黏结预应力 RC 桥墩抗震性能的数值分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(3): 68-76.
- Si B J, Chen C, Sun Z G, et al. Numerical analysis of the seismic performance of unbonded prestressed RC bridge piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(3): 68-76. (in Chinese)
- [27] 布占宇, 唐光武. 无黏结预应力带耗能钢筋预制节段拼装桥墩抗震性能研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 33-40.
- Bu Z Y, Tang G W. Seismic performance investigation of unbonded prestressing precast segmental bridge piers with energy dissipation bars[J]. China Railway Science, 2011, 32(3): 33-40. (in Chinese)
- [28] 金郑禄, 郑罡, 刘少乾, 等. 基于 OpenSees 的节段拼装桥墩抗震性能数值分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2383-2393.
- Jin Z L, Zheng G, Liu S Q, et al. Numerical analysis for seismic behavior of segmental assembly piers based on OpenSees[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2383-2393. (in Chinese)
- [29] Dawood H, ElGawady M, Hewes J. Behavior of segmental precast posttensioned bridge piers under lateral loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(5): 735-746.

(编辑 XXX)