

预制节段桥梁钢榫键干接缝抗剪机理及计算方法

邹宇¹, 贾勤龙¹, 徐栋¹, 宋冰泉², 申洛岑², 谢正元³, 戚永超¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 宁波交通工程建设集团有限公司, 浙江宁波 315000;

3. 柳州欧维姆机械股份有限公司, 广西柳州 545005)

摘要: 接缝是节段预制拼装桥梁的薄弱部位, 为确保节段间的定位和传力, 设计了钢榫键接缝。为充分完整掌握钢榫键接缝局部剪切性能, 基于试验研究, 结合理论分析对钢榫键接缝的抗剪机理和计算方法进行深入研究。研究结果表明: 在侧限压力的作用下钢榫键接缝借助榫键和混凝土的接触受压来传递接缝间的剪力, 接缝具有较高的抗剪承载力和良好的延性。结合钢榫键接缝的传力机制, 构建了适用于钢榫键接缝的力学模型, 揭示了钢榫键接缝的抗剪机理及破坏模式, 包括: 榫键剪切破坏、混凝土局部受压破坏(接触面压碎、接触面端部膨胀、劈裂破坏)、混凝土撕裂破坏。最后, 建议采用钢榫键剪切破坏作为钢榫键接缝抗力设计的依据, 同时应对钢榫键周围混凝土强度进行验算。

关键词: 桥梁工程; 接缝; 钢榫键; 直剪破坏; 计算方法

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

joint transmits the shear force between the joint by means of the contact pressure between the steel key and the concrete under the action of confining pressure, and the joint had high shear capacity and good ductility. Combined with the force transfer mechanism of steel shear keyed joint, a mechanical model was constructed, and the shear mechanism and failure mode of steel tenon joint were revealed, including shear failure of steel key, partial compression failure of concrete, tearing failure of concrete. Finally, the paper suggests that the shear failure of steel key should be used as the basis for the resistance design of steel shear keyed joints, and the strength of concrete around the steel key should be checked.

Keywords: bridge engineering; joints; steel shear key; direct shear failure; calculation methods

Shear Mechanism and Calculation Method of Steel Shear Key Dry Joint of Precast Segmental Bridge

ZOU Yu¹, JIA Qinlong¹, XU Dong¹, SONG Bingquan², SHEN Luocen², XIE Zhengyuan³, QI Yongchao¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Ningbo Communication Engineering Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 3. OVM Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545005, China)

Abstract: Joints are the weak parts of segmental precast Bridges. To ensure the positioning and force transmission between segments, steel shear keyed joints are designed. To fully grasp the local shear performance of steel shear keyed joint, the shear mechanism and calculation method of steel shear keyed joint were deeply studied based on the existing experimental research results and theoretical analysis. The results showed that the steel shear keyed

得益于标准化和工厂化的快速制造, 预制节段桥梁在国内外得到广泛的应用。相对于整体结构, 接缝作为预制节段结构设计时预设的不连续(纵向普通钢筋和混凝土)构造^[1-2], 其受力特性在设计和施工中都得到足够的重视。在直接剪切力作用下, 接缝会发生平行于接缝面的直剪破坏^[3]。因此, 对预制节段桥梁接缝力学性能的研究非常必要进行。

预制节段桥梁通常采用凹凸形混凝土齿键作为接缝的传力构造。自1950年来, 国内外学者通过理论分析、数值模拟、试验研究已对混凝土齿键接缝的力学性能和承载能力进行了大量的科学研究。Jones^[4]得出接缝抗力与轴向预压力成正比例关系。Buyukozturk等^[5]试验得到胶接缝剪切强度明显高于干接缝, 干接齿键接缝的抗剪强度和刚度会随着预压应力的增大而提高。Zhou^[1]认为AASHTO^[6]规范低估了单齿键干接缝承载力, 同时高估了多齿键干接缝承载能力。Issa等^[7]试验得到胶接

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(52078363)

第一作者: 邹宇, 博士生, 主要研究方向为装配式桥梁结构的设计与施工, 桥梁结构智能设计与建造。

E-mail: zouyu028@163.com

通信作者: 徐栋, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土桥梁、桥梁轻型化快速建造技术。

E-mail: xu_dong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

缝高温养护比低温养护承载力平均提高28%。Rombach^[8]的试验结果表明胶接齿键接缝的抗剪强度比干接缝大20%。同时,研究人员得到共同的结论:传统混凝土齿键接缝在达到峰值加载力后,承载力急剧降低,破坏后仅仅依靠接缝间摩擦提供抗力。干接缝破坏时沿着齿键根部出现直剪破坏^[1, 3, 9-13],胶接缝的破坏则出现在环氧胶层、环氧胶与混凝土黏结层、混凝土砂浆层^[1, 14-17]。

为提高接缝的抗剪承载力、延性、传力可靠性及施工便利性,科研人员基于新材料和新型剪力键接缝进行了大量研究。Beattie^[18]试验对比素混凝土齿键接缝,得出掺入钢纤维的混凝土齿键接缝承载力和延性都有提高。Jiang^[9, 19, 20]试验显示SFRC干接缝强度相比传统混凝土齿键干接缝承载力提高25%。Voo^[21], Kim^[22]开展UHPC齿键接缝试验,得到UHPC齿键接缝强度随齿键数量的增加而增加。袁爱民^[23]对16个试件开展直剪试验,获得布置体内束的胶接缝剪力键抗剪承载能力相比素混凝土齿键提高18.6%。孙学帅^[2]试验得到普通钢筋插筋剪力键延性较好,而FRP插筋剪力键表现出较大的脆性。Sangkhon^[24]对齿键的几何构造形式进行了试验研究,得到半圆形齿键和三角形齿键的抗剪承载能力明显好于梯形齿键,但是半圆形和三角形齿键更容易出现脆性破坏。Turmo^[3], Jiang^[19]的试验结果显示SFRC可以提高齿键接缝的延性。Smittakorn^[10]的试验结果

显示钢纤维能提高齿键接缝的抗剪能力。Gopal^[25]研究得到UHPFRC齿键接缝的抗剪承载能力随齿键数量的增加而明显增加。综上所述,为获得不同参数变量对齿键接缝力学性能的影响以及改善齿键接缝局部受力性能,国内外众多研究人员通过大量的理论和试验研究获得了丰硕的研究成果。

同时,作者所在研究团队为简化接缝形式,改善接缝传力,提高接缝承载能力和延性,针对预制节段梁剪力键设计了方形锚头钢榫键,并对钢榫键接缝在直剪力作用下的力学性能开展了试验研究^[26, 27]。论文以钢榫键接缝的抗剪机理为切入点,通过建立钢榫键接缝的局部受力理论模型,基于理论分析和试验研究,揭示了钢榫键接缝的传力机制及破坏模式,并推导获得了钢榫键接缝的计算方法。

1 钢榫键接缝传力机制

钢榫键由凸键和凹键组成,其中凸键包括锚头和跨缝齿,凹键包括锚头和承插槽,如图1a所示。凸键和凹键分别预埋在预制节段梁A段和预制节段梁B段中,节段拼装时在纵向预应力(体内束或体外束)的作用下通过凹键和凸键的匹配对位实现接缝的拼装连接,如图1b所示。

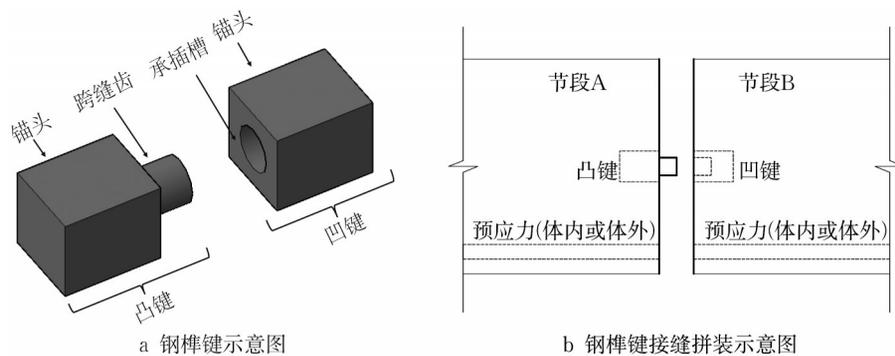


图1 钢榫键接缝示意图^[27]

Fig.1 Schematic diagram of steel shear key joint

为研究钢榫键接缝力学性能开展试验研究,钢榫键接缝加载方案如图2a所示,对其受力状态进行简化获得如图2b所示力学简图。试验结果显示:钢榫键接缝在侧限力的作用下依靠榫键和混凝土的接触受压来传递接缝间的剪力,相比传统混凝土齿键接缝,钢榫键干接缝、胶接缝承载力均有明显提高;且钢榫键接缝荷载一位移曲线发展历程相对较长,具有较好的延性^[28];钢榫键接缝出现榫键直剪破坏、

混凝土撕裂破坏、混凝土局部受压破坏^[26]。

为进一步研究钢榫键接缝在受力过程中榫键与混凝土间的传力机制及接缝的抗剪机理,将试件进行拆分并对脱离体进行受力分析。钢榫键接缝依靠榫键锚头和混凝土试件间的接触受压来传递接缝间的剪力。而锚头集中力作用面的截面积远小于试件支承面的截面积,这将导致试件支承面混凝土处于局部受压状态。同时如图3所示,凸键除了存在局

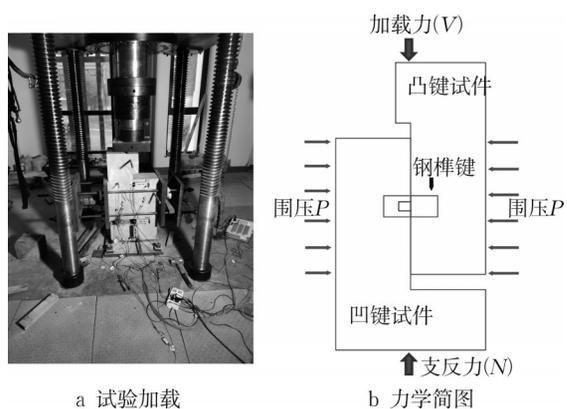


图 2 钢榫键接缝受力模式^[26]
Fig.2 The mechanical model of steel shear key joint

部受压外,还存在杠杆效应。因此,脱离体选择凸键试件为研究对象进行力学分析。混凝土试件力学简图如图 3a、b 所示,凸键力学简图如图 3c 所示。假设凸键与凹键、锚头与混凝土接触面应力均匀,即 F 、 F_1 、 F_2 为均匀作用力。

欧洲混凝土 CEB-FIP MC90 规范中提出局部受压模型如图 4 所示。局部压应力作用于柱体中心,竖向压应力 σ_z 沿柱的中心轴线自上而下逐渐减小;水平应力 $\sigma_x = \sigma_y$ 在上端为压应力,往下逐渐转为拉应力,且在 $0.4h$ 处出现应力曲线反弯点,再往下趋近于零。该模型中柱体在所受应力状态下,试件可能发生端面压碎、端部胀裂、劈裂破坏共三种破坏。

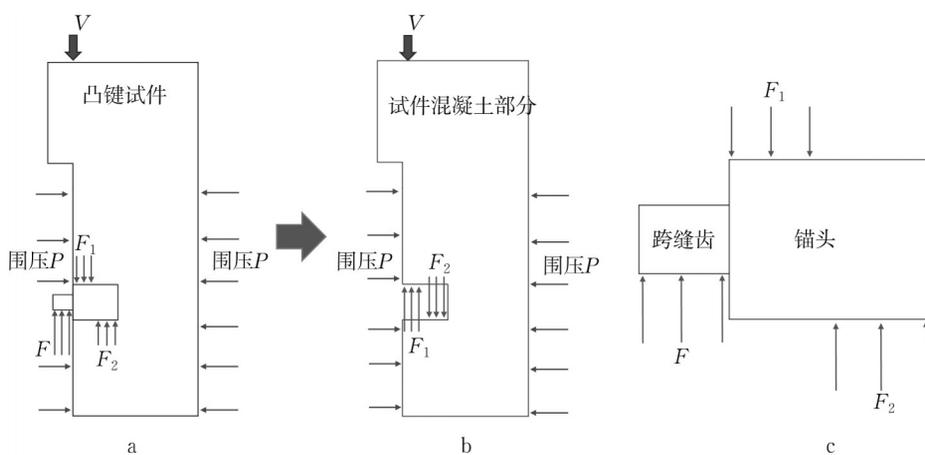


图 3 凸键试件力学简化图
Fig.3 Simplified mechanical diagram

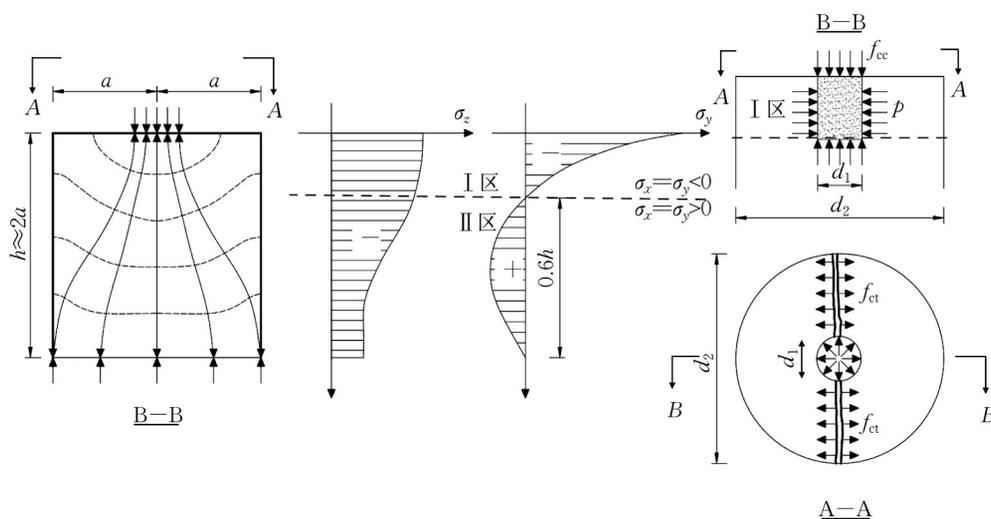


图 4 CEB-FIP MC90 模型
Fig.4 CEB-FIP MC90 model

基于 CEB-FIP MC90 模型,结合钢榫键在试件中的传力路径,按照弹性理论分析可以得到钢榫键

试件主应力轨迹线,如图 5a 所示。依据模型中 I、II 区混凝土的应力状态,将榫键锚头附近区域混凝土

应力场分为压区和拉-压区,且细分为压区 A、拉-压区 A 和压区 B、拉-压区 B,如图 5b 所示。

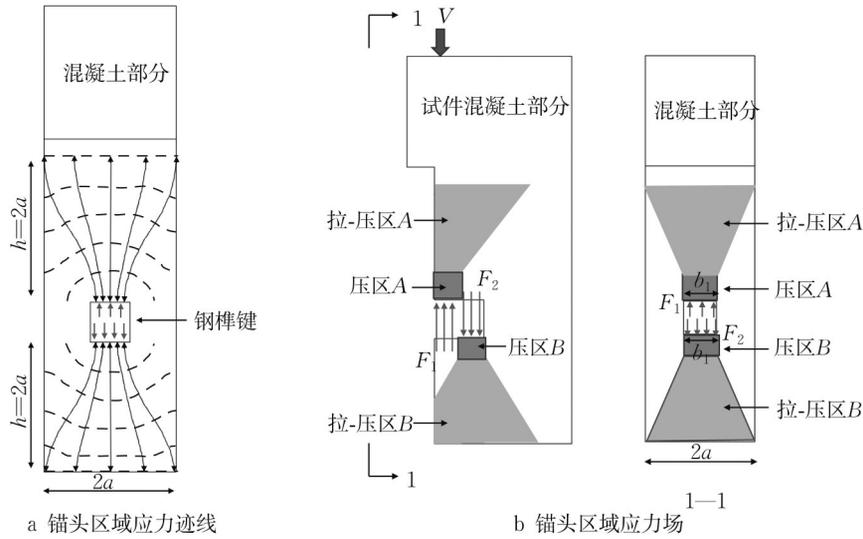


图 5 试件脱离体力学行为

Fig.5 Mechanical behavior of specimen

依据杠杆原理,并结合图 6,近似认为凸键动力臂、阻力臂及支点长度相等。因此由图 3、图 5b,根据简单的力学平衡可得:

$$F = V \quad (1)$$

$$F_2 \approx F \quad (2)$$

$$F_1 \approx F + F_2 \quad (3)$$

$$F_1 \approx 2V \quad (4)$$

式中: V 为钢榫键接缝的剪力, N ; F 为作用于跨缝齿

的接触反力, N ; F_1 为凸键锚头与混凝土试件压区 A 的接触作用力, N ; F_2 为凸键锚头与混凝土试件压区 B 的接触作用力, N 。

下面将以混凝土试件压区、拉-压区及榫键自身为研究对象,基于试验结果,并结合理论分析,对该区域裂缝发展、破坏模式、极限强度等力学行为进行研究分析,并针对不同的破坏形态提出强度计算公式和验算公式。

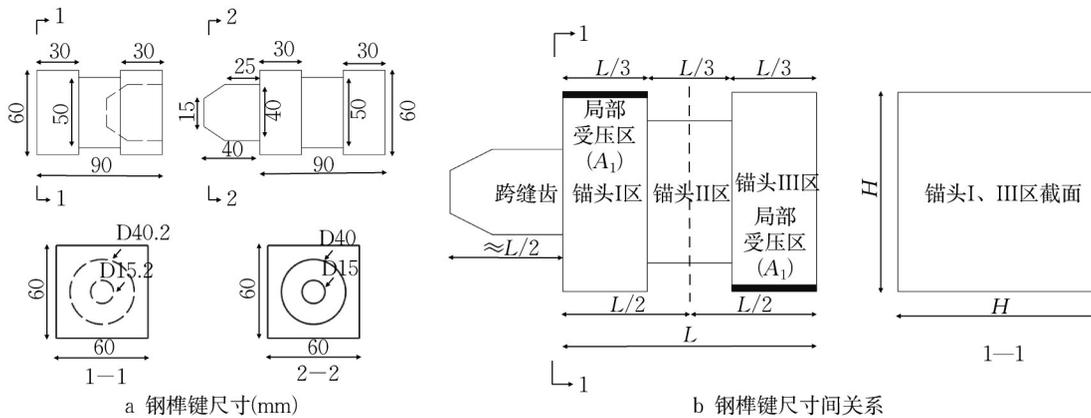


图 6 钢榫键尺寸示意图

Fig.6 Schematic diagram of steel shear key dimensions

2 钢榫键接缝抗剪机理及破坏模式

2.1 混凝土局部受压破坏

2.1.1 接触面混凝土压碎

如图 7a 所示,锚头接触面下局部受压区 A 混凝土

处于三轴受压状态,承受较大的三向压应力。而锚头周边非局部受压混凝土处于受剪状态,承受较大的剪应力。钢榫键抗压强度明显高于混凝土抗压强度,因此锚头下混凝土在压剪应力的共同作用下,混凝土骨料被挤压碾碎,使锚头出现下陷现象,试验

破坏模式如图 7b 所示,且该破坏模式符合 CEB-FIP MC90 规范局部承压破坏模式—端面压碎。

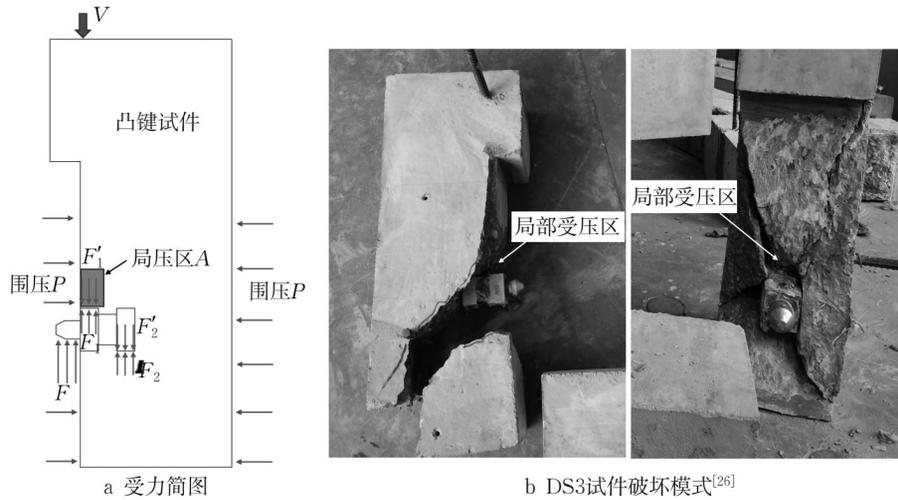


图 7 接触面混凝土压碎

Fig.7 Contact surface concrete crushed

为保证钢榫键接缝在正常使用极限状态条件下,压区混凝土仍处于弹性工作状态,应验算压区混凝土强度。集中力通过局部面积传递至支承构件,在直接传力面积下的混凝土应力高,变形大,必受到不直接传力的四周混凝土的约束,混凝土的局部抗压强度有不同程度的提高,得

$$\sigma_{co} = \frac{F_1}{A_1} < \beta f_{cd} \quad (5)$$

式中: F_1 为压区 A 混凝土产生的接触压力,N; A_1 为锚头与混凝土局部受压区接触面积, mm^2 ; σ_{co} 压区 A 混凝土产生的压应力,Mpa; f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值,MPa; β 为混凝土局部抗压强度的提高系数。

从式(5)可见压区混凝土的强度验算与接触受压面积(A_1)紧密相关。如图 6b 所示,榫键设计时将锚头等分为 1~3 区三个部分,为保守计算可以近似认为压区 A 中的锚头长度为 $L/3$,得

$$\sigma_{co} = \frac{2V}{H(L/3)} = 6 \frac{V}{HL} < \beta f_{cd} \quad (6)$$

式中: V 为钢榫键接缝间剪力,N; H 为钢榫键锚头宽度,mm; L 为钢榫键锚头长度,mm。

2.1.2 接触面端部混凝土胀裂

与锚头接触的混凝土为三轴受压的应力状态。在局部受压端面,局部受压处混凝土横向膨胀的趋势受到周围非局部受压混凝土的限制,局部受压周围的混凝土受到横向拉应力,按此拉应力达到混凝土的抗拉强度 f_t 可能导致出现垂直于作用面的横向胀裂裂缝,如图 8a 所示。这类破坏由锚头周围混凝土沿周边的水平拉应力控制,是锚头接触面下混凝土

往外膨胀挤压的结果,试验破坏模式如图 8b、c 所示,且该破坏模式符合 CEB-FIP MC90 规范局部承压破坏模式—端部胀裂。

为避免试件在正常使用极限状态条件下,锚头附近出现胀裂裂缝,保证试件处于弹性阶段,应对该区域应力进行验算。依据 CEB-FIP MC90 模型,可得

$$pd_1 = f_{ct} (d_2 - d_1) \quad d_2 > d_1 \quad (7)$$

$$p = \frac{f_{cc}}{10} \cdot \frac{d_2 - d_1}{d_1} \quad (8)$$

由三轴受压效应,得

$$f_{cc}^* \approx f_{cc} + 5p = f_{cc} + 0.5f_{cc}(d_2 - d_1)/d_1 \quad (9)$$

由 $d_2 \approx 2 \sim 4d_1$,得

$$f_{cc}^* \approx 0.7f_{cc} \sqrt{A_2/A_1} \quad (10)$$

考虑尺寸效应,基于混凝土抗压强度乘以系数 1.3,得

$$f_{cc}^* \approx f_{cc} \sqrt{A_2/A_1} \quad (11)$$

依据规范要求得

$$f_{cc}^* \approx f_{cc} \sqrt{A_2/A_1} \leq 4f_{cc} \quad (12)$$

即,为了避免锚头下混凝土出现劈裂裂缝,应确保

$$A_2/A_1 \leq 16 \quad (13)$$

式中: A_1 为锚头与混凝土的接触面(加载面), mm^2 , A_1 依据图 6b 计算结果为 $HL/3$; A_2 为应力分布有效面积, mm^2 。钢榫键与混凝土试件靠边接触,属于局部偏心受压,在确定 A_2 时依据蔡绍怀提供的模型进行计算,如图 9 所示。

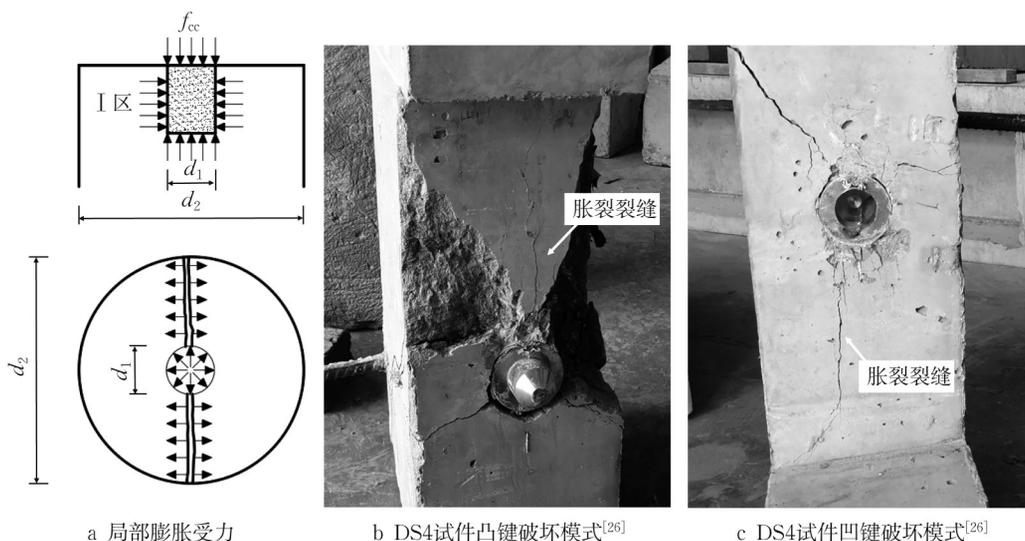


图8 接触面胀裂破坏

Fig.8 Contact surface concrete spalling

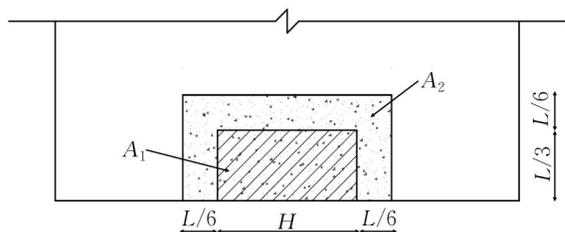
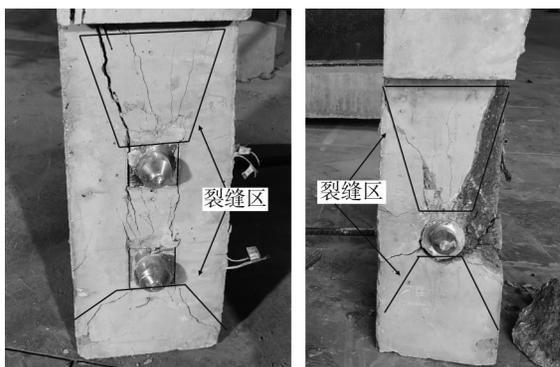


图9 蔡绍怀模型

Fig.9 CAI Shaohuai model

2.1.3 劈裂破坏

如图4、图5b所示,在局部压力作用下模型中II区应力 $\sigma_x = \sigma_y > 0$,榫键附近拉-压区混凝土由水平拉应力控制,当该区域混凝土所受拉应力超过混凝土抗拉强度即发生开裂,试件裂缝发展及破坏模式如图10a、b所示,且该破坏模式符合CEB-FIP MC90规范局部承压破坏模式—劈裂破坏。



a DS6试件双键破坏模式 b DS4试件单键破坏模式

图10 劈裂破坏^[26]

Fig.10 Splitting failure

为避免试件在正常使用阶段钢榫键附近拉-压区混凝土出现开裂,确保该区域混凝土处于弹性状态,应对该区域混凝土的抗拉强度进行验算。图4中应力迹线可近似地认为由两条圆弧组成,得到力学简化模型如图11所示。

依据图11可得

$$F_1 = (V/2) \tan\theta = \frac{(V/2)(b_2/4 - b_1/4)}{0.4b_2} \quad (14)$$

$$F_1 = 0.3V(1 - b_1/b_2) \quad (15)$$

同时,结合图4可得

$$F_1 = 0.3V(1 - b_1/b_2) < 0.6b_2h_1f_{td} \quad (16)$$

式中: F_1 为计算拉应力,MPa; f_{td} 为混凝土抗拉强度设计值,MPa; V 为接缝间剪力,N; $0.6b_2$ 为应力场内拉应力高度,如图4所示;结合图4、图5、图6b可以得到 $b_1 = H, h_1 = L/3, b_2 = 2a$,分别代入式(16)得

$$F_1 = 0.3V(1 - H/2a) < \frac{2aL}{5} f_{td} \quad (17)$$

2.2 钢榫键剪切破坏

凸键脱离体受力如图12a所示。在作用力 F, F_1, F_2 的共同作用下,凸键跨缝齿与锚头间出现相向运动的趋势,进而发生剪切滑移,最终凸键跨缝齿沿根部发生直剪破坏,如图12b所示。

基于图12中所示钢榫键力学行为及破坏模式,得

$$\tau_{sk} = \frac{V}{nA} < f_{vd} \quad (18)$$

式中: τ_{sk} 为钢榫键跨缝齿截面应力,MPa; n 为接缝面钢榫键的数量,(1,2,3...); A 为钢榫键跨缝齿截面积, mm^2 ; V 为节段梁接缝面在最不利工况条件下的

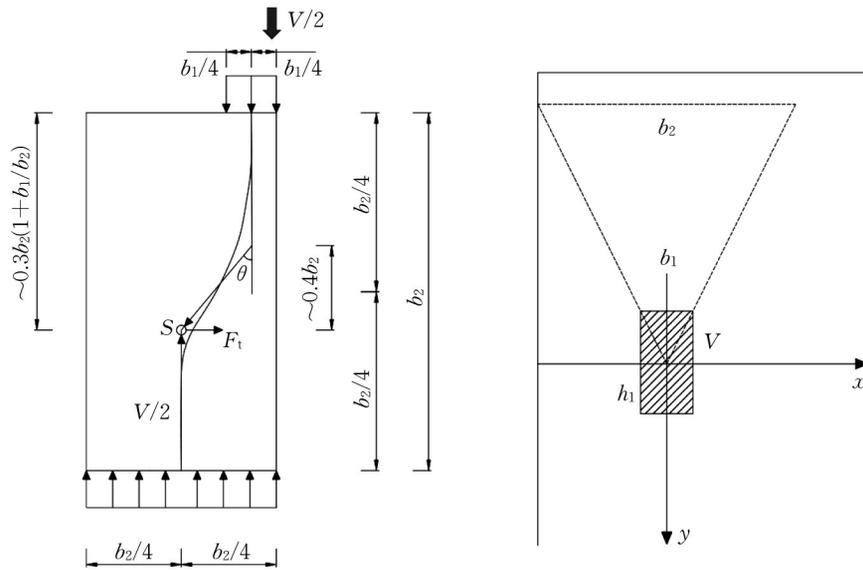


图 11 力学简化模型

Fig.11 Simplify mechanical model

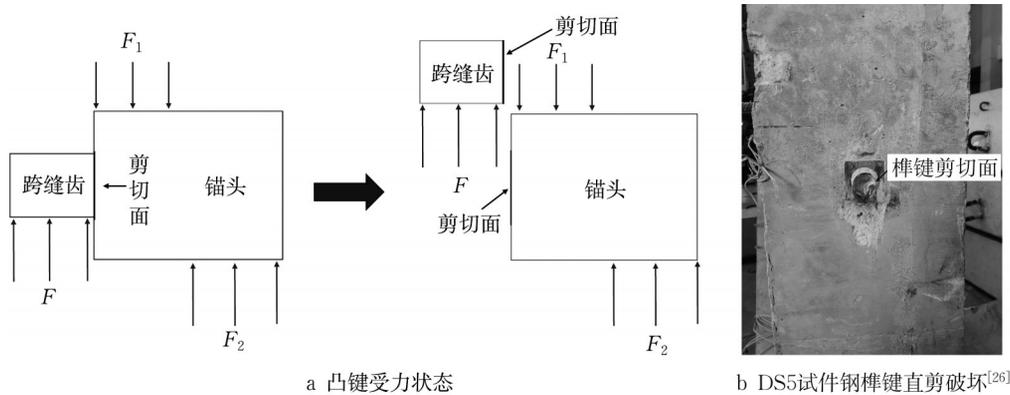


图 12 钢榫键力学行为及破坏模式

Fig.12 The failure model of steel shear key

截面剪力, N ; f_{vd} 为钢榫键材料抗剪强度设计值, MPa。

依据 San Venient 原理和图 4, 在局部受压构件中, 离开轴力作用端面一定距离 ($h \geq 2a$) 外的柱体可视作均匀的单轴应力状态。但是, 在端部 $h < 2a$ 范围内, 因为两端压应力分布的差别, 因而产生了复杂的应力变化。当榫键间距小于试件宽度 $S/2a < 1$ 时, 如图 13a、b 所示。S 范围内的应力分布不再均匀, 内部应力更集中于榫键作用面轴线周围, 榫键锚头接触面产生由底面往上发展的裂缝, 榫键间混凝土将产生劈裂裂缝, 试验结果如图 13c 所示。

因此, 式(18)在计算多榫键接缝抗剪强度时, 榫键间距应大于试件宽度 $2a$ (腹板宽度), 即 $S > 2a$; 若榫键布置间距小于试件宽度 $2a$, 应乘以分项系数 α , $\alpha < 1$, 具体值与榫键间距有关, 得

$$V = \alpha n A f_{vd} \quad (19)$$

2.3 混凝土撕裂破坏

由于杠杆效应, 锚头附近形成方向相反的作用力 F_1 、 F_2 , 如图 14a 所示。对 F_1 、 F_2 平移至与加载力 V 共线, 如图 14b 所示。因此, 在 F_1 、 F_2 共同作用下, 锚头附近混凝土将出现撕裂破坏, 如图 15 所示。

为避免试件在正常使用阶段钢榫键附近混凝土出现撕裂, 确保该区域混凝土处于弹性状态, 应对该区域混凝土的抗拉强度进行验算。

$$V < f_{td} L (2a - H) + f_{sd} A_s \quad (20)$$

式中: L 为锚头的长度, mm; H 为锚头的宽度, mm; $2a$ 为试件的宽度, mm; f_{td} 为混凝土抗拉强度设计值, MPa; V 为接缝间的剪力, N; f_{sd} 为箍筋抗拉强度设计值, MPa; A_s 为箍筋截面积, mm^2 。

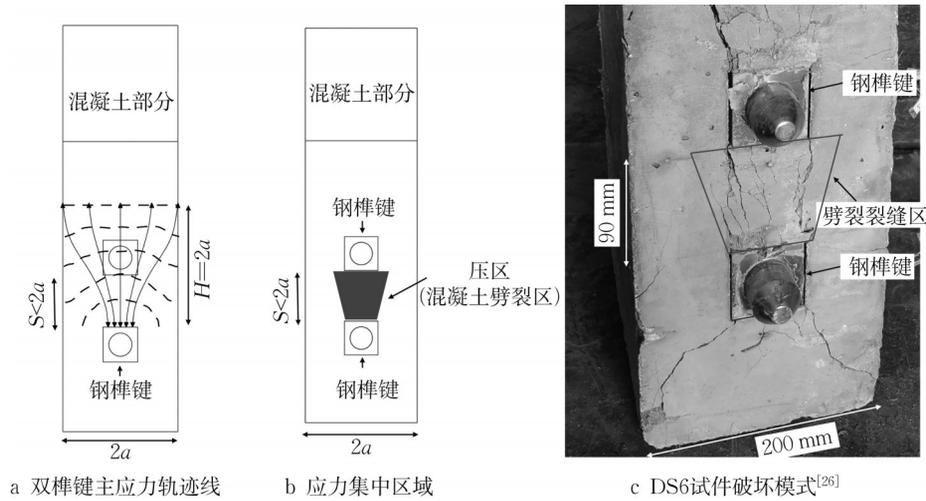


图13 多榫键力学行为

Fig.13 Mechanical behavior of multiple key

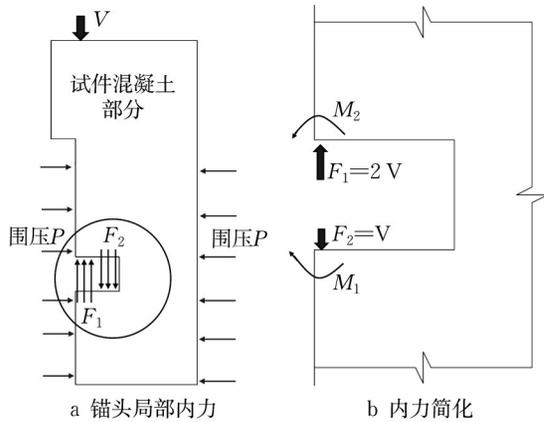


图14 凸键试件力学行为

Fig.14 Mechanical behavior of convex key specimen

3 抗剪承载力计算方法

试件在局部受压条件下可能出现混凝土端面压碎、劈裂破坏,结构配筋设计时应根据强度需要在局压区端面混凝土内及劈裂裂缝路径设置加强筋(平行于锚头面布置)。因此,分别在式(6)、式(17)基础上应叠加加强筋抗力,得到式(22)~(23)。综合前述试验结果及力学分析,相比混凝土出现局部受压破坏、撕裂破坏,钢榫键发生剪切破坏时试件荷载一位移曲线发展历程长,结构呈延性破坏^[26],接缝宜按式(21)进行强度设计。但在应用该式进行强度设计时,应确保榫键周边混凝土处于弹性状态,避免混凝土出现局部受压破坏、撕裂破坏,榫键周围混凝土应力验算需满足式(22)~(25);或利用式(22)~(25)对榫键周围混凝土进行局部加强筋设计:

$$V_1 = \alpha n A f_{vd} \quad (21)$$

$$V_1 < \frac{\beta f_{cd} HL}{6} + k \beta_{cor} \rho_v f_{sd} \frac{HL}{3} \quad (22)$$

$$0.3V_1(1 - H/2a) < \frac{2aL}{5} f_{td} + f_{sd} A_s \quad (23)$$

$$V_1 < f_{td} L \cdot (2a - H) + f_{sd} A_s \quad (24)$$

$$A_2/A_1 \leq 16 \quad (25)$$

式中: V_1 为钢榫键接缝抗剪承载力, N; H 为钢榫键锚头宽度, mm; L 为钢榫键锚头长度, mm; f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值, MPa; β 为混凝土局部抗压强度的提高系数, 保守计算时可取 $\beta = 1$; $2a$ 为试件的宽度, mm; f_{td} 为混凝土抗拉强度设计值, MPa; n 为接缝面钢榫键的数量, (1, 2, 3...); A 为钢榫键跨缝齿截面积, mm²; f_{vd} 为钢榫键材料抗剪强度设计值, MPa; A_1 为锚头与混凝土的接触面(加载面), mm²; A_2 为应力分布有效面积, mm²; α 为折减系数, 榫键间距应大于试件宽度 $2a$ (腹板宽度), 即 $S > 2a$ 时, $\alpha = 1$; A_s 为锚头长度范围内箍筋面积, mm²; f_{sd} 为箍筋抗拉设计强度, MPa; A_s 为锚头长度范围垂直于箍筋加强筋面积, mm²; f_{sd} 为加强筋抗拉设计强度, MPa; β_{cor} 配置间接钢筋时局部抗压承载力提高系数, 按规范^[29]5.7.2取值; ρ_v 为间接钢筋体积配筋率, 按规范^[29]5.7.2取值和布置。

综上所述, 可得钢榫键接缝抗力计算如下:

$$V = V_1 + V_2 \quad (26)$$

$$V_2 = \mu A_{sm} \sigma_n \quad (27)$$

式中: V_1 为钢榫键提供的抗力, 按式(21)进行计算, N; V_2 为接缝间摩擦力提供的抗力^[30], N; σ_n 为接缝间应力, MPa; A_{sm} 为接缝面积, mm²。

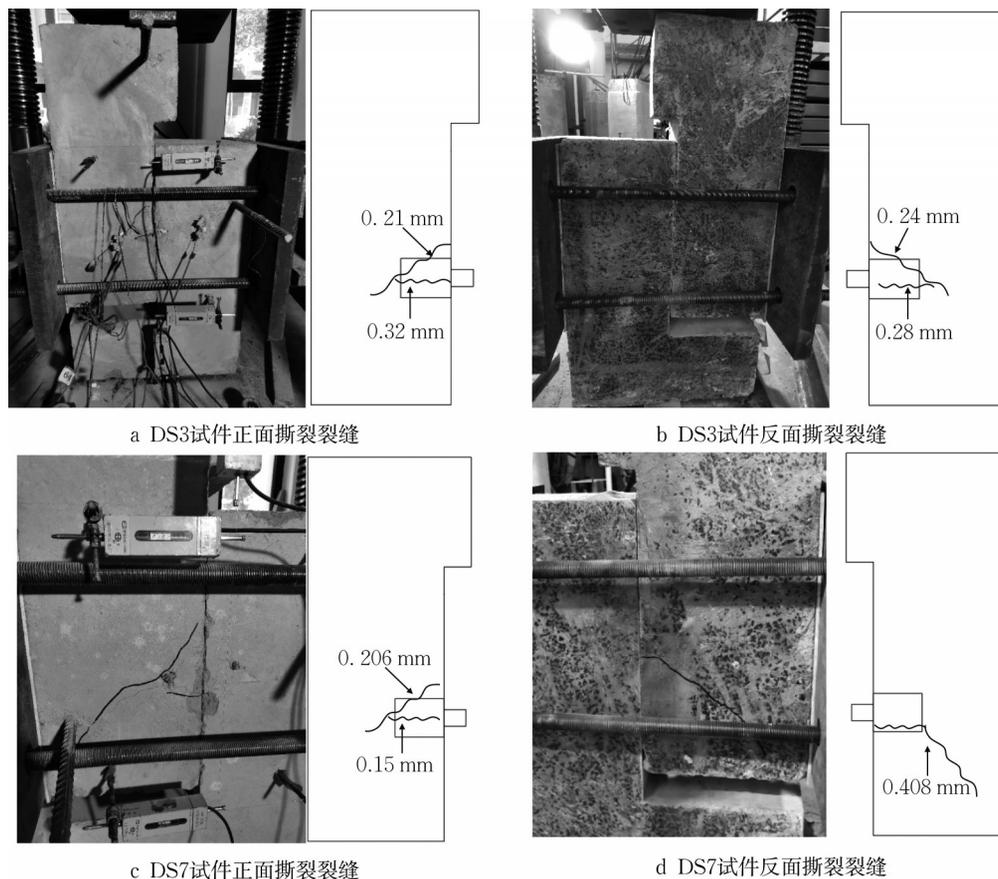
图15 试件破坏模式^[26]

Fig.15 DS3 and DS7 failure model

4 结论

(1)获得钢榫键接缝的抗剪机理:钢榫键接缝在侧限力的作用下依靠榫键和混凝土的接触受压来传递接缝间的剪力,接缝具有较高的抗剪承载力和良好的延性。

(2)结合钢榫键接缝的传力机制及试验结果,构建了钢榫键接缝的力学模型,并对接缝的抗剪机理和破坏模式进行了理论分析。获得了钢榫键接缝的破坏模式包括:端部混凝土胀裂、端面混凝土压碎、混凝土劈裂破坏、混凝土撕裂破坏及钢榫键直接剪切破坏。

(3)提出钢榫键接缝应采用榫键剪切破坏进行抗力设计,但须对榫键周围混凝土进行强度验算。钢榫键接缝抗力可按剪切实用公式计算,钢榫键材料和跨缝齿直径均是影响钢榫键接缝承载力的关键因素。

(4)钢榫键干接缝抗力由钢榫键和接缝间摩擦力提供,多榫键接缝应考虑榫键间距对接缝力学性能的影响。

作者贡献声明:

邹宇:完成试验实施、理论公式推导,论文整体的撰写并修改;

贾勤龙:试验实施、数据采集;

徐栋:整体思路构架,指导论文撰写与修改;

宋冰泉:提出研究需求,论文审阅及定稿;

申洛岑:研究选题,提供研究思路;

谢正元:进行钢榫键设计、提供咨询;

戚永超:试验实施、数据采集。

参考文献:

- [1] ZHOU X, MICKLEBOROUGH N, LI Z. Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(1):3.
- [2] 孙雪帅. 预制拼装桥梁节段间接缝抗剪性能试验研究 [D]. 南京:东南大学, 2015.
SUN Xueshuai. Experimental study on shear behavior of joints in precast segmental bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [3] TURMO J, RAMOS G, APARICIO A. Shear strength of dry joints of concrete panels with and without steel fibres: Application to precast segmental bridges [J]. Engineering

- Structures, 2006, 28(1):23.
- [4] JONES LL. Shear test on joints between precast post-tensioned units [J]. Magazine of Concrete Research, 1959, 11(31):25.
- [5] BUYUKOZTURK O, BAKHOUM M M, BEATTIE S M. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(12):3380.
- [6] AASHTO. Guide specifications for design and construction of segmental concrete bridges [M]. Washington DC; AASHTO, 1999.
- [7] ISSA M A, ABDALLA H A. Structural behavior of single key joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3):315.
- [8] ROMBACH G. Precast segmental box girder bridges with external prestressing-design and construction [D]. Hamburg: Technical University of Hamburg and Harburg, 2002.
- [9] JIANG H, CHEN L, MA Z J, *et al.* Shear behavior of dry joints with castellated keys in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(2):04014062.
- [10] SMITTAKORN W, MANAVITHAYARAK P, SUKMOUNG P. Improvement of shear capacity for precast segmental box girder dry joints by steel fiber and glass fiber [C]// Proceedings of the MATEC Web of Conferences. [S.l.]: EDP Sciences, 2019: 04006.
- [11] SHAMASS R, ZHOU X, ALFANO G. Finite-element analysis of shear-off failure of keyed dry joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(6):04014084.
- [12] JIANG H, YING C, LIU A, *et al.* Effect of high-strength concrete on shear behavior of dry joints in precast concrete segmental bridges [J]. Steel Composite Structures, 2016, 22(5):1019.
- [13] ALCALDE M, CIFUENTES H, MEDINA F. Influence of the number of keys on the shear strength of post-tensioned dry joints [J]. Materiales De Construccion, 2013, 63(310):297.
- [14] AHMED G H, AZIZ O Q. Stresses, deformations and damages of various joints in precast concrete segmental box girder bridges subjected to direct shear loading [J]. Engineering Structures, 2020, 206:110151.
- [15] AHMED G H., AZIZ O Q. Shear behavior of dry and epoxied joints in precast concrete segmental box girder bridges under direct shear loading [J]. Engineering Structures, 2019, 182:89.
- [16] MORETON A J. Tests of epoxy-glued joints for a segmental precast bridge deck [J]. International Journal of Adhesion Adhesives, 1982, 2(2):97.
- [17] MOUSTAFA S E. Ultimate load test of a segmentally constructed prestressed concrete I-beam [J]. PCI Journal, 1974, 19(4):54.
- [18] BEATTIE S M. Behavioral improvements in segmental concrete bridge joints through the use of steel fibers [M]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [19] JIANG H, WEI R, JOHN Ma Z, *et al.* Shear strength of steel fiber-reinforced concrete dry joints in precast segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11):04016085.
- [20] 姜海波, 王添龙, 肖杰, 等. 预制节段钢纤维混凝土梁干接缝抗剪性能试验 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(12):37. JIANG Haibo, WANG Tianlong, XIAO Jie, *et al.* Test on shear behavior of dry joints in precast steel fiber reinforced concrete segmental bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12):37.
- [21] VOO YL, FOSTER SJ, VOO CC. Ultrahigh-performance concrete segmental bridge technology: toward sustainable bridge construction [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(8):B5014001.
- [22] KIM YJ, CHIN WJ, JEON SJ. Interface Shear Strength at Joints of Ultra-High Performance Concrete Structures [J]. International Journal of Concrete Structures Materials, 2018, 12(6):767.
- [23] 袁爱民, 符俊冬, 程磊科, 等. 节段预制桥梁胶接缝配筋剪力键剪切性能试验 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(12):81. YUAN AM, FU JD, CHENG LK, *et al.* Experiment of shear performance of epoxy resin joints with reinforced keys in precast concrete segmental bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12):81.
- [24] SANGKHON A, PISITPAIBOOL C. Shear strength test of joint with different geometric shapes of shear keys between segments of precast segmental bridge [J]. International Transaction Journal of Engineering Management Applied Sciences Technologies, 2017, 8(1):23.
- [25] GOPAL BA, HEJAZI F, HAFEZOLGHORANI M, *et al.* Numerical analysis and experimental testing of ultra-high performance fibre reinforced concrete keyed dry and epoxy joints in precast segmental bridge girders [J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2019, 11(4):463.
- [26] 邹宇, 柳惠芬, 徐栋, 等. 预制节段桥梁钢棒键接缝直剪力学性能试验 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(2):212. ZOU Y, LIU H F, XU D, *et al.* Experimental study of steel keyed joints in precast concrete segmental bridges under direct shear loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2022, 50(2):212.
- [27] 邹宇, 徐栋, 宋冰泉, 等. 预制节段桥梁钢棒键接缝受力特性 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(7):986. ZOU Y, XU D, SONG BQ, *et al.* Mechanical characteristics of steel keyed joints of precast segmental bridge [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2021, 49(7):986.
- [28] 邹宇, 端木祥永, 宋冰泉, 等. 预制节段桥梁钢棒键接缝剪切性能及工法设计 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(10):62. ZOU Y, DUANMU X Y, SONG B Q, *et al.* Shear properties and construction design of steel shear key in precast segmental bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(10):62.
- [29] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [M]. 北京: 人民交通出版社. 2018. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and concrete bridges and culverts [M]. Beijing: People's Communications Press, 2015.
- [30] TASSIOS T P. Concrete-to-concrete friction [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(4):832.