

新型装配式钢管混凝土柱-预制RC横系板格构式 高墩静力推覆性能研究

焦佳楠¹, 王宣鼎^{1*}, 乔云强², 陈晓虎², 刘永健¹, 刘源¹, 周绪红¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆 401121)

摘要: 本文提出了一种新型装配式钢管混凝土(CFST)桥墩体系, 采用间断预制钢筋混凝土(RC)横系板连接, 抗侧刚度大, 施工效率高。基于ABAQUS软件, 建立该新型桥墩体系的精细化有限元模型, 并开展参数分析, 考察板间距、板高、板分布等对体系静力推覆性能与损伤模式的影响规律; 基于有限元分析, 提出该桥墩体系的概念设计建议。研究结果表明: 该桥墩体系具有较高的抗侧刚度、承载力与较好的延性, 新型装配式CFST柱-预制RC横系板的连接节点能保证体系的高效传力与充分变形, 合理设计预制RC横系板的高度与间距可改变体系的塑性发展机制, 以满足不同性能化设计的需要。

关键词: 格构式CFST桥墩; 预制RC横系板; 装配式节点; 静力推覆性能; 精细化有限元模型; 参数分析

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)02-0001-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240829001

Static Pushover Performance of a Novel Prefabricated Laced High Pier with CFST Columns and Precast RC Tie Plates

JIAO Jianan¹, WANG Xuanding^{1*}, QIAO Yunqiang², CHEN Xiaohu²,
LIU Yongjian¹, LIU Yuan¹, ZHOU Xuhong¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. T. Y. Lin International Engineering Consulting (China) Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

*Corresponding author: wangxuanding@cqu.edu.cn

Abstract: A novel prefabricated concrete filled steel tube (CFST) laced pier system connected by discontinuous precast RC tie plates is proposed, providing high lateral stiffness and high construction efficiency. Refined finite element models are established using ABAQUS to evaluate the static pushover response of the system and to clarify its damage patterns. A parametric study is conducted to quantify the effects of tie plate arrangement, including spacing, height and distribution ratio. Based on the finite element analysis, several concept design suggestions of the pier system are put forward. The results show that the pier system has high lateral stiffness, bearing capacity and ductility, and the novel prefabricated CFST column-RC tie plate connection can ensure the efficient force transmission and full deformation of the system. At peak load, the connections exhibited only localized yielding, suggesting a rational connection design. Reasonable design of the height and spacing of the RC tie plate can change the plastic development mechanism of the

收稿日期: 2024-08-29

基金项目: 重庆市在渝院士牵头科技创新引导专项(CSTB2023YSZX-JSX0001), 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1529)

作者简介:

焦佳楠(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事装配式钢-混凝土组合节点方面的研究。E-mail: 2903094396@qq.com。

通信作者:

王宣鼎(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: wangxuanding@cqu.edu.cn。

system to meet the different performance-based design demands.

Keywords: laced CFST bridge pier; prefabricated RC tie plate; prefabricated connection; static pushover performance; refined finite element model; parametric study

以钢管混凝土(Concrete Filled Steel Tube, CFST)为主要构件的钢-混凝土组合桥墩自重轻、抗震性能优异、施工效率高、运输方便,在桥梁工程中的应用潜力巨大^[1-2]。在高墩桥梁建设中,格构式CFST墩因其刚度大、稳定性好等优势,受到越来越多的关注,并成功应用于干海子特大桥、腊八斤沟特大桥等重点桥梁^[3-4]中。目前,CFST格构式高墩的柱肢连接一般为钢结构桁架或现浇混凝土墙板,前者用钢量与焊接量大,且节点焊接疲劳问题突出;后者存在节点连接复杂、现场作业量多、施工工期长等问题^[5-6]。

邓萱奕等^[7]研究了轴压比等参数对四肢等截面K形缀管CFST格构柱的结构延性、水平承载力与耗能性能的影响,并提出此构造下CFST格构柱的骨架曲线计算方法。HUANG等^[8]对缩尺的干海子桥墩试件进行振动台试验,证明采用CFST复合桁架梁和格构桥墩的轻质桥梁具有较好的抗震性能。HUANG等^[9]采用有限元分析法,发现格构柱内的初始应力会使构件提早进入弹塑性阶段,长细比较大时会显著降低其极限荷载。HUANG等^[10]对不同连接构造的CFST格构柱与组合箱梁的节点进行低周往复加载试验,发现该类节点具有良好的位移延性,可满足大型组合结构的抗震要求。YUAN等^[11-12]研究了混凝土强度、柱肢纵向间距、缀管竖向间距等参数对平缀管式等截面CFST格构柱承载力、延性的影响。晏巧玲等^[13]对等截面四肢CFST叠合柱进行静力试验研究和理论分析,并提出其承载力的简化计算方法。CHEN等^[14]通过试验研究发现CFST-RC柱的主要失效模式是RC板被压碎,增加钢管厚度和RC板厚可以有效提高此类柱的轴向抗压强度。YADAV等^[15]对CFST与RC腹板连接的格构柱在循环荷载下的破坏模式、延性、强度等特性进行分析,发现RC腹板耗能能力较强。TIAN等^[16-18]结合试验与有限元结果发现随着剪跨比增加,CFST叠合格构式桥墩的水平承载力和侧移刚度降低,但变形和耗能能力明显提高。袁辉辉等^[19]对CFST混合柱试件进行拟静力试验,发现此类构件的抗震性能良好,荷载-位移滞回曲线饱满。

在此背景下,本文提出一种通过间断预制RC横系板连接的新型格构式CFST桥墩体系。为保证预制RC横系板与CFST柱肢的高效连接,该桥墩体系采用“局部钢接头+局部现浇混凝土”的装配式节点连接方案。局部钢接头由2块外翻钢侧板与2块钢盖板组成,其中外翻钢侧板与CFST柱肢焊接,上下钢盖板通过螺栓与外翻钢侧板连接。预制RC横系板两侧留有外伸钢筋,并通过局

部现浇混凝土锚固于局部钢接头内。为保证连接区有效的嵌固与传力效果,局部钢接头的侧板内侧焊有开孔钢板剪力连接键(PBL剪力键)且侧边内翻,使得局部现浇混凝土的厚度大于预制板厚。新型桥墩体系的装配工艺简单,局部采用钢接头连接可有效减少现场施工量,免去支模工序;栓接上下钢盖板可消除高空焊接,降低施工难度;增大局部现浇混凝土厚度使得现场装配容差大,从而实现工厂预制生产,现场快速装配。

本文对该新型装配式钢管混凝土柱-预制RC横系板格构式桥墩在水平推覆荷载作用下的受力性能进行有限元分析,研究预制RC板高度、间距、配板率等参数对体系破坏模式与受力机理的影响规律,探究不同荷载等级下体系各部件及节点的损伤演化过程与变形特征,验证了该新型桥墩体系的优异受力性能并提出优化设计建议。

1 有限元模型的建立

1.1 模型参数

新型桥墩体系应用于典型刚构桥中的效果图及其关键节点构造如图1所示。本文采用有限元软件ABAQUS中的Standard模块模拟所提出新型装配式CFST柱-预制RC横系板格构式高墩在横桥向水平荷载作用下的受力性能。如图2所示,有限元标准模型(B1)的参数如下:CFST柱高 H 为21 720 mm,截面外径 D 为720 mm,钢管壁厚 t 为12 mm,双柱中心距 B 为6 000 mm;预制钢筋混凝土板宽 b 为150 mm,高 h 为3 000 mm,长 L 为4 380 mm,沿柱高共布置5块,间距 d 为1 500 mm;外包U型钢长 c 为500 mm,侧板上下外翻长度 w 为100 mm,侧边内翻封板长度 n 为50 mm,厚8 mm,底板和盖板厚16 mm。在标准模型的基础上,为分析板高 h 、板间距 d 及配板率 μ 对体系受力性能的影响,共建立7个变参数模型,见表1。

1.2 单元类型选取及接触关系

模型主要由3部分组成:钢管混凝土柱、U型钢连接节点、钢筋混凝土板。混凝土采用三维实体单元C3D8R模拟,墩柱外包钢管、钢接头及PBL剪力键采用曲面壳单元S4R模拟,板内钢筋采用三维桁架单元T3D2模拟。钢管混凝土柱及混凝土板的网格尺寸采用100 mm×100 mm,钢筋间距设为100 mm,U型钢及PBL剪力键构件按照其构造形式均匀划分网格。

模型中钢材与混凝土的接触关系定义为“面-面接触”,包括CFST钢管与其核心混凝土和局部钢接头及该

表1 模型参数表
Table 1 Model parameters

模型编号	h/mm	d/mm	$\mu/\%$
B1	3 000	1 500	66.7
B2	3 000	3 000	50.0
B3	3 000	6 000	33.3
B4	2 100	1 500	58.3
B5	4 500	1 500	75.0
B6	4 000	2 000	66.7
B7	6 000	3 000	66.7

注： μ 为配板率，根据柱间配板总高度/有效柱高 $\times 100\%$ 计算所得；有效柱高为柱高 H 减去最下面的固定板板高和柱头高度，即 $21\,720 - 3\,000 - 720 = 18\,000\text{ mm}$ ，各模型有效柱高相同。

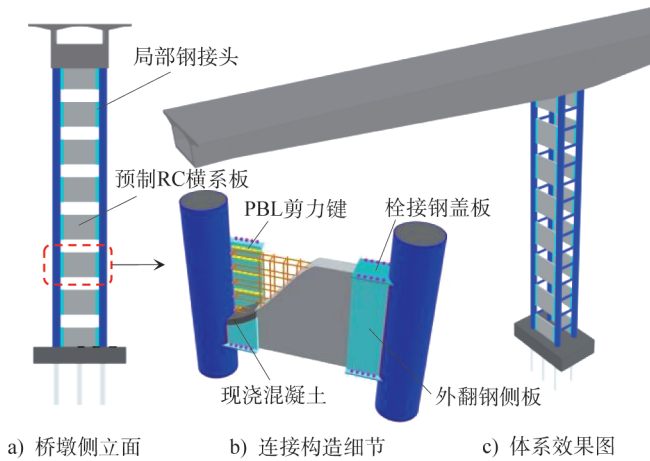


图1 桥墩体系图

Fig. 1 Bridge pier system

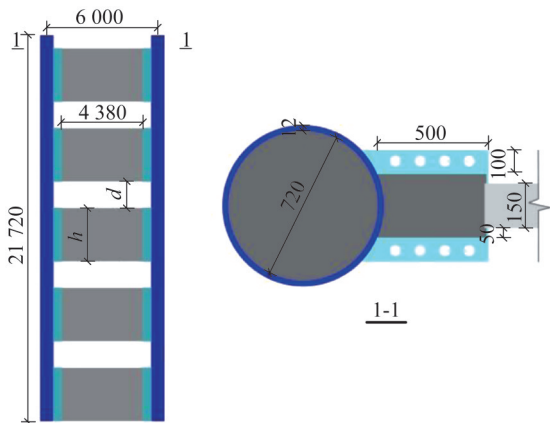


图2 模型示意图(单位:mm)

Fig. 2 Finite element model (unit:mm)

区域柱钢管与其内填现浇混凝土。接触切向作用采用“罚”函数模拟，摩擦系数取0.6，法向作用采用“硬接触”模拟。外翻钢侧板与CFST钢管、PBL剪力键与外翻钢

侧板等钢材之间的焊接通过“绑定”模拟。板内钢筋及PBL剪力键采用“嵌入区域”置入混凝土板中，以保证变形协调。此外，连接区盖板与侧板外翻翼缘的螺栓连接简化为螺栓孔边缘的“绑定”连接。模型网格划分及接触关系如图3所示。

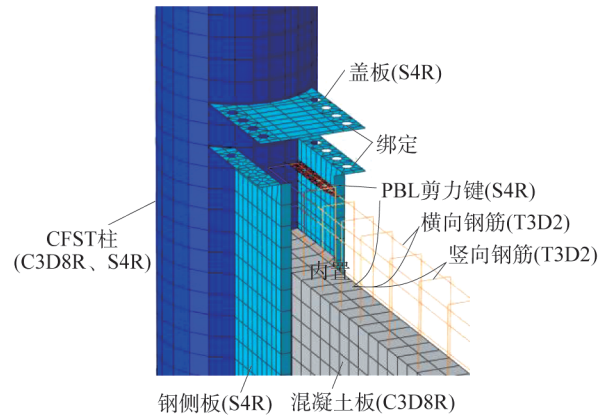


图3 网格划分及接触关系

Fig. 3 Meshing and contact relation

1.3 材料本构

模型中钢筋和钢板均采用理想弹塑性本构模型，屈服强度分别取355 MPa和400 MPa，泊松比取0.3，弹性模量取 $2.0 \times 10^5\text{ MPa}$ 。

钢管内混凝土强度等级为C60，局部钢接头内填现浇混凝土强度等级为C45，预制RC横系板的混凝土强度等级为C35。基于ABAQUS的塑性损伤模型定义混凝土材料的非弹性行为，其中，泊松比取0.2，弹性模量采用美国ACI规范^[20]建议公式。

$$E_c = 4\,730 \sqrt{f_c} \quad (1)$$

式中： f_c 为混凝土抗压强度。

CFST钢管内填混凝土应力-应变关系采用韩林海^[21]提出的圆钢管混凝土本构模型；预制RC横系板中混凝土与局部钢接头内填混凝土均采用余志武^[22]提出的混凝土单向拉压本构模型，后者忽略了局部钢接头的约束效应，模拟结果偏于保守。

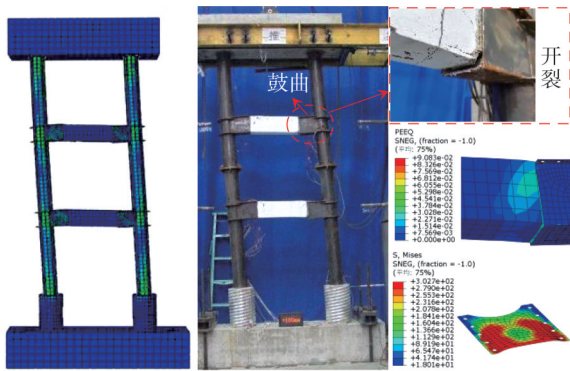
1.4 边界条件与加载方式

模型的边界条件和加载方式根据桥墩在实际工程应用中的受力情况进行设置。根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)将两边柱底面及最下层板的底面设为固定端，采用位移加载的方式，两边柱顶面分别与其面外一点进行耦合，将位移值同时施加于两个耦合点上，并限制耦合点水平面外的移动和转动。位移值通过计算规则桥梁倒塌破坏极限状态下的墩顶漂移率^[23]取得。当RC板内横向钢筋或竖向钢筋出现全长屈服或承载力下

降至峰值荷载的90%时,停止加载,判断构件已失效。

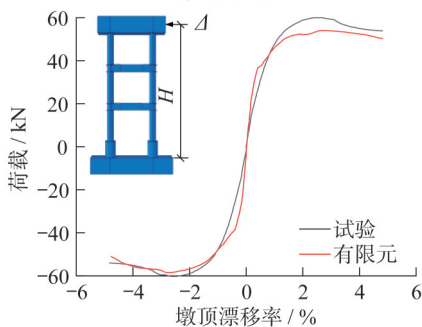
1.5 模型验证

为验证模型的可靠性,采用相同建模方法对课题组前期开展的装配式钢管混凝土-预制RC梁双柱桥墩体系^[24]进行模拟。有限元模型能较好地预测试验中试件的变形情况、损伤过程与破坏模式,如图4a)所示。有限元模型预测的荷载-墩顶漂移率骨架曲线与试验结果的对比情况如图4b)所示,二者刚度、承载力及后期延性均吻合较好,验证了有限元模型的可靠性。



注:图中PEEQ为累积等效塑性应变,用于衡量混凝土的塑性损伤,定义为变形值/原始长度,单位为无量纲;图中S, Mises为米塞斯等效应力,单位为MPa。

a) 破坏模式



b) 荷载-墩顶漂移率骨架曲线

图4 有限元模型验证

Fig. 4 Verification of the FEM

2 典型模型全过程受力分析

以标准模型B1(板高为3000mm,板间距为1500mm,柱间共布置5块板,配板率为66.7%)为例,开展水平推覆荷载作用下的全过程受力分析。

图5为模型B1的推覆荷载-水平位移曲线。曲线的四个损伤特征点包括:A点-板内横向钢筋达到屈服强度,B点-板内竖向钢筋达到屈服强度,C点-CFST柱外包钢管达到屈服强度,D点-峰值荷载。在A点前,模型基本处于弹性阶段,推覆荷载与水平位移近似呈线性关系。随着推覆荷载的增大,刚度出现退化,模型进入弹塑性阶段(AD),先后经历了板内横向钢筋屈服延伸、钢接

头PBL剪力键局部屈服、板内竖向钢筋屈服(B点)、钢接头外翻钢侧板局部屈服、CFST柱肢底部局部钢管屈服(C点)。模型达到峰值荷载(D点)后,承载力缓慢下降,具有较好的延性。

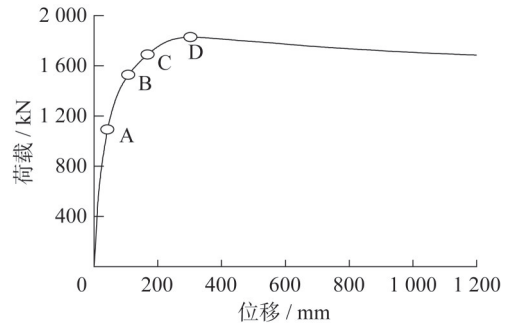
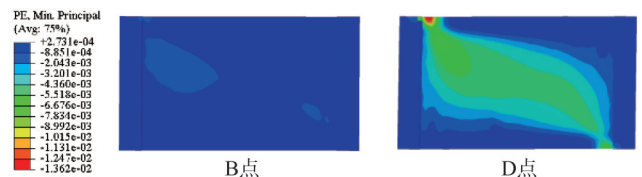


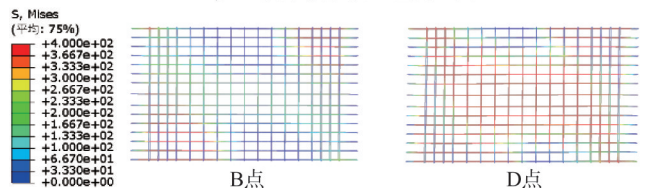
图5 模型B1的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of model B1

柱间各位置RC横系板的损伤特征和破坏模式基本相同,图6为模型B1顶部RC横系板在B点和D点时的云图。RC板的损伤始于对角混凝土的受拉开裂与横向钢筋屈服;随着水平位移不断增大,板内应力沿对角线逐渐向板中部扩展,横向钢筋出现全长受拉屈服,板中部区域竖向钢筋逐渐屈服。到达峰值荷载时,RC板总体呈现弯剪破坏。图7为模型B1钢构件在峰值荷载D点时的Mises应力云图。CFST柱钢管的屈服主要集中于左柱一倍板高范围处,以拉应力为主。局部钢接头内的PBL剪力键随荷载增大,应力逐渐增大,将钢筋应力传递至外翻钢侧板。峰值荷载时,外翻钢侧板翼缘局部达到屈服,上下钢盖板及钢侧板内翻的应力较小,未达到屈服强度,整体处于弹性段,节点连接可靠。



a) RC横系板混凝土应变云图



b) RC横系板钢筋应力云图(单位:MPa)

图6 模型B1的RC横系板应变及应力云图

Fig. 6 Strain and stress contours of RC tie plate of model B1

综上,模型B1具有较高的抗侧刚度与承载力,局部钢接头装配式节点能有效保证预制RC横系板与CFST

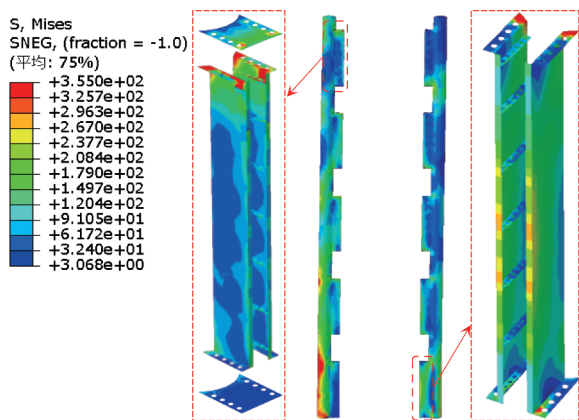


图7 模型B1钢构件D点状态下应力云图(单位:MPa)
Fig. 7 Stress contours of model B1 steel component at point D (unit: MPa)

柱肢的协同工作性能,结构体系的塑性损伤合理,表现出良好的变形能力与延性性能。

3 参数分析

3.1 RC横系板板间距

在模型B1的基础上,保持柱高和单块板高不变的情况下,模型B2和B3通过减少RC横系板的数量使板间距由1500mm分别增加至3000mm和6000mm,同时,配板率由66.7%分别降低至50.0%和33.3%。

如图8所示,RC横系板间距的变化并未改变各模型推覆荷载-水平位移曲线的发展趋势,且曲线上四个特征点对应的水平位移基本相同,说明结构体系的屈服机制未发生明显改变。然而,RC横系板间距的增加使得配板率降低,从而导致体系抗侧刚度和承载力的显著降低,但对延性和变形能力的影响较小。

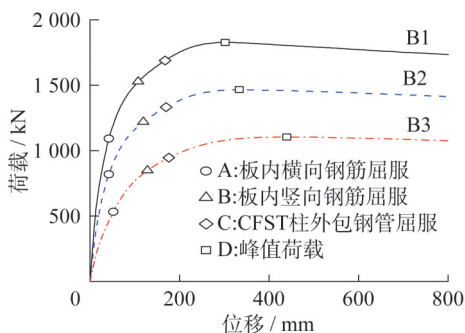


图8 模型B1、B2、B3荷载-位移曲线
Fig. 8 Load-displacement curves for model B1, B2 and B3

模型B2和B3在D点状态下的云图见图9。随着RC横系板间距的增加,板混凝土的损伤和钢筋屈服程度相差不大,CFST柱钢管的屈服位置逐渐上移,屈服面积逐

渐增大,模型B1、B2、B3在峰值荷载下柱钢管屈服面积比例约为1.0:1.2:2.5。值得注意的是,由于RC横系板间距过大,模型B3的两CFST柱肢均形成独立的塑性铰,体系协同抗侧能力较差。

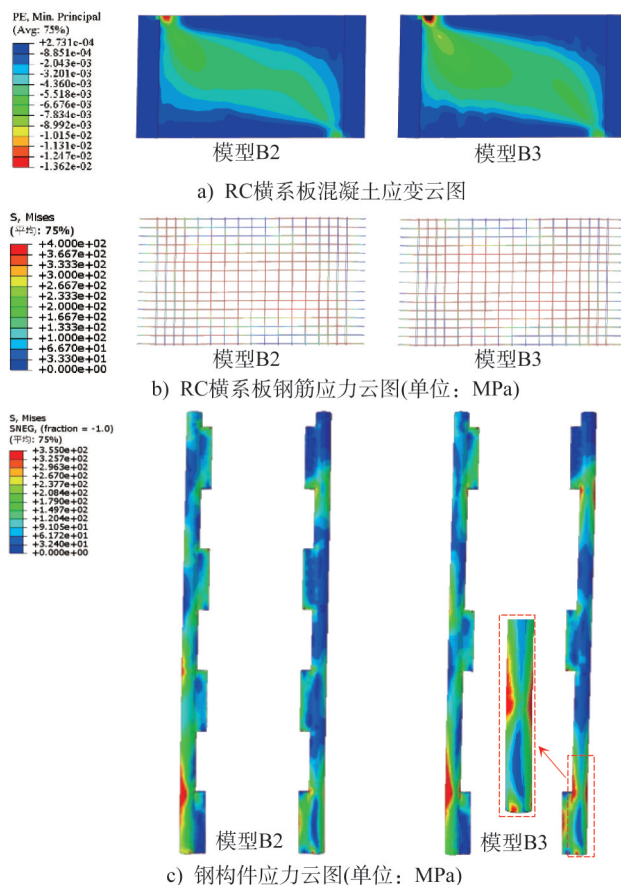


图9 模型B2、B3在D点的应变及应力云图
Fig. 9 Strain and stress contours of model B2 and B3 at point D

综上,在保持RC横系板高度不变的情况下,其间距与配板率直接相关,会显著影响体系的抗侧刚度和承载力。RC横系板间距过大时,CFST柱肢易形成独立塑性铰,削弱体系协同抗侧力性能。实际设计中,建议板间距不宜过大。

3.2 RC横系板高度

在模型B1的基础上,保持柱高和板间距不变的情况下,模型B4和B5改变单块RC横系板板高(配筋率不变),板高分别为2100mm和4500mm,对应配板率为58.3%和75.0%。

如图10所示,在RC横系板间距一定的情况下,增加板高会提高体系的配板率,从而提升抗侧刚度与承载力。与间距参数不同,RC横系板高度对体系的屈服机制和变形能力也存在较为显著的影响。与基准模型B1相比,较小板高的模型B4具有更长的弹塑性发展阶段,峰值位移

提升约 1.58%，塑性变形能力显著提升；较大板高的模型 B5 发生了 B 点和 C 点屈服顺序的改变，即 CFST 柱钢管先于板内竖向钢筋屈服，且后期延性较差。

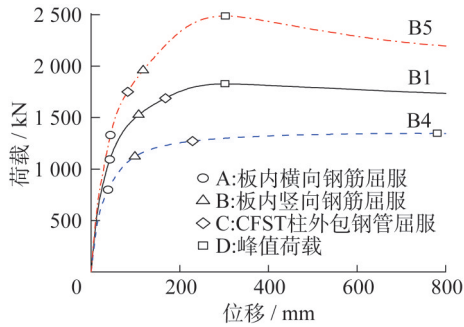


图 10 模型 B1、B4、B5 荷载-位移曲线
Fig. 10 Load-displacement curves for model B1、B4 and B5

模型 B4 和 B5 在 D 点状态下的云图见图 11。随着 RC 横系板高度的增加，其破坏模式从弯剪破坏向剪切破坏转变，板内混凝土损伤程度逐渐减小，板内钢筋更晚发生屈服且屈服程度更低。与基准模型 B1 相比，模型 B4 和 B5 在 D 点状态下 CFST 柱肢钢管的屈服范围更大，且均形成独立的柱肢塑性铰，但塑性发展机制存在显著差异。模型 B4 的柱肢塑性铰是在 RC 横系板严重损伤并出现较大强度退化的情况下发生的，柱肢呈现弯曲破坏特征，延性较强。模型 B5 的柱肢损伤先于 RC 横系板内竖向钢筋屈服发生，且呈现一定程度的短柱剪切破坏特征，不利于体系抗震性能的提高。

综上，在保持 RC 横系板间距不变的情况下，板高度的变化不仅直接影响体系的抗侧刚度和承载力，还会改变体系的屈服机制与破坏特征。实际设计中，应合理控制 RC 横系板的高度，避免 CFST 柱肢过早屈服和发生局部剪切破坏。

3.3 RC 横系板分布

在模型 B1 的基础上，模型 B6 和 B7 同时改变 RC 横系板的间距和高度，以保证相同柱高下配板率不变，为 66.7%。模型 B6 对应的板高为 4 000 mm，板间距为 2 000 mm，模型 B7 对应的板高为 6 000 mm，板间距为 3 000 mm。

如图 12 所示，加载初期各曲线弹性段及 A 点位置几乎重合，说明配板率对体系刚度及屈服荷载起控制作用。进入弹塑性段后，各曲线逐渐产生差异，屈服后刚度与峰值承载力随着板高的增大而提高。RC 横系板分布同样影响体系的屈服顺序。与基准模型 B1 相比，模型 B6 的 CFST 柱钢管与板内竖向钢筋几乎同时屈服，而模型 B7 与模型 B5 类似，其柱钢管先于板内竖向钢筋屈服。在配板率相同的情况下，体系抗侧承载力与板高呈正相关，而

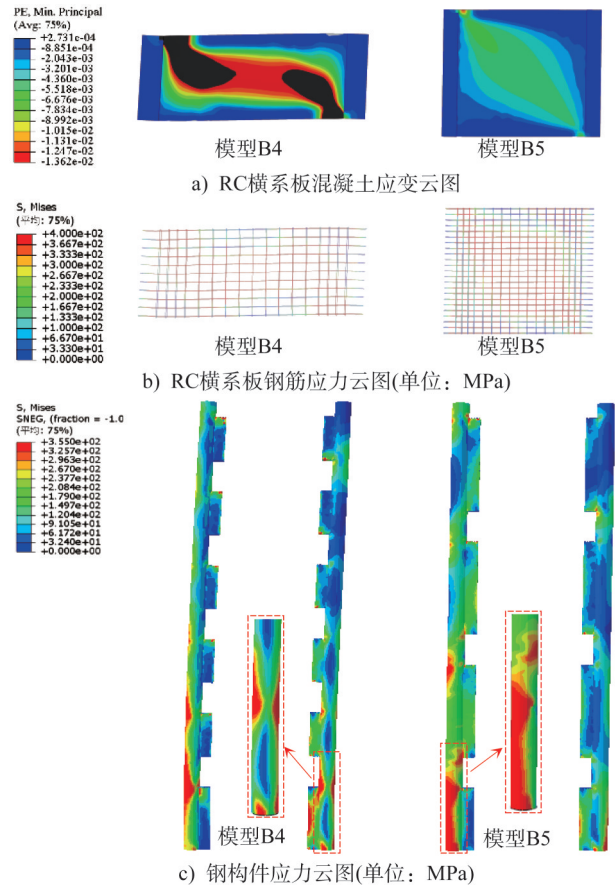


图 11 模型 B4、B5 在 D 点时的应变及应力云图
Fig. 11 Strain and stress contours of model B4 and B5 at piont D

延性与板高呈负相关。

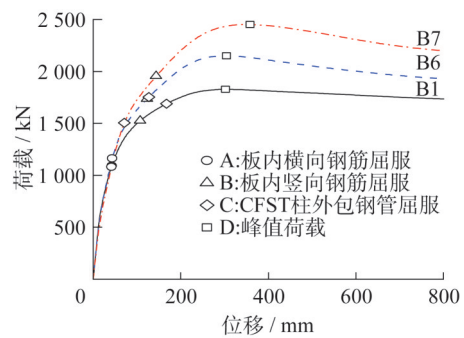


图 12 模型 B1、B6、B7 荷载-位移曲线
Fig. 12 Load-displacement curves for model B1、B6 and B7

如图 13 所示，模型 B6 和 B7 的 RC 横系板均发生了沿对角的剪切损伤，且二者混凝土与钢筋的塑性发展程度接近。与基准模型 B1 相比，在配板率相同的情况下，随着板高度的增加，柱肢的损伤更为显著。对于板高为 6 000 mm 的模型 B7，其左侧以拉应力为主的柱肢底部出现大面积钢管屈服，且上下板间的柱肢均发生不同程度

的受剪损伤破坏。

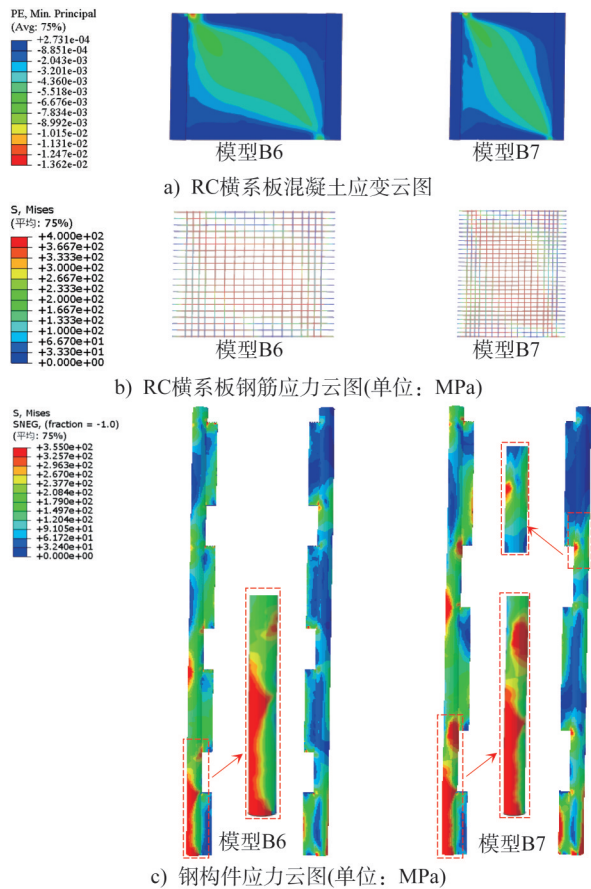


图 13 模型 B6、B7 在 D 点的应变及应力云图

Fig. 13 Strain and stress contours of model B6 and B7 at point D

综上,在相同配板率下,不同RC横系板的布置方式对体系抗侧刚度的影响较小,但会改变体系抗侧承载力与损伤破坏模式。双柱间横系板配置间距更大且高度更高(h/d 为定值0.5)的模型具有更高的承载力,但更容易发生CFST柱肢的破坏,延性偏低。实际设计中,应通过改变配板率来提高体系抗侧性能,RC横系板抗剪强度的设计要充分考虑板间柱肢的强度与变形性能。

4 结论

本文对装配式CFST柱-预制RC横系板格构式高墩体系的静力推覆性能进行了有限元模拟与参数分析,得到以下结论:

(1) 所提出新型装配式节点能有效保证预制RC横系板与CFST柱肢的可靠连接与传力,所有模型在峰值荷载下连接钢接头仅发生局部屈服,节点设计合理。

(2) 合理设计的RC横系板能与CFST柱肢协同受力,有效提升了体系的抗侧刚度与承载力,且塑性损伤发展充分,改善了体系的耗能能力与延性。

(3) RC横系板沿墩高的配板率是影响体系抗侧刚度与承载力的最重要因素,实际工程中可通过改变该参数合理调整体系的抗侧性能,满足不同的设计需求。

(4) 当RC横系板间距过大时,体系抗侧刚度和承载力退化显著,CFST柱肢稳定性差,易形成独立的塑性铰,体系协同抗侧能力差,故而建议设计板间距小于3倍柱直径。

(5) 当RC横系板高度过大时,虽然体系抗侧承载力得以提高,但CFST柱肢较早屈服,且板间柱肢呈现剪切破坏趋势,不利于结构抗震。实际设计中,应合理控制RC横系板的高度,避免CFST柱肢过早屈服和发生局部剪切破坏。

参考文献:

- [1] OU Z J. The practice of concrete filled steel tube piers to bridges: A review [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405/406/407/408: 1602-1605. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.405-408.1602.
- [2] 杨有福, 刘敏. 格构式钢管混凝土构件抗震性能研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 10-20. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.12.002.
YANG Youfu, LIU Min. Progress of research on seismic behavior of concrete-filled steel tube latticed members [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 10-20. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.12.002. (in Chinese)
- [3] 欧智菁, 王金泽, 林建茂, 等. 格构式高墩连续梁桥设计参数抗震适用性研究[J]. 福建工程学院学报, 2019, 17(3): 230-235. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4348.2019.03.005.
OU Zhijing, WANG Jinze, LIN Jianmao, et al. Study on seismic applicability of design parameters of laced high-pier continuous-beam bridge [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2019, 17(3): 230-235. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4348.2019.03.005. (in Chinese)
- [4] 欧智菁, 陈盛富, 吴庆雄, 等. 四肢变截面钢管混凝土格构柱恢复力模型计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(5): 77-89. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.05.008.
OU Zhijing, CHEN Shengfu, WU Qingxiong, et al. Calculation method of restoring force model of four-element variable cross-sectional concrete filled steel tubular laced column [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(5): 77-89. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.05.008. (in Chinese)
- [5] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.05.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2014 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 1-96. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.05.001.

- (in Chinese)
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001. (in Chinese)
- [7] 邓萱奕. 钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
DENG Xuanyi. Study on the seismic performance of concrete filled steel tubular lattice column [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [8] HUANG Y F, BRISEGHHELLA B, ZORDAN T, et al. Shaking table tests for the evaluation of the seismic performance of an innovative lightweight bridge with CFST composite truss girder and lattice pier [J]. Engineering Structures, 2014, 75: 73-86. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.039.
- [9] HUANG F Y, QIAN H M, YU G, et al. Finite element analysis on mechanical performance of concrete-filled steel tubular latticed column with initial stress [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2015, 9(2): 41-46. DOI: 10.1061/jhtrcq.0000439.
- [10] HUANG Z, JIANG L Z, ZHOU W B, et al. Studies on restoring force model of concrete filled steel tubular laced column to composite box-beam connections [J]. Steel and Composite Structures, 2016, 22(6): 1217-1238. DOI: 10.12989/scs.2016.22.6.1217.
- [11] YUAN H H, WU Q X, HUANG Y F, et al. Experimental and theoretical studies on the seismic performance of CFST battened built-up column piers [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110099. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.110099.
- [12] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平缀管式等截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验与有限元分析[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 226-235. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2015.05.0373.
YUAN Huihui, WU Qingxiong, CHEN Baochun, et al. Aseismic performance test and fem analysis of uniform sectional cfst lattice column with flat lacing tubes [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 226-235. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.05.0373. (in Chinese)
- [13] 晏巧玲, 牟廷敏, 范碧琨, 等. 钢管混凝土复合短柱极限承载力有限元分析[C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2012.
YAN Qiaoling, MOU Tingmin, FAN Bikun, et al. Finite element analysis of ultimate bearing capacity of steel-concrete composite short columns[C]//Proceedings of the 20th National Bridge Academic Conference. Beijing: China Communications Press, 2012.(in Chinese)
- [14] CHEN B C, LAI Z C, YAN Q L, et al. Experimental behavior and design of CFT-RC short columns subjected to concentric axial loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(11): 04017148. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001879.
- [15] YADAV R, YUAN H H, CHEN B C, et al. Experimental study on seismic performance of latticed CFST-RC column connected with RC web [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 126: 258-265. DOI:10.1016/j.tws.2017.11.043.
- [16] TIAN T, QIU W L, ZHANG Z. Behaviour of steel tube reinforced-concrete short bridge columns under cyclic loading [J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 70(22): 1157-1174. DOI:10.1680/jmacr.17.00332.
- [17] 邱文亮, 胡哈斯, 田甜, 等. 影响钢管混凝土组合桥墩抗震性能的结构参数[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(5): 889-898. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2019.05.009.
QIU Wenliang, HU Hasi, TIAN Tian, et al. Structural parameters affecting seismic behavior of concrete-filled steel tube composite piers [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(5): 889-898. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2019.05.009. (in Chinese)
- [18] 邱文亮, 田甜, 张哲. 反复荷载作用下钢管混凝土组合桥墩抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 156-164, 183. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2019.17.021.
QIU Wenliang, TIAN Tian, ZHANG Zhe. Experimental study on the seismic behavior of steel tube reinforced concrete bridge columns under cyclic loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 156-164, 183. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.17.021. (in Chinese)
- [19] 袁辉辉, 程军, 吴庆雄, 等. 钢管混凝土混合柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2025, 42(3): 167-180. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2022.11.1014.
YUAN Huihui, CHENG Jun, WU Qingxiong, et al. Experimental study on seismic performance of CFST hybrid columns [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(3): 167-180. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2022.11.1014. (in Chinese)
- [20] ACI 318R-95 Building code requirements for structural concrete and commentary[S].
- [21] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007: 106-110.
HAN Linhai. Concrete-filled steel tubular structure: Theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 106-110. (in Chinese)
- [22] 丁发兴, 余志武, 欧进萍. 混凝土单轴受力损伤本构模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(4): 70-73. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2008.04.016.
DING Faxing, YU Zhiwu, OU Jinping. Damage constitutive model for concrete under uniaxial stress conditions [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(4): 70-73. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2008.04.016. (in Chinese)

- [23] 孙颖,卓卫东,房贞政. 规则桥梁抗震性能水准的定义及其量化描述[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(5): 104-112. DOI:10.13197/j.eeev.2011.05.011.
SUN Ying, ZHUO Weidong, FANG Zhenzheng. Definition and quantified description of seismic performance levels for regular bridges [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31 (5) : 104-112. DOI: 10.13197/j.eeev.2011.05.011.(in Chinese)
- [24] ZHOU X H, WANG X D, GU C, et al. Seismic behavior of a novel prefabricated thin-walled CFST double-column pier system for simple on-site assembly[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183: 110388. DOI:10.1016/j.tws.2022.110388.