

DOI:10.11784/tdxbz202407002

## 混凝土盖梁胶接缝抗剪承载力试验及参数分析

李长春<sup>1</sup>, 秦志清<sup>2</sup>, 陈金盛<sup>2</sup>, 卓卫东<sup>1</sup>

(1. 福州大学土木工程学院, 福州 350108; 2. 福建省交通规划设计院有限公司, 福州 350043)

**摘要:** 拼接缝是节段预制拼装混凝土盖梁的薄弱环节, 为研究其抗剪承载力, 开展了盖梁键齿胶接缝抗剪性能试验及有限元模拟分析, 模拟剪切荷载-相对滑移曲线和开裂破坏形态与试验结果吻合较好. 采用有限元模型对盖梁键齿胶接缝进行参数分析, 探讨侧向压应力、混凝土强度等级、键齿内配筋率以及键齿数量、深度和倾角对键齿胶接缝抗剪承载力的影响. 研究表明: 键齿胶接缝在剪力作用下的破坏模式均为脆性破坏. 键齿胶接缝的抗剪承载力随着侧向压应力、混凝土强度等级及键齿内配筋率的增加而增加: 当侧向压应力由 1 MPa 增至 9 MPa 时, 抗剪承载力增加了 71.3%; 当混凝土强度等级由 C40 提高至 C80 时, 抗剪承载力增加了 22.3%; 当键齿内配筋率由 0.5% 增至 2.6% 时, 抗剪承载力增加了 14.8%. 键齿数量、深度和倾角均对键齿胶接缝的抗剪承载力有较大影响, 建议实际工程中键齿数量不超过 3 个, 深度不超过 105 mm, 倾角不超过 45°. 基于 Gopal 公式建立了键齿胶接缝抗剪承载力的实用计算公式, 该公式计算结果与试验及有限元分析结果均吻合良好, 可用于键齿胶接缝的抗剪承载力计算.

**关键词:** 胶接缝; 有限元模拟; 侧向压应力; 键齿倾角; 抗剪承载力

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)04-0368-11

## Tests and Parametric Analysis of Shear Bearing Capacity of Epoxy Joints in Concrete Cap Beam

Li Changchun<sup>1</sup>, Qin Zhiqing<sup>2</sup>, Chen Jinsheng<sup>2</sup>, Zhuo Weidong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350043, China)

**Abstract:** The split-joint is a weak link in a segmental prefabricated concrete cap beam. To study its shear bearing capacity, shear performance tests and finite element simulation analysis were carried out on the key tooth epoxy joints in the cap beam, and it was found that the simulated shear load-relative slip curves and the cracking failure pattern were in good agreement with the test results. The parametric analysis of epoxy joints was performed using finite element models, and the influences of lateral compressive stress, concrete strength grade, internal reinforcement ratio, and the number, depth and inclination angle of key teeth on the shear bearing capacity of epoxy joints were discussed. Results show that the failure pattern of the epoxy joint under the shear force was brittle failure. The shear bearing capacity of the epoxy joint increased with the growing lateral compressive stress, concrete strength grade and internal reinforcement ratio of key teeth. In the cases of the lateral compressive stress rising from 1 MPa to 9 MPa, the concrete strength grade rising from C40 to C80 and the internal reinforcement ratio rising from 0.5% to 2.6%, the shear bearing capacity increased by 71.3%, 22.3% and 14.8%, respectively. Since all the number, depth and inclination angle of key teeth had a great impact on the shear bearing capacity of the epoxy joint, it is recommended that the number of key teeth should not exceed 3, the depth should not exceed 105 mm, and the inclination angle should not exceed 45° in actual projects.

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-11-05.

作者简介: 李长春(1993—), 男, 博士研究生, 892792312@qq.com.

通信作者: 卓卫东, zhuowd@fzu.edu.cn.

基金项目: 福建省高校产学研合作项目(2019Y4003); 福建省交通运输科技示范工程项目(2021-2); 福州市市政建设开发有限公司科技项目(榕市建-20190987号).

**Supported by** the Industry-University Cooperation Project of Fujian Province(No. 2019Y4003), the Technology Demonstration Project of Fujian Transportation Science(No. 2021-2), the Science and Technology Project of Fuzhou Municipal Construction and Development Co., Ltd.(No. 20190987).

Based on the Gopal formula, a practical calculation formula for the shear bearing capacity of epoxy joints was also established, and the values calculated using this formula agreed well with the test results and finite element analysis results, indicating that it can be used to calculate the shear bearing capacity of epoxy joints.

**Keywords:** epoxy joint; finite element simulation; lateral compressive stress; key tooth inclination angle; shear bearing capacity

城市桥梁的混凝土盖梁往往呈现长悬臂、大体积、大自重等特点,为了加快工程中施工进度,节段预制拼装技术已成为一种广泛采用的施工方法,在上海 S26、S7 公路项目及福州市新店外环路西段道路、吉隆坡沙阿兰等主体高架桥中均得到了成功应用<sup>[1]</sup>。然而,节段预制拼装混凝土盖梁在拼接缝处存在薄弱环节,因此其抗剪性能值得重点关注和研究<sup>[2-3]</sup>。

为提高混凝土节段拼接缝的抗剪承载力,通常需要在拼接缝处设置键齿剪力键以构成键齿胶接缝。国内外学者开展了众多试验研究,深入探讨了节段预制拼装混凝土梁中键齿干接缝的抗剪性能<sup>[4-13]</sup>,结果表明:随着侧向压应力、键齿数量及深度的增加,键齿干接缝的抗剪承载力也会增大;反之,该抗剪承载力随着键齿间距的增大而减小。键齿胶接缝能够减少接缝处缺陷,与键齿干接缝相比,其具有更高的抗剪承载力<sup>[8]</sup>。Issa 等<sup>[14]</sup>开展了节段预制拼装混凝土梁键齿胶接缝试件的抗剪承载力试验,发现试件断裂发生在胶接缝处,环氧树脂能够显著提高其抗剪承载力。袁爱民等<sup>[15]</sup>开展了 3 组节段预制拼装混凝土梁键齿胶接缝试件的直剪试验,结果显示键齿内增加配筋能够提高试件的延性及抗剪承载力,降低开裂荷载与极限荷载的比值,改变开裂形式。Ahmed 等<sup>[16-17]</sup>也开展了类似的系列试验,指出侧向压应力能够提高拼接缝的抗剪承载力,提高混凝土强度也会提高拼接缝的抗剪承载力,但效果不明显。综合国内外的相关研究可以发现,目前的研究工作多集中于节段预制拼装混凝土梁的键齿胶接缝,然而对节段预制拼装混凝土盖梁中键齿胶接缝的抗剪性能研究明显不足,且现有研究未充分考虑键齿倾角、深度、数量等关键构造参数对其抗剪承载力的影响。

针对目前试验与理论研究的不足,本文以节段预制拼装混凝土盖梁键齿胶接缝直剪试验为基础,采用 ABAQUS 软件建立键齿胶接缝试件的有限元模型,通过试验结果对有限元模型的有效性进行验证;利用验证后的有限元模型,开展参数化分析,系统探讨侧向压应力、混凝土强度等级、键齿内配筋率  $\rho$  以及键齿数量  $n$ 、深度和倾角对键齿胶接缝抗剪承载力的影响规律;基于试验和参数分析结果,提出键齿胶接缝抗剪承载力的实用计算公式,以期节段预制拼装混

凝土盖梁键齿胶接缝设计提供依据。

## 1 混凝土盖梁胶接缝直剪试验

### 1.1 试验概况

本文试验试件采用三段式结构,根据原型混凝土盖梁拼接缝节点的缩尺比例 1:2 进行试件设计<sup>[18]</sup>;试件采用原形材料制作,混凝土强度等级为 C50,键齿内配筋采用 HRB400 级钢筋,直径为 6 mm。根据相似关系,取试件高度为 950 mm,宽为 1 100 mm,厚度为 200 mm,侧向压应力取为 7 MPa。以键齿倾角  $\theta$  和键齿深度  $h$  为试验参数,设计 2 组共 6 个盖梁键齿胶接缝试件。图 1 给出了试件尺寸具体情况,表 1 列出了各试件的设计参数。根据材性实验结果,试件 C50 混凝土的立方体抗压强度为 53.9 MPa,弹性模量为  $3.51 \times 10^4$  MPa;HRB400 级钢筋的屈服强度和抗拉强度分别为 572 MPa 和 670 MPa,弹性模量为  $2.15 \times 10^5$  MPa。试件加载方案见文献[19]。

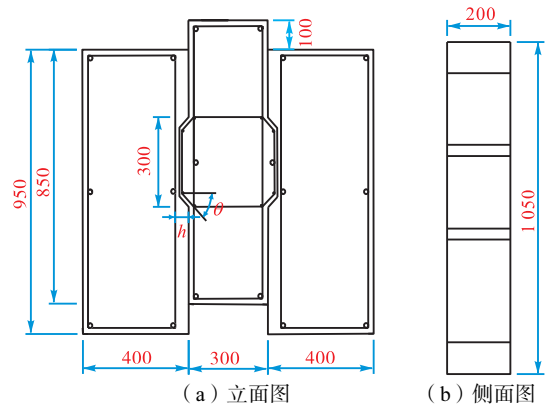


图 1 试件尺寸及配筋布置(单位:mm)

Fig.1 Dimension and reinforcement layout of specimen (unit:mm)

表 1 各试件设计参数及实测抗剪承载力

Tab.1 Design parameters and measured shear bearing capacity of each specimen

试件 分组	试件 编号	键齿深度 $h/\text{mm}$	键齿倾角 $\theta/(\text{°})$	抗剪承载 力/kN	极限位移/ mm
1	ES-1	35	45	3 122	2.50
	ES-2	35	15	3 129	2.65
	ES-3	35	30	3 207	3.30
	ES-4	35	60	2 862	2.60
2	ES-5	70	45	3 311	2.18
	ES-6	105	45	3 539	1.83

### 1.2 试验结果

试验现象观察发现:在直剪荷载作用下,接缝底部最先开裂且逐渐沿键齿根部扩展,对键齿深度为 35 mm 的试件(试件 ES-1 ~ ES-4),当键齿倾角  $\theta \geq 45^\circ$  时,裂缝基本沿胶接缝界面发展;当键齿倾角  $\theta \leq 30^\circ$  时,键齿区域混凝土形成了与垂直方向夹角约为  $15^\circ \sim 45^\circ$  的斜裂缝;对于键齿倾角为  $45^\circ$  但键齿深度较大的试件(试件 ES-5 和 ES-6),键齿区域混凝土出现了与垂直方向平行的裂缝;当达到极限承载力时,主裂缝贯通键齿根部,键齿剪切破坏.图 2 为各试件的破坏形态及破坏时的裂缝分布,可见各试件均发生剪切破坏,且主裂缝形态受键齿深度和键齿倾角的耦合影响:当键齿深度较小且键齿倾角较大时,键齿区域主裂缝基本出现在胶接缝界面;当键齿深度和键齿倾角均较小或键齿深度较大时,键齿区域主裂缝出现在键齿混凝土内部.

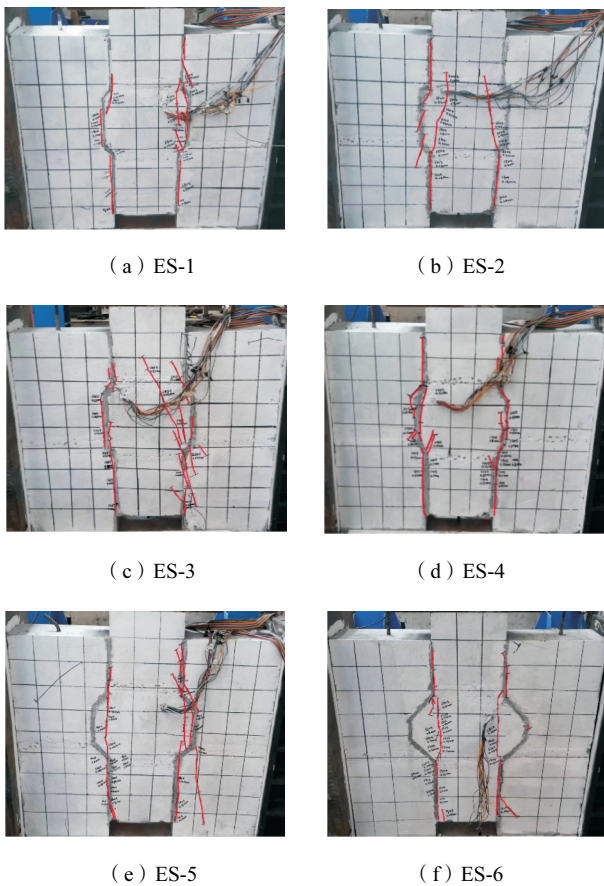


图 2 各试件破坏形态及裂缝分布

Fig.2 Failure modes and distribution of cracks for each specimen

表 1 给出了 2 组共 6 个试件的抗剪承载力(最大竖向荷载)和极限位移(定义为与最大竖向荷载相应的胶接缝界面的相对滑移).可以看出,对键齿深度均为 35 mm 的各试件,键齿倾角为  $30^\circ$  的试件 ES-3

的抗剪承载力最大;与试件 ES-3 相比,键齿倾角为  $15^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  试件的抗剪承载力分别减小了 2.4%、2.7% 和 10.8%,说明键齿胶接缝的抗剪承载力受键齿倾角的影响,且最优键齿倾角为  $30^\circ$ .对于键齿倾角均为  $45^\circ$  的各试件,其抗剪承载力随键齿深度的增大而增大;与键齿深度为 35 mm 的试件 ES-1 相比,键齿深度为 70 mm 和 105 mm 的试件的抗剪承载力分别提高了 6.1% 和 13.4%,说明增大键齿深度可有效提高键齿胶接缝的抗剪承载力.此外,各试件的极限位移均为毫米级的微小位移且保持为同量级,表明键齿胶接缝在直剪荷载作用下的破坏模式为脆性破坏.

## 2 混凝土盖梁胶接缝抗剪性能参数分析

### 2.1 有限元模型及验证

采用 ABAQUS 软件,建立了 6 个试件的精细化有限元模型.试件混凝土部分采用实体单元 C3D8R 模拟,以防止有限元计算不收敛等问题,其本构模型选为塑性损伤模型<sup>[20-21]</sup>,部分参数取值如表 2 所示,其余参数取实测值;普通钢筋采用单元 T3D2 模拟,采用双折线本构模型,材料参数取实测值;采用嵌入约束将普通钢筋骨架与混凝土实体单元进行连接.

表 2 塑性损伤模型参数取值

Tab.2 Parametric values of plastic damage model

膨胀角/ $^\circ$	偏心率	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	界面刚度 $K$	黏性系数
38	0.1	1.16	0.666 7	0.000 5

注:  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$  为双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度的比值;  $K$  为拉伸子午面上和压缩子午面上的第 2 应力不变量之比.

胶接缝界面的准确模拟是建立正确胶接缝有限元模型的关键,由于胶接缝界面厚度一般仅为 1 ~ 3 mm,故本文采用黏性接触单元进行模拟.根据试验结果,胶接缝界面存在一定的环氧树脂黏结剂脱空现象,故将黏性接触单元损失起始应力取为 2.5 MPa(对黏结强度最大值 3 MPa 进行折减)<sup>[22]</sup>.黏性接触单元的界面刚度  $K$  一般可按式(1)计算得出<sup>[23]</sup>.试验现象观察表明,部分试件破坏并非表现为胶接缝界面胶体撕裂,而是发生在紧邻接缝的混凝土区域,故其界面刚度还需根据试验结果进行调整,调整后取值为  $2 \times 10^4$  MPa/mm.单元网格尺寸均选取为 20 mm.图 3 为本文建立的试件 ES-1 的三维精细化有限元模型,其他试件的精细化有限元模型与之基本相同.

$$K = E_{c0} / L_c \tag{1}$$

式中:  $E_{c0}$  为等效弹性模量, MPa,  $E_{c0} = (E_c + E_e) / 2$ ,

$E_c$  为混凝土弹性模量, MPa,  $E_e$  为环氧树脂弹性模量, MPa;  $L_e$  为环氧树脂胶层的厚度, mm.

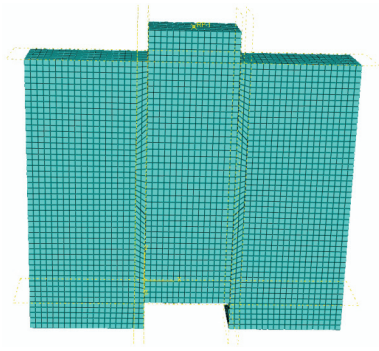


图3 试件 ES-1有限元模型

Fig.3 Finite element model of specimen ES-1

横向荷载以均布力形式施加于模型两侧面上, 加载区域面积为  $850\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ; 竖向加载采用位移加载方式<sup>[24]</sup>. 边界条件为底面固结.

图 4 给出了有限元模型计算与试验实测得到的各试件剪切荷载-相对滑移曲线对比, 可见两者发展规律总体一致, 吻合较好. 表 3 给出了有限元模型计算得到的各试件抗剪承载力、极限位移与试验结果对比, 可见有限元模拟得到的各试件抗剪承载力和极限位移与相应的试验结果之比的均值分别为 0.99 和 1.06, 标准差分别为 0.023 和 0.084, 变异系数分别为 0.023 和 0.078. 有限元模型计算的结果与试验结果吻合较好, 验证了所建立的三维精细化有限元模型可准确预测混凝土盖梁键齿胶接缝剪切荷载-相对滑移曲线.

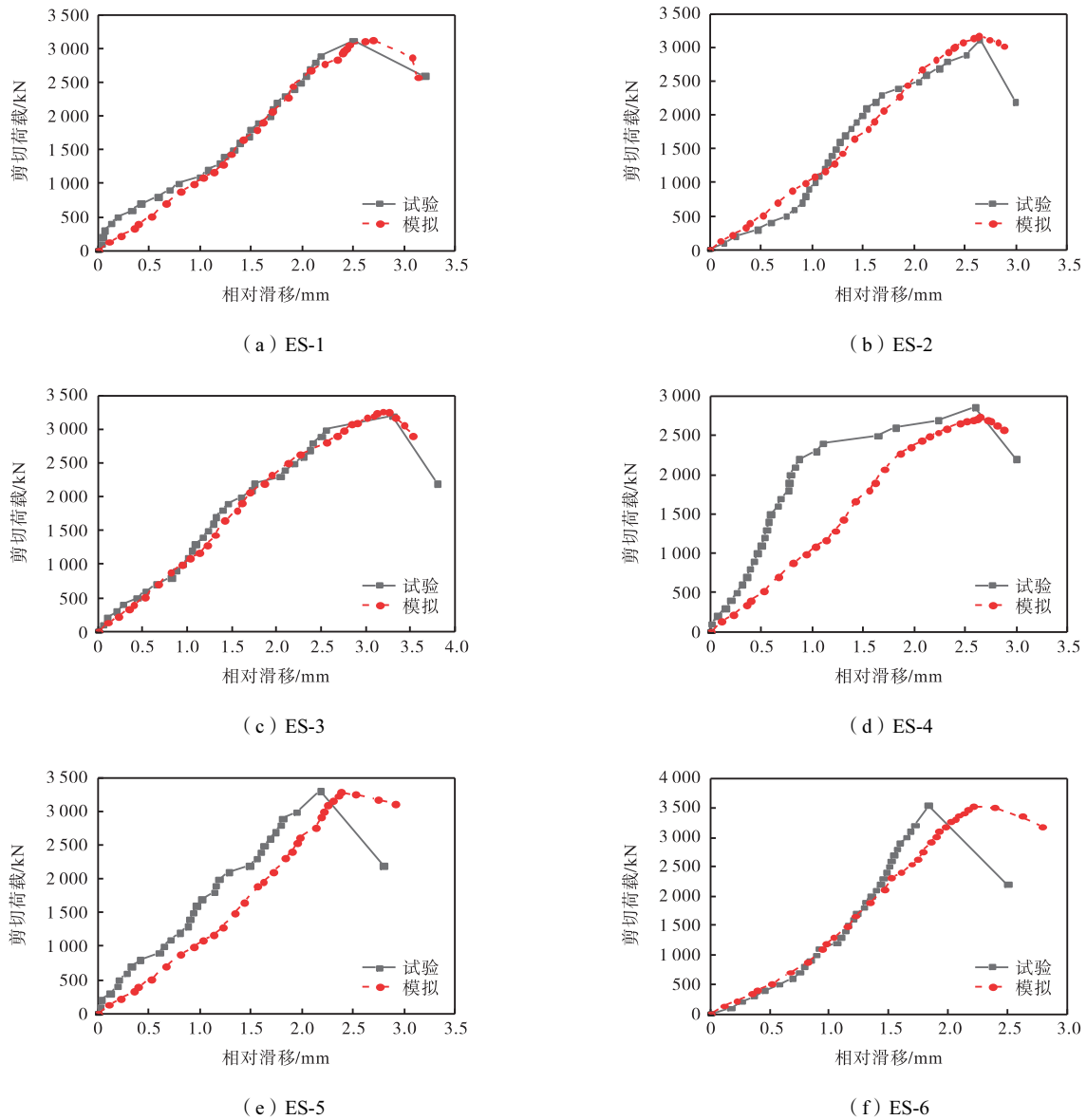


图 4 有限元与试验剪切荷载-相对滑移曲线对比

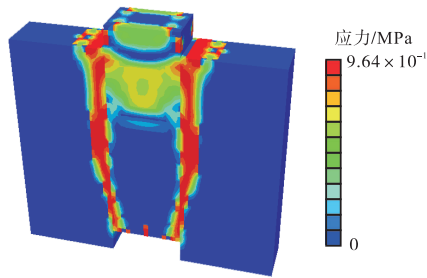
Fig.4 Comparison of shear load-relative slip curves between FEM and test results

表 3 有限元与试验结果对比

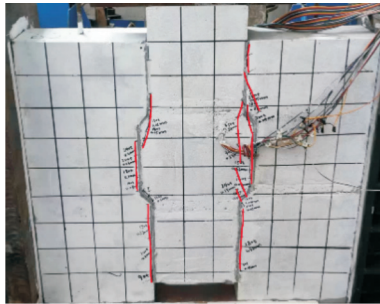
Tab.3 Comparison between FEM and test results

试件 编号	抗剪承载力		极限位移	
	计算值/ kN	计算值/ 试验值	计算值/ mm	计算值/ 试验值
ES-1	3 135.8	0.99	2.69	1.08
ES-2	3 181.3	1.02	2.64	1.00
ES-3	3 269.6	1.02	3.19	0.97
ES-4	2 736.3	0.96	2.64	1.01
ES-5	3 289.3	0.99	2.38	1.09
ES-6	3 527.3	0.99	2.20	1.20

图 5 为有限元模拟与试验实测得到的试件典型破坏形态及破坏时的裂缝分布情况,可见,有限元模型中键齿破坏均发生在键齿部位,且裂缝发展规律也是由键齿根部逐渐往键齿上部发展,与试验中键齿的开裂和破坏现象基本吻合。



(a) 有限元模拟结果



(b) 试验结果

图 5 破坏形态及破坏时裂缝分布对比

Fig.5 Comparison of damage modes and distribution of cracks in failure state

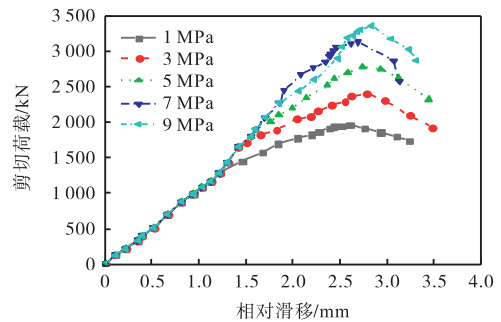
### 2.2 参数拓展分析

本文以试件 ES-1 为基础,采用验证后的有限元建模技术建立混凝土盖梁键齿胶接缝的基准有限元模型,开展抗剪性能参数化分析,探究侧向压应力、混凝土强度等级、键齿内配筋率以及键齿数量、深度和倾角对键齿胶接缝抗剪性能的影响。

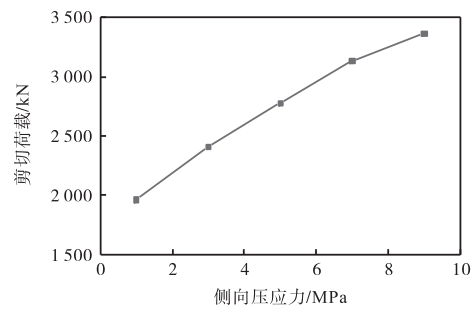
#### 2.2.1 侧向压应力影响分析

节段预制拼装混凝土盖梁通常为预应力混凝土构件,因此其键齿胶接缝的抗剪性能受预应力的影响

较大,取侧向压应力分别为 1 MPa、3 MPa、5 MPa、7 MPa 和 9 MPa 进行分析. 图 6 给出不同侧向压应力下键齿胶接缝模型的剪切荷载-相对滑移曲线和抗剪承载力. 从图 6(a)可以看出,模型在弹性阶段的刚度基本不会随侧向压应力的变化而变化,说明侧向压应力对键齿胶接缝开裂前的剪切刚度基本没有影响;在达到极限剪切荷载时,各模型相应的极限位移均小于 3 mm,表明其均为脆性破坏. 此外,侧向压应力越大,抗剪承载力也越大. 从图 6(b)可以看出,侧向压应力为 1 MPa 时模型的抗剪承载力最小,仅为 1 964.3 kN;与其相比,侧向压应力为 3 MPa、5 MPa、7 MPa 和 9 MPa 时模型的抗剪承载力分别增大 22.7%、41.5%、59.6% 和 71.3%. 这是由于侧向压应力在胶接缝承受剪切荷载时可以起到“围压效应”,并且能够限制胶接缝的横向位移,从而提高胶接缝的抗剪承载力. 因此,提高节段预制拼装混凝土盖梁的预应力水平能够显著增大键齿胶接缝的抗剪承载力。



(a) 剪切荷载-相对滑移曲线



(b) 抗剪承载力

图 6 侧向压应力的影响

Fig.6 Influence of lateral compressive stress

#### 2.2.2 混凝土强度等级影响分析

已有研究<sup>[16-17]</sup>表明,节段预制拼装混凝土梁键齿胶接缝的抗剪性能受混凝土强度等级的影响,取混凝土强度等级分别为 C40、C50、C60、C70 和 C80 进行分析,图 7 给出了不同混凝土强度等级下键齿胶接缝模型的剪切荷载-相对滑移曲线和抗剪承载力. 从图 7(a)可以看出,模型在弹性阶段的刚度基本不会随混

混凝土强度等级的变化而变化,说明混凝土强度等级对键齿胶接缝开裂前的剪切刚度基本没有影响;在达到极限剪切荷载时,各模型相应的极限位移也均小于3.2 mm,表明其均为脆性破坏.此外,混凝土强度等级越高,抗剪承载力越大.从图7(b)可以看出,抗剪承载力与混凝土强度等级近似呈线性关系,混凝土强度等级为C40时模型的抗剪承载力最小,为2971.6 kN;与其相比,混凝土强度等级分别为C50、C60、C70和C80时模型的抗剪承载力分别增大5.5%、11.6%、17.4%和22.3%.这是由于等级越高的混凝土在承受剪切荷载时能够更好地抵抗破坏,从而表现出更强的抗剪承载力.因此,提高混凝土的强度等级可以有效提高键齿胶接缝的抗剪承载力.

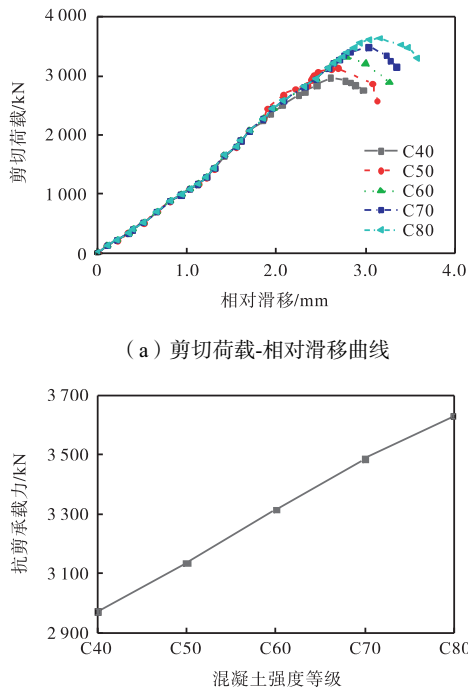


图7 混凝土强度等级的影响

Fig.7 Influence of concrete strength grade

2.2.3 键齿内配筋率影响分析

已有研究<sup>[15]</sup>表明,节段预制拼装混凝土梁键齿胶接缝的抗剪性能受键齿内配筋率的影响,取键齿内配筋率分别为0.5% (直径  $d = 6$  mm)、0.8% ( $d = 8$  mm)、1.3% ( $d = 10$  mm)、1.9% ( $d = 12$  mm)和2.6% ( $d = 14$  mm)进行分析.图8给出了键齿内不同内配筋率下键齿胶接缝模型的剪切荷载-相对位移曲线和抗剪承载力.从图8(a)可以看出,模型在弹性阶段的刚度基本不会随键齿内配筋率的变化而变化,说明键齿内配筋率对键齿胶接缝开裂前的剪切刚度基本没有影响;在达到极限剪切荷载时,各模型的极限位移

均位于2.7~3.7 mm,表明其均为脆性破坏.此外,键齿内配筋率越大,抗剪承载力越大,且延性也明显增大.从图8(b)可以看出,键齿内配筋率为0.5%时模型的抗剪承载力最小,为3135.8 kN;与其相比,键齿内配筋率为0.8%、1.3%、1.9%和2.6%时模型的抗剪承载力分别增大4.5%、7.5%、9.5%和14.8%.这是由于钢筋在混凝土中起到销栓作用,可以阻止裂缝的开展.因此,提高键齿内配筋率亦可有效提高键齿胶接缝的抗剪承载力.

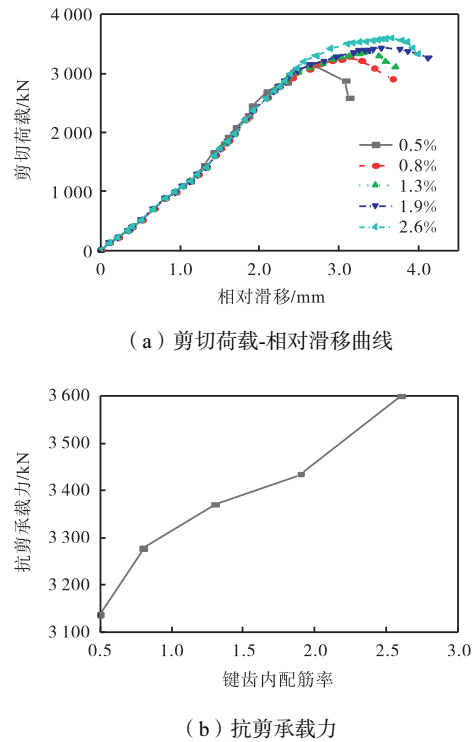


图8 键齿内配筋率的影响

Fig.8 Influence of internal reinforcement ratio of key teeth

2.2.4 键齿数量影响分析

国内外研究表明,节段预制拼装混凝土梁键齿干接缝的抗剪性能受键齿数量的影响.为了避免由于接缝面积不同而引起摩擦力不同,需控制接缝处接触、根部面积均相同,将其键齿数量分别取为0、1、2、3和4进行分析,键齿示意如图9所示.图10给出了不同键齿数量下键齿胶接缝模型的剪切荷载-相对位移曲线和抗剪承载力.从图10(a)可以看出,模型在弹性阶段的刚度基本不会随键齿数量的增加而变化,说明键齿数量对键齿胶接缝开裂前的剪切刚度基本没有影响;在达到极限剪切荷载时,各模型的极限位移均位于2.1~3.4 mm,表明其均为脆性破坏.此外,键齿数量越多,抗剪承载力越大,且延性也越大.从图10(b)可以看出,键齿数量为0(平接缝)时模型的抗剪承载力仅为2135.4 kN,而键齿数量为1

时模型的抗剪承载力为 3 135.9 kN, 相对提高了 46.9%, 说明设置键齿可显著提高胶接缝的抗剪承载力. 此外, 抗剪承载力随着键齿数量的增加而增大, 但增加比例明显小于无强度折减的理论值, 且键齿数量越多折减系数越大, 主要原因是分步剪切破坏时接

缝试件的各键齿先后被剪断, 未能同时发挥各键齿的抗剪能力, 抗剪承载力随键齿数量的增加而增大, 但当键齿数量超过 3 个后, 提高幅度明显减小, 故建议键齿数量不宜超过 3 个.

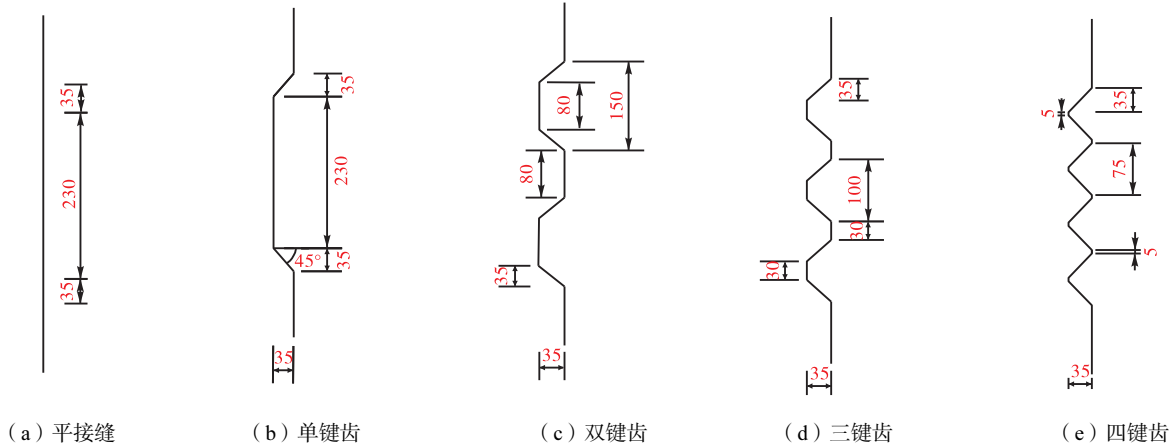
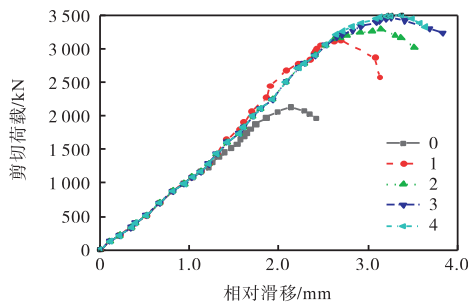
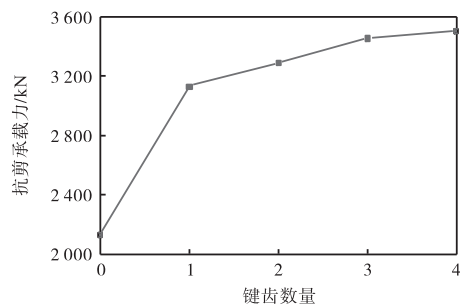


图 9 键齿示意(单位: mm)

Fig.9 Schematic of key teeth (unit: mm)



(a) 剪切荷载-相对滑移曲线



(b) 抗剪承载力

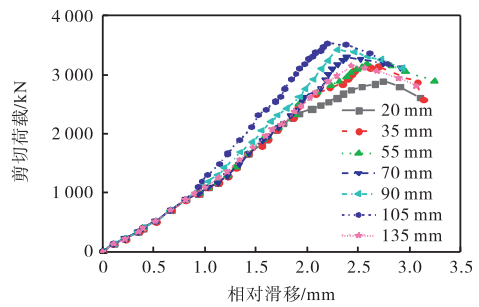
图 10 键齿数量的影响

Fig.10 Influence of number of key teeth

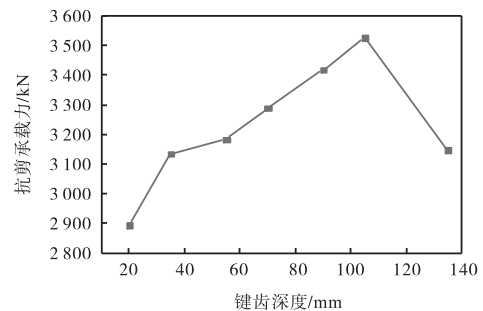
### 2.2.5 键齿深度影响分析

试验结果表明, 节段预制拼装混凝土盖梁键齿胶接缝的抗剪性能受键齿深度的影响. 取键齿深度分别为 20 mm、35 mm、55 mm、70 mm、90 mm、105 mm 和 135 mm 时进行分析, 图 11 给出了不同键齿深度下键齿胶接缝模型的剪切荷载-相对滑移曲线和抗剪承载力, 可以看出模型在弹性阶段的刚度基本不会随键齿

深度的增加而变化, 说明键齿深度对键齿胶接缝开裂前的剪切刚度基本没有影响; 在达到极限剪切荷载时, 各模型的极限位移均小于 3.0 mm, 表明其均为脆性破坏. 此外, 当键齿深度  $h \leq 105$  mm 时, 抗剪承载力随键齿深度的增大而增大; 与键齿深度为 20 mm 的模型相比, 键齿深度为 35 mm、55 mm、70 mm、



(a) 剪切荷载-相对滑移曲线



(b) 抗剪承载力

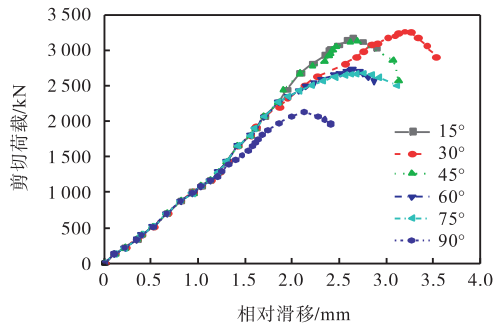
图 11 键齿深度的影响

Fig.11 Influence of depth of key teeth

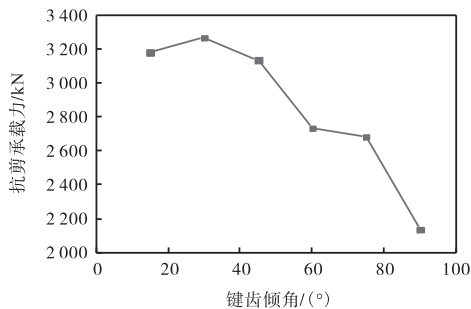
90 mm 和 105 mm 时模型的抗剪承载力分别增大了 8.3%、10.0%、13.6%、18.1%和 21.8%；当键齿深度从 105 mm 增大为 135 mm 时，抗剪承载力出现明显下降，这是由于键齿深度越大的试件其支承作用对抗剪承载力的贡献越大，但达到一定深度时更容易发生直剪脆性破坏而导致抗剪承载力降低。因此，适当增加键齿深度可明显提高键齿胶接缝的抗剪承载力，但键齿深度不宜过大。

2.2.6 键齿倾角影响分析

试验结果表明，节段预制拼装混凝土盖梁胶接缝的抗剪性能受键齿倾角的影响。取键齿倾角分别为 15°、30°、45°、60°、75°和 90°进行分析，图 12 给出了不同键齿倾角下键齿胶接缝模型的剪切荷载-相对位移曲线和抗剪承载力，可见模型在弹性阶段的刚度基本不会随键齿倾角的变化而变化，说明键齿倾角对键齿胶接缝开裂前的剪切刚度基本没有影响；在达到极限剪切荷载时，各模型的极限位移均位于 2.1 ~ 3.2 mm，表明其均为脆性破坏。此外，键齿倾角  $\theta$  为 30°模型的抗剪承载力最大；当  $\theta$  大于 30°时，抗剪承载力随键齿倾角的增大而减小，与键齿倾角为 30°时模型相比，键齿倾角为 15°、45°、60°、75°和 90°时模型的抗剪承载力分别减小了 2.7%、4.1%、16.3%、18.0%和 34.7%。这是由于键齿倾角小于临界值之前，其对接缝抗剪承载力影响较小；当倾角大于临界值



(a) 剪切荷载-相对位移曲线



(b) 抗剪承载力

图 12 键齿倾角的影响

Fig.12 Influence of inclination angle of key teeth

后，倾角增大会导致抗剪承载力显著下降，原因是倾角增大至临界值后胶接缝破坏模式由直剪破坏转变为滑移破坏，导致抗剪承载力下降，因此键齿倾角对键齿胶接缝的抗剪承载力有明显影响。在其他条件相同时，最优键齿倾角为 30°，且不宜大于 45°。

由于在实际工程中键齿深度和键齿倾角之间存在相互耦合影响，故本文进一步取工程中常用的键齿深度为 35 mm、55 mm、70 mm 及 90 mm，探究不同键齿深度及键齿倾角共同耦合作用对模型抗剪承载力的影响。从图 13 中可以看出，键齿倾角  $\theta$  为 30°时模型的抗剪承载力最大，当  $\theta$  大于 30°时，抗剪承载力随键齿倾角的增大而逐渐减少；当键齿深度为 55 mm 和 70 mm 且键齿倾角  $\theta$  为 75°时，抗剪承载力会发生突变，但均小于  $\theta$  为 45°时的对应值，这进一步说明键齿倾角对键齿胶接缝的抗剪承载力有明显影响，因此最优键齿倾角为 30°，且键齿倾角不宜大于 45°。

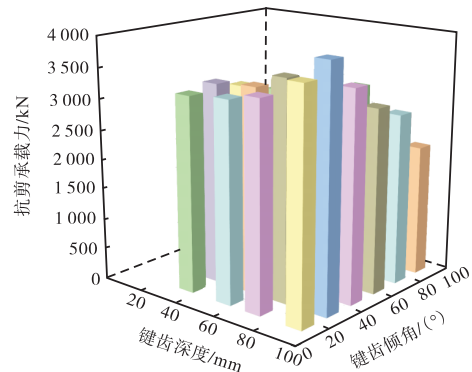


图 13 多参数影响

Fig.13 Influences of multiple parameters

3 键齿胶接缝抗剪承载力实用计算公式

目前，关于节段预制拼装混凝土盖梁键齿胶接缝抗剪承载力的理论研究仍相对匮乏。本文在 Gopal 等<sup>[12]</sup>提出的键齿胶接缝抗剪承载力计算公式基础上，考虑键齿内配筋的销栓力贡献，提出了一个修正公式，即

$$V_i = V_k + V_{sm} + V_e + V_{sr} \tag{2}$$

式中： $V_i$  为键齿胶接缝的抗剪承载力； $V_k$  为混凝土键齿提供的抗剪承载力； $V_{sm}$  为接缝处摩擦力； $V_e$  为接缝处环氧树脂提供的黏聚力； $V_{sr}$  为抗剪钢筋的销栓力。

混凝土键齿提供的抗剪承载力计算式为

$$V_k = \tau A_k \tag{3}$$

式中： $A_k$  为键齿根部的剪切面积； $\tau$  为键齿破坏面上的剪应力。假设主裂缝出现在键齿混凝土内部，基于

应力莫尔圆公式,  $\tau$  的计算式为

$$\tau = \sqrt{\left(f_t + \frac{\sigma_n}{2}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_n}{2}\right)^2} \quad (4)$$

式中:  $f_t$  为混凝土抗拉强度;  $\sigma_n$  为侧向压应力.

接缝处摩擦力  $V_{sm}$  的计算式为

$$V_{sm} = \mu A_{sm} \sigma_n \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为接缝处的摩擦系数;  $A_{sm}$  为接缝界面摩擦区域面积.

接缝处环氧树脂胶黏聚力  $V_e$  的计算式为

$$V_e = C(A_{sm} + A_k) \quad (6)$$

式中  $C$  为环氧树脂在混凝土表面的黏聚力, 根据 ASTM 标准<sup>[25]</sup>取为 3.7.

根据文献[26], 键齿内配筋的销栓力  $V_{sr}$  的计算公式为

$$V_{sr} = 1.65 A_{sd} \sqrt{f_c f_y} \quad (7)$$

式中:  $A_{sd}$  为剪切面上所有钢筋的面积;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值;  $f_y$  为抗剪钢筋的抗拉强度设计值.

已有研究<sup>[27]</sup>表明, 键齿拼接缝的摩擦系数  $\mu$  与侧向压应力  $\sigma_n$  近似呈线性函数关系, 即

$$\mu = A\sigma_n + B \quad (8)$$

式中  $A$  和  $B$  均为待定的拟合系数.

利用本文试验及有限元模型参数分析结果, 对上式中的拟合系数  $A$  和  $B$  进行回归分析, 得到的拟合公式为

$$\mu = 0.037\sigma_n + 0.596 \quad (9)$$

将相关公式代入式(2)中, 最终得到的键齿胶接缝抗剪承载力的实用计算式为

$$V_i = \tau A_k + (0.037\sigma_n + 0.596) A_{sm} \sigma_n + 3.7(A_{sm} + A_k) + 1.65 A_{sd} \sqrt{f_c f_y} \quad (10)$$

图 14 给出了修正前后 Gopal 公式键齿胶接缝抗剪承载力的理论计算结果与试验实测及有限元计算

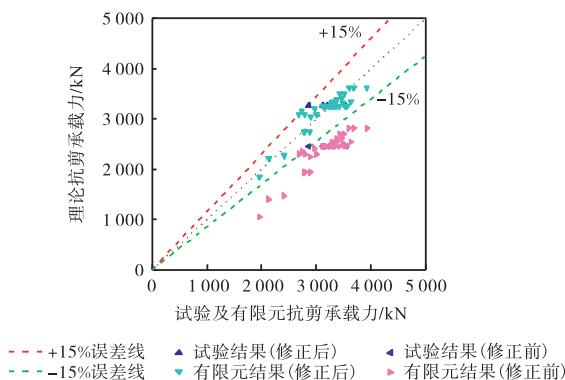


图 14 抗剪承载力理论、试验及有限元结果对比

Fig.14 Comparison of shear bearing capacity among theoretical, test and FEM results

结果对比. 可以看出, 仅修正前 Gopal 公式对键齿胶接缝的抗剪承载力存在不同程度的低估, 且结果偏离较大, 低估了 25.1%, 但修正后的理论计算结果与试验实测及有限元计算结果均吻合较好. 统计分析表明, 理论公式计算值与试验值之比的均值和标准差分别为 1.02 和 0.07, 变异系数为 6.86%; 理论公式计算值与有限元计算结果之比的均值和标准差分别为 1.01 和 0.05, 变异系数为 4.95%, 说明修正后的理论计算公式具有较好的精度.

### 4 结 论

本文对节段预制拼装混凝土盖梁键齿胶接缝的抗剪性能进行试验及有限元模型参数分析, 得到以下结论.

(1) 键齿胶接缝的抗剪承载力随键齿数量的增加而增大, 但当键齿数量超过 3 个后, 提高幅度明显减小, 故建议键齿数量不宜超过 3 个.

(2) 当键齿深度不大于 105 mm 时, 键齿胶接缝的抗剪承载力随键齿深度的增大而增大; 当键齿深度超过 105 mm 后, 键齿胶接缝的抗剪承载力明显下降, 故建议键齿深度不应超过 105 mm.

(3) 键齿倾角对键齿胶接缝抗剪承载力有较大影响, 在其他条件相同时, 最优键齿倾角为 30°; 当键齿倾角大于 45°后, 键齿胶接缝的抗剪承载力明显下降, 故建议键齿倾角不宜大于 45°.

(4) 考虑混凝土键齿、键齿内配筋以及接缝处摩擦力和环氧树脂胶层的作用, 建立了键齿胶接缝抗剪承载力的实用计算公式, 该公式计算结果与试验及有限元分析结果均吻合良好.

### 参考文献:

[1] 卓卫东, 李长春, 孙作轩, 等. 分段预制拼装预应力混凝土盖梁静力性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(12): 1752-1760.  
Zhuo Weidong, Li Changchun, Sun Zuoxuan, et al. Experiment on static behavior of segmental precast PC cap beam[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(12): 1752-1760 (in Chinese).

[2] Buyukozturk O, Bakhom M M, Michael B S. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(12): 3380-3401.

[3] Li G P, Yang D H, Lei Y. Combined shear and bending

- behavior of joints in precast concrete segmental beams with external tendons[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(10): 1042-1052.
- [4] Jiang H B, Chen L, Ma Z G, et al. Shear behavior of dry joints with castellated keys in precast concrete segmental bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(2): 04014062.
- [5] Jiang H B, Wei R B, Ma Z G, et al. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete dry joints in precast segmental bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(11): 04016085.
- [6] Base G D. *Shear Tests on Very Thin Epoxy Resin Joints Between Precast Concrete Units*[R]. London: Cement and Concrete Association, 1962.
- [7] Alcalde M, Cifuentes H, Medin F. Influence of the number of keys on the shear strength of post-tensioned dry joints[J]. *Materiales de Construcción*, 2013, 63(310): 297-307.
- [8] Ahmed G H, Aziz O Q. Shear behavior of dry and epoxyed joints in precast concrete segmental box girder bridges under direct shear loading[J]. *Engineering Structures*, 2019, 182: 89-100.
- [9] 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.
- [10] Bu Z Y, Wu W Y. Inter shear transfer of unbonded prestressing precast segmental bridge column dry joints[J]. *Engineering Structures*, 2018, 154: 52-65.
- [11] Lee C H, Chin W J, Choi E S, et al. An experimental study on the joints in ultra-high performance precast concrete segmental bridges[J]. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2011, 23(2): 235-244.
- [12] Gopal B A, Farzad H, Milad H, et al. Shear strength of dry and epoxy joints for ultra-high-performance fiber reinforced concrete[J]. *ACI Structural Journal*, 2020, 117(1): 279-288.
- [13] 王景全, 胡玉庆, 刘桐旭, 等. 超高性能混凝土大键齿干接缝受剪性能与承载力计算方法[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(10): 177-185.
- Wang Jingquan, Hu Yuqing, Liu Tongxu, et al. Shear performance and bearing capacity calculation method for UHPC dry joints with large keys[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(10): 177-185 (in Chinese).
- [14] 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): 315-324.
- [15] 袁爱民, 何雨, 程磊科, 等. 节段预制桥梁胶接缝剪切性能试验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(6): 22-26, 33.
- Yuan Aimin, He Yu, Cheng Leike, et al. Study on shear behavior of glued joint structure in segmental precast concrete beam[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2014, 33(6): 22-26, 33 (in Chinese).
- [16] Ahmed G H, Aziz O Q. Shear strength of joints in precast posttensioned segmental bridges during 1959—2019, review and analysis[J]. *Structures*, 2019, 20: 527-542.
- [17] 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.
- [18] Li Changchun, Zhuo Weidong, Lin Kaiqi, et al. Experimental study on flexural behavior of segmental precast large-cantilevered prestressed concrete cap beam[J]. *Structures*, 2023, 57: 105166.
- [19] 傅健鑫, 李长春, 李鑫, 等. 节段预制拼装混凝土盖梁胶接缝抗剪性能试验[J]. *福建建设科技*, 2024(3): 84-87.
- Fu Jianxin, Li Changchun, Li Xin, et al. Experimental study on shear behavior of epoxy joints of segmental precast concrete cap beams[J]. *Fujian Construction Science & Technology*, 2024(3): 84-87 (in Chinese).
- [20] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 59-67, 82.
- Nie Jianguo, Wang Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 59-67, 82 (in Chinese).
- [21] 雷拓, 钱江, 刘成清. 混凝土损伤塑性模型应用研究[J]. *结构工程师*, 2008, 24(2): 22-27.
- Lei Tuo, Qian Jiang, Liu Chengqing. Application of damaged plasticity model for concrete[J]. *Structural Engineers*, 2008, 24(2): 22-27 (in Chinese).
- [22] 李长春, 卓卫东, 孙作轩, 等. 牛腿式接缝分段预制

- 拼装盖梁的受力性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(8): 1328-1335.
- Li Changchun, Zhuo Weidong, Sun Zuoxuan, et al. Static behavior of segmental precast assembled cap beam with corbel joints[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(8): 1328-1335 (in Chinese).
- [23] 赵作周, 周 剑, 侯建群, 等. 上下层插筋连接预制混凝土空心模剪力墙有限元分析[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 117-129.
- Zhao Zuozhou, Zhuo Jian, Hou Jianqun, et al. Finite element analysis of shear walls precast concrete hollow moulds and splice rebar connection between the upper and lower floors[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 117-129 (in Chinese).
- [24] 李立峰, 范 昕, 石雄伟, 等. 预应力 UHPC 梁弯曲性能分析与合理设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 38-46.
- Li Lifeng, Fan Xin, Shi Xiongwei, et al. Analysis of flexural performance and rational design of prestressed UHPC beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2): 38-46 (in Chinese).
- [25] ASTM C882/C882M-13a Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used with Concrete by Slant Shear[S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2013.
- [26] 武芳文, 梅韵歌, 何岚清, 等. 磷酸镁水泥混凝土-普通混凝土界面直剪性能试验研究[J/OL]. 工程力学, <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20231106.1349.008>.
- Wu Fangwen, Mei Yunge, He Lanqing, et al. Experimental study on interfacial direct shear performance between magnesium phosphate cement concrete and normal concrete[J/OL]. Engineering Mechanics, <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20231106.1349.008> (in Chinese).
- [27] 王景全, 刘桐旭, 王 震. 考虑弯距影响的混凝土键齿接缝抗剪承载力计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 553-558.
- Wang Jingquan, Liu Tongxu, Wang Zhen. Calculation method for shear strength of concrete keyed joints considering bending effects[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(3): 553-558 (in Chinese).

(责任编辑: 武立有)