

# 套筒连接预制拼装桥墩直剪性能试验研究

王志强<sup>1</sup>, 陈乐纯<sup>1</sup>, 吕昊<sup>2</sup>, 张涛<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 为探究套筒连接预制拼装桥墩的直剪性能和影响因素, 对拼接面增设剪力键、不同套筒位置的预制拼装桥墩试件进行直剪试验。分析不同拼接缝构造桥墩的损伤发展、破坏模式, 探讨预制拼装桥墩的抗剪机理并将实测值与既有抗剪公式计算结果进行比较。结果表明: 矮桥墩直剪试验有 2 种破坏模式, 即以斜裂缝开展为主的破坏和以拼接缝滑移为主的破坏; 套筒设置在桥墩底部会改变桥墩的破坏模式, 使得试件破坏以拼接缝滑移为主; GB50010—2010 中的抗剪公式可以较合理地预测套筒连接预制拼装桥墩的抗剪强度。

**关键词:** 预制拼装桥墩; 直剪性能; 灌浆套筒; 直剪试验

**中图分类号:** U443.22

**文献标志码:** A

## Experimental Study of Direct Shear Performance of Precast Segmental Bridge Piers with Splice Sleeve

WANG Zhiqiang<sup>1</sup>, CHEN Lechun<sup>1</sup>, LÜ Hao<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** In order to study the influencing factors and direct shear performance of precast segmental bridge piers with splice sleeve, direct shear tests were conducted on precast segmental bridge piers with additional shear keys and different splice sleeve position. Then, the damage development and failure mode of models were analyzed. Finally, the shear mechanism of precast segmental bridge piers was discussed and the test results was compared with the calculated results of the existing shear formula. The results show that there are two failure modes in the direct shear test of low piers, namely, the failure mainly due to the development of diagonal cracks and the failure mainly due to the slippage of the splicing joint; the setting of the sleeve at the bottom of the pier will change the failure mode of the pier. As a result, the failure of the specimen is dominated by the slip of the

splicing joint; the shear formula in GB50010—2010 can reasonably predict the shear strength of the precast segmental bridge piers with splice sleeve.

**Key words:** precast segmental bridge piers; direct shear performance; grouted splice sleeve; direct shear test

预制装配施工技术具有现场工期较短、质量可控、安全性高、交通干扰低、对环境较为友好等优点。随着施工单位吊装、运输大型构件的设备不断普及, 国内外学者和工程人员在上部结构预制拼装的基础上进一步提出了桥梁全预制技术<sup>[1]</sup>, 而预制拼装桥墩就是其中的关键一环。由于相关试验研究与相应理论支撑的不足, 因此具有套筒连接的预制拼装桥墩在地震作用下的抗剪性能仍然是桥梁设计中的关键问题。

国内外学者开展了大量针对预制拼装节段梁的抗剪性能研究。Buyukozturk 等<sup>[2]</sup>的试验是 AASHTO 规范<sup>[3]</sup>公式的主要依据; 卢文良<sup>[4]</sup>在对节段预制体外预应力混凝土主梁设计进行系统理论研究时提出了节段预制梁的剪切性能问题; 宋守坛<sup>[5]</sup>通过参数统计回归提出了节段预制拼装梁各种形式拼接缝的截面抗剪承载力公式; 吴威业<sup>[6]</sup>对预应力筋连接预制节段桥墩的拼接缝抗剪性能展开了研究并在试验基础上提出了干接缝的抗剪承载力公式; Ahmed 等<sup>[7]</sup>评估了直剪荷载下节段预制箱形梁的抗剪性能; Yuan 等<sup>[8]</sup>对带键齿的环氧树脂接头节段预制梁进行了剪切试验; Liu 等<sup>[9]</sup>对采用超高性能混凝土接头的预制节段梁进行了直剪试验。

上述学者对节段梁的抗剪开展了较全面的研究, 可供套筒连接预制拼装桥墩拼接缝抗剪研究参考, 但套筒连接预制拼装桥墩拼接缝抗剪性能和机理与节段梁存在一定的差异, 主要差异是节段梁拼

收稿日期: 2022-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(51978511, 51778470)

第一作者: 王志强(1971—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: Wangzhiq@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

接缝界面的压应力与预应力筋张拉力有关,如果预应力筋屈服并发生混凝土局部压碎损伤,预应力筋中的预应力就可能发生损失,进而导致界面的压应力减小;套筒连接预制桥墩的压应力由上部结构自重产生,局部损伤不会导致拼接缝界面压应力减小。

速艳东等<sup>[10]</sup>为对比灌浆套筒连接预制拼装桥墩抗剪性能,对2个相同缩尺比的现浇和预制拼装桥墩模型进行拟静力试验。结果表明,预制桥墩与现浇桥墩破坏模式存在显著差异,但是具备与现浇桥墩相近的耗能能力及延性变形能力。同时,该团队对灌浆套筒连接预制拼装桥墩抗剪强度设计方法展开研究<sup>[11]</sup>,基于试验结果对现有桥墩抗剪强度设计公式的适用性和精度进行分析,并提出修正计算公式。Han等<sup>[12]</sup>为建立带有灌浆套筒预制柱的抗剪设计步骤,提出基于修正压力场理论的方法来评估套筒区域裂缝的发展,同时给出带有灌浆套筒预制柱抗剪强度的改进模型并进行试验验证。

王志强等<sup>[13]</sup>为了探究采用灌浆套筒连接预制拼装桥墩的抗剪性能和影响因素,对预制拼装桥墩试件及现浇混凝土桥墩试件进行了拟静力试验,试验中试件剪跨比为1.70、2.64。根据试验结果可知,灌浆套筒连接构造的预制拼装桥墩主要表现为弯剪破坏模式,变形能力和耗能能力良好,且与现浇试件抗剪性能相近。截面中心增设无黏结预应力筋可提高试件的抗剪承载力,并降低残余变形。

从上述研究看出,套筒连接预制拼装桥墩抗剪试验基本是针对剪跨比1.75及以上开展的,其破坏模式与现浇混凝土桥墩有显著不同,但破坏仍属于弯剪破坏,具有较好的延性性能。可以发现,现阶段套筒连接预制拼装桥墩抗剪性能的研究多数未讨论更趋向直剪的、有钢筋穿过的拼接缝抗剪问题,且从预制桥墩拼接缝角度出发研究抗剪性能的文献也较少。尽管预制拼装桥墩拼接缝的行为一定程度上可

以借鉴节段拼装主梁及剪力键齿直剪试验和理论分析的一些研究成果,但考虑到节段梁拼接缝抗剪行为与预制桥墩抗剪行为还是存在一定的差异,以及目前开展的套筒连接桥墩抗剪试验剪跨比较大,因此本研究通过设计剪跨比更小的套筒连接预制拼装桥墩试件和直剪加载方式,对套筒连接预制拼装桥墩耦合拼接缝的抗剪行为展开研究,调查各试件的典型破坏模式,探讨增设剪力键、不同套筒位置对预制拼装桥墩抗剪性能的影响。基于桁架理论、剪摩理论对传力机理和破坏模式进行了讨论,同时对既有规范中抗剪公式的适用性进行了分析,以期在实际工程设计提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计和制作

套筒连接预制拼装桥墩是指预制墩身节段与承台、盖梁或相邻墩身节段间通过灌浆套筒连接伸出的钢筋。该连接方式可避免现场浇注和张拉预应力筋,现场工作量少,施工所需时间较短。根据灌浆套筒连接构造的特点,当用于桥墩与承台连接时,灌浆套筒可以预埋在预制墩身底部或承台顶部<sup>[13]</sup>。

为研究预制拼装桥墩在直剪条件下的破坏模式以及各种构造细节对拼接缝界面剪切机理的影响,设计了3个不同拼接缝构造的预制拼装矮桥墩,试件的基本参数如表1所示,各试件构造尺寸如图1所示。试件桥墩的设计尺寸为530 mm×500 mm×500 mm,承台部分尺寸为1 600 mm×1 600 mm×1 600 mm。桥墩、承台截面中心与竖向施力中心位于同一轴线。试验过程中水平荷载沿530 mm边长方向施加,实际加载点位置距承台顶23 cm,剪跨比为0.43。

1号试件为套筒连接预制拼装矮桥墩,套筒设置

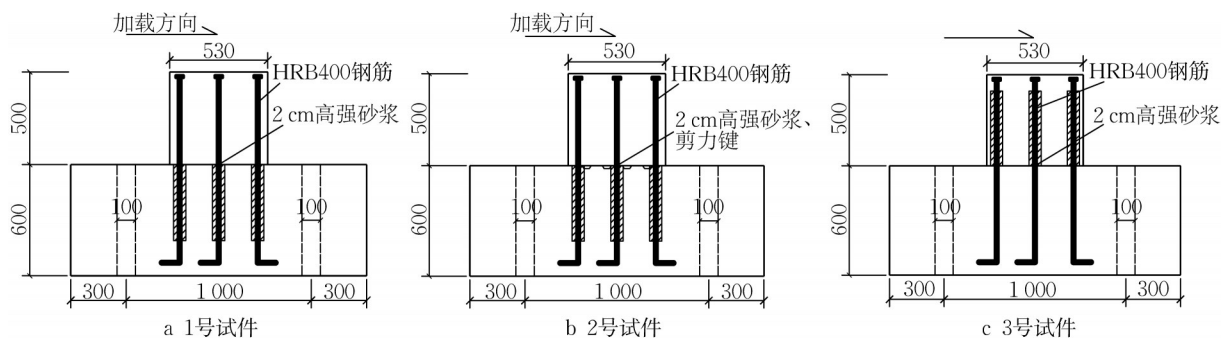


图1 试件构造示意图(单位:mm)

Fig.1 Geometry of pier specimens(unit:mm)

表 1 试件参数

Tab.1 Parameters of specimens

试件编号	垫层材料	有无剪力键	纵筋材料	套筒位置	轴压比/%
1号	高强砂浆	无	HRB400	承台顶	10.66
2号	高强砂浆	有	HRB400	承台顶	10.66
3号	高强砂浆	无	HRB400	墩底	10.66

在承台顶部,垫层材料为高强砂浆,拼接缝界面无剪力键齿;2号试件在1号试件的基础上于拼接缝界面增设剪力键,剪力键构造细节如图2所示;3号试件与1号试件的区别是将套筒设置在桥墩底部,其余均相同。

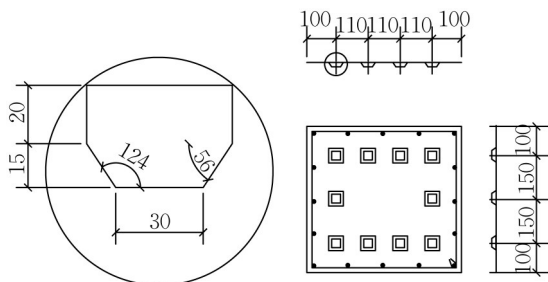


图 2 剪力键构造细节(单位:mm)

Fig.2 Shear key construction detail(unit:mm)

本试验矮桥墩均采用C40混凝土。1号—3号试件截面配筋设计如图3所示。3个试件纵筋为HRB400热轧带肋钢筋,纵筋穿过拼接缝并通过灌浆套筒连接;箍筋和拉筋均采用直径为8、10 mm的HPB300热轧光圆钢筋。

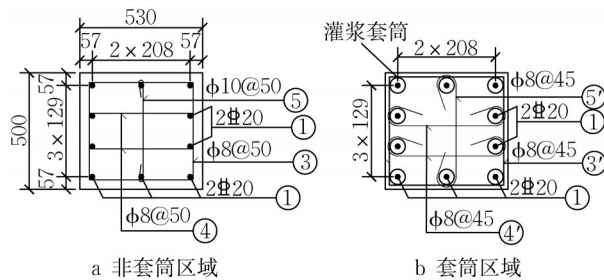


图 3 桥墩截面配筋设计(单位:mm)

Fig.3 Reinforcement details of pier specimens (unit:mm)

实测内容有墩身绝对位移、拼接缝相对滑移、钢筋和箍筋应变、试件承受的水平力与竖向力。试件位移计布置如图4所示,应变片布置如图5所示,图中SL代表纵筋编号。

### 1.2 试件加载与测量方案

预制拼装桥墩直剪试验装置如图6所示。竖向荷载由一台工作吨位为100 t的千斤顶施加于试件

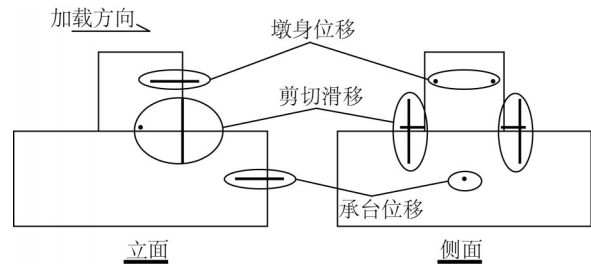


图 4 测量装置布置示意图

Fig.4 Measuring device arrangement

纵轴线上,竖向荷载为52.0 t(509.6 kN),对应轴压比为10.66%。水平荷载由一台工作吨位为300 t的千斤顶施加。试件加载采用力控制的加载制度。每级加载到预定水平力时持载,观察破坏现象并完成裂缝记录,逐级加载直至试件纵筋屈曲、断裂,箍筋断裂或混凝土压碎,加载结束。

1号—3号试件加载制度如图7所示。第一级为100 kN,此后每一级累加100 kN,持载3 min。由于本试验水平力较大,对1号试件加载时,为避免由试验器材、加载装置等原因引起的不安全因素,在1 000、1 300 kN两级加载后卸载至零,观察试验现象后继续加载。2号、3号试件在试验中无此卸载过程。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验现象描述方法

为了清晰地描述试件的损伤状态,基于构件层次定义损伤级别,考虑到构件的剪切破坏模式又分为以斜裂缝开展为主的剪切破坏和以拼接缝滑移为主的剪切破坏,表2、表3<sup>[14-15]</sup>按这2种破坏模式定义各级损伤状态。

根据表2和表3所列损伤级别分级,相同损伤级别下各试件破坏的表观现象描述如下:

(1)在损伤级别Ⅰ时,3个试件侧面底部均出现细小斜裂缝,裂缝倾斜角约为45°。另外,2号试件底部垫层和拼接缝处出现裂纹;3号试件加载面及其对侧底部拼接缝出现裂缝。

(2)在损伤级别Ⅱ时,1号和2号试件侧面均出现2~3条斜裂缝,裂缝宽度在0.2 mm左右,其中1号试件在加载面出现以加载点为中心的辐射裂缝,该裂缝与侧面斜裂缝贯通,并且第一根纵筋屈服;3号试件加载面及其对侧底部拼接缝贯通。

(3)在损伤级别Ⅲ时,1号和2号试件均沿着级别Ⅱ出现的斜裂缝发生混凝土劈裂,拼接缝张开并

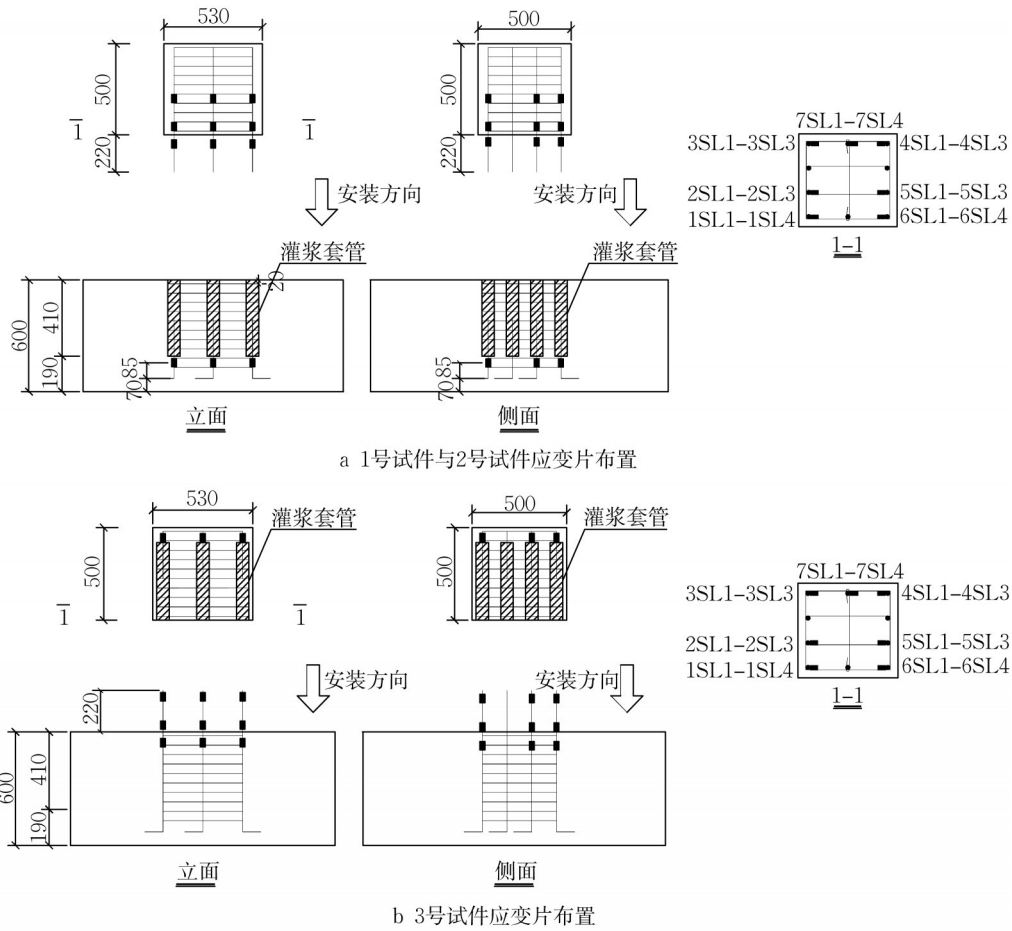


图5 试件应变片布置(单位:mm)

Fig.5 Strain gauge arrangement of specimens(unit:mm)

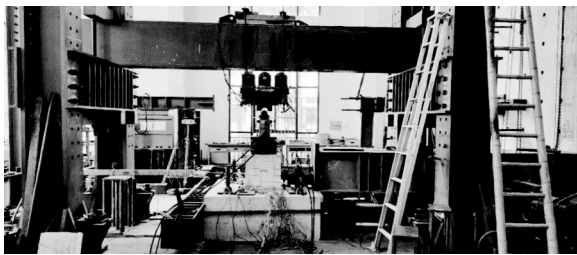


图6 试验加载装置

Fig.6 Experimental loading system setup

整体错动,桥墩底部开始出现滑移;2号试件一侧柱脚裂缝向上发展至顶部,另一侧柱脚混凝土碎裂;3号试件拼接缝相对承台滑移17 mm,试件出现很大倾角,拼接缝张开最大处达到5 cm,试件侧面产生细小裂缝,并且未扩展。

(4)在损伤级别IV时,1号和2号试件在加载过程中拼接缝滑移并迅速增大,承载力先下降后上升,新裂缝产生较少,原有裂缝宽度不断增大且上下贯通,混凝土保护层有脱落趋势;3号试件整体倾斜,部分钢筋从套筒中拔出。继续加载后承载力降低,试

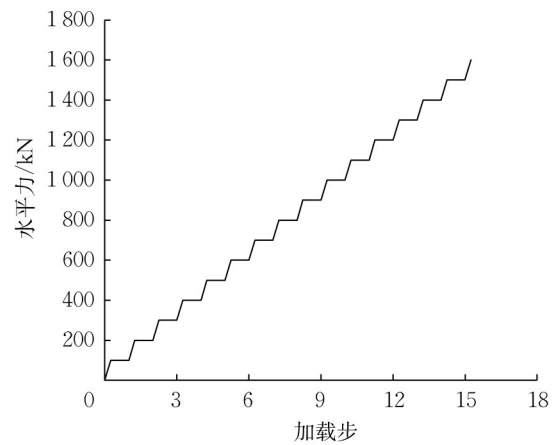


图7 试件加载制度

Fig.7 Specimen loading system

验结束。

(5)在损伤级别V时,1号和2号试件拼接缝的滑移继续发展,试件倾斜角较大。1号试件加载点以下混凝土呈板块状脱落,试件被斜裂缝分割;2号试件加载点附近及试件侧面混凝土均被压碎,保护层混凝土大面积脱落,箍筋断裂;3号试件在损伤级别

表2 基于构件层次的损伤级别定义(斜裂缝开展为主)

Tab.2 Definition of damage level based on component level (due to the development of diagonal cracks)

损伤级别	损伤状态	损伤现象描述	损伤现象的定性描述	损伤现象的定量描述
I	无损伤	出现斜裂缝	出现发丝般裂缝	裂缝几乎不可见
II	微小损伤	纵筋屈服、拼接缝开裂,斜裂缝开展	形成多条斜裂缝、拼接缝开裂,开始出现非线性变形	裂缝宽度<1 mm
III	中等损伤	混凝土沿斜裂缝碎裂	柱脚混凝土碎裂,拼接缝张开并开始大幅度滑移	承台顶部以上柱脚10 cm内混凝土保护层剥落
IV	严重损伤	贯通斜裂缝	主裂缝宽度很大,上下贯通,局部损伤区域混凝土剥落	桥墩滑移2~3 cm,斜裂缝宽度>1 cm
V	局部失效或倒塌	强度退化	箍筋断裂,混凝土压碎	

表3 基于构件层次的损伤级别定义(拼接缝滑移为主)

Tab.3 Definition of damage level based on component level (due to the slippage of splicing joint)

损伤级别	损伤状态	损伤现象描述	损伤现象的定性描述	损伤现象的定量描述
I	无损伤	出现拼接缝裂缝	拼接缝出现发丝般裂缝	裂缝几乎不可见
II	中等损伤	拼接缝裂缝贯通	桥墩开始滑移,出现少量斜裂缝	试件滑移<2 mm
III	严重损伤	拼接缝张开	拼接缝张开较大	试件滑移>15 mm,拼接缝张开>3 cm
IV	局部失效、倒塌	强度退化	试件整体倾斜,钢筋从套筒中拔出	

IV时试验已经结束,所以未识别到损伤级别V。

加载结束后,3个试件的最终破坏形态如图8所示。从图8可以看出,3个试件纵筋均严重变形、屈曲但未断裂。1号试件箍筋外鼓,2号试件箍筋断裂,3号试件箍筋较为完整。1号和2号试件加载面的加载点以下及边角处混凝土保护层脱落,加载面对侧的混凝土较为完好;3号试件拼接缝完全张开,裸露出的拼接缝界面混凝土比较光滑,试件整体翘起,钢筋从套筒中拔出。除加载面对侧的底部混凝土保护层部分挤碎外,其余各面混凝土比较完整。

## 2.2 水平力-位移曲线

试验获得的水平力-位移曲线反映了该试件的基本抗剪性能特点,包括极限抗剪强度、桥墩刚度变化和拼接缝滑移情况等。图9a-c为3个试件的实测水平力-位移曲线。

从图9可以看出,1号和2号试件是以斜裂缝开展为主的剪切破坏,整个直剪过程可划分为5个阶段,曲线有2个峰值点。阶段1为线性上升阶段,即从开始加载到损伤级别II,试件整体处于弹性阶段,此时桥墩抗剪刚度很大,水平力迅速增大;阶段2为非线性上升阶段,即从损伤级别II到损伤级别III,水平力非线性上升,构件整体刚度开始降低;阶段3为滑移-下降阶段,即损伤级别III到之后的第1个最低点,此时抗剪承载力下降约10%,拼接缝相对滑移迅速增加,持续时间短暂;阶段4为滑移-上升阶段,即从最低点继续加载至损伤级别V,此时位移较大,大位移的激发使得纵筋销钉作用增强,箍筋作为受拉腹杆起到传递破损混凝土体主压应力的作用,试件

抗剪承载力得以上升,拼接缝滑移仍在持续增大;阶段5为破坏阶段,即到达损伤级别V(第2个峰值点)后继续加载,加载点混凝土压碎,混凝土块状剥落,箍筋断裂,试件抗剪承载力跳跃式下降。

1号和2号试件在第1个峰值点(损伤级别III)的水平力分别为1 460、1 300 kN,水平位移分别为2.00、2.04 mm,在第2个峰值点(损伤级别V)的水平力分别为1 540 kN、1 600 kN,水平位移分别为43.20、40.41 mm。由此可知,1号试件与2号试件在加载点混凝土压碎之前,水平力和水平位移均相差不大,2号试件中的剪力键并未发挥有效作用。

3号试件是以拼接缝滑移为主的剪切破坏,整个直剪过程可划分为3个阶段,曲线只有1个峰值点。阶段1为拼接缝损伤阶段,即从开始加载到损伤级别II,此时垫层竖向裂缝不断出现,试件刚度减小,水平力呈非线性上升;阶段2为拼接缝错动阶段,即从损伤级别II到损伤级别III,此时拼接缝出现贯通裂缝,试件开始明显滑移,试件整体刚度小于前一阶段;阶段3为拼接缝张开阶段,即从损伤级别III到试件破坏,此时拼接缝完全张开,继续加载,部分受拉区钢筋从套筒中拔出,承载力下降。

## 2.3 钢筋应变分析

由设置于钢筋不同位置的应变片可以得到钢筋应变随水平力的变化情况,从而分析试件的剪切传力机理,采集应变数据的钢筋位置如图10所示。选取这3个位置的钢筋应变数据得到1号-3号试件的钢筋应变随水平力变化曲线,如图11a-c所示,图11d是1号-3号试件的受拉侧钢筋应变变化对比。

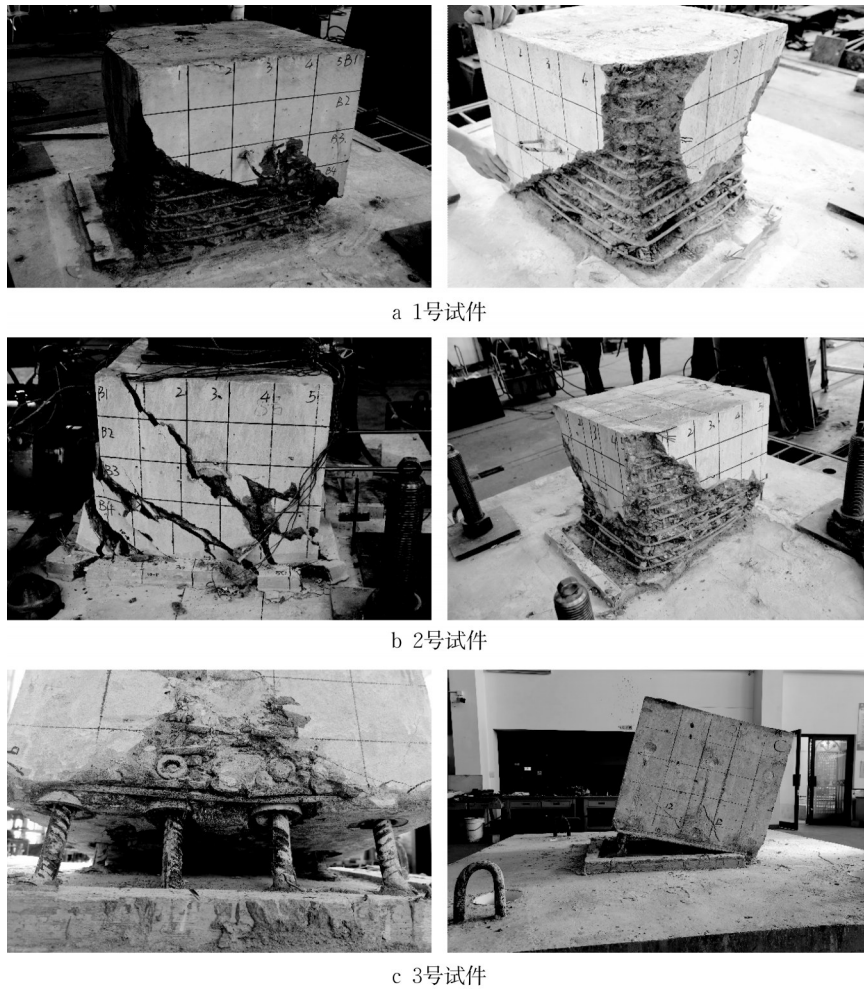


图8 试件损伤形态

Fig.8 Failure mode of specimens

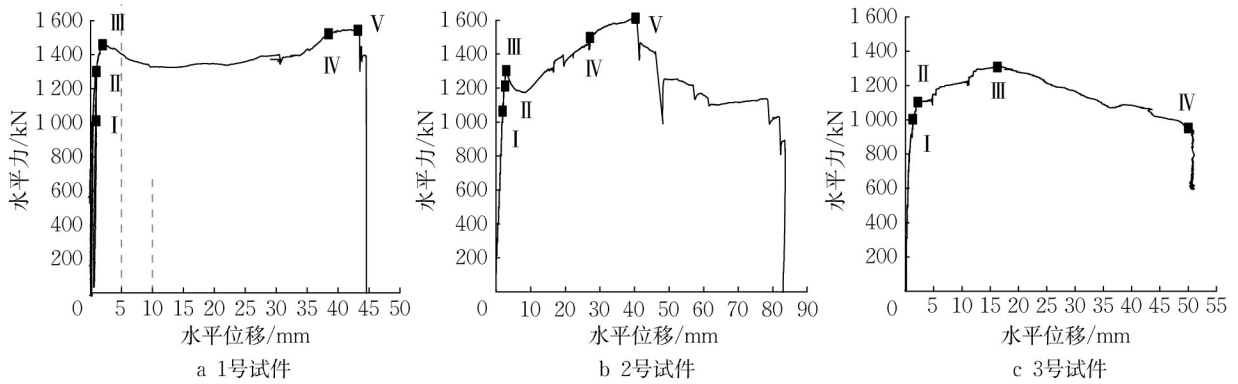


图9 水平力-位移曲线

Fig.9 Lateral load-displacement curve

从图11a—c可以看出,随着水平力施加,拼接缝处纵筋应变变化可大致分为3个阶段。第一阶段为应变平缓段。此时3个位置的纵筋应变均较小,应变变化平缓。第二阶段为急剧变化段。受压侧钢筋由受压过渡到受拉,3个位置钢筋均受拉。受拉侧钢筋应变急剧上升,其余2个位置钢筋应变上升幅度

也较大。第三阶段为直线上升段。水平力不变,钢筋应变直线上升。

第一阶段试件钢筋应变表现出压弯剪耦合,此时桥墩底部拼接缝没有滑移。当拼接缝受损、试件滑移加剧时,试件损伤状态过渡到所有钢筋均受拉的第二阶段;随着水平力继续增大,拼接缝完全破

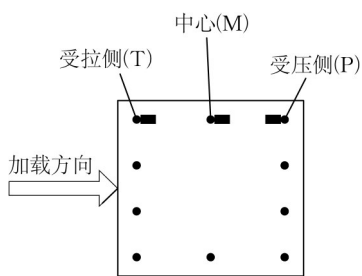


图 10 钢筋位置示意图

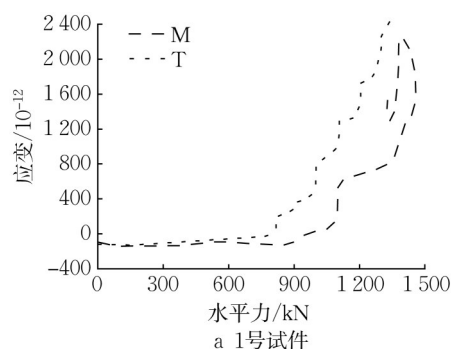
Fig.10 Reinforcement position

坏,试件开始大幅度滑移,进入第三阶段;纵筋应变直线上升,之后钢筋应变减小,出现卸载现象。这与 2.2 节的水平力-位移曲线中滑移-下降段相对应,钢筋周围的混凝土在试件碎裂后脱落,钢筋周围出现了较大空隙。因此,在钢筋与其周围一侧混凝土重新紧密贴合之前,钢筋出现卸载现象,试件整体抗剪承载力下降。

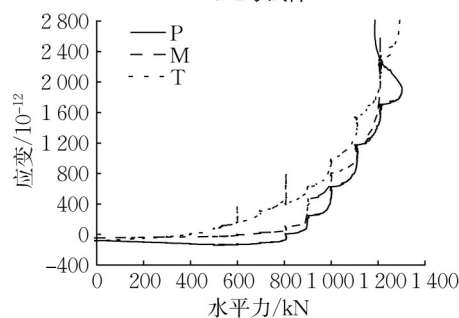
由图 11d 可知,在水平力为 0~1 000 kN 时,3 号试件钢筋应变最大,这是由于 3 号试件的套筒设置在桥墩底部,柱底混凝土整体性较好,开裂少且不发展,全部变形几乎集中在桥墩底部拼接缝。其次应变较大的是 2 号试件,由于 2 号试件拼接缝内剪力键的凸齿与凹面增加了制作难度,在齿块周围存在灌浆不饱满而产生的空隙,由此拼接缝处混凝土黏结面积小于其余试件。在施加水平力后,受拉区拼接缝处混凝土的黏结力与拼缝处钢筋的拉力共同承担弯矩引起的截面拉力,而 2 号试件拼接缝的混凝土黏结力较小,所以相同的水平力下受拉区钢筋的应变更大,这就解释了 2 号试件先出现拼接缝裂缝的原因;1 号和 2 号试件的水平力超过 1 000 kN 后钢筋应变逐渐达到极值点,此处对应水平力-位移曲线中的峰值点 1,此时试件混凝土劈裂,拼接缝完全滑开。1 号和 2 号试件的峰值点 1 水平力分别为 1 460、1 300 kN。2 号试件拼接缝处设有剪力键,但其峰值点 1 抗剪强度略小于 1 号试件,这是由于剪力键高度较低且拼接缝有初始空隙,影响了剪力键作用发挥。

2.4 试件破坏机理与性能评价

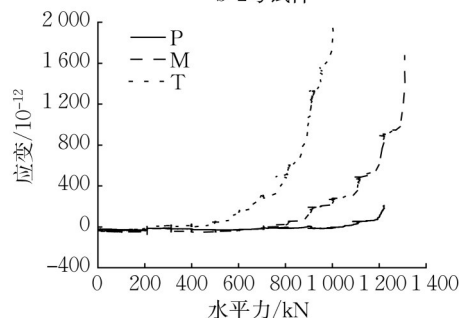
1 号试件的破坏以斜裂缝开展为主,在加载过程中拼接缝也有损伤,当力加载至 1 460 kN(峰值点 1)时,水平力达到桁架拱抗剪承载力极限,使得混凝土沿裂缝劈裂,水平承载力突降。加载过程中,桥墩斜截面抗剪能力可由桁架拱模型进行描述,即伴随斜裂缝出现后,墩身产生明显的应力重分布,剪力更倾向于沿着斜裂缝以上未破坏混凝土部分传至墩底受压区,形成了以纵筋为拉杆、未破坏混凝土部分为拱



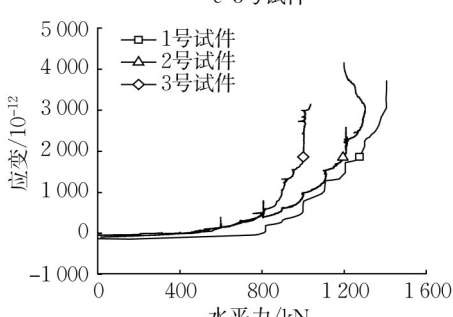
a 1号试件



b 2号试件



c 3号试件



d 1号-3号试件受拉侧

图 11 纵筋应变曲线

Fig.11 Longitudinal reinforcement strain curve

体的拉杆拱(桁架拱),如图 12 和图 13 所示。

混凝土劈裂后,拼接缝完全滑开,水平剪力由箍筋、纵筋的销钉作用与界面的剪切摩擦共同抵抗,箍筋与纵筋的剩余强度使得试件抗剪承载力再次上升至第 2 个峰值点,此时试件的剪切传力体系变为桁架体系与剪切摩擦体系共同作用。

2 号试件破坏模式与 1 号试件类似,但在第一条斜裂缝开裂之前,2 号试件垫层出现大量的竖向裂

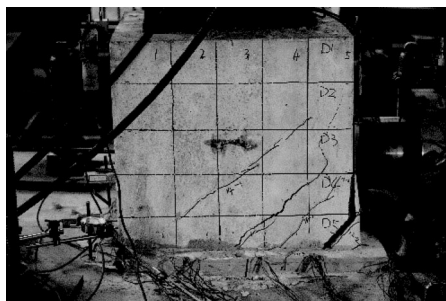


图12 1号试件破坏形态对应VI损伤

Fig.12 Failure mode of specimen 1 corresponding to VI damage

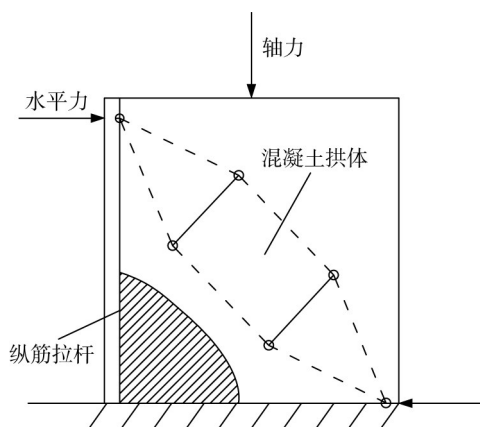


图13 桁架拱模型

Fig.13 Trussed arch model

缝,同时2号试件增设的小型剪力键齿对抗剪强度贡献较小,这是由于因本试验所用小型剪力键齿高度较低,拼接缝张开较大,剪力键齿没有发挥作用。

3号试件最终破坏模式以拼接缝滑移为主。在加载初期,垫层不断出现竖向裂缝,试件刚度随之减小。水平力为1100 kN时,拼接缝裂缝贯通,试件开始明显滑移。加载到1300 kN时,部分受拉区钢筋从套筒中拔出。继续加载,试件承载力下降。3号试件并没有表现出类似于其他试件的混凝土碎裂现象,所有变形均集中在接缝处,这是因为3号试件套筒设在桥墩底部,对周围混凝土起到保护作用,增大了套筒区域混凝土的抗剪强度。

## 2.5 既有抗剪强度公式对比验证

随着剪跨比的增大,桥墩的破坏模式从纯剪破坏过渡到弯剪破坏再到纯弯破坏。一般认为剪跨比小于2.5时试件表现出剪切破坏特征,此时桥墩先发生弯曲破坏,有横向弯曲裂缝产生。试件损伤后截面抗剪能力下降,随着斜裂缝的出现与扩展,试件最终发生剪切破坏。目前国内相关规范还没有关于预制拼装桥墩含拼接缝行为的抗剪公式,因此利用3

个直剪试验试件的抗剪承载力实测值和国内外与之相关的既有抗剪承载力公式计算值进行对比。

目前可参考的桥墩抗剪计算公式有:欧洲Fib规范(剪切摩擦机理),该规范中的抗剪公式适用于预制混凝土构件接缝抗剪承载力计算,公式中考虑了界面化学黏结力、骨料机械互锁力、剪切摩擦力以及钢筋销栓作用;AASHTO混凝土节段梁规范(剪切摩擦机理),该规范中的抗剪公式适用于混凝土梁节段拼接缝抗剪承载力计算,公式中考虑了混凝土拼接缝处的剪力键和剪切摩擦力;GB50010—2010《混凝土结构设计规范》(桁架拱机理),该规范中的抗剪公式适用于静力荷载下立柱斜截面抗剪强度计算,考虑了剪跨比对混凝土抗剪项的削弱。3个规范所涉及的抗剪公式如下:

(1)欧洲Fib规范抗剪公式为

$$\tau_{Rdi} = c_r f_{ck}^{1/3} + \mu \sigma_n + \kappa_1 \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) + \kappa_2 \rho \sqrt{f_{yd} f_{cd}} \leq \beta_c \nu f_{cd} \quad (1)$$

式中: $c_r$ 为粗糙界面的骨料机械互锁系数; $\mu$ 为界面摩擦系数; $\sigma_n$ 为作用于界面上的法向力可能产生的最低压应力; $\kappa_1$ 为纵筋拉力相互作用界面系数; $\kappa_2$ 为弯曲阻力界面系数; $\rho$ 为穿过界面钢筋的配筋率; $\alpha$ 为穿过界面钢筋的角度; $f_{yd}$ 为穿过界面钢筋的屈服强度设计值; $f_{cd}$ 为混凝土的轴心抗压强度设计值; $f_{ck}$ 为混凝土的轴心抗压强度标准值; $\beta_c$ 为压杆强度系数; $\nu = 0.55(30/f_{ck})^{1/3} < 0.55$ 。

(2)AASHTO混凝土节段梁规范抗剪公式为

$$V_j = A_k \sqrt{f'_c} (0.9961 + 0.2048 \sigma_n) + \mu A_{sm} \sigma_n \quad (2)$$

式中: $A_k$ 为破坏面上键齿根部的面积; $f'_c$ 为混凝土圆柱体抗压极限强度; $A_{sm}$ 为破坏面上的摩擦接触面; $\sigma_n$ 为考虑到所有预应力损失后的混凝土压应力; $\mu$ 为破坏面上的摩擦系数,一般取0.6。

(3)GB50010—2010抗剪公式为

$$V \leq \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07N \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为偏心受压构件的剪跨比; $f_t$ 为混凝土轴心抗拉强度; $b$ 为截面宽度; $h_0$ 为截面有效高度; $f_{yv}$ 为箍筋屈服强度; $A_{sv}$ 为计算方向的箍筋面积总和; $s$ 为箍筋间距; $N$ 为轴向压力设计值,当大于 $0.3f_c A$ 时取 $0.3f_c A$ ,其中 $A$ 为构件的截面面积。实测值与既有公式计算值比较如表4所示。

从表4可看出,对于1号和3号试件,Fib规范计算值小于实测值,但对于2号试件,计算值大于实测值。由此可知,Fib规范中的公式对此类套筒连接的



表4 直剪桥墩试验实测值与既有公式抗剪强度计算值比较

Tab.4 Comparison of shear strength between measured values from direct shear tests and calculation results from existing formulas

试件名称	剪跨比	实测值/kN	Fib规范公式计算值/ kN	AASHTO公式计算值/ kN	GB50010—2010公式计 算值/kN
1号	0.43	1460	1239.7	312.0	1195.5
2号	0.43	1300	1638.9	500.2	1154.3
3号	0.43	1300	1262.6	312.0	1224.9

预制拼装桥墩抗剪强度的计算偏于不安全。从AASHTO混凝土节段梁规范公式的计算结果来看,计算值远小于试验实测值,由此可知,AASHTO公式对此类预制拼装桥墩抗剪强度的计算过于保守。GB50010—2010中的抗剪公式计算结果均小于实测值,且较为相近,因此该规范中的公式对于本试验所涉及的套筒连接预制拼装桥墩适用性较好。

### 3 结论

(1)在墩顶压力和水平力共同作用下,套筒连接预制拼装矮桥墩分为2种主要破坏模式,套筒设置于承台顶部的1号和2号试件表现为以斜裂缝开展为主的剪切破坏,套筒设置于墩底部位的3号试件表现为以拼接缝滑移为主的剪切破坏。

(2)剪力键齿的存在增加了试件浇筑与接缝垫层砂浆的施工难度,易导致浇筑不密实而留有空隙,降低试件刚度并增加钢筋所受拉力,在滑动位移较小时,剪力键无法发挥作用,因此小型剪力键齿对试件抗剪强度的贡献较小。

(3)将套筒设置在桥墩底部会改变矮桥墩(套筒高度与墩身高度比值为0.8情况)的破坏模式,桥墩底部的套筒对墩底区域的混凝土进行“加强”,套筒高度范围内墩身混凝土斜裂缝出现后不继续发展,主要变形集中在墩底部接缝处。

(4)从试验实测值与既有规范给出的抗剪公式比较结果可知,对于本试验中套筒连接预制拼装桥墩试件,按Fib规范中抗剪公式计算的部分结果偏于不安全,AASHTO公式计算的结果过于保守,而GB50010—2010中的抗剪公式计算结果均小于实测值且较为相近,适用性较好。

#### 作者贡献声明:

王志强:试验设计,研究思路提出,论文修改,经费支持。

陈乐纯:试验分析,论文写作和修改。

吕昊:试验设计,试验实施和数据分析。

张涛:试验方案设计。

#### 参考文献:

- [1] 沙丽新,李国平.典型城市高架倒T盖梁预制装配化设计关键技术研究[J].中国市政工程,2017(3):4.  
SHA Lixin, LI Guoping. Research on key technologies of inverted T pier cap prefabricated design of typical urban viaduct [J]. China Municipal Engineering, 2017(3):4.
- [2] BUYUKOZTURK O, BAKHOUM M M, MICHAEL BEATTIE S. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(12): 3380.
- [3] AASHTO LRFD bridge specifications [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994.
- [4] 卢文良.节段预制体外预应力混凝土梁设计理论研究[D].北京:北京交通大学,2004.  
LU Wenliang. Theoretical research on the design of segmental precast externally prestressed concrete beams [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2004.
- [5] 宋守坛.高速铁路预制拼装箱梁抗弯及接缝抗剪试验研究与理论分析[D].南京:东南大学,2015.  
SONG Shoutan. Experimental research and theoretical analysis of the flexural and joint shear resistance of the high-speed railway prefabricated box girder bridge [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [6] 吴威业.预制节段拼装桥墩抗剪性能研究[D].宁波:宁波大学,2017.  
WU Weiye. Research on shear performance of precast segmental bridge piers [D]. Ningbo: Ningbo University, 2017.
- [7] AHMED G H, AZIZ O Q. Influence of intensity & eccentricity of posttensioning force and concrete strength on shear behavior of epoxied joints in segmental box girder bridges [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 117.
- [8] YUAN A M, YANG C, WANG J W, et al. Shear behavior of epoxy resin joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4): 1.
- [9] LIU T X, WANG Z, GUO J, et al. Shear strength of dry joints in precast UHPC segmental bridges: experimental and theoretical research [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(1): 1.
- [10] 逯艳东,李士友,胡兴安,等.灌浆套筒连接预制拼装桥墩抗剪性能对比试验研究[J].防灾科技学院学报,2021,23(1):17.  
LU Yandong, LI Shiyu, HU Xingan, et al. Comparative