

预制桥墩节段节点抗剪性能研究 ——拟静力试验

吴威业, 奚 康, 布占宇*

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 预制节段拼装桥墩在节段接缝处混凝土断开, 仅通过纵向钢筋和剪力键连接相邻节段, 节点抗剪承载能力是设计工程师所关心的关键设计变量。通过拟静力单调加载直接剪切试验研究了 3 组节段节点的抗剪性能, 试验参数包括剪力键的数量和长度、平接缝、接触面约束应力等。分析了试验得到的剪切力—滑移曲线、受力阶段和破坏机理, 根据试验结果的回归分析得到了预制节点抗剪承载力经验公式, 并与 AASHTO 和已有文献中的回归公式进行了比较。结果表明, 带剪力键试件的剪切破坏形式为多个阳齿的剪断和单个阴齿的斜裂缝, 平接缝试件的剪切破坏形式为滑移和截面的拉伸裂缝, AASHTO 公式计算结果与试验结果趋势一致。多剪力键干接缝试件发展了较好的延性剪力—滑移响应, 可作为推荐的预制拼装桥墩接缝构造形式。

关键词: 预制混凝土; 节段桥墩; 节点; 抗剪强度; 拟静力加载试验

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 02-0106-06

桥梁预制节段施工方法是建筑工业化的一部分, 也是国家国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要重点发展的一项建筑技术, 其优点包括加快施工进度、减少现场安全隐患、提高施工质量、减少寿命周期费用、减少环境污染等。可用于城市高架桥、高速公路桥梁、高速铁路桥梁以及跨海大桥等大型桥梁工程的引桥的上、下部结构。

从目前国内的应用和研究现状看, 桥梁预制节段施工方法主要用于上部结构箱梁的预制节段拼装, 而下部结构桥墩的预制节段拼装应用实例较少。与现场浇筑桥墩相比, 预制节段拼装桥墩存在节段与节段的接缝(节点), 属于受力薄弱环节, 节段内部的抗剪性能可以通过合理设置箍筋数量和混凝土抗剪面积来保证, 而节点的抗剪承载力主要依靠剪力键的销栓作用和一定接触面约束应力作用下混凝土面—面之间的摩擦力提供, 各部分的贡献大小与剪力键的设置方式、接触面的约束应力和混凝土强度等参数有关。

现有的研究主要是针对预制节段箱梁的桥梁上部结构接缝抗剪性能研究, 根据所采用的研究方法可以分为试验研究、有限元仿真和断裂力学理论分析 3 种。Buyukozturk 等^[1]通过单调加载试验研究了预制节段拼装箱梁的节点抗剪性能。Zhou 等^[2]开展了平接缝、剪力键接缝, 干接缝、环氧胶, 单剪力键、多剪力键足尺节点模型试验。Jiang 等^[3]通过试验研究了足尺齿状剪力键在不同约束应力水平下的抗剪强度和剪力响应。Shamass 等^[4]利用有限元程序建立数值分析模型研究了剪力键干接缝节点受直接剪力作用时的结构响应。Issa^[5]通过 5 对环氧胶单剪力键节点试件进行了抗剪承载力分析。Kaneko 等^[6]基于断裂力学和桁架模型理论发展了简化力学模型用于分析和设计纤维增强混凝土剪力键节点。

上述研究主要集中在预制箱梁腹板齿状剪力键的抗剪性能, 而预制拼装桥墩中一般采用普通剪力键和干接缝, 受力特点和抗剪性能不同于齿

收稿日期: 2016-06-28.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51208268); 宁波市自然科学基金(2015A610293); 宁波市交通运输科技项目(201602, 201706); 桥梁工程结构动力学开放基金(201603); 桥梁结构抗震技术开放基金(201603); 浙江省大学生科技创新活动计划(2015R405074)。

第一作者: 吴威业(1991—), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁抗震。E-mail: wuweiy701@163.com

*通信作者: 布占宇(1977—), 男, 山东聊城人, 副教授, 主要研究方向: 桥梁抗震。E-mail: buzhanYu@nbu.edu.cn

状剪力键。本文通过对预制拼装桥墩节点抗剪性能的试验研究,分析了剪切力—滑移响应,受力阶段和剪切破坏机理,回归得到了抗剪强度公式,与规范和文献建议的节点抗剪强度公式进行了比较,为该类型拼装式节点的抗剪设计提供参考。

1 试验试件的设计

典型的预制节段拼装桥墩如图1所示,桥墩节段—节段以及节段—承台之间设置了剪力键,便于安装时对位和提供抗剪能力。选取其中典型的节段—节段接缝,细部构造如图1(b)所示,节段内部的构造钢筋不通过接缝,接缝仅有预应力筋通过,接缝面上设置有剪力键。

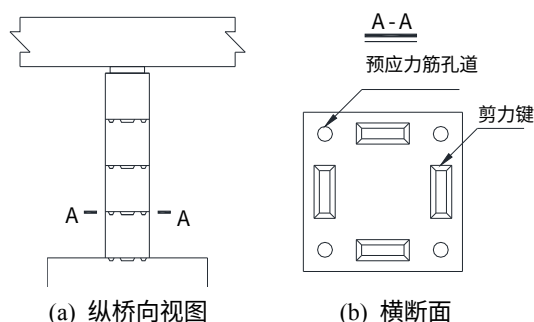


图1 预制拼装桥墩

为了研究图1中A-A截面节点的抗剪承载能力,设计制作了3组预制桥墩节段抗剪试件对,每组包含相同的2个试件对,分别进行了1、2 MPa约束应力抗剪加载,试件几何尺寸如图2所示。从图2可知,试件外观为600 mm×450 mm×800 mm,接触面450 mm×450 mm,接触面中心设置直径70 mm PVC管,用于穿预应力筋。截面约束应力由3根 $\phi 15.2$ mm钢绞线张拉提供,固定端用OVM15-3工作锚具固定,张拉端用OVM15-3工具锚具固定。S1试件设置2个长200 mm剪力键,S2试件设置4个长150 mm剪力键,S3试件无剪力键。接触面接触条件为干接缝,模拟实际桥梁中干接缝连接的情况,不考虑环氧胶的粘结。因为环氧胶的粘结会使受力变得更脆,破坏更突然^[1],虽然抗剪强度有所提高,但不适合抗震设计中延性节点的受力要求。每一个试件对包含阳齿部分和阴齿部分,加载时阳齿部分在下,阴齿部分在上,呈L形和倒L形布置。

本试验的试件对制作采用匹配预制(Match-

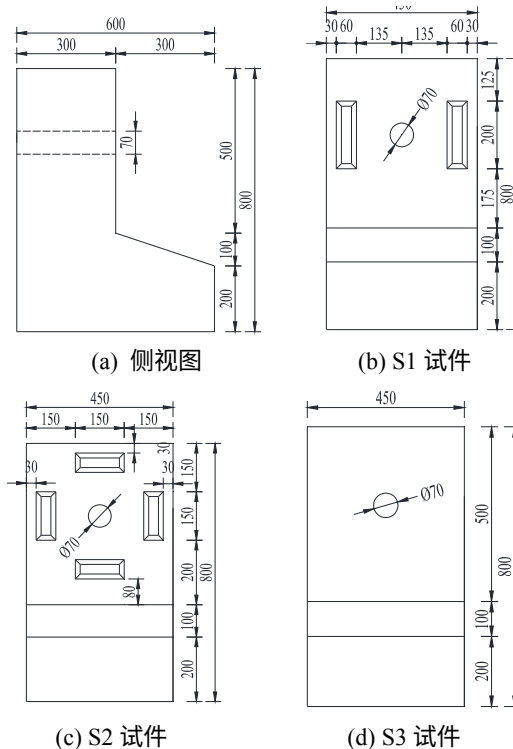


图2 预制桥墩节段抗剪试件(单位: mm)

cast)的方式,以S1试件为例制作过程如图3所示。首先制作一个包含2个部件的底面积的模板箱,先制作阳齿部件,接触面模板采用模具厂制作的塑料模板,精确制作剪力键阳齿的模板(图3(a));然后放入阳齿部件的钢筋笼,浇筑混凝土,形成阳齿部件(图3(b))。接着安装阴齿部件的部分模板,以阳齿部件的接缝面为模板,安装阴齿部件钢筋笼(图3(c))。浇筑混凝土,拆模完成阴齿部件浇筑,形成S1试件对(图3(d))。

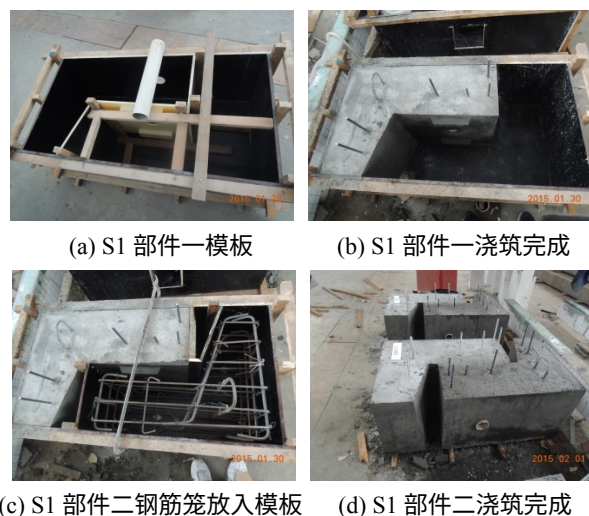


图3 节段抗剪试件浇筑过程

2 试件加载和数据采集

试验加载的测试仪器布置如图4所示。测试仪器分为3大类:应变测试、位移测试和力测试。试件的剪力加载为纯剪力直接加载,在双L形试件的顶部(阴齿部分)利用万能试验机加载,加载点通过接缝面,试验加载装置如图5所示。

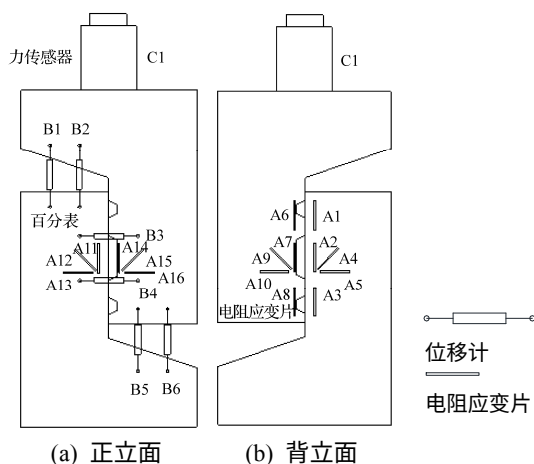


图4 测试仪器布置(单位: mm)



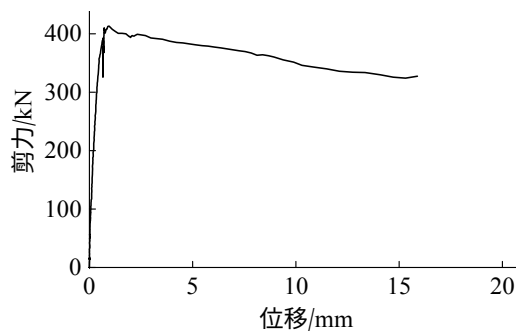
图5 试验加载装置

加载方式为位移控制的单调加载,速率约为 $0.50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。数据采集分为顶部施加剪力、接缝水平和竖向相对位移、混凝土表面应变和接触面约束应力等几部分,分别利用力传感器C1、机电百分表B1~B6、电阻应变片A1~A16和穿心式力传感器(串联在张拉千斤顶和试件之间,图5)测量。数据

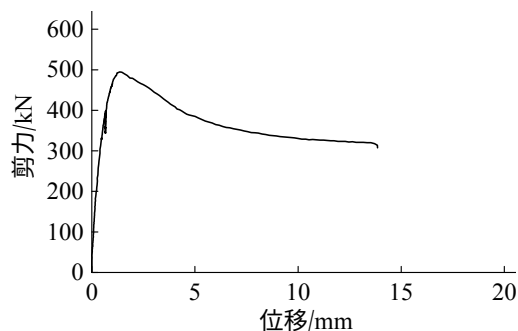
采集采用东华静态应变仪,连接笔记本电脑采样。接触面约束应力通过穿心式千斤顶张拉预应力筋施加,千斤顶由电动油泵提供压力。

3 剪切力—剪切位移响应

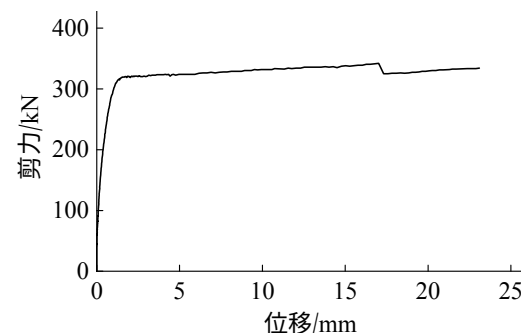
取剪切力为试件顶部加载试验机力传感器C1的读数(图4),相对滑移为机电百分表B1、B2、B5和B6的读数平均值,绘制3个试件在2 MPa约束应力时剪切力—滑移曲线,如图6所示。



(a) S1 试件



(b) S2 试件



(c) S3 试件

图6 剪力—滑移曲线

S1 试件在抗剪强度达到峰值之前剪切力与剪切滑移基本呈线性关系,在到达峰值抗剪强度之前有一个突然下降段,但很快又恢复了上一个最大的峰值剪力,一直到整个加载的峰值(413.3 kN)。



图7 试件破坏情况

接着随着剪切位移的增大, 剪切力呈线性降低, 加载过程在位移超过 15.8 mm 后停止. 结合破坏的照片图 7(a), 峰值之前的抗剪承载力突然下降应该为单个剪力键先承载, 随着单个剪力键的局部斜裂缝的发展, 第 2 个剪力键开始承载, 然后抗剪承载力在 2 个剪力键共同承载下达到峰值, 抗剪承载力受剪力键的抗剪强度和摩擦力共同影响. 随着第 2 个剪力键的剪断, 承载力逐渐降低, 抗剪承载力受摩擦力控制.

S2 试件在抗剪强度达到峰值之前基本与滑移位移呈线性关系. 与 S1 试件类似, 在 400 kN 剪力附近有一个下降段, 随后又恢复了抗剪承载力, 峰值抗剪承载力约为 494.5 kN. 峰值后剪力—滑移关系开始时下降斜率较大, 剪切位移达到 5 mm 后, 下降斜率变缓. 与 S1 试件不同, S2 试件的剪力—滑移曲线分 3 个阶段, 即上升段、峰后下降段和平稳下降段. 第一阶段在 400 kN 前所有剪力键均未破坏, 400 kN 附近有 1 个剪力键开裂, 峰值 494.5 kN 处有 4 个剪力键开裂, 到 5 mm 滑移处剪力键完全剪断, 曲线下下降斜率变缓, 受摩擦力控制.

S3 试件剪切力位移曲线基本呈两阶段分布, 在到达峰值剪力前, 剪切力与滑移基本呈线性关系, 峰值以后剪力—滑移基本呈水平线状态. 其中在剪力小于 100 kN 阶段, 滑移几乎为零, 剪力在 100~342.2 kN 时, 混凝土接触面的微小颗粒相互咬合, 抗剪承载力逐渐增大, 由于微粒的受力与位移基本呈线性关系, 因此剪力—滑移也呈线性关系. 在到达峰值时, 微粒发生断裂, 之后试件的滑移位移逐渐增大, 而剪切力增大缓慢, 基本维持不变, 在位移 17 mm 处有一个突然的滑动, 摩擦系数降低, 抗剪承载力也随之突然降低, 抗剪承载力—滑移曲线仍呈水平线状态.

4 试件破坏机理分析

S1 试件阴齿部分的破坏情况如图 7(a)所示, 阳齿剪力键剪断, 留在阴齿中, 阴齿则发生斜裂缝, 原因是 2 个剪力键不同时受力, 一个剪力键先受力, 在阴齿靠近外侧表面处引起斜裂缝, 等第 2 个剪力键受力以后裂缝的发展会变缓, 直至第 2 个剪力键也剪断, 整个试件的抗剪强度依靠摩擦力提供. S2 试件的破坏形式与 S1 试件类似(图 7(b)), 一侧的竖向阴齿剪力键发生斜裂缝破坏, 其余 3 个阴齿剪力键均完好. S3 试件无剪力键(图 7(c)), 在接触面上形成了竖向裂缝和斜向裂缝, 裂缝均贯通至中央圆孔. 另外一个比较显著的现象是, L 形和倒 L 形布置的阳齿和阴齿部件在顶部剪力作用下, 剪力通过倒 L 形试件的底面传递到 L 形试件的接触面下边缘, 在接触面的下边缘形成受压侧, 接触面的上边缘形成受拉侧, 对剪力键的受力产生较大影响, 上部的剪力键处于部分接触受力状态, 而下部剪力键几乎处于完全接触受力状态.

有剪力键试件的破坏机理与文献[6]提供的齿状剪力键的 2 种破坏机理有相似之处, 阴齿部分是发展了单一弯曲斜裂缝, 阳齿部分则发展了多条斜裂缝, 最终发生剪力键整体剪掉破坏. 而平接缝试件的破坏机理可以归结为接触面的微小颗粒的剪切破坏以及接触面的拉伸裂缝.

5 抗剪强度与规范的比较

AASHTO 1999 规范 12.2.21 小节^[7]提供了如下预制拼装节段箱梁的节点抗剪强度计算公式:

$$V_j = A_{\text{key}} \sqrt{6.895 \times 10^{-3} f'_c (12 + 2.466 \sigma_n) + 0.6 A_{\text{sm}} \sigma_n}, \quad (1)$$

其中: V_j 是节点抗剪强度, N; A_{key} 是节点剪力键根

部面积, mm^2 ; f'_c 是混凝土圆柱体抗压强度, MPa; σ_n 是节点约束应力, MPa; A_{sm} 是节点平面部分面积, mm^2 . 抗剪承载力试验结果与规范的比较见表 1. 从表 1 可看出, AASHTO 规范公式给出了 3 个试件的抗剪承载力的保守估计值, 这可能与试件的混凝土强度、剪力键面积占总接触面积的比例和试件的总抗剪承载力大小(尺度效应)有关.

表 1 抗剪强度比较

试件名称	$f_{cu,k}/\text{MPa}$	σ_n/MPa	试验抗剪强度/kN	AASHTO/试验
S1	24.3	2.01	413.3	0.86
S2	24.4	2.02	494.5	0.85
S3	23.5	1.99	342.2	0.69

将平均峰值剪应力 τ 用圆柱体抗压强度开根号 $\sqrt{f'_c}$ 无量纲化, 绘制剪切应力 τ 试验结果随约束应力 σ_n 的变化曲线, 得到最小二乘参数拟合回归方程为:

$$\tau / \sqrt{f'_c} = 0.1886\sigma_n + 0.0998. \quad (2)$$

将 $\sqrt{f'_c}$ 的平均值 4.607 代入式(2), 得:

$$\tau = 0.87\sigma_n + 0.0998\sqrt{f'_c}. \quad (3)$$

同时文献[1]给出了环氧胶平接缝抗剪承载力回归公式为:

$$\tau = 0.98\sigma_n + 0.8511\sqrt{f'_c}. \quad (4)$$

文献[1]剪力键干接缝抗剪承载力回归公式为:

$$\tau = 1.36\sigma_n + 0.6477\sqrt{f'_c}. \quad (5)$$

文献[1]平干接缝的抗剪承载力公式为:

$$\tau = \mu\sigma_n, \quad (6)$$

式中: 当约束应力 σ_n 分别取 0.69, 2.07 和 3.45 MPa 时, 摩擦系数 μ 分别取 0.8, 0.7 和 0.5.

图 8 为上述试验结果及回归公式计算结果. 从图 8 可看出, 文献[1]给出的带环氧胶平接缝抗剪承载力大大高出本研究干接缝抗剪承载力, 文献[1]带剪力键接缝抗剪承载力也高出试验结果很多, 而文献[1]平干接缝抗剪承载力公式与本研究结果基本一致. 对于同样的几何轮廓和同样约束应力的抗剪试件, 4 个剪力键的 S2 试件抗剪承载力高于双剪力键的 S1 试件抗剪承载力, 而双剪力键的 S1 试件抗剪承载力高于平接缝 S3 试件抗剪承载力. AASHTO 公式对 3 个试件的抗剪承载力均有所低估, 但对于设计人员而言是可以接受的. 本研究得

到的抗剪回归公式(式(3))较好地估计了平接缝和剪力键干接缝节点的抗剪承载力.

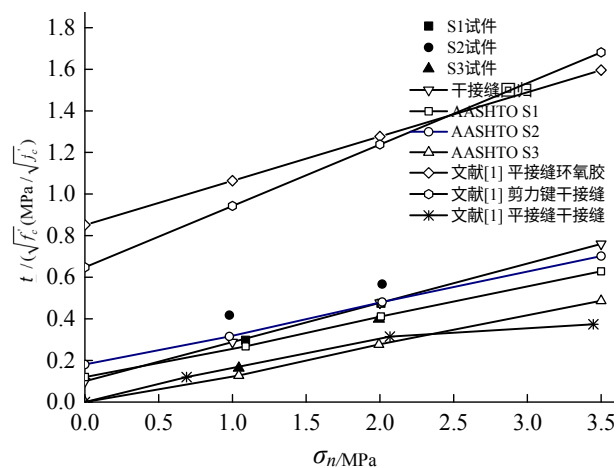


图 8 抗剪承载力回归分析

6 结论

进行了预制节段拼装桥墩节点抗剪性能试验研究, 得到了剪切力—滑移曲线, 分析了剪切受力破坏的过程和机理, 利用最小二乘回归分析得到了节点抗剪承载力经验公式, 并将试验得到的抗剪承载力与 AASHTO 规范以及文献[1]的回归公式计算结果进行了比较(限于篇幅仅给出 2 MPa 压应力时的结果), 得到如下结论:

(1)不同截面剪力键布置方式时剪切力—滑移曲线的特征不同, 峰值剪切承载力也不同, 其中双剪力键 S1 试件剪切力—滑移曲线为线性上升段—线性下降段模式, 四剪力键 S2 试件剪切力—滑移曲线为上升段—峰后下降段—平稳下降段模式, 平接缝 S3 试件剪切力—滑移曲线为线性上升—平台段模式, 其中有剪力键试件的峰值抗剪承载力对应所有剪力键均发生剪切破坏的关键点, 平接缝试件的峰值抗剪承载力对应接缝面微小颗粒发生剪切破坏的关键点. 对有剪力键试件, 抗剪承载力在到达峰值承载力之前是由剪力键剪切加光滑面摩擦力提供, 峰值后抗剪承载力是由剪断后的剪力键的咬合力以及光滑面的摩擦力提供. 对平接缝试件, 峰值前抗剪承载力由微小颗粒的咬合力提供, 峰值后则由研磨过的面—面摩擦力提供.

(2)有剪力键试件的破坏机理分为 2 种, 阴齿部分发展了单一弯曲斜裂缝, 阳齿部分则发展了多条斜裂缝, 最终发生剪力键整体剪掉破坏. 而平

接缝试件的破坏机理可以归结为接触面的微小颗粒的剪切破坏以及接触面的拉伸裂缝。

(3)文献[1]给出的带环氧胶平接缝抗剪承载力大大高于试验得到的3个试件干接缝抗剪承载力,文献[1]带剪力键干接缝抗剪承载力也显著高于试验结果,而文献[1]平干接缝抗剪承载力公式与本文的S3试件试验结果基本一致。对于同样的几何轮廓和同样的约束应力的抗剪试件,4个剪力键的S2试件抗剪承载力高于双剪力键的S1试件抗剪承载力,而双剪力键的S1试件抗剪承载力高于平接缝的S3试件抗剪承载力,AASHTO公式对3个试件的抗剪承载力均有所低估,对于设计人员而言是可以接受的。

参考文献:

- [1] BUYUKOZTURK O, BAKHOUM M M, BEATTIE S M. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116(12):3380-3401.
- [2] ZHOU X M, MICKLEBOROUGH N, LI Z J. Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(1):3-11.
- [3] JIANG H B, CHEN L, MA Z G J, et al. Shear behavior of dry joints with castellated keys in precast concrete segmental bridges[EB/OL]. [2016-06-16]. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000649](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000649).
- [4] SHAMASS R, ZHOU X M, ALFANO G. Finite-element analysis of shear-off failure of keyed dry joints in precast concrete segmental bridges[EB/OL]. [2016-06-16]. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000669](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000669).
- [5] ISSA M A, ABDALLA H A. Structural behavior of single key joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2007, 12(3):315-324.
- [6] KANEKO Y, CONNOR J J, TRIANTAFILLOU T C, et al. Fracture mechanics approach for failure of concrete shear key I: Theory[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1993, 119(4):681-700.
- [7] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Guide specifications for design and construction of segmental concrete bridges[M]. Washington D C, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2003:9-20.

Shear resistant performance investigation of segment joints in precast columns: Quasi-static test

WU Wei-ye, XI Kang, BU Zhan-yu*

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The segment concrete of precast segmental bridge column is discontinuous at the joint. Longitudinal reinforcement and shear keys are used to connect the two adjacent segments. The shear resistant capacity of joint is a key design quantity concerned by design engineers. The shear performance of three groups of segment joints was studied through quasi-static monotonic direct shear loading test. The parameters of test included number and length of shear keys, flat joint, and confinement stress of joint. The shear force-slip displacement curve, loading stage and damage mechanism were analyzed. The empirical formula of shear resistant capacity of precast joint was derived through test regression analysis. The proposed equation was then compared with that suggested by AASHTO and other literature. The results show that the damage pattern of the keyed dry joints was shear-off of multiple convex shear keys and diagonal crack of single concave shear key. The damage form of the flat dry joint was slippage and tensile crack on interface. The calculation results by AASHTO formula had same tendency with the test results. Multi-keyed specimens developed satisfying ductile shear force-slip displacement response. So it is recommended to be the preferred configuration of precast segmental column joints.

Key words: precast concrete; segmental column; joint; shear strength; quasi-static loading test

(责任编辑 史小丽)