

# 分段预制拼装预应力混凝土盖梁静力性能试验

卓卫东<sup>1</sup>, 李长春<sup>1</sup>, 孙作轩<sup>1</sup>, 肖泽荣<sup>2</sup>, 林志滔<sup>2</sup>, 黄新艺<sup>1</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州市规划设计研究院集团有限公司 市政设计所, 福建 福州 350108)

**摘要:** 为探究采用不同胶接缝构造的分段预制拼装大悬臂 PC 盖梁在弯剪内力共同作用下的受力性能, 结合实际工程, 设计制作了 1 个整体预制大悬臂 PC 盖梁模型以及 3 个分别采用大键齿、小键齿和牛腿式接缝构造的分段预制拼装大悬臂 PC 盖梁模型(模型缩尺比例均为 1:5), 并完成 4 个模型全过程的静力加载测试试验, 获得梁体开裂荷载、极限承载力以及梁体混凝土应变分布、挠度、最大裂缝宽度等关键结果。试验结果表明: 分段预制拼装盖梁模型与整体预制盖梁模型的裂缝分布形态基本相同, 破坏时梁体裂缝分布稀疏, 裂缝宽度较大, 且破坏形式均为弯曲破坏; 采用大键齿和牛腿式接缝构造的盖梁模型的开裂荷载与整体盖梁模型相同, 而采用小键齿接缝构造的盖梁模型的开裂荷载仅为整体盖梁模型的 81%; 采用不同接缝构造的盖梁模型的极限承载力均明显低于整体盖梁模型, 其中采用牛腿式接缝构造的盖梁模型的极限承载力最大, 约为整体盖梁模型的 84%; 从极限变形能力看, 采用牛腿式接缝构造的盖梁模型的极限位移达到整体盖梁模型的 75%, 而采用大键齿或小键齿接缝构造的盖梁模型的极限位移均低于整体盖梁模型的 50%。综合结构静力性能及施工性能, 牛腿式接缝构造是推荐采用的分段预制拼装大悬臂 PC 盖梁的较合理接缝构造。

**关键词:** 城市桥梁; 分段预制; 预应力混凝土盖梁; 胶接缝; 开裂荷载; 极限承载力

中图分类号: TU997

文献标志码: A

## Experiment on Static Behavior of Segmental Precast PC Cap Beam

ZHUO Weidong<sup>1</sup>, LI Changchun<sup>1</sup>, SUN Zuoxuan<sup>1</sup>, XIAO Zerong<sup>2</sup>, LIN Zhitao<sup>2</sup>, HUANG Xinyi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fuzhou Planning & Design Research Institute Group Co. Ltd., Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In order to investigate the static performances of segmental prefabricated large-cantilevered PC cap

beams with different epoxy joints under the combined action of bending and shear internal forces, an integral precast large-cantilevered PC cap beam model and 3 segmental prefabricated large-cantilevered PC cap beam models with large key teeth, small key teeth and corbel joints respectively (the scale of each model is 1:5) were designed and manufactured based on a practical engineering. The full-process static loading tests of the four models were conducted, and the key results such as cracking loads, ultimate load capacities, distributions of concrete strains, deflections, and maximum crack widths of the cap beams were obtained. The test results show that: the crack distributions of the segmental prefabricated models are basically the same as that of the integral prefabricated model, and cracks in the cap beams of all test models are sparse and wide during failure; the failure modes of all test models are flexural failure; the cracking load of the cap beam model with large key teeth or corbel joint is the same as that of the integral cap beam model, while the cracking load of the cap beam model with small key teeth joint is only 81% of that of the integral cap beam model; the ultimate bearing capacities of the cap beam models with different epoxy joints are significantly lower than that of the integral cap beam model; among segmental precast models, the ultimate bearing capacity of the cap beam model with corbel joint is the largest, which is about 84% of that of the integral cap beam model; in terms of ultimate deformation capacity, the ultimate displacement of the cap beam model with corbel joint reaches 75% of that of the integral cap beam model, while the ultimate displacement of the model with large or small key teeth joint is lower than 50% of the integral cap beam model. From the test results of static performances and construction performance, the corbel joint is a more reasonable epoxy joint recommended for segmental prefabricated large-

收稿日期: 2021-08-17

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实施计划; 福州市市政建设开发有限公司科技项目(榕市建-20190987号)

第一作者: 卓卫东(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震、结构稳定与振动等。

E-mail: zhuowd@fzu.edu.cn



cantilevered PC cap beams.

**Key words:** Urban bridge; Segmental precast; Prestressed concrete cap beam; Epoxy joint; Cracking load; Ultimate bearing capacity

近年来,预制拼装技术已广泛应用于公路和城市桥梁的主梁、桥墩等构件中<sup>[1-2]</sup>,然而城市桥梁中混凝土盖梁的预制装配化难题却一直难以得到解决,主因是整体预制混凝土盖梁往往呈现长悬臂、大体积、自重大的特点,严重受限于城市道路通行能力以及城市桥梁建设场地面积,难以运输与吊装。

为了有效减轻整体预制大悬臂混凝土盖梁的自重,可采用预制钢盖梁<sup>[3-5]</sup>、全预制预应力超高性能混凝土(UHPC)薄壁盖梁<sup>[6-9]</sup>、半预制叠合盖梁<sup>[10]</sup>等技术方案,然而,这些方案均存在构造复杂、造价偏高等不足。因此,分段预制拼装混凝土盖梁技术成为目前实践中应用较多的一种解决方案。从国内的工程实践看,分段预制拼装混凝土盖梁现阶段主要以横向分段为主,现场拼装只对接缝进行处理,无需立模浇筑<sup>[11]</sup>。Le等<sup>[12-14]</sup>、Wrayosh等<sup>[15]</sup>、李国平等<sup>[16]</sup>均通过系列试验研究了接缝类型的影响,发现采用胶接缝的分段预制混凝土梁的受力性能接近于整体现浇混凝土梁。徐栋和项海帆等<sup>[17]</sup>较早对采用胶接缝的分段预制拼装预应力混凝土(PC)盖梁开展了试验研究,试验结果表明:分段预制拼装盖梁模型在弹性阶段与常规整体盖梁的力学性能相同;而在极限荷载阶段,盖梁模型的裂缝疏而宽,极限荷载比后者约小30%。闫兴非等<sup>[18]</sup>对胶接缝处设置小键齿剪力键、采用横向分三段预制拼装的大悬臂PC盖梁,开展了模拟正常使用极限状态的静载试验以及模拟地震作用的循环加载试验,试验结果表明:在正常使用阶段,分段预制拼装盖梁模型的开裂荷载安全系数为1.1;在循环加载作用下,拼接缝发生显著张开,表明其是分段预制拼装盖梁的薄弱环节。沙丽新和李国平<sup>[19]</sup>探讨了采用横向分三段和竖向分层的预制拼装大悬臂PC盖梁的受力性能,结果表明,这两种预制拼装盖梁方案技术上均是可行的。

总结国内外研究现状可以发现,与分段预制拼装混凝土盖梁的实践应用相比,当前的理论研究已严重滞后。本文结合实际工程,对采用不同胶接缝构造的分段预制拼装大悬臂PC盖梁在弯剪内力共同作用下的受力性能开展系列试验研究,探究其裂缝发展规律、受力特征和破坏形态等,并与整体预制

PC盖梁进行对比,从而提出合理的接缝构造建议,以为城市桥梁中大悬臂混凝土盖梁的快速施工提供指导。

## 1 试验概况

### 1.1 模型设计

本试验以福州市新店外环路西段道路工程主线高架桥采用的预制拼装PC盖梁为原型,原型结构采用实心多边形截面,横桥向宽25.2m,纵桥向长2.2m,中间段梁高1.9m,悬臂长度达6.8m。试验模型设计中,对盖梁分段方案采用现阶段主流的“横向分三段方案”<sup>[11, 17-19]</sup>,并采用胶接缝,接缝构造则采用当前实践中应用较多的大键齿构造、小键齿构造和牛腿式构造<sup>[11]</sup>。模型采用1/5几何缩尺比例,并分别按整体预制和分段预制方案进行设计制作;为便于模型加工制作,根据截面面积及惯性矩不变的原则,将原型盖梁截面按相似关系简化为500mm×390mm的等效实心矩形截面,悬臂段也由变截面简化为等截面。在横向分段方案中,节段拼接缝均设置于距立柱外边0.225m处,兼顾构造、施工操作便利以及接缝面设在靠近盖梁受力最不利位置时的结构总体和局部受力性能。

本试验共设计了4个大悬臂PC盖梁模型,如表1所列;其中,ZT0模型为整体预制盖梁模型,其余3个分别为采用大键齿、小键齿和牛腿接缝构造的分段预制拼装盖梁模型。模型均采用原型材料制作,混凝土强度为C50,纵筋和箍筋均采用HRB400级钢筋;除小键齿构造外,大键齿构造和牛腿式构造内均配置抗剪钢筋。由于盖梁模型尺寸较小,为方便加工制作,对原型盖梁截面进行简化处理,将模型截面简化为500mm×390mm的矩形截面。原型盖梁与墩柱的线刚度之比为1.21,为正确模拟这一关系,调整墩柱高度为1000mm,墩柱截面尺寸为400×320mm。试验模型的结构尺寸及配筋如图1所示。

表1 试验模型概况

Tab.1 Overview of test models

模型编号	接缝构造	纵向普通钢筋
ZT0	无	通长
DJ1	大键齿	接缝处断开
XJ2	小键齿	接缝处断开
NT3	牛腿式	接缝处断开

试验模型中,盖梁部分为后张有黏结预应力构件,均布置3束通长的预应力钢束;其中,N1束1束,

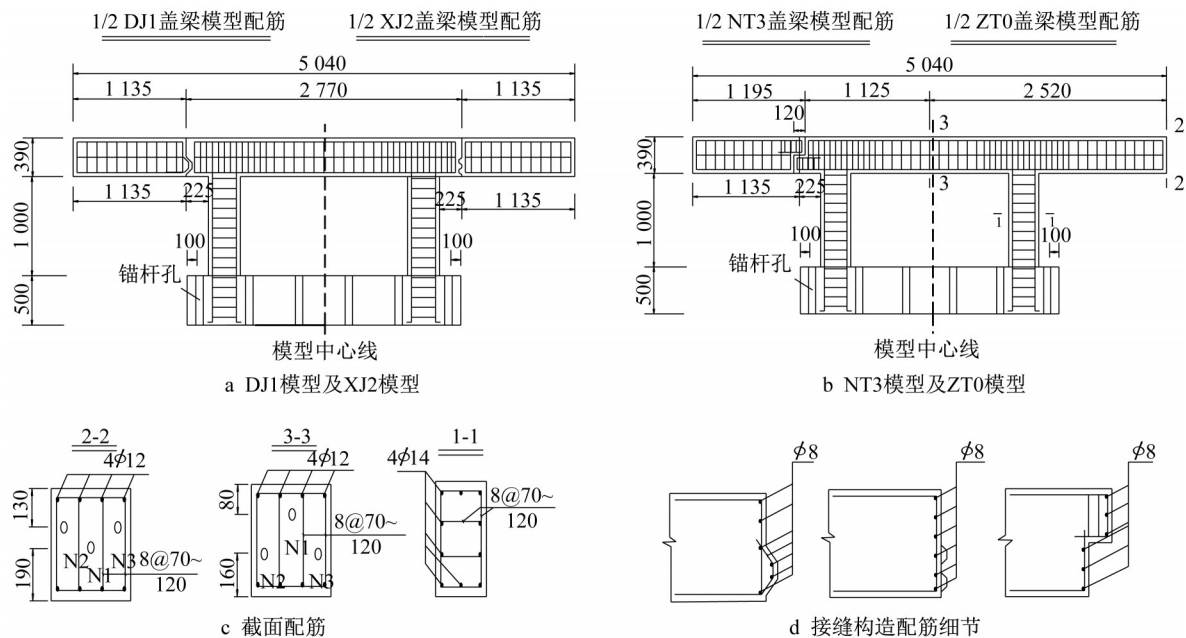


图1 试验模型结构尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.1 Structural dimensions and reinforcements of test models (unit: mm)

由3根1×7-15.24-1860-GB/T 5224-2014的预应力钢绞线组成,位于截面的竖向对称轴上;N2束2束,各由2根与N1束同型号的预应力钢绞线组成,沿截面左右对称布置;所有预应力钢绞线均为曲线布置,无平弯,预应力筋布置如图2所示。金属波纹管及配套锚具均根据《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器》(JTJ 329-2010)<sup>[20]</sup>及《预应力混凝土用金属波纹管》(JG/T 225-2020)<sup>[21]</sup>的有关规定选取。

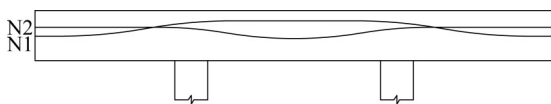


图2 预应力筋布置

Fig.2 Layout of prestressed reinforcement

### 1.2 模型预制及拼装

试验模型浇筑前,需要布置好预应力孔道,混凝土浇筑过程中要确保振捣密实。对分段预制拼装的试验模型,需按试验方案分段浇筑,在养护28d后进行拼装。正式拼装前需进行预拼装,以检查接缝构造是否匹配良好,并记录拼装需要的大致时间。正式拼装前,还需对拼接缝界面进行凿毛处理,并安装临时挤压装置;拼装时,需将环氧树脂黏结剂涂抹在拼接面事先确定好的位置上,双面涂抹时用带齿镩刀控制涂抹厚度2mm,注意不要涂抹到留白区域和预应力孔道内,若有残留物要及时擦净;之后快速进行拼装,锁紧临时挤压装置,直到预应力张拉完成

后,才可撤除临时挤压装置。

### 1.3 试验加载与量测方案

在原型结构中,上部结构恒、活载通过5个支座传递给盖梁,若对此进行模拟,则试验加载过于复杂,且同步性难以实现。本文参照文献[6]的加载方案,对加载过程进行适当简化,仅在两侧悬臂端部单点加载;这种加载方案可充分探究本试验采用的分段预制拼装大悬臂PC盖梁模型的受力性能。试验加载装置采用5000kN的反力架及2个2000kN千斤顶,如图3所示。采用单调分级加载制度,按静载试验标准<sup>[22]</sup>逐级施加荷载,直至盖梁模型破坏为止。

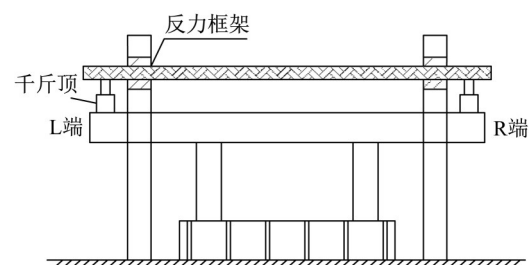


图3 试验加载装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of test setup

本试验量测内容包括试验荷载、梁体混凝土应变、挠度和裂缝等。利用标定后的50t压力传感器测量试验荷载;沿梁纵向共布置11个(ZT0模型)/13个(其他模型)竖向位移传感器,以测量梁体挠度;选取全梁多个典型截面测试混凝土应变,包括跨中截

面及接缝截面,并沿盖梁长度方向在顶、底板布置一定数量的应变片,观测全梁混凝土应变变化情况。试验中,同步观察并记录各级荷载下裂缝发展情况。

具体测点布置如图 4 所示,各测点之间的距离以 mm 为单位。

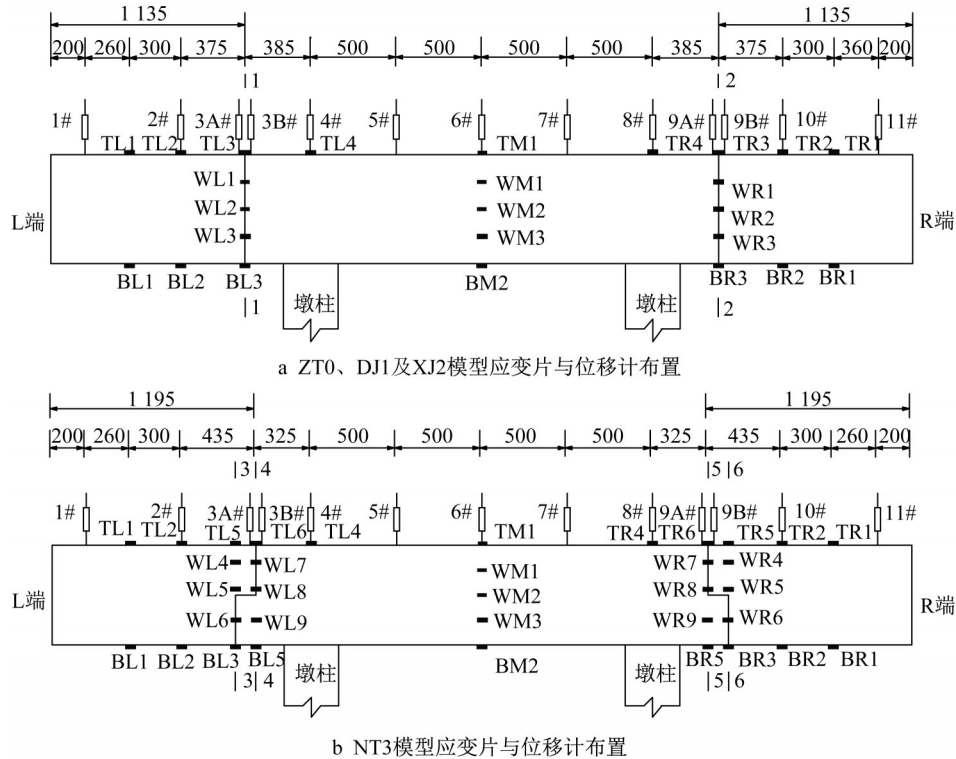


图 4 测点布置示意(单位:mm)

Fig.4 Schematic diagram of measuring point layout (unit: mm)

## 2 试验结果及分析

### 2.1 裂缝发展与破坏形态

图 5 显示 4 个盖梁模型在达到承载能力极限状态时的裂缝分布和破坏形态,可以发现,4 个模型的裂缝分布形态基本相同,破坏时梁体裂缝分布稀疏,且裂缝宽度较大;与整体预制盖梁模型相比,分段预制拼装盖梁模型破坏时梁体的最大裂缝宽度有显著增加,胶接缝处受拉区混凝土均完全分离,且裂缝主要分布在胶接缝与悬臂根部之间,胶接缝到自由端之间没有出现裂缝,表明胶接缝是其薄弱环节。从破坏形态看,除了 XJ2 模型是由于胶接缝内侧梁体底部混凝土被压碎而破坏外,其余 3 个盖梁模型都是在弯矩最大截面(悬臂根部)的梁体底部混凝土被压碎而破坏,且胶接缝均没有发生剪切破坏;破坏时,所有模型梁体裂缝宽度均较大,主裂缝宽度均已超出裂缝观测仪的 2mm 量程范围,且悬臂段自由端下挠较为明显。

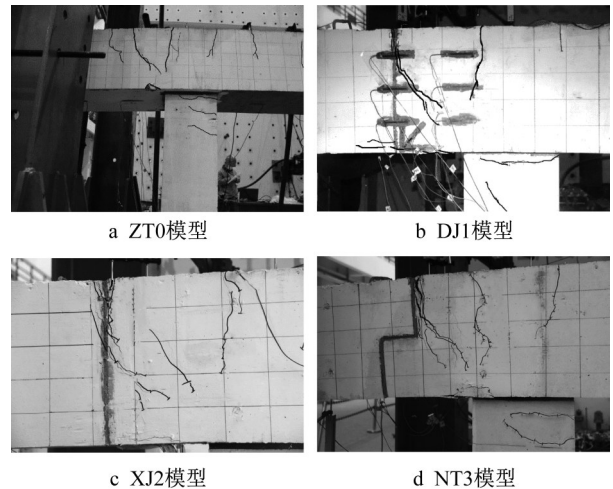


图 5 试验模型裂缝分布与破坏形态

Fig.5 Crack distribution and failure mode

### 2.2 荷载-挠度曲线

图 6 绘出 4 个盖梁模型实测的加载点荷载-挠度曲线,可以发现,其呈现出较为明显的弹性阶段、裂缝发展阶段和破坏阶段的三阶段特点:

(1)当荷载较小、梁体未开裂时,各模型均处于

弹性阶段,挠度随荷载的增大而增大,两者基本上呈比例关系,且各分段预制拼装盖梁模型与整体预制盖梁模型的初始刚度均相同。

(2)超过开裂荷载后,各模型均进入裂缝发展阶段,荷载—挠度曲线的斜率不断减小,非线性特征明显。在裂缝发展的大部分阶段,各分段预制拼装盖梁模型与整体预制盖梁模型的切线刚度都基本相同;而在后期,前者的切线刚度才明显低于后者,其中以XJ2模型的切线刚度最小,DJ1模型和NT3模型的切线刚度则基本相同。

(3)进入破坏阶段后,荷载—挠度曲线的斜率接近于零,梁体挠度增长迅速,各模型最终因梁体受压区混凝土被压碎而破坏。与整体预制盖梁模型相比,各分段预制拼装盖梁模型的极限承载力和极限变形能力均明显减小,其中DJ1模型和XJ2模型的极限变形能力减小幅度较大。此外,NT3模型在荷载—挠度曲线上呈现出明显的破坏阶段特征,而DJ1模型和XJ2模型的破坏阶段均不太明显。

### 2.3 荷载—应变曲线

图7显示各盖梁模型在混凝土应变测试截面实

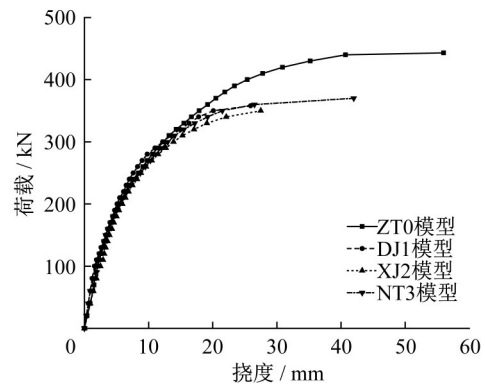


图6 试验模型荷载—挠度曲线比较

Fig.6 Comparison of load-deflection curves of test models

测的荷载—应变曲线,限于篇幅,本文仅给出其中一个典型截面的测试结果。从图7可以发现,各模型在弹性阶段实测的混凝土应变沿截面高度基本呈线性分布,符合平截面假定;随着荷载持续增加和裂缝的发展,位于受拉区的各应变测点实测的混凝土应变不再满足线性分布规律,而位于受压区的各应变测点实测的混凝土应变则仍基本呈线性分布。

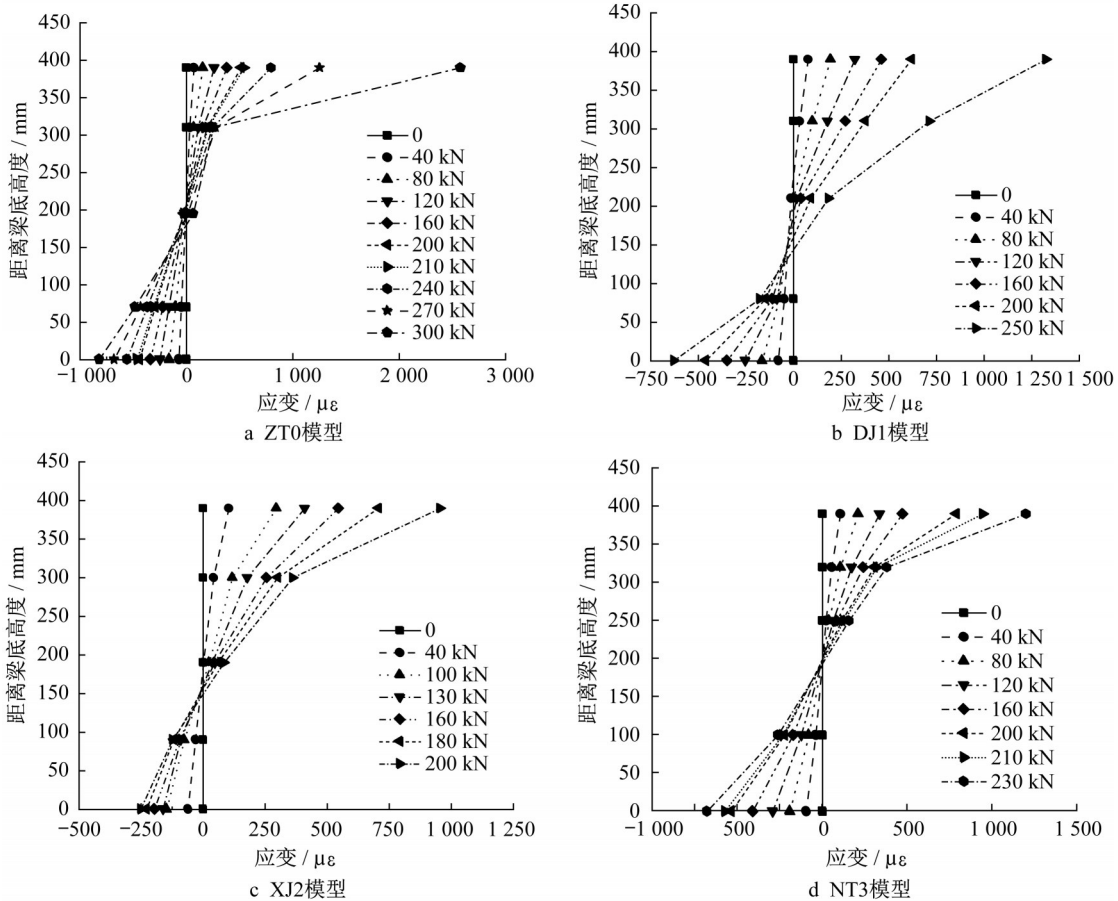


图7 试验模型混凝土应变测试截面的荷载—应变曲线

Fig.7 Load-strain curve of each model at typical concrete strain test section

## 2.4 裂缝宽度发展规律

图8绘出了各盖梁模型实测的最大裂缝宽度随荷载的变化曲线,可以发现,各盖梁模型的裂缝宽度发展可概括为开裂初期—中期—后期3个发展阶段:在开裂初期,裂缝宽度发展较慢;在裂缝发展中期,其宽度发展明显加快;在裂缝后期,其裂缝宽度急剧增长。

与整体预制盖梁模型相比,分段预制拼装盖梁模型的裂缝宽度发展更快;在3个采用不同接缝构造的分段预制拼装盖梁模型中,XJ2模型的开裂荷载最小,且裂缝宽度发展最快;DJ1模型的裂缝宽度发展相对较慢,NT3模型的裂缝宽度发展速度介于两者之间;在破坏阶段,各分段预制拼装盖梁模型的最大裂缝宽度均已远远超出裂缝观测仪的2mm量程范围,而整体预制盖梁模型的最大裂缝宽度仍处于裂缝观测仪的量程范围。可见,对于分段预制拼装盖梁模型,由于胶接缝两侧纵向普通钢筋不连续,导致胶接缝成为整个盖梁结构的薄弱位置,在破坏阶段胶接缝附近的主裂缝宽度开展较大,胶接缝处受拉区混凝土完全分离。因此,提高胶接缝两侧的纵向普通钢筋的连续性,应是抑制分段预制拼装PC盖梁裂缝发展的一个重要措施。

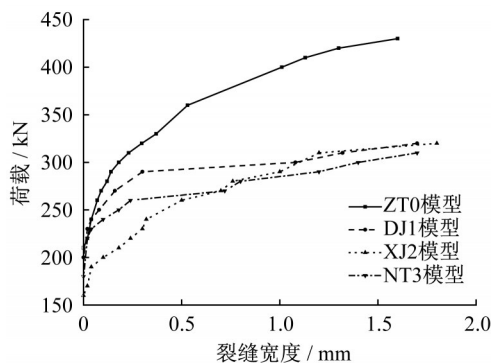


图8 各试验模型荷载最大裂缝宽度曲线比较

Fig.8 Comparison of load-maximum crack width curves of test models

## 2.5 开裂荷载

根据试验实测结果,表2列出各盖梁模型的开裂荷载及其比较情况。从表2中可见,与ZT0模型相比,XJ2模型的开裂荷载仅为81%,而DJ1模型和NT3模型的开裂荷载与之相同。可见,从抗裂角度而言,采用大键齿或牛腿式接缝构造的分段预制拼装PC盖梁具有与整体预制盖梁相同的抗裂性能。

需要指出的是,对ZT0模型、DJ1模型和NT3模

表2 试验模型开裂荷载比较

Tab.2 Comparison of cracking loads of test models

模型编号	开裂荷载/kN	与整体盖梁模型之比/%
ZT0	210	100
DJ1	210	100
XJ2	170	81
NT3	210	100

型,其裂缝都是最早出现在梁体悬臂段根部上方,而XJ2模型裂缝最早出现在胶接缝附近。分析原因,主要是由于模型尺寸较小,胶接缝施工质量难以控制,引起环氧树脂黏结剂在匹配面出现脱空现象(见图9)。由此可见,对实际工程,胶接缝的施工质量是保证分段预制拼装PC盖梁结构性能的必要基础。



图9 XJ2模型胶接缝脱空现象

Fig.9 Cavity at epoxy joint of XJ2 model

## 2.6 极限承载力

根据试验实测结果,表3列出了各盖梁模型的极限承载力及其比较情况。从表3中可见,采用不同接缝构造的3个分段预制拼装混凝土盖梁模型的极限承载力相近,其值分别为358kN、350kN和370kN,均明显低于整体盖梁模型的极限荷载(443kN);其中,NT3模型的极限承载力最大,达到ZT0模型极限承载力的84%。

对各盖梁模型的破坏形态观察发现,ZT0模型、DJ1模型和NT3模型都是在弯矩最大截面梁体受压区混凝土被压碎而破坏,而XJ2模型是在胶接缝内侧梁体受压区混凝土被压碎而破坏,其原因是XJ2模型在胶接缝内部出现脱空现象,从而造成其极限承载力相对较低。

## 2.7 变形能力

根据试验实测结果,表4列出了各盖梁模型破坏时的最大挠度及其比较情况。从表4中可见,破坏时各分段预制拼装盖梁模型的最大挠度均明显低于整体预制盖梁模型;其中,NT3模型的最大挠度可达ZT0模型的75%,而DJ1模型和XJ2模型的最大挠度均不到ZT0模型的50%。可见,从变形性能方

表3 试验模型极限承载力比较

Tab.3 Comparison of ultimate bearing capacities of test models

模型编号	极限承载力/kN	与整体盖梁模型之比/%
ZT0	443	100
DJ1	358	81
XJ2	350	79
NT3	370	84

面考虑,采用牛腿式接缝构造的分段预制拼装PC盖梁具有更好的极限变形能力。

表4 试验模型最大挠度比较

Tab.4 Comparison of maximum deflections of test models

模型编号	极限位移/mm	与整体盖梁模型之比/%
ZT0	56.0	100
DJ1	25.9	46
XJ2	27.5	49
NT3	42.0	75

### 3 有限元模拟分析

图9显示的XJ2模型在键齿位置附近出现环氧树脂黏结剂的脱空现象,应是造成XJ2模型过早开裂的原因;而普通钢筋不连续和环氧树脂黏结剂的脆性是造成采用垂直拼缝的DJ1模型和XJ2模型承载力较低、极限变形能力较差的主要原因。为了定量分析DJ1模型和XJ2模型极限承载力较低和极限变形能力较差的原因,采用ABAQUS软件分别建立ZT0模型、DJ1模型和XJ2模型的精细化有限元模型,如图10所示。其中,梁体和墩柱混凝土采用C3D8R单元模拟,单元网格尺寸取为50mm,本构模型选为塑性损伤模型;预应力筋及普通钢筋均采用T3D2单元模拟,本构模型分别选用线弹性模型和理想弹塑性模型,网格长度取为80mm,并采用嵌入约

束将预应力筋、普通钢筋与混凝土实体连接;采用黏性接触单元模拟DJ1模型和XJ2模型的胶接缝界面,并对其黏结强度进行折减,以模拟胶接缝界面的环氧树脂黏结剂脱空现象。各本构模型中的材料参数均根据相应的材性试验实测结果取值;采用降温法模拟预应力荷载的施加,采用位移加载方式加载;墩底设为固定边界。

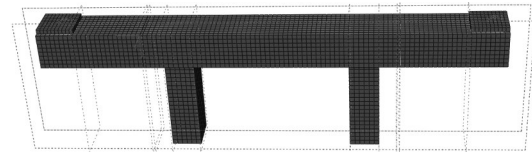


图10 XJ2模型的有限元模型

Fig.10 Finite element model of XJ2 model

图11给出了荷载-位移曲线的有限元模拟计算结果与试验实测结果之对比,可以看出,对ZT0模型、DJ1模型或XJ2模型,有限元模拟计算得到的曲线与试验实测曲线总体变化规律一致,且两者极限荷载也基本接近;然而,有限元模拟得到的曲线斜率总体上略大于试验实测曲线的斜率,这主要是由于有限元模型无法精确模拟混凝土开裂后的刚度以及胶接缝处环氧树脂黏结剂的实际脱空现象。图12给出了有限元模拟计算得到ZT0模型、DJ1模型和XJ2模型在达到极限承载力时胶接缝截面(对ZT0模型,为相应截面位置)的正应力分布曲线,可以发现,在达到极限承载力时,ZT0模型位于受拉区的普通钢筋均达到屈服强度,而位于受压区的普通钢筋则未达到屈服强度;此外,三个模型的预应力筋也均远超过其设计强度;与ZT0模型相比,DJ1模型和XJ2模型的抗弯承载力明显较小,这主要是由于普通钢筋在胶接缝界面不连续、拼接缝为薄弱环节所致。结合试验模型的破坏现象可知,DJ1模型和XJ2

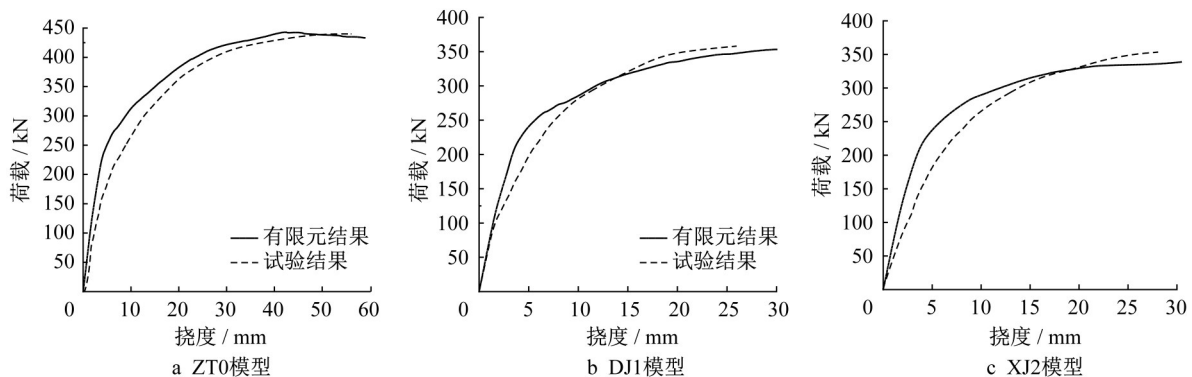


图11 荷载-挠度曲线对比

Fig.11 Comparison of load-displacement curves between numerical and test results

模型达到极限承载力时,其承载力因胶接缝界面受拉区混凝土裂缝宽度和悬臂段下挠增长较快而迅速下降,导致其极限变形能力较差。因此,提高胶接缝

两侧纵向普通钢筋的连续性,增加胶接缝两侧混凝土受拉区的预应力筋数量,应是改善分段预制拼装PC盖梁结构性能的重要措施。

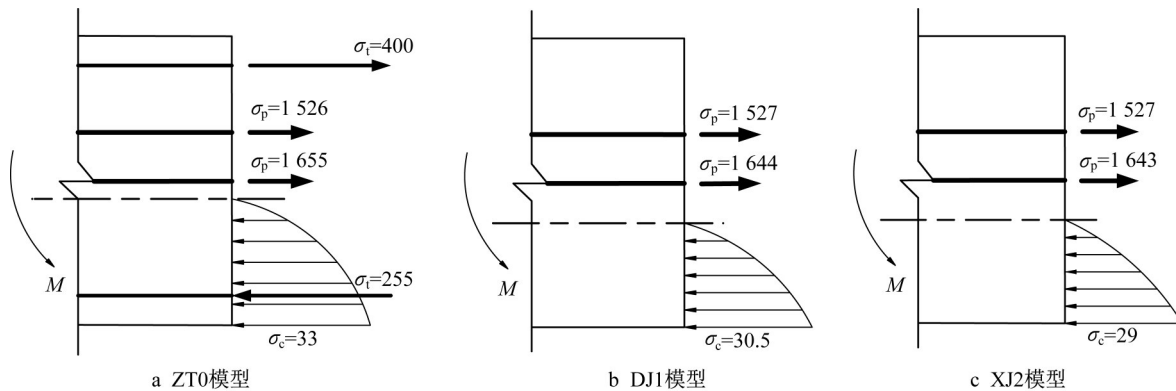


图12 极限荷载作用下胶接缝截面正应力分布(单位:MPa)

Fig.12 Normal stress distribution of epoxy joint section under ultimate load (unit: MPa)

## 4 结论

本文通过对4个预制大悬臂PC盖梁模型受力性能的试验研究,得到如下主要结论:

(1)采用大键齿、小键齿和牛腿接缝构造的分段预制拼装大悬臂PC盖梁模型与整体预制大悬臂PC盖梁模型的裂缝分布形态基本相同,破坏时梁体裂缝分布稀疏,裂缝宽度较大,且破坏形式均为弯曲破坏。

(2)与整体预制盖梁模型相比,分段预制拼装盖梁模型的胶接缝是其薄弱环节,梁体破坏时胶接缝处受拉区混凝土均完全分离,但胶接缝均没有发生剪切破坏。提高胶接缝两侧纵向普通钢筋的连续性,增加胶接缝两侧混凝土受拉区的预应力筋数量,应是改善分段预制拼装PC盖梁结构性能的重要措施。

(3)采用大键齿和牛腿式接缝构造的分段预制拼装盖梁模型的开裂荷载与整体预制盖梁模型相同,而采用小键齿接缝构造的分段预制拼装盖梁模型因胶接缝脱空,其开裂荷载仅为整体预制盖梁模型的81%。对实际工程,胶接缝的施工质量是保证分段预制拼装大悬臂PC盖梁结构性能的必要基础。

(4)与整体预制盖梁模型相比,分段预制拼装盖梁模型的极限承载力和变形能力均明显较低。其中,采用牛腿式接缝构造的分段预制拼装盖梁模型的极限荷载和变形能力最大,分别约为整体盖梁模型的84%和75%。

(5)从拼接施工方面看,牛腿式接缝构造采用垂直拼缝,更便于涂刷环氧树脂黏结剂,同时在拼接作业时可作为临时支撑,有效降低了施工难度和施工风险。

综合施工性能及结构性能,牛腿式接缝构造是推荐采用的分段预制拼装大悬臂PC盖梁的较合理接缝构造。

本文仅从静力性能试验得到上述结论,尚未考虑分段预制拼装大悬臂PC盖梁的抗震性能以及胶接缝的疲劳性能和耐久性能等,这些问题将在后续研究中深入探讨。

### 作者贡献声明:

卓卫东:指导试验工作及试验结果分析,文章撰写及修改;  
李长春:参与试验研究及试验结果分析,文章初稿撰写;  
孙作轩:负责试验测试及试验结果分析;  
肖泽荣:参与试验方案论证,提供工程背景设计资料;  
林志滔:参与试验方案论证,提供工程背景设计资料;  
黄新艺:参与试验方案论证,指导试验测试。

### 参考文献:

- [1] CULMO M P, MARSH L, STANTON J. Recommended AASHTO guide specifications for ABC design and construction [M]. Washington D C: The National Academies Press, 2018.
- [2] 项贻强, 竺盛, 赵阳. 快速施工桥梁的研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 1.  
XIANG Yiqiang, ZHU Sheng, ZHAO Yang. Research and development on accelerated bridge construction technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 1.
- [3] 裴志慧, 邓俊晔, 王军辉. 新建铁路跨既有营业线钢盖梁吊装施工技术[J]. 施工技术, 2013, 42(12): 8.  
PEI Zhihui, DENG Junye, WANG Junhui. Construction technology for steel cap beam in some new railway crossing the running railway [J]. Construction Technology, 2013, 42(12): 8.
- [4] 赵文聘. 特殊环境下上跨铁路高架桥关键技术应用研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(4): 58.



- ZHAO Wenpin. The application of key technologies to over-crossing railway viaduct in special environment [J]. *Railway Standard Design*, 2015, 59(4): 58.
- [5] 徐艳玲, 李建龙. 快速施工钢盖梁方案在北京新机场高速公路工程中的应用[J]. *特种结构*, 2019, 36(4): 77.  
XU Yanling, LI Jianlong. Applications of quick construction steel cover beam scheme in Beijing new airport expressway project[J]. *Special Structures*, 2019, 36(4): 77.
- [6] 李立峰, 叶萌, 胡方健, 等. 预制大悬臂预应力UHPC薄壁盖梁抗弯性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(2): 92.  
LI Lifeng, YE Meng, HU Fangjian, *et al.* Experimental study on the flexural behavior of a prefabricated large-cantilevered prestressed UHPC thin-walled bent cap [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(2): 92.
- [7] 李立峰, 唐金良, 胡方健, 等. 全预制轻型预应力UHPC薄壁盖梁抗剪性能试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(8): 144.  
LI Lifeng, TANG Jinliang, HU Fangjian, *et al.* Experimental on shear behavior of prefabricated light weight thin-walled UHPC bent cap [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(8): 144.
- [8] YE Meng, LI Lifeng, HU Fangjian, *et al.* Flexural behavior of a fully prefabricated lightweight UHPC bent cap[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(10): 04020085.
- [9] 陈卫伟. 超高性能混凝土(UHPC)预制装配盖梁设计分析[J]. *中国市政工程*, 2019, 44(2): 43.  
CHEN Weiwei. Design analysis of prefabricated cover beam of ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. *China Municipal Engineering*, 2019, 44(2): 43.
- [10] 李嘉伟, 夏樟华, 孙明松, 等. UHPC模壳-RC叠合盖梁受力性能试验研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(8): 157.  
LI Jiawei, XIA Zhanghua, SUN Mingsong, *et al.* Experimental study on mechanical performance of UHPC formwork-RC composite cap beam[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(8): 157.
- [11] 葛继平, 梅德磊, 闫兴非, 等. 预制拼装盖梁施工方式对比分析[J]. *应用技术学报*, 2018, 18(1): 56.  
GE Jiping, MEI Delei, YAN Xingfei, *et al.* Comparison and analysis of construction method of precast pier cap[J]. *Journal of Technology*, 2018, 18(1): 56.
- [12] LE T D, PHAM T M, HAO H, *et al.* Flexural behaviour of precast segmental concrete beams internally prestressed with unbonded CFRP tendons under four-point loading[J]. *Engineering Structures*, 2018, 168(8): 371.
- [13] LE T D, PHAM T M, HAO H, *et al.* Performance of precast segmental concrete beams posttensioned with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) tendons[J]. *Composite Structures*, 2019, 208(1): 56.
- [14] LE T D, PHAM T M, HAO H, *et al.* Behavior of precast segmental concrete beams prestressed with external steel and CFRP tendons[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(5): 1.
- [15] WRAYOSH W A, HASHIM A H. Flexural behaviours of box segmental beams with internal tendons subjected to repeated and static loads[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 671(1): 012109.
- [16] 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.
- [17] 徐栋, 项海帆, 黄鼎业, 等. 装配式无黏结预应力混凝土盖梁模型试验[J]. *结构工程师*, 1999(1): 29.  
XU Dong, XIANG Haifan, HUANG Dingye, *et al.* Model test of segmental concrete coping with unbonded prestressing stands [J]. *Structural Engineer*, 1999(1): 29.
- [18] 闫兴非, 葛继平, 王志强, 等. 装配式大悬臂分段预应力混凝土盖梁抗弯性能研究[J]. *中国市政工程*, 2019(4): 72.  
YAN Xingfei, GE Jiping, WANG Zhiqiang, *et al.* Study on flexural behavior of assembled large cantilever segmented prestressing concrete cap beam[J]. *China Municipal Engineering*, 2019(4): 72.
- [19] 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): 16.  
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): 16.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器: JT/T 329-2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Prestressing strand anchorage, grip and coupler for highway bridge: JT/T 329-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 预应力混凝土用金属波纹管: JG/T 225-2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Corrugated metal ducts for prestressed concrete: JG/T 225-2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152-2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.