Vol. 52 No. 11 Nov. 2024

文章编号: 0253-374X(2024)11-1670-11

**DOI:** 10. 11908/j. issn. 0253-374x. 22447

# 接缝处纵筋连续预制节段梁弯剪受力机理试验研究

邹 宇, 俞承序, 徐 栋, 端木祥永, 王田虎, 何家学

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:基于网格抗剪配筋原理,提出了接缝处纵筋连续预制节段梁概念。设计3根试验梁,将接缝类型作为试验参数,以试件裂缝发展、钢筋应变、破坏模式、刚度、承载力为研究对象,开展弯剪试验。结果表明,接缝处纵筋连续预制节段梁中腹板水平纵筋有效承担了由剪力作用引起的截面上轴向拉力,与箍筋同样起到抗剪作用;腹板水平纵筋在接缝位置处的连续可以更好地抑制斜裂缝的发展,限制主裂缝的宽度,从而有效提高预制节段梁结构的刚度;从试件腹板开裂至试件破坏的整个加载过程中,纵筋连续预制节段梁接缝附近节段受力基本满足平截面假定,各项力学行为与整体梁相似。试验结果充分验证了接缝处纵筋连续是预制节段梁从受力性能上消除"接缝"的必要手段。

关键词: 预制节段桥梁;接缝;腹板水平纵筋;弯剪试验中图分类号: U443.35 文献标志码: A

## Experimental Study on Bending Shear Force Mechanism of Precast Segmental Girder with Continuous Longitudinal Reinforcement Across Joints

ZOU Yu, YU Chengxu, XU Dong, DUANMU Xiangyong, WANG Tianhu, HE Jiaxue

(College of Civil Engineering , Tongji University , Shanghai 200092 , China)

Abstract: Based on the principle of grid shear reinforcement, the concept of precast segmental girders with continuous longitudinal reinforcements across joints was proposed. Three test beams were designed, and the joint type was taken as the test parameter. The bending shear test was carried out with the research objects of crack development, reinforcement strain, failure mode, stiffness and bearing capacity. The test results show that the longitudinal reinforcement of webs across joints

effectively bears the axial tension caused by shear force, and plays the same role of shear resistance as the stirrup. The continuous longitudinal reinforcement can restrain the development of oblique cracks and limit the width of main cracks, so as to effectively improve the stiffness of precast segmental beam structure. During the whole loading process from the cracking to the failure of continuous longitudinal reinforcement precast segmental beams, the structure near the joint satisfies the plane cross-section assumption, and the mechanical behavior is similar to that of the whole beam. The test results fully verify the necessity of continuous longitudinal reinforcement across the joint of precast segmental beams.

**Keywords:** precast segmental bridge; joints longitudinal reinforcement of web; bending shear test

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应用。接缝处纵筋完全断开 是预制节段梁结构的弱点,蕴藏的风险容易导致不 可预计的问题甚至错误,也影响预制节段桥梁结构 的进一步推广。为此,国内外学者对传统混凝土接 缝节段梁开展了大量研究。

Rabbat等<sup>[1]</sup>测试了3根预制节段混凝土梁,并用传统抗弯理论预测抗弯承载能力。Hindii等<sup>[2]</sup>、MacGregor等<sup>[3]</sup>利用三跨缩尺梁试验验证了节段梁体内束与体外束的受力差别。Ramos等<sup>[4]</sup>、Aparicio等<sup>[5]</sup>对干接缝体外预应力节段梁进行了弯曲试验,采用特殊接缝单元反映接缝开裂,基于非线性杆系模型对体内、体外预应力节段梁进行分析。徐栋<sup>[6]</sup>采用弹簧单元研究接缝受力。Huang等<sup>[7]</sup>采用实体有限元对体外预应力节段梁进行模拟。Yuan等<sup>[8]</sup>对体内束和体外束配比进行试验,得到钢束比例和荷

收稿日期: 2023-04-04

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、混凝土桥梁精细化设计。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、混凝土桥梁精细化设计。E-mail: xu\_dong@tongji. edu. cn



载类型对受力模式的影响,并认为节段梁的最终破坏发生在弯剪内力急剧变化的截面附近键齿处。 Jiang等[9-10]对14根体外预应力混凝土梁开展试验,给出了不同节段梁破坏模式,验证了节段个数对弯曲性能的影响,并提出了计算方法。

Moustafa<sup>[11]</sup>对胶接缝节段式体外预应力混凝土 梁进行了抗剪试验。Ramirez等[12]采用弯剪复合试 验验证了干接缝与胶接缝对梁的极限破坏模式和承 载能力的影响。Turmo等[13-15]的体外预应力干接缝 节段梁试验揭示了节段梁在弯剪组合受力情况下的 受力机理,接缝两侧节段内配置的箍筋抗剪贡献小。 李国平等[16-17]提出了加载点在接缝附近的破坏模式, 并依据平衡方程给出了该受力模式下承载力计算方 法。Brenkus 等[18]对一种特殊形状的节段梁进行了 试验研究。Takebayashi等[19]对一片45m足尺预制 节段干接缝试验梁开展弯曲试验,节段梁达到设计 荷载时,节段间干接缝未出现滑移,梁体也未发生斜 截面破坏。Hindii等[2]的试验结果表明,有黏结预应 力预制节段梁的强度和延性均高于无黏结预应力预 制节段梁。Sivaleepunth等[20]对节段梁节段长度、接 缝形式(平接缝、键齿接缝)、正应力水平开展试验研 究,认为节段梁裂缝开展模式与正应力大小相关,截 面抗剪强度受节段长度影响较小,支座附近截面剪 力可以通过齿键接缝进行传递。

综上所述,体内束的增加有利于梁体的受力,接 缝附近的箍筋并不能提高抗剪承载能力,造成这种 现象的主要原因是:接缝处的纵筋断开后混凝土开 裂过大,剪应力仅能从顶缘的混凝土传递。为了改 善接缝这个薄弱环节,对比分析了欧洲规范、美国 ACI/AASHTO、中国现行规范GB/JTG及网格抗 剪配筋理论中结构抗剪钢筋的设计方法,从受力上 "消除"接缝的角度,基于网格抗剪配筋原理提出了 节段梁接缝处纵筋连续的概念。设计3根试验梁, 横向对比了各试验梁在弯剪复合受力下的力学性 能,揭示了接缝处纵筋连续的必要性。

## 1 接缝处纵筋连续节段梁的理论基础

预制节段施工结构的本质可视为插有若干素混凝土区段的钢筋混凝土结构,即纵向普通钢筋断开、"跳档"的箍筋形成的无钢筋素混凝土段(C段,即接缝)以及纵向普通钢筋连续的钢筋混凝土段(R段),如图1所示。接缝(C段)是预制节段梁的特点也是

弱点,其受力性能是预制节段梁结构的关键。研究结果表明,预制节段梁结构的裂缝开展基本是在接缝附近<sup>[3]</sup>,如图2所示。

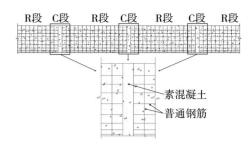


图1 预制节段梁接缝本质示意图

Fig.1 Schematic diagram of joint essence of precast segmental beam

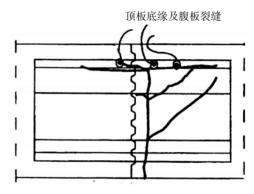


图2 接缝附近裂缝开展示意图[3]

Fig.2 Schematic diagram of crack propagation near the joint<sup>[3]</sup>

实际上,接缝(C段)犹如预设的裂缝位置,其受力情况已经脱离结构设计中截面方法的基石——所有截面满足平面假定,如图3所示。

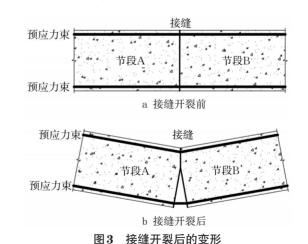
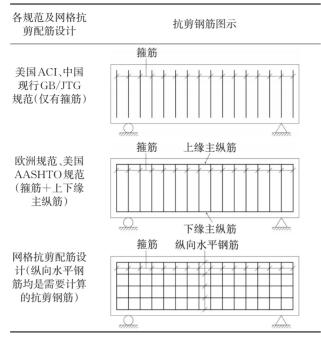


Fig.3 Deformation of joints after cracking

为了消除接缝(C段)带来的不利影响,提出了接缝处纵筋连续预制节段梁,在保持预制节段梁施工优点的同时从受力上"消除"接缝这个薄弱环节。

表1为抗剪钢筋设计。

表1 抗剪钢筋设计 Tab.1 Shear reinforcement design



- (1)仅有竖向箍筋。目前只有美国ACI和中国的GB/JTG规范采用该抗剪钢筋设计。美国ACI规范仅以混凝土出现第1条弯剪或腹剪裂缝时的荷载为混凝土抗力,而中国规范中混凝土抗力为无腹筋梁的破坏荷载。
- (2)箍筋+上下缘主纵筋。目前美国AASHTO和欧洲规范采用该抗剪钢筋设计,其根源是桁架模型。桁架模型建立结构体的平衡方程,斜向主拉应力合力的竖向分力由箍筋承担、水平分力由上下缘主纵筋承担,所以在钢筋混凝土结构中,主纵筋除了满足抗弯需要以外,还需考虑剪力引起的应力增量。
- (3)网格抗剪配筋。网格抗剪配筋采用与抗弯设计协调的截面法。混凝土构件中任意位置一旦由于主拉应力超过限值而引起开裂,在截面上相应位置就需有纵横向网格配筋构成的抗剪钢筋承担竖向分力和水平分力,并保证这些钢筋在极限阶段不会屈服。这样不但控制住了斜裂缝,而且只要结构中所有纵横向网格配筋不屈服,就能够确保结构剪切刚度不会削弱,保证正应力传递。

网格抗剪配筋意味着抗剪钢筋不仅仅是箍筋, 腹板里面的纵筋都是需要计算的抗剪钢筋,而不是 所谓的"构造钢筋"。预制节段梁由于有接缝,因此 箍筋和纵筋在接缝处是不连续的。在工程实践中, 箍筋的"连续"较容易处理,因为其本身就是间隔分 布的,所以跳过接缝与结构其他位置后结构仍是协 调的,关键在于纵筋的连续。图4所示为课题组参与的苏通长江公路大桥引桥的接缝处纵筋处理。将纵筋也设计为环箍形式,以最大限度减小C段的宽度。



图 4 接缝处纵筋的处理

Fig.4 Treatment of longitudinal reinforcement across joints

纵筋的连续包括顶底板钢筋和腹板钢筋的连续,顶底板的体内预应力钢束可以视作连续钢筋,故纵筋连续主要是针对腹板高度范围内的水平纵筋,图5所示为腹板采用插筋使纵筋连续的方法。在受力性能上,纵筋是抗剪钢筋的需要。

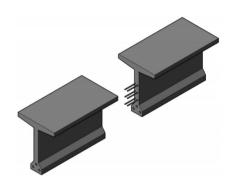


图5 接缝处纵向插筋示意图

Fig.5 Schematic diagram of longitudinal reinforcement across joints

综上所述,目前预制节段梁的设计方法并没有 形成规范或达成一致,其核心是纵筋在接缝处被截 断。为了避免接缝带来的不利受力影响,提出了接 缝处纵筋连续预制节段梁,旨在从抗剪机理和受力 性能上消除"接缝"。

## 2 试验方案

#### 2.1 试验梁设计

共设计3根弯剪梁(BS1~3)。BS1为整体梁(钢筋通长,混凝土1次浇筑),如图6a所示;BS2的普通钢筋在接缝位置处通长连续,并以接缝为界,混凝土分2次浇筑,模拟接缝位置处普通钢筋连续的节段梁,如图6b所示;BS3的普通钢筋在接缝位置处

断开,混凝土1次浇筑,模拟传统混凝土接缝的节段梁,如图6c所示。图中,P为加载力,N1、N2、N3为

预应力钢筋。各试件截面尺寸、配筋、剪跨比均相 同,参数如表2所示。

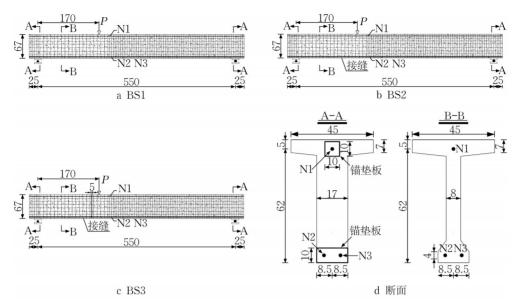


图 6 弯剪试验梁及接缝型式示意图(单位:cm)

Fig.6 Schematic diagram of bending shear test beams and joints (unit: cm)

表2 试件参数

Tab.2 Parameters of specimens

<b>↔</b> ₩-	各试件参数值			
参数	BS1	BS2	BS3	
腹板宽度/mm	80	80	80	
梁高/mm	670	670	670	
有效高度/mm	639	639	639	
剪跨区箍筋间距/mm	100	100	100	
剪跨, $\alpha$ /mm	1 700	1 700	1 700	
剪跨比,λ	2.66	2.66	2.66	
纵向主筋配筋率/%	0.614	0.614	0.614	
配箍率/%	0.706	0.706	0.706	
腹板水平钢筋	接缝位置连续	接缝位置连续	接缝位置不连续	
腹板水平钢筋配筋率/%	0.706	0.706	0.706	

## 2.2 试验材料

BS1、BS2、BS3混凝土强度试验值分别为49、46、48 MPa。普通钢筋及预应力筋力学性能试验值如表3所示。预应力张拉时,在梁端布置压力传感器,测得BS1、BS2、BS3预应力值分别为840、827、829 MPa,整个加载过程中各试件预应力值稳定不变。试件胶接缝采用国产商用环氧结构胶,并按规范[21]施工与养护。

#### 2.3 加载设计

试验采用单调分级加载,加载示意图及位移计布置(LVDT1~6)如图7所示。混凝土开裂前,以10kN为1级加载至试件接近开裂,开裂后以5kN为一级加载至钢筋屈服,然后采用位移控制加载直至梁体破坏。

钢筋应变片按图8从左往右、从下向上的顺序

表3 普通钢筋及预应力钢筋力学性能试验值

Tab.3 Test values of mechanical properties of reinforcements and tendons

钢筋规格	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
<b>∯</b> 6	455. 30	617.78	200
<b>₽</b> 8	450.06	625.88	200
<b>⊈</b> 10	465.35	658.35	200
$\Phi^{S}15.2$	1 658. 50	1 844. 39	195

进行编号。H表示腹板水平纵筋,V表示箍筋,B表示底板纵筋。

## 3 试验结果与分析

## 3.1 裂缝发展

在加载过程中BS1~3以主梁底缘竖向弯曲裂

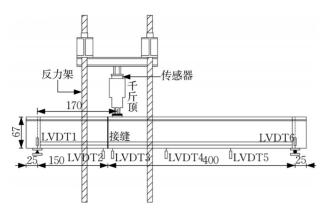


图7 加载示意图(单位:cm)

Fig.7 Loading diagram (unit: cm)

缝和腹剪斜裂缝发展为主,将前3条竖向弯曲裂缝和前3条腹剪斜裂缝作为初期裂缝对各试件的力学行为进行比较。

表4、5分别列出了BS1~3初期竖向弯曲裂缝和腹剪斜裂缝数据,图9为BS1~3初期裂缝发展状态。如表4、图9所示,BS1~3均首先出现竖向弯曲裂缝。BS1、BS2初期竖向弯曲裂缝位于加载点处主梁底缘;BS3初期竖向弯曲裂缝位于距加载点10cm处主

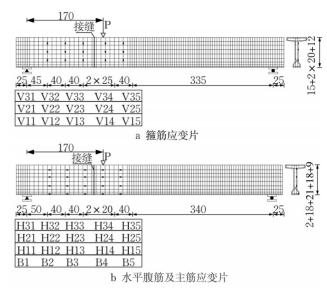


图8 应变片布置示意图(单位:cm)

Fig.8 Schematic diagram of strain gauge arrangement (unit: cm)

梁底缘;各试件初期竖向弯曲裂缝长度为20~30 mm,裂缝宽度为0.050~0.060 mm;各试件初期裂缝出现时加载力为90~110 kN,初期竖向弯曲裂缝出现时加载力为90~155 kN。

表4 主梁底缘初期裂缝

Tab.4 Incipient crack at the bottom of main girder

试件编号	加载力/kN	裂缝类型	长度/mm	宽度/mm	位置
	90	竖向弯曲裂缝	20	0.050	加载点处主梁底缘
BS1	120	竖向弯曲裂缝	60	0.064	距加载点60 cm处主梁底缘
	130	竖向弯曲裂缝	40	0.052	距加载点40、50 cm处主梁底缘
	95	竖向弯曲裂缝	30	0.060	加载点处主梁底缘
BS2	145	竖向弯曲裂缝	80	0.085	接缝位置主梁底缘
	150	弯剪斜裂缝	100	0.075	距加载点 40 cm 处主梁底缘
	110	竖向弯曲裂缝	30	0.053	距加载点10 cm处主梁底缘
BS3	150	竖向弯曲裂缝	30	0.060	加载点正下方主梁底缘
	155	竖向弯曲裂缝	50~70	0.073	距加载点30~60 cm范围内主梁底缘

表5 主梁腹板初期裂缝

Tab.5 Incipient cracks in the web of main girder

试件编号	加载力/kN	裂缝类型	长度/mm	宽度/mm	位置
	120	腹剪斜裂缝	200	0.072	距加载点50 cm处腹板
BS1	125	腹剪斜裂缝	50	0.065	距加载点60 cm处腹板
	130	腹剪斜裂缝	80	0.069	距加载点85 cm处腹板
	120	腹剪斜裂缝	80	0.073	距加载点35 cm处腹板
BS2	155	腹剪斜裂缝	50	0.071	距加载点30 cm处腹板
	160	腹剪斜裂缝	50~80	0.089	距加载点20、60 cm处腹板
	130	腹剪斜裂缝	100	0.099	距加载点40 cm处腹板
BS3	150	腹剪斜裂缝	100	0.179	距加载点45 cm处腹板
	160	腹剪斜裂缝	200	0.079	距加载点20 cm处腹板

由表 5、图 9 可见,整体梁和节段梁出现腹剪斜裂缝均晚于竖向弯曲裂缝,但加载力相差不大。除BS1 第 3 条腹剪斜裂缝外,BS1~3 初期腹剪斜裂缝均出现在距加载点 1 倍梁高范围内。各试件裂缝宽

度为 $0.065\sim0.179$  mm, 裂缝长度为 $50\sim200$  mm。 各试件初期裂缝出现时加载力为 $120\sim130$  kN, 初期 腹剪斜裂缝出现时加载力为 $120\sim160$  kN。

图 10 为 BS1~3 裂缝发育完全后的裂缝状态。

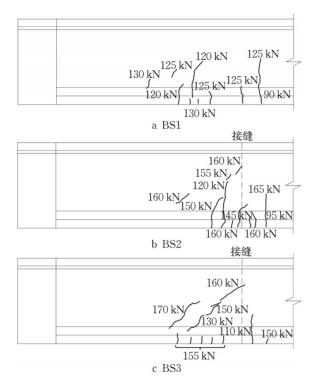


图9 BS1~3 裂缝发展初期示意图

Fig.9 Schematic diagram of incipient crack of BS1~3 BS1加载前期裂缝主要集中分布在加载点附近,随着加载力的增大,裂缝发展区域逐渐向支点附近区

着加载力的增大,裂缝发展区域逐渐向支点附近区域转移。在该过程中,裂缝发展角逐渐减小,剪跨段范围内裂缝逐渐发育完全,并在加载点与支点间逐渐形成一条主裂缝。

BS2裂缝发展同样经历了加载点区域向支点区域转移的过程,剪跨段范围内裂缝逐渐发育完全,并

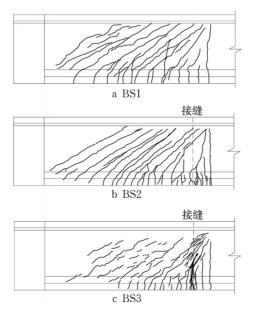


图 10 BS1~3 裂缝完全发育示意图

Fig.10 Schematic diagram of fully developed cracks of BS1~3

在加载点与支点间逐渐形成一条主裂缝,裂缝发展 状态与BS1相似。

在加载前期,BS3裂缝主要集中在距加载点1倍梁高范围内,随着加载力的增大,支点附近出现多条细小腹剪斜裂缝,但裂缝间并未相互贯通。反观接缝位置,裂缝宽度发展速率增大,发展长度逐渐向顶板延伸,并在腹板中部形成转角,逐渐形成一条指向加载点的主裂缝,主裂缝最终发展成倒V形张开口。

### 3.2 钢筋应变

## 3.2.1 腹板水平纵筋

试件破坏时,BS1~3荷载-腹板水平纵筋应变曲线对比如图11所示。

BS1受拉区腹板水平纵筋H11~15、H23、H25 测点处应变均达到钢筋屈服应变,H21、H22、H24测 点处应变非常接近钢筋屈服应变,而H31~35测点 处应变变化较小,H32、H35出现了较大压应变。

BS2受拉区腹板水平纵筋H11~14、H24、H25、H34测点处应变均达到钢筋屈服应变,H15、H22测点处应变非常接近钢筋屈服应变,而H21、H23、H31、H32、H33、H35测点处应变变化较小,H31、H33测点处出现了压应变。

BS3中主裂缝穿过H34测点处腹板水平纵筋,整个腹板水平纵筋测点中仅有H34测点处达到钢筋屈服应变,其余H11~15、H21~25、H31~33、H35测点处应变均未达到钢筋屈服应变。H11~15测点中发生的最大拉应变位于H14测点处,但其应变值也不超过2×10<sup>-3</sup>。H21~25中除H24、H25测点处出现较小拉应变外,其余测点处均出现不同程度的压应变。H31~35中除H34测点外,H31、H32、H33、H35测点处应变变化较小,H35测点处甚至出现压应变。

图12~14所示为各试件沿截面高度腹板水平纵筋应变分布。BS1、BS2从初始开裂至试件破坏,各腹板水平纵筋应变沿试件截面高度呈线性变化,由腹板底缘拉应变逐渐转变为腹板顶缘压应变。BS3在初始裂缝出现时,腹板水平纵筋应变沿试件截面高度呈线性变化。随后,试件各截面腹板水平纵筋应变均出现不规律变化,结构不再满足平截面假定。

### 3.2.2 箍筋

BS1~3荷载-箍筋应变曲线对比如图15所示。 BS1的截面1~5中除截面1外,截面2~5中均有一个测点达到屈服应变;BS2的截面1~5中除截面5外,截面1~4中均有一个测点达到屈服应变。随着

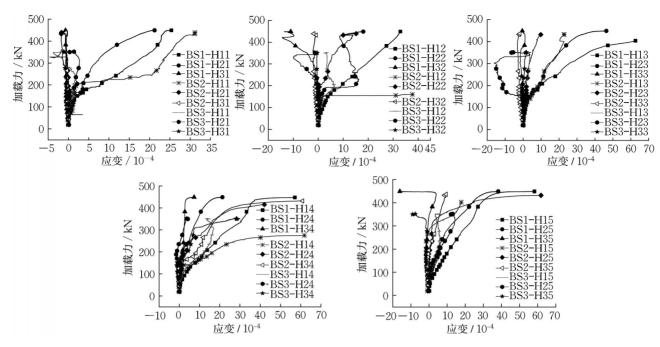


图 11 各试件荷载-腹板水平纵筋应变曲线对比

Fig.11 Comparison of load-web longitudinal reinforcement strain curves between specimens

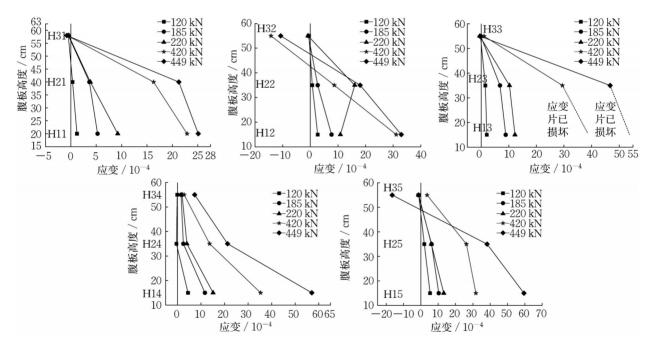


图 12 沿截面高度腹板水平纵筋应变分布(BS1)

Fig.12 Web longitudinal reinforcement strain distribution along section height (BS1)

接缝位置主裂缝的逐渐张开,BS3的截面4、5在试件破坏前出现拉应变减小的现象,主裂缝两侧结构应力得到进一步释放。反观远离接缝位置的截面1、2,由于预应力筋与该位置箍筋构成剪力传递机构,使截面1、2箍筋应变接近屈服应变。

## 3.2.3 底板纵筋

BS1~3荷载-底板纵筋应变曲线对比如图16所示。由于预应力筋的有利作用,使得马蹄裂缝宽度

明显小于腹板,马蹄内纵筋在主梁破坏时大部分测点未达到屈服应变。横向比较BS1、BS2、BS3马蹄内纵筋应力增量可以发现,BS3主筋应力增量大部分测点大于BS1、BS2。这是因为BS1、BS2中接缝位置连续的腹板水平纵筋可以有效承担主拉应力的水平分量,所以分担了底板主筋由于主拉应力产生的水平分量;BS3腹板水平纵筋在接缝位置处断开,主拉应力的水平分量仅仅由马蹄内预应力筋承担,

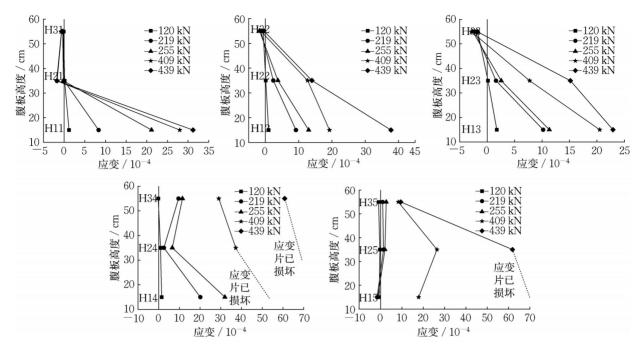


图 13 沿截面高度腹板水平纵筋应变分布(BS2)

Fig.13 Web longitudinal reinforcement strain distribution along section height (BS2)

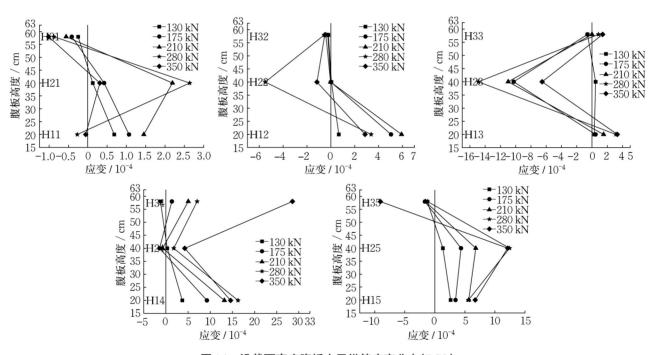


图 14 沿截面高度腹板水平纵筋应变分布(BS3)

Fig.14 Web longitudinal reinforcement strain distribution along section height (BS3)

导致预应力筋受主拉应力水平分量的影响较大,拉

#### 3.3 破坏模式

图 17 所示为 BS1~3 的破坏模式。BS1 临近破 坏时出现2条典型薄腹板腹剪斜裂缝,一条连接加载 点与支点,另一条位于距加载点50 cm处主梁底缘指 向加载点。BS1破坏时,破坏裂缝宽度增大,裂缝附 近混凝土剥落,加载点处顶缘受压区混凝土局部 应力增长明显,马蹄内主筋拉应力增大。 压溃。

BS2临近破坏时在腹板逐渐形成一条主裂缝, 该裂缝连接加载点与支点。随着加载继续,主裂缝 宽度逐渐增大,腹板处混凝土、顶板与腹板交界面处 混凝土剥落,加载点处顶缘受压区混凝土形成块体 外鼓压溃,并伴有剥落。BS2剪跨内腹板裂缝穿过

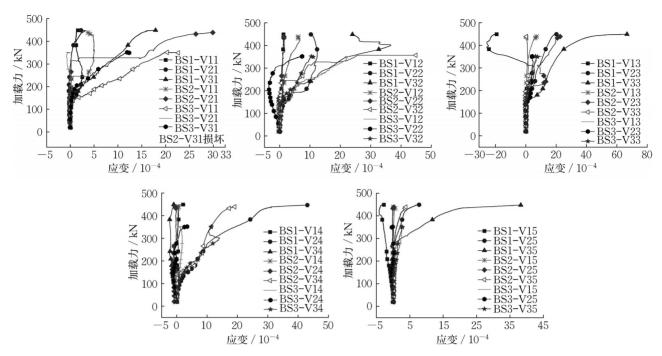


图 15 各试件荷载-箍筋应变曲线对比

Fig.15 Comparison of load-stirrup strain curves between specimens

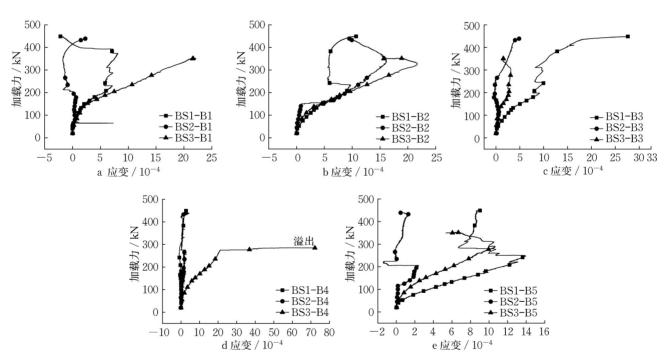


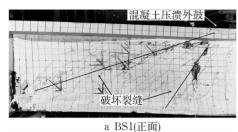
图16 各试件荷载-底板纵筋应变曲线对比

 $Fig. 16 \quad Comparison \ of \ load-bottom \ longitudinal \ reinforcement \ strain \ curves \ between \ specimens$ 

接缝面且发展充分,破坏裂缝并非位于接缝位置,破坏模式与BS1极为相似。

BS3在加载过程中逐渐沿素混凝土截面形成主裂缝,主裂缝向顶板延伸过程中在腹板中部形成转角,并指向加载点。随着加载力的分级增大,主梁素混凝土截面下部受拉区混凝土逐步退出工作,接缝

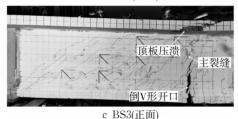
面逐渐张开,截面中性轴向上移动,受压区混凝土面积逐渐减小,截面发生应力重分布。节段梁沿素混凝土截面形成倒V形开口,加载点附近主梁顶缘受压区混凝土压溃,BS3破坏。梁体发生破坏前有较明显征兆,接缝两侧梁体绕接缝上部顶板塑性转动,主梁产生过大的下挠变形。



混凝土压溃外鼓

破坏裂缝

b BS2(背面)



c BS3(正則

图 17 各试件破坏模式 Fig.17 Failure mode of specimens

## 3.4 梁体变形

图 18 所示为 BS1~3 在不同荷载工况下竖向挠 度沿试件长度的分布, 曲线包括了初始裂缝、初期裂 缝、裂缝发展中期、1/2 极限荷载、裂缝发育完全、极 限荷载等6个荷载工况下各测点的竖向位移。加载 初期试件刚度大, 均发生整体变形, 但未出现开裂。

BS1、BS2裂缝在整个剪跨区内均匀充分发展,接缝两侧竖向位移发展基本一致,未出现剪切滑移。试件破坏时,挠度曲线在接缝位置处产生较为平缓的转角,如图18a、b所示。BS3主裂缝形成后,主裂缝沿接缝位置逐渐张开,形成倒V形开口,接缝两侧节段梁出现由曲率引起的节段挠度差。试件破坏时,该挠度差发展到最大,且节段间沿接缝面出现剪切滑移,以至BS3挠度曲线在接缝位置处产生较为突然的转角,如图18c所示。

此外,随着加载力的增大,BS1、BS2通过裂缝数量和宽度的发展来适应结构的整体变形。在加载力接近0.91P<sub>u</sub>~0.93P<sub>u</sub>(P<sub>u</sub>为极限加载力)时,试件裂缝宽度、数量发育基本完全,竖向挠度发展大部分集中在主梁裂缝发展期间。BS3加载前期发生整体变形,挠度发展趋势与BS1、BS2相似。加载力接近0.80P<sub>u</sub>时,BS3裂缝数量和宽度基本发育完全,随后试件主要通过接缝开口的张开度适应试件的弯折变形。BS3竖向位移主要发生在裂缝发育完全后,即接缝形成倒V形开口

后。可见,从裂缝发育完全到发生破坏,BS3 所经历的 位移增量明显大于BS1 和BS2。

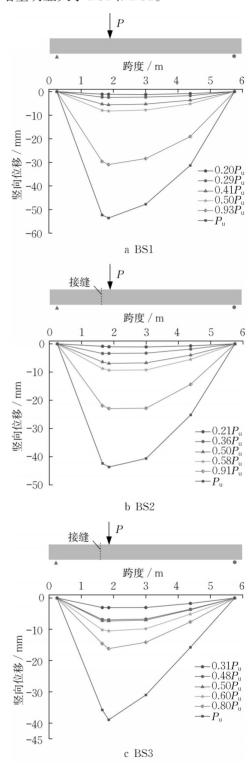


图 18 各试件挠度发展

Fig.18 Deflection development of specimens

#### 3.5 刚度与承载力

各试件荷载-位移曲线如图19所示。BS1、BS2 在整个加载过程中荷载-位移曲线发展趋势基本一致,经历了弹性阶段、裂缝发展阶段、持荷至破坏阶 段。BS3在整个加载过程中经历了弹性阶段、裂缝发展阶段、接缝持续张开阶段、持荷至破坏阶段。BS3接缝的张开,导致整体刚度降低明显。张开的接缝使截面逐渐发生应力重分布,受拉区混凝土逐渐退出工作,中性轴上移,受压区高度逐渐减小,压应力逐渐增大,从而使BS3压区混凝土早于BS1、BS2进入弹塑性阶段。BS1、BS2荷载-位移曲线发展历程大于BS3,接缝处纵筋连续可以提高节段梁延性。各试件抗剪承载力试验值如表6所示。可见,接缝位置纵筋连续对节段梁的抗剪贡献较为明显。

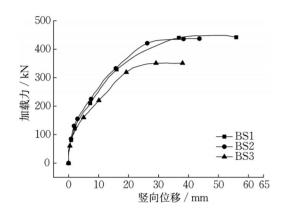


图19 各试件荷载-位移曲线

Fig.19 Load-displacement curves of specimens

表 6 各试件抗剪承载力试验值

Tab.6 Test values of Shear capacity of specimens

试验编号	抗剪承载力/kN	BS2(BS3)—BS1 BS1
BS1	449	
BS2	435	-3.11
BS3	350	-22.05

## 4 结论

- (1)接缝处纵筋连续节段梁中腹板水平纵筋有效承担了由于剪力作用引起的截面上轴向拉力,并沿纵向有效传递到主梁各截面,与箍筋同样起抗剪作用。
- (2)接缝处纵筋连续节段梁箍筋受力与整体梁相似,试件破坏时接缝附近箍筋能有效承担主拉应力产生的竖向分量,充分发挥抗剪钢筋的作用。
- (3)因为接缝处纵筋连续节段梁腹板水平纵筋 承担了由剪力作用引起的截面上轴向拉力,所以大 大减小了底板纵筋承担的由剪力引起的拉应力。
- (4)接缝处纵筋连续节段梁腹板水平纵筋在接缝处的连续可以更好地抑制斜裂缝的发展,限制主

裂缝的宽度,从而有效提高节段梁结构的刚度。

(5)在试件腹板开裂至试件破坏的整个加载过程中,接缝附近节段受力基本满足平截面假定,且抗剪承载力、试件刚度、裂缝发展、破坏模式等力学行为与整体梁基本一致。试验结果充分验证了节段梁接缝处纵筋连续的必要性,同时接缝处纵筋连续也是节段梁从受力性能上消除"接缝"的必要手段。

### 作者贡献声明:

邹 宇:构建整体思路,完成试验并撰写、修改论文。 俞承序:试验实施,数据处理,论文修改。

徐 栋:提出选题,指导论文撰写与修改。

端木祥永:参与试验实施,论文修改。

王田虎:参与试验实施,论文修改。

何家学:参与试验实施,论文修改。

## 参考文献:

- [1] RABBAT B G, SOWLAT K J. Testing of segmental concrete girders with external tendons [J].PCI Journal, 1987, 32(2):86.
- [2] HINDII A, MACGREGOR R, KREGER M E, et al. Enhancing strength and ductility of post-tensioned segmental box girder bridges [J].ACI Structural Journal, 1995, 92(1):73.
- [3] MACGREGOR R, KREGER M E, BREEN J E. Strength and ductility of a three-span externally post-tensioned segmental box girder bridge model [J]. Earth Planetary Science Letters, 1990, 305(1/2):83.
- [4] RAMOS G, APARICIO A C. Ultimate analysis of monolithic and segmental externally prestressed concrete bridges [J]. Journal of Bridge Engineering: ASCE, 1996, 1(1):10.
- [5] APARICIO A C, RAMOS G, CASAS J R. Testing of externally prestressed concrete beams [J]. Engineering Structures, 2002, 24(1):73.
- [6] 徐栋.节段施工体外预应力桥梁的极限强度分析 [D].上海:同济大学,1998.
  - XU Dong. Ultimate strength analysis of segmental externally prestressed concrete bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 1998
- [7] HUANG Z, LIU X. Modified skew bending model for segmental bridge with unbonded tendons [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(1):59.
- [8] YUAN A, DAI H, SUN D, et al. Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending [J]. Engineering Structures, 2013, 48:623.
- [9] JIANG H, CAO Q, LIU A, et al. Flexural behavior of precast concrete segmental beams with hybrid tendons and dry joints [J]. Construction and Building Materials, 2016, 110:1.
- [10] JIANG H, LI Y, LIU A, et al. Shear behavior of precast concrete segmental beams with external tendons [J]. Journal of

(下转第1698页)