

# 灌浆套筒混合连接装配式方柱墩 偏压性能试验

夏樟华<sup>1</sup>, 林龙镁<sup>2</sup>, 林上顺<sup>3</sup>, 张伟<sup>4</sup>, 姜绍飞<sup>1</sup>

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 中国电建集团福建省电力勘察设计院有限公司, 福建 福州 350003; 3. 福建工程学院福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118; 4. 福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建 福州 350025)

**摘要** 为提高灌浆套筒连接节段拼装桥墩的整体受力性能, 提出内置钢管的灌浆套筒接头连接节段拼装方柱墩, 并对其偏压性能进行研究。**方法** 以钢管长度、直径及壁厚等为参数, 设计了8个拼装桥墩试件, 研究节段拼装桥墩在大小偏压作用下的损伤机理和受力性能。**结果** 采用混合接头的装配式桥墩在偏压作用下破坏位置主要在桥墩中下部, 随着钢管长度的增加上移而逐渐接近整体现浇桥墩, 且破坏时钢管屈服。钢管长度和直径的增加可以有效提高装配式桥墩试件的承载力, 采用混合接头连接装配式桥墩在小偏压和大偏压作用下竖向承载力最大分别比现浇桥墩提高了21.6%和62.2%。**结论** 考虑内置钢管作用, 提出小偏压作用下竖向承载力计算修正公式, 可为内置钢管的混合接头连接节段拼装桥墩的偏压计算提供参考。

**关键词** 拼装桥墩; 灌浆套筒; 内置钢管; 偏压试验; 承载力

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Experimental Study on Bias Compressive Performance of Square Column Piers with Grouting Sleeves Hybrid Joints

XIA Zhanghua<sup>1</sup>, LIN Longmei<sup>2</sup>, LIN Shangshun<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>4</sup>, JIANG Shaofei<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, China, 350108; 2. Power China Fujian Electric Power Engineering Co. Ltd., Fuzhou, China, 350003; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, China, 350118; 4. Fujian Academy of Building Research Co. Ltd., Fuzhou, China, 350025)

**Abstract:** In order to improve the whole mechanical performance of the assembled piers connected

收稿日期: 2021-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678156); 福州市科技成果转化项目(2020-GX-18); 福建省科技计划引导性项目(2018Y0021)

作者简介: 夏樟华(1980—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事预制拼装桥梁等方面研究。

with grouting sleeves, a hybrid joint with built-in steel pipes to connect the assembled piers was proposed. In this paper, the length, diameter and wall thickness of the steel pipe were adopted as the experimental parameters. Eight assembled pier specimens were designed to study the damage mechanism and mechanical performance of segmental assembled pier under large and small bias. The results show that the failure location of the assembled pier with hybrid joints mainly appeared in the middle and lower part of the pier under the action of eccentric load. With the increase of steel pipe length, it moved up and gradually approached the failure location of the integral cast-in-place pier, and the steel pipe yielded when the pier failed. The increase of steel pipe length and diameter can effectively improve the load capacity of assembled pier specimens. The maximum axial load capacity of assembled bridge pier connected with hybrid joints was 21.6% and 62.2% larger than that of the cast-in-place pier. Considering the effect of the built-in steel pipe, a modified formula for calculating the axial load capacity under small eccentric load was proposed, which can provide a reference for the calculation of the assembled bridge pier with the built-in steel pipe under the eccentric load.

**Key words:** assembled pier; grouting sleeve; built-in steel tube; eccentric pressure test; bearing capacity

相对传统现浇桥墩,节段拼装桥墩具有施工周期短、交通干扰小等优势,因而在国内外桥梁建设中得到了广泛应用。在预制拼装桥墩的建造中,灌浆套筒是一种最常用的节段连接方法,其优点是连接简单、现场施工时间短且造价较低<sup>[1]</sup>。灌浆套筒接头是由专门加工的钢套筒、配套灌浆料和钢筋组装的组合物,在连接钢筋时注入快硬无收缩灌浆料,依靠材料之间的黏结咬合作用来连接套筒与钢筋。灌浆套筒联接构造的特点是,它能够保证节段间耗能钢筋的“一对一”等强连接<sup>[2-5]</sup>。然而,这种连接方法仅保证了节段钢筋的连接,混凝土在接缝处不连续。现有试验表明,使用灌浆套筒连接的预制拼装桥墩在强度和位移延性等指标上低于现浇桥墩,其损伤部位集中在接缝<sup>[6-8]</sup>。

为了改善接头处的力学性能,欧智菁等<sup>[9]</sup>在灌浆套筒连接的基础上,对内置钢管剪力键的混合连接装配式桥墩进行了抗震性能试验,结果表明其抗震性能优于整体现浇墩和灌浆套筒连接的装配式桥墩。然而,对于这种新型拼装桥墩的受压性能,尤其是偏压作用下的力学性能还缺乏认识。目前关于墩柱偏压性能的研究主要是针对整体式的钢

筋混凝土墩柱、加固柱以及钢管混凝土墩柱<sup>[10]</sup>等,关于节段拼装桥墩静力性能的研究数量较少。高聪等<sup>[11]</sup>对同时使用凹槽和预应力筋连接的节段拼装桥墩进行静载试验,结果表明节段拼装桥墩在静载作用下的破坏开始于桥墩的受拉侧,而最终的破坏形态为受压区混凝土被压碎。吴威业等<sup>[12]</sup>将试件分为平接缝试件、阳齿阴齿组合试件,研究了装配式桥墩中拼接处的抗剪性能。王志强等<sup>[13-15]</sup>研究了灌浆套筒连接的装配式桥墩试件的抗剪性能,发现灌浆套筒连接的节段拼装桥墩的抗剪性能接近于整体现浇桥墩。目前节段拼装桥墩的静力研究还未涉及灌浆套筒连接的节段拼装桥墩在偏压作用下的力学性能。

新型混合连接装配式桥墩,除了灌浆套筒外,还增加了内置钢管剪力键,内插钢管的作用类似于型钢混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)。型钢与混凝土之间的粘结主要由化学胶结力、摩擦阻力和机械咬合力三部分组成<sup>[16]</sup>。在加载后期,型钢和混凝土存在相对滑移的情况,其相对滑移随着偏心距的增大而增大<sup>[17]</sup>。由于配置了型钢,与普通的钢筋混凝土相比,型钢混凝土柱具有更

高的承载力<sup>[18]</sup>。型钢对核心区混凝土提供连续的约束,改善核心区混凝土的受力性能<sup>[19-20]</sup>,在偏心受压条件下,其破坏机理取决于约束条件,约束不坏,核心混凝土很难破坏<sup>[21]</sup>。由于所研究的节段拼装桥墩,其内插的钢管并非贯通于墩柱全高,并配置了灌浆套筒,在构造和受力机理上,与型钢墩柱以及节段拼装桥墩都存在一定的差异,已有的研究结论并不完全适用。因此,需要对这种混合式接头连接的装配式桥墩开展偏压性能试验,研究其在偏压状态下的力学性能、损伤机理以及破坏模式,为相关工程应用提供参考。

## 1 试验

### 1.1 构件设计

试验包括两组试件,ZT组为整体现浇混凝土桥墩,GT组为混合接头连接装配式桥墩,GT组按照不同的钢管尺寸分为GTA~GTD。GT组试件制作严格遵循节段拼装桥墩施工流程,分别预制墩身和承台后进行拼装灌浆。

试验构件编号及主要设计参数见表1。10个偏压试件采用统一的截面尺寸,所有构件统一配筋。

表1 试验构件主要设计参数				
Table 1	Design parameters of the tested specimens			
试件编号	钢管高度/ mm	钢管直径 <i>D</i> /mm	钢管壁厚 <i>T</i> /mm	偏心距/ mm
ZT-25	—	—	—	25
GTA-25	500	114	4	25
GTB-25	500	80	4	25
GTC-25	750	114	4	25
GTD-25	500	114	16	25
ZT-105	—	—	—	105
GTA-105	500	114	4	105
GTB-105	500	80	4	105
GTC-105	750	114	4	105
GTD-105	500	114	16	105

墩柱截面长×宽为250 mm×250 mm,墩柱有效高度为1 400 mm。综合考虑钢管埋置长度、承台钢板位置以及墩柱有效高度等因素,将试件承台长×宽×高设计为600 mm×600 mm×500 mm。

钢管与灌浆套筒预埋于桥墩下端部,其中钢管伸出墩身250 mm。承台预埋与灌浆套筒相对应的钢筋,并设置与钢管相对应的凹槽。在拼接过程中,保证承台纵筋准确插入于墩柱处的灌浆套筒后,进行灌浆施工。节段拼装桥墩试件具体尺寸如图1和图2所示。

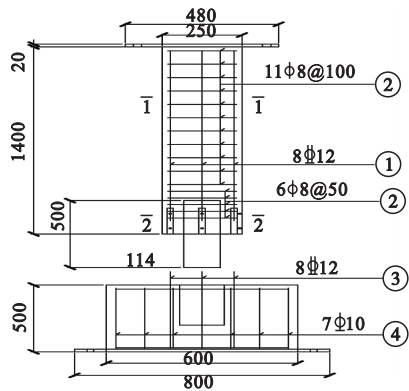


图1 拼装桥墩试件立面图

Fig. 1 Elevation of assembled pier test piece

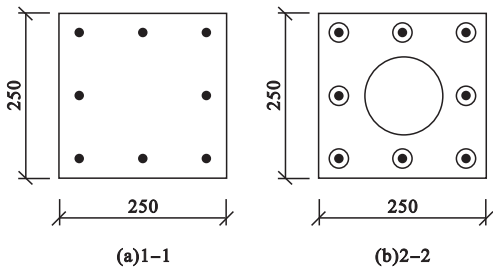


图2 试件剖面图

Fig. 2 Section of test piece

### 1.2 材料性能和试验加载

构件采用C35混凝土,实测立方体抗压强度为39.0 MPa。纵筋采用8根直径为12 mm的HRB400热轧带肋钢筋,箍筋采用直径为6 mm的HPB300光圆钢筋,箍筋间距为100 mm,墩底箍筋加密区高度为

300 mm,加密区箍筋间距为 50 mm。节段拼装桥墩试件中的灌浆套筒采用《合成切割液》(GB/T6144—2010)φ12 型全灌浆套筒,灌浆料采用 CGMJM-VI 型高强灌浆料(套筒灌浆专用);无缝钢管由 Q235 级钢材加工而成,实测材料力学性能见表 2。

表 2 钢材实测力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of steel bars

材料类型	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
Φ12 纵筋	415	561
Φ 6 箍筋	321	411
Q235 钢材	279	402

为避免出现应变片破损导致试验数据失效等偶然性试件,本次试验对应变片的布置采取中心对称布置的方式,钢筋和混凝土应变片的具体位置见图 3。在桥墩中部沿 E、W 方向布置位移计。试验加载采用 5 000 kN 压力机,加载装置见图 4。

的压溃位置为桥墩中下部,拼装试件的典型破坏形态如图 5 所示(GTD-105 构件)。



图 4 加载装置布置图

Fig. 4 Schematic diagram of test device

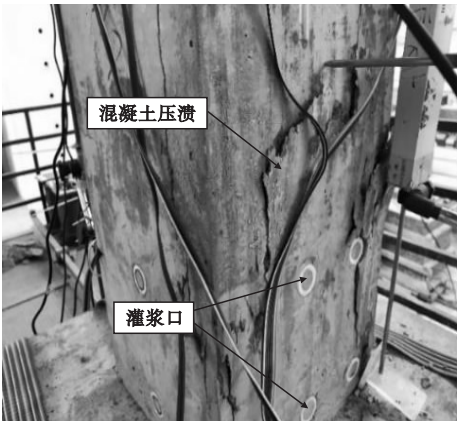


图 5 拼装试件破坏模式

Fig. 5 Failure mode of assembled specimen (GTD-105)

图 6 和图 7 给出了试件 W 侧(即受压侧)的试件破坏形态图。如图所示,拼装构件的最终压溃位置位于钢管的上端部附近,因此构件的破坏发生位置取决于内置钢管的长度。在小偏压构件中,GTA-25、GTB-25 和 GTD-25 三个墩柱的钢管长度一致,裂缝分布位置比较接近,最终破坏位置位于桥墩下部,也就是钢管的上端部附近(见图 6)。而 GTC-25 试件中的内置钢管长度更大,其最终破坏位置在柱中,最接近整体现浇构件的破坏模式。大偏压构件的破坏情况与小偏压构件基本一致(见图 7)。

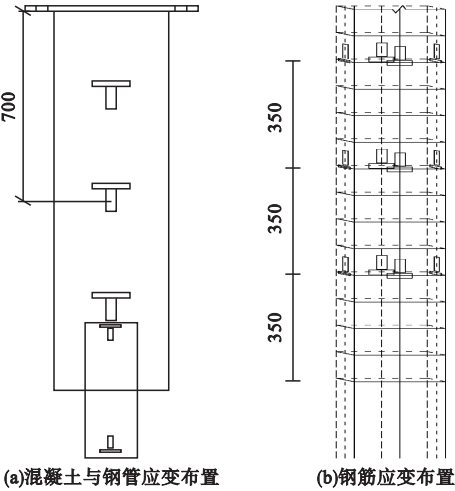


图 3 应变片布置示意图  
Fig. 3 Layout of strain gauges

2 试验结果

2.1 试件破坏形态

拼装试件的破坏模式与现浇桥墩基本一致,偏压作用下各个墩柱受压侧混凝土被压溃,但压溃位置存在显著区别。现浇桥墩的混凝土压溃位置在桥墩中上部,而拼装桥墩



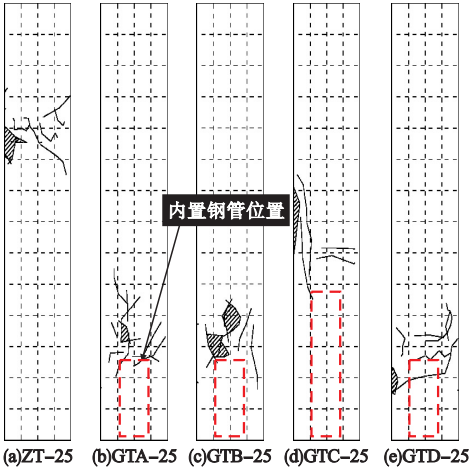


图6 小偏压试件破坏形态

Fig. 6 Failure modes of tested specimens under small eccentric compression

根据破坏形态比较发现,通过增大内置钢管长度可以改变装配式墩的破坏形态,GTC-25 和 GTC-105 试件的破坏位置最接近整体现浇构件,说明内置钢管长度的增大可以提升装配式墩的整体受力性能。试件 GTA-25、GTB-25 和 GTD-25,以及试件 GTA-105、GTB-105 和 GTD-105 的破坏部位接缝位置相接近,体现出了装配式墩的破坏特点。

2.2 荷载-竖向位移曲线

构件荷载-位移曲线如图8所示。从图

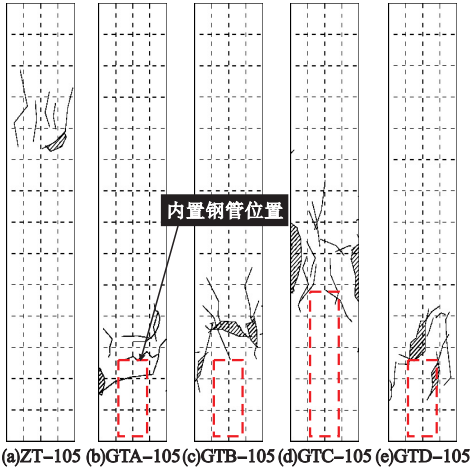


图7 大偏压试件破坏形态

Fig. 7 Failure modes of tested specimens under big eccentric compression

中可以看出,小偏压作用下现浇墩的初始刚度略大于装配式墩,其原因在于装配式墩存在接头,整体性降低,在加载初期接头处产生较大的位移,导致初始轴向刚度减小。同时由于接缝降低了装配式墩的整体性,导致峰值位移增大且均大于现浇墩,但是大偏压作用下现浇墩初始轴向刚度与装配式墩较为接近。内置钢管使得混合连接装配式墩的局部纵向配筋率提高,提升了装配式墩的承载力。

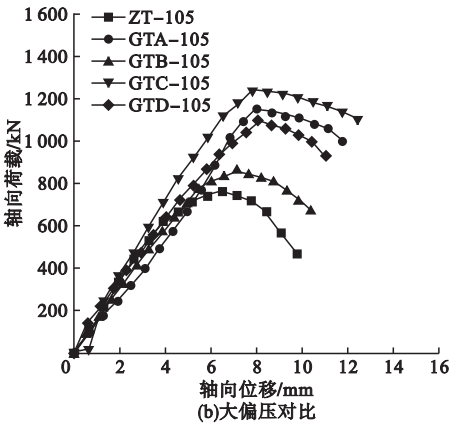
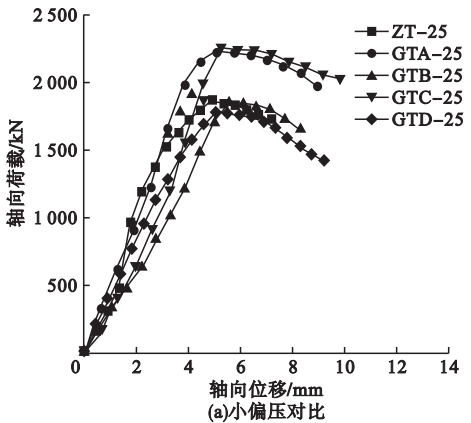


图8 荷载-竖向位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of load-vertical displacement curves

比较现浇墩和装配式墩竖向承载能力(见表3)。在小偏压作用下,装配式墩承载力与现浇墩的比值为0.962~1.216,在大偏

压作用下,装配式墩竖向承载力与现浇墩的比值为1.129~1.622。总体来看,增加内置钢管的装配式墩的承载力接近或大于现浇桥

墩,混合连接效果良好。

表 3 偏压试件实测极限承载力

Table 3 Measured ultimate bearing capacity of eccentric compression specimen

试件	极限承载力/ kN	与整体构件的 比值
ZT-25	1 847. 1	1. 000
GTA-25	2 224. 3	1. 204
GTB-25	1 842. 1	0. 997
GTC-25	2 247. 1	1. 216
GTD-25	1 776. 8	0. 962
ZT-105	765. 6	1. 000
GTA-105	1 153. 6	1. 507
GTB-105	864. 8	1. 129
GTC-105	1 241. 6	1. 622
GTD-105	1 096. 6	1. 432

进一步比较不同参数对承载力的影响,内置钢管直径的增大对试件极限承载力有明显的提高,试件 GTA-25、GTA-105 比试件 GTB-25、GTB-105 的极限承载力提高了

20. 7% 和 33. 4%。随着内置钢管长度的增加,试件的承载力也有相应的提高,试件 GTC-25、GTC-105 比试件 GTA-25、GTC-105 的极限承载力提高了 1. 1% 和 7. 6%。但在内置钢管直径和长度相同的情况下,钢管壁厚增大对试件大小偏压下承载力的影响并不明显。

2.3 荷载 - 混凝土应变曲线

测得桥墩高度 1/2 处的竖向压应变和横向拉应变如图 9 所示。从图中可以看出,在加载初期,混凝土的应变呈线性增长。当混凝土进入塑性阶段,荷载约为峰值荷载的 80% 时,混凝土的应变与荷载不再呈线性关系。试件发生破坏时,破坏位置四周混凝土压碎崩裂,应变增长速度加快,混凝土的峰值应变基本都超过了 0. 002,极限压应变超过 0. 003 3,使得混凝土的塑性性能得到充分发挥。说明混合连接装配式墩在大小偏压作用下混凝土都达到了极限压应变,混凝土压碎。

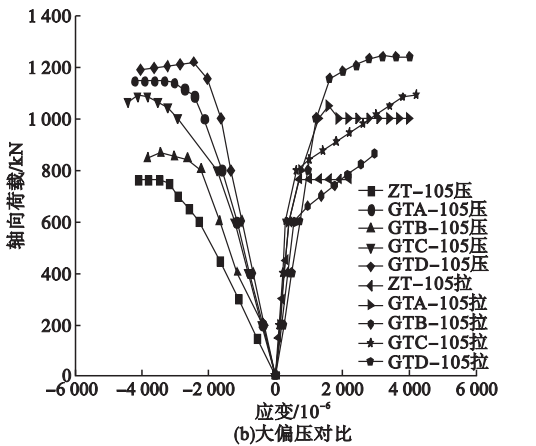
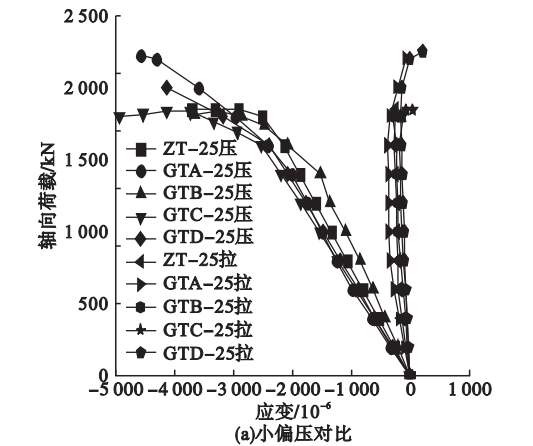


图 9 荷载 - 混凝土应变曲线  
Fig. 9 Load-concrete strain curves

受压混凝土的峰值应变在一定程度上随着内置钢管的加入而增大,其中增大钢管长度的试件,即 GTC 组试件增加最为明显,小偏压作用下 GTC 组试件受压侧混凝土峰值应变较整体现浇墩增加了 33%,大偏压作用下受压侧混凝土应变增加了 9%。说明内置一定长度的钢管可以提高装配式墩的抗压强

度,与承载力提高的规律是一致的。

2.4 荷载 - 钢筋应变曲线

试件荷载 - 纵筋应变关系曲线见图 10。从图中可以看出,加载初始阶段荷载和钢筋的应变增长较为稳定,基本呈线性变化;随着荷载的逐步提升,混凝土率先进入塑性状态,随后曲线的斜率逐渐变缓,说明钢筋也进入

了塑性阶段。对于小偏压构件,受压侧钢筋不发生屈服,而大偏压构件远侧钢筋均受拉

屈服,符合大偏压桥墩的破坏模式。

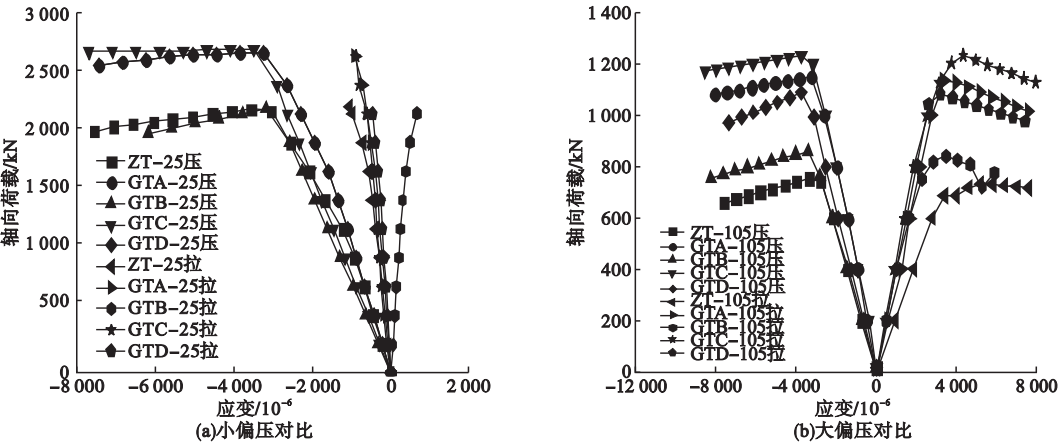


图 10 荷载-钢筋应变曲线

Fig. 10 Load-reinforcement strain curves of specimens

桥墩发生破坏时,不论大小偏压,所有构件的钢筋都达到了屈服,钢筋的压应变基本超过混凝土极限压应变 0.003 3,部分钢筋应变甚至达到 0.006。说明在破坏时,现浇墩和混合连接装配式墩的钢筋都达到极限压应变或拉应变,钢管厚度的改变对纵筋荷载-应变曲线的影响并不显著。

3 承载力分析

当前国内对于节段拼装桥墩承载力计算方面的研究较少,没有完整的规范适用于节段拼装桥墩的承载力计算,在 2015 年颁布的《预制拼装桥墩技术规程》(DGTJ 08—2160—2015)中,对于灌浆套筒等连接的装配式桥墩的相关计算规定如下:当节段拼装桥墩中的灌浆套筒、金属波纹管、灌浆料以及砂浆垫层等材料满足规范中的各项要求时,装配式桥墩的承载力计算可以参照国家现行标准技术标准《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)。

将实测和计算的偏压承载力结果列于表 4,规范承载力用  $N_{cl}$  表示,节段拼装桥墩偏压试件规范计算值  $N_{cl}$  与试验值  $N_u$  的比值在 0.65~0.97,平均值  $\mu$  为 0.81。通过以上数据可知,偏压作用下混合接头连接装配式桥

墩实测承载力明显大于规范计算值,因此提出修正公式计算。根据试验结果,钢管参与偏压受力且发生屈服,故考虑钢管截面面积及长度对承载力的影响,修正后承载力用  $N_{c2}$  表示,修正计算公式见式(1)和式(2)。

大偏心受压构件竖向承载力计算公式为 
$$N_u = \alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' - f_y A_s + n(f_{sd}' A_1' - f_{sd} A_1) \tag{1}$$

小偏心受压构件竖向承载力计算公式为 
$$N_u = \alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' - \sigma_s A_s + n(f_{sd}' A_1' - f_{sd} A_1) \tag{2}$$

式中:  $f_c$   $f_y$   $f_y'$  分别表示混凝土轴心抗压强度以及受拉侧与受压侧钢筋强度的设计值;  $A_s$  和  $A_s'$  分别表示受拉、受压钢筋的截面面积;  $\alpha_1$  表示矩形应力的强度与受压区混凝土最大应力  $f_c$  的比值;  $n$  表示钢管长度与墩柱计算长度之比;  $f_{sd}'$   $f_{sd}$  表示受压、受拉侧钢管的抗压强度设计值;  $A_1'$   $A_1$  表示受压、受拉侧钢管横截面面积,以中性轴为界限取值,按拉压侧实际面积取值。

试件承载力计算结果见表 4。小偏压构件的规范计算值  $N_{c2}$  与实测值  $N_u$  的比值为 0.80~1.10,平均值为 0.92,具有较好的计算精度,提出承载力计算修正公式可为内置钢管的混合接头连接节段拼装桥墩的小偏压设计

计算提供参考。对于大偏压构件,修正公式误差过大不能适用。大偏压构件存在较大的弯矩作用,内置钢管处于中心位置,对受力性能

影响较小,导致计算结果偏小。按照规范的计算结果精度相对更高,结果同样偏于保守。

表 4 偏压试件承载力试验结果和计算结果  
Table 4 Tested and calculation results of bearing capacities of specimens under eccentric compression

试件编号	试验值 $N_u/\text{kN}$	规范值 $N_{cl}/\text{kN}$	公式值 $N_{c2}/\text{kN}$	$N_{cl}/N_u$	$N_{c2}/N_u$
ZT-25	1 847. 1	1 715. 7	—	0. 93	—
GTA-25	2 224. 3	1 715. 7	1 784. 6	0. 77	0. 80
GTB-25	1 842. 1	1 715. 7	1 763. 3	0. 93	0. 96
GTC-25	2 247. 1	1 715. 7	1 853. 5	0. 76	0. 82
GTD-25	1 776. 8	1 715. 7	1 961. 1	0. 97	1. 10
ZT-105	765. 6	810. 1	—	1. 05	—
GTA-105	1 153. 6	810. 1	797. 8	0. 70	0. 69
GTB-105	864. 8	810. 1	797. 9	0. 93	0. 92
GTC-105	1 241. 6	810. 1	785. 6	0. 65	0. 63
GTD-105	1 096. 6	810. 1	766. 5	0. 74	0. 70

4 结 论

(1)在偏压状态下,各组拼装桥墩试件与整体现浇试件的破坏位置存在区别,整体现浇试件破坏位置位于墩柱中上部,而节段拼装试件破坏位置取决于内置钢管的长度。

(2)钢管传力效果良好,能够较好地与墩身混凝土协同工作,参与整体受压。偏压状态下,内置钢管长度越长,拼装桥墩的破坏形态越接近于现浇桥墩,说明增大钢管长度可以提高装配式墩整体性。

(3)随着内置钢管的加入,受压混凝土的峰值应变相应增大。同时,钢管的加入导致节段拼装桥墩在偏压下的极限承载力普遍大于现浇桥墩。钢管直径和长度越大,试件极限承载力越高,而钢管壁厚对试件承载力的影响并不明显。

(4)考虑钢管的作用,提出修正公式进行计算,小偏压作用下计算值精度较高,可为内置钢管的混合接头连接节段拼装桥墩的设计计算提供参考。对于大偏压构件,修正公

式误差过大,原因在于内置钢管处于装配式墩截面中心位置,在大偏压荷载下内置钢管对承载能力的提升作用不体现,按照现浇桥墩的承载力计算方法得到的计算结果总体也偏于保守。

参考文献

[ 1 ] 王志强,卫张震,魏红一,等. 预制拼装联接件形式对桥墩抗震性能的影响[J]. 中国公路学报,2017,30(5):74-80.  
( WANG Zhiqiang, WEI Zhangzhen, WEI Hongyi, et al. Influences of precast segmental connector forms on seismic performance of bridge pier [J]. China journal highway transportation,2017,30(5):74-80. )  
[ 2 ] KRAHL N W, DEMIR I K. Axial strength of grouted pile to sleeve connections [J]. Journal of structural engineering, 1985, 111 ( 4 ): 889-905.  
[ 3 ] LING J H, RAHMAN A B A, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load [J]. Construction & building materials,2012,33(8):90-98.  
[ 4 ] LING J H, RAHMAN A B A, IBRAHIM I S. Feasibility study of grouted splice connector under tensile load [J]. Construction and building materials,2014,50:530-539.  
[ 5 ] HABER Z B, SAIIDI M S, SANDERS D H. Behavior and simplified modeling of mechanical reinforcing bar splices [J]. ACI



- structural journal, 2015, 112(2):179.
- [6] AIDA H, TANIMURA Y, TADOKORO T, et al. Cyclic loading experiment of precast columns of railway rigid-frame viaduct installed with NMB splice sleeves [J]. Proceedings of the Japan concrete institute, 2005, 27(2):613-618.
  - [7] HABER Z B, SAIDI M, SANDERS D H. Seismic performance of precast column with mechanically spliced column-footing connection [J]. ACI structural journal, 2014, 111(3):639-650.
  - [8] 魏红一, 肖伟, 王志强, 等. 采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(7):1010-1016.  
(WEI Hongyi, XIAO Wei, WANG Zhiqiang, et al. Experimental study on seismic performance of precast bridge pier with grouted splice sleeve [J]. Journal of tongji university (natural science), 2016, 44(7):1010-1016.)
  - [9] 欧智菁, 谢铭勤, 秦志清, 等. 带钢管剪力键的装配式混凝土桥墩抗震性能研究[J/OL]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6):1169-1175.  
(OU Zhijing, XIE Mingqin, QIN Zhiqing, et al. Seismic performance test and FEM analysis of assembled concrete pier with sleeve and steel tube shear connector [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2021, 56(6):1169-1175.)
  - [10] 任庆新, 丁纪楠, 李明伦, 等. 中空钢管混凝土叠合柱偏压力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(1):35-42.  
(REN Qingxin, DING Ji'nan, LI Minglun, et al. Research on mechanical properties of hollow concrete-encased concrete filled steel tubes under eccentric compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(1):35-42.)
  - [11] 高聪. 节段预制拼装混凝土桥墩静力行为研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.  
(GAO Cong. Research on the static behavior of segmental precast concrete piers [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.)
  - [12] 布占宇, 吴威业. 预制拼装混凝土桥墩抗震性能拟静力循环加载试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1):42-50.  
(BU Zhanyu, WU Weiye. Experiment on seismic behavior of precast segmental concrete bridge piers under quasi-static cyclic loading [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2015, 32(1):42-50.)
  - [13] 王志强, 张杨宾, 蒋仕持. 套筒连接的预制拼装桥墩抗剪性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 46(6):767-775.  
(WANG Zhiqiang, ZHANG Yangbin, JIANG Shichi. Experimental study of shear performance of precast segmental bridge piers with grouted splice sleeve [J]. Journal of tongji university (natural science), 2017, 46(6):767-775.)
  - [14] LI T, QU H, WANG Z, et al. Seismic performance of precast concrete bridge columns with quasi-static cyclic shear test for high seismic zones [J]. Engineering structures, 2018, 166:441-453.
  - [15] GE J, YAN X, WANG Z. Seismic performance of prefabricated assembled pier with grouted sleeve and prestressed reinforcements [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2018, 18(2):42-52.
  - [16] BRYSON J O, MATHEY R G. Surface condition effect on bond strength of steel beams in concrete [J]. Journal proceedings, 1962, 59(3):397-406.
  - [17] 王彦宏, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 型钢混凝土偏压柱粘结滑移性能的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2003(3):217-220.  
(WANG Yanhong, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental analysis on the bond-slip properties of SRC eccentric loading columns [J]. Journal of Xi'an university of architecture & technology (natural science edition), 2003(3):217-220.)
  - [18] SHERKH S A, SHAH D V, KKOURY S S. Confinement of high strength concrete columns [J]. ACI structural journal, 1994, 91(11):100-111.
  - [19] EL T S, DEIERLEIN G G. Strength and ductility of concrete encased composite columns [J]. Journal of structural engineering, 1999, 129(9):1009-1019.
  - [20] 齐宝欣, 阎石, 张文新, 等. 爆炸作用下型钢混凝土柱的动力响应影响因素分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2):202-210.  
(QI Baoxin, YAN Shi, ZHANG Wenxin, et al. Influencing factor analysis on dynamic response of steel reinforced concrete column under blast loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(2):202-210.)
  - [21] 余琼, 陆洲导. 型钢混凝土偏压柱力学性能研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(6):34-38.  
(YU Qiong, LU Zhoudao. Research on the static performance of eccentric steel reinforced concrete column [J]. Architectural structure, 2009, 39(6):34-38.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)