

文章编号:1671-8879(2015)05-0073-09

# 体内体外混合配束节段预制箱梁受弯性能试验

袁爱民<sup>1</sup>, 吴闻秀<sup>2</sup>, 孙大松<sup>3</sup>, 戴航<sup>4</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 金华市公路管理局, 浙江 金华 321013;  
3. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210005; 4. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**为了探索体内体外配束比对节段预制箱梁受弯性能的影响,考虑 3 种水平的体内体外混合配束比,制作 3 根节段预制拼装箱梁进行极限承载力试验,研究了体内体外不同配束比下,节段预制箱梁的变形特点、裂缝分布特征及破坏模式。研究表明:体内束布置越多,节段预制箱梁的承载力越高;梁体变形主要集中在节段接缝处;梁体的裂缝是沿胶接缝的素混凝土开裂,张开的接缝沿梁高方向分布符合平截面假定;极限承载力状态下,体外束的应力可达 1 400~1 600 MPa,应力增量可达 35%~45%;当梁体破坏时,普通钢筋的累积应变仍小于钢筋屈服应变,建议普通钢筋按照构造配筋配置。

**关键词:**桥梁工程;体内体外混合配束;节段预制箱梁;受弯性能;破坏模式

**中图分类号:**U448.21;TU378.2 **文献标志码:**A

## Experimental on flexural behavior of segmental precast concrete beam with internal tendons and external tendons

YUAN Ai-min<sup>1</sup>, WU Wen-xiu<sup>2</sup>, SUN Da-song<sup>3</sup>, DAI Hang<sup>4</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;  
2. Jinhua Municipality Administration Bureau of Highway, Jinhua 321013, Zhejiang, China;  
3. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Co. Ltd., Nanjing 210005, Jiangsu, China;  
4. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of ratio of internal tendons and external tendons on performance of the SPCB, three different ratios of internal tendons and external tendons were considered to make three segmental precast concrete beams for the experiment of ultimate strength destructive tests. The deformation properties, cracks distribution characteristics and failure modes of the three concrete beams were studied. The results show that the more internal tendons are, the higher ultimate strength capacity will be. The deformation of SPCB is mainly focused on the segment joints and the cracks of SPCB are mainly epoxy opening between the joints. The opening width of the joints along vertical direction are in accord with the plane section assumption. The ultimate stress of external tendons can be up to 1 400 MPa-1 600 MPa and the stress increment is about 35%-45%, whose contribution to the ultimate bearing capacity should not be neglected. The load-strain curve of plain reinforcement of SPCB shows an obvious turning

收稿日期:2015-05-25

基金项目:江苏省交通科学研究计划项目(08Y08);博士点基金项目(20100094120013);中央高校基科研业务费专项资金项目(2009B13914)

作者简介:袁爱民(1974-),男,安徽宣城人,副教授,工学博士,E-mail:yuanam@163.com。

point at the moment of joint cracking. The strain grows faster after cracking, but is still less than the yield strain. Therefore, the minimum reinforcement ratio is recommended. 3 tabs, 16 figs, 16 refs.

**Key words:** bridge engineering; internal tendons and external tendons; segmental precast concrete beam(SPCB); flexural behavior; failure mode

## 0 引言

体内体外混合配束较好地发挥了体内预应力混凝土桥梁预应力筋利用效率高、延性好的特点,又利用了体外预应力混凝土桥梁布筋简单、可拆除、易更换与检测、便于多次张拉、方便施工等优点。近几年,这种混合配束技术正逐渐兴起,在苏通大桥引桥、崇启大桥引桥、上海长江大桥引桥、厦门 BRT 高架桥和南京长江四桥引桥等桥梁中已经使用,但此类桥梁的理论研究与试验研究还相对滞后,现行桥规中还未涉及相应条款。

体外预应力节段预制桥梁技术在国外已经较为成熟,中国也有很多学者和专家开展了试验研究工作,取得了一批有价值的成果,但对于混合配束节段预制桥梁试验,国内外研究还较少。国外方面,Rabbat 等进行了 3 根节段预制梁模型的受力性能试验,研究了不同配束方式对梁受力性能的影响,重点对比了不同配束方式下梁受力行为差异,结果表明:体内有粘结筋的试验梁延性更好,梁体极限破坏模式为剪切破坏<sup>[1]</sup>;Algorafi 等研究了不同体外束的布置、接缝形式以及不同的加载方式对节段预制箱梁受力性能的影响<sup>[2]</sup>;Aparicio 比较了整体式体外预应力梁和节段式体外预应力梁在不同加载方式下梁体受力性能的差异<sup>[3]</sup>。中国方面,上海城市建设设计研究院的李坚等通过体内体外混合配束节段箱梁模型试验,研究了梁在拼装过程中及设计荷载作用下的力学性能,表明体内体外节段拼装梁的跨中截面应力和挠度理论计算值与实测值基本吻合,该试验接缝形式为干接缝,预应力管道不灌浆,与实际有一定的差异,且该试验只研究了正常使用状态,并没有对极限状态及破坏机理进行分析<sup>[4]</sup>;李国平等通过体内体外混合配束节段预应力混凝土连续梁模型试验得到节段式梁的破坏裂缝主要集中在接缝位置<sup>[5-6]</sup>;李国平还通过整体式与节段式体内体外混合配束简支梁模型弯曲的对比试验,研究了整体式与节段式梁体的极限承载力、极限挠度的差异,体内体外配束比对节段式模型梁体外预应力筋极限应力增量的影响,并提出了体外预应力抗弯承载力的简化

计算公式<sup>[5,7]</sup>;徐海军等通过非线性有限元法对体内体外混合配束节段梁的体内体外配束比、接缝数量等影响弯曲性能的参数进行分析,并用国内外体外预应力混凝土梁试验资料得到了验证,结果表明增加体内有粘结预应力筋可以提高结构弯曲性能,接缝数量对全体外预应力筋混凝土梁承载力影响较大<sup>[8]</sup>;刘钊等开展了一孔 48 m 跨径箱梁的足尺模型试验,并用 ANSYS 建立实体模型,研究了节段预制箱梁正常使用和施工状态下的结构行为,结果表明正常使用阶段节段预制拼装桥梁的整体性能较好,力学行为基本符合平截面假定<sup>[9]</sup>。

综上所述,节段预制箱梁受力性能的研究以 T 形或工字形截面较多,箱形截面少;干接缝多,胶接缝少;正常使用状态较多,极限状态较少;体外束较多,体内体外混合配束较少。鉴于此,本文将体内体外配束比作为影响因素,开展不同配束比的节段预制箱梁受弯性能试验,研究制作了体内体外配束比分别为 3:1、1:1、1:3 的 3 根节段预制胶接缝箱梁;分析了箱梁的抗弯承载力、荷载-挠度关系、跨中节段接缝处变形、体外预应力筋极限应力增量、普通钢筋应变的变化规律,建立了荷载-接缝宽度的关系曲线,揭示了此类梁体的破坏机理。

## 1 试验概况

### 1.1 试验构件与材料性能

#### 1.1.1 试件构件

本试验是以某座现役桥梁为基本原型,截面几何尺寸按 1:10 的比例制作试验模型梁。梁长为 5.76 m,由 38 cm+10×50 cm+38 cm 的 12 个节段拼装而成,计算跨径 550 cm,见下页图 1。梁段高 60 cm,顶板宽 150 cm,底板宽 70 cm,顶板、底板及腹板的厚度取 10 cm;箱梁截面情况见下页图 2~图 4。预应力配束比见下页表 1。

#### 1.1.2 材料性能

试验混凝土用 C40 普通商品混凝土,现场测得混凝土力学性能见下页表 2;构造钢筋采用 HPB235,预应力筋均采用 1×7- $\Phi$ 12.7,体外预应力束采用环氧涂层无粘结钢绞线,预应力筋力学参数见下页表 3。

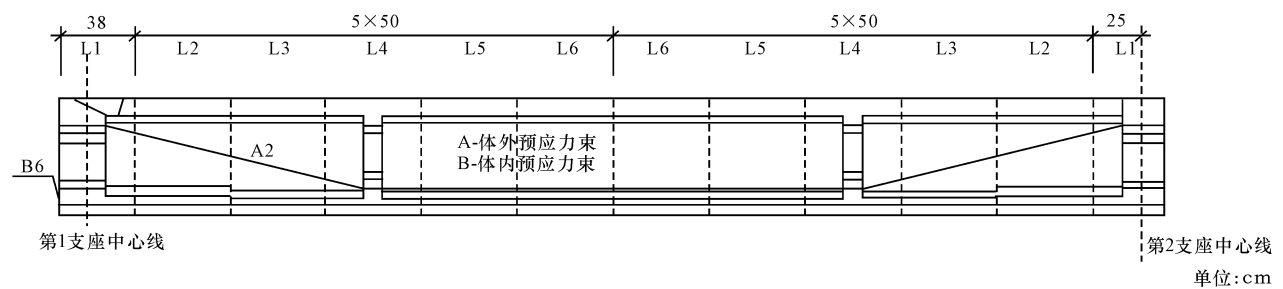


图 1 构件节段划分  
Fig. 1 Divided segment components

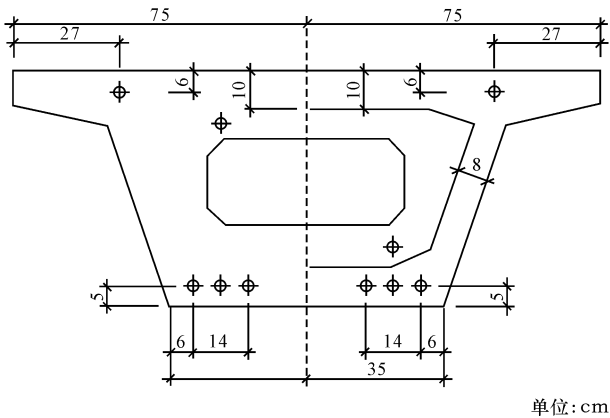


图 2 预应力束布置:端部处(左)、转向块处(右)  
Fig. 2 Arrangement of internal tendons and external tendons: telos(left), deviators(right)

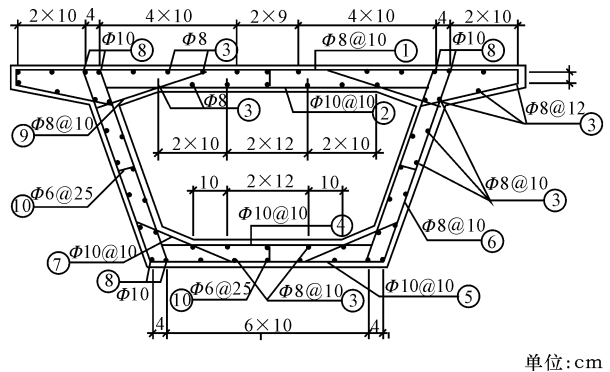


图 3 普通钢筋配筋  
Fig. 3 Divided segment components

表 1 体内体外预应力筋基本参数

试件编号	顶板体内束/根	底板体内束/根	体外束/根	配束比 $\mu$
SPCB-2-6-2	2	6	2	3 : 1
SPCB-2-4-4	2	4	4	1 : 1
SPCB-2-2-6	2	2	6	1 : 3

表 2 混凝土力学性能

混凝土种类	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	密度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
普通混凝土	32.2	$2.37 \times 10^4$	25.0

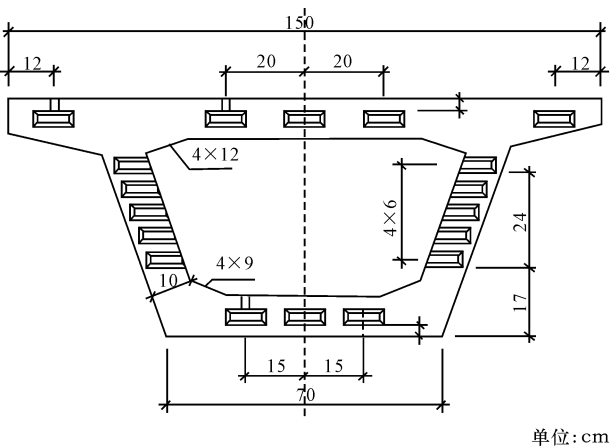


图 4 剪力键类型:凹面(左)、凸面(右)  
Fig. 4 Shear key joint type: concave(left), convex(right)

表 3 体内体外预应力筋力学性能

钢绞线种类	规格	强度/MPa	截面积/ $\text{mm}^2$	筋壁摩擦因数	质量/kg
有粘结	1×7- $\Phi 12.7$	1 860	98.7		0.84
无粘结	1×7- $\Phi 12.7$	1 860	98.7	0.004	0.84

本试验模型按长线法施工,将所有预制节段在底模上精确定位,先浇筑奇数节段,拆模养护,再以已浇筑好的节段界面作为端模,浇筑偶数节段,以避免节段界面间的不匹配。

## 1.2 试验装置与加载制度

### 1.2.1 试验装置

试验装置如下页图 5 所示,由 2 个 1 000 kN 反力架,纵、横向分配梁,垫块,固定支座,滚动支座以及 320 t 油压千斤顶组成;反力架、分配梁的刚度满足要求。竖向力由油压千斤顶手动施加,千斤顶的最大行程为 200 mm。

### 1.2.2 加载制度

试验采用分级加载,试验前预估试件的破坏荷载。加载时,在破坏荷载的 70%~80%之前,按预估荷载的 1/10 进行分级加载,每加一级荷载后停顿 10 min,使变形充分发展。此后,按照破坏荷载的



图 5 试验装置  
Fig. 5 Test set-up

1/20 分级加载。当承载力不再上升时以位移控制，继续分级加载至破坏。

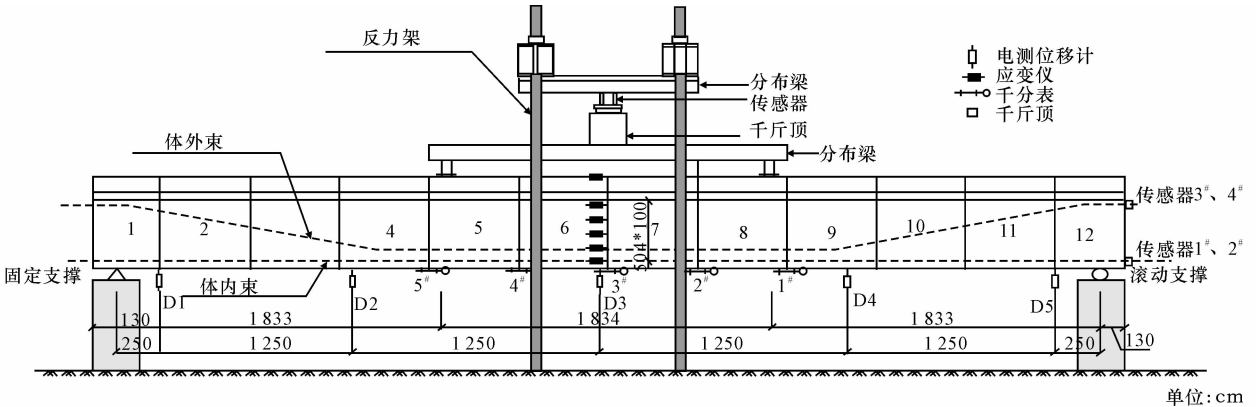


图 6 测点布置

Fig. 6 Instrumentation layout

## 2 试验结果分析

### 2.1 箱梁荷载-挠度与变形分析

油压千斤顶上布置压力传感器测得各工况加载荷载，跨中梁体底部布置位移计测得各工况的挠度，绘制荷载-挠度关系曲线，见图 7；沿梁纵向布置的 5 个电测位移计 D1~D5，测得梁体各截面竖向变形，绘制变形曲线，见下页图 8。

从图 7 中可以看出，体内体外配束比越大，跨中荷载-挠度关系曲线越饱满，极限承载力越大。由于梁体在竖向荷载作用下产生弯曲变形，体外束在梁体加载前后始终为直线状态，加载后梁体弯曲，而跨中无转向块，体外束将产生偏心距增量即二次效应。这种效应当梁弯曲时反过来影响梁的抗弯性能；而体内束与梁一起弯曲，预应力筋的偏心距在梁受力前后对于每个截面都基本固定不变<sup>[10]</sup>。因此，体内束对梁体的极限承载力影响明显。当体内体外配束比小于 1:1 时，荷载-挠度曲线可近似采用双折线形式。

从图 8 中可以看出，随荷载增加，梁体变形逐渐

### 1.3 试验方法与测点布置

采用 200 t 压力传感器测竖向荷载，应变片和电测位移计分别测应变及变形。试验数据采用 TS3890 程控静态电阻应变仪和计算机组成的数据采集系统全程记录。部分测点布置见图 6，沿梁纵向弯曲平面内距一侧支座 30 cm、 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$  以及另一侧支座 30 cm 处布置 5 个电测位移计 D1~D5；跨中底板布置量程为 100 mm 的位移计；跨中顶板沿梁横向均匀布置 5 个应变片，跨中侧面沿梁高均匀布置 5 个应变片；纯弯段各节段间接缝处布置百分表；体外束端部布置压力传感器。

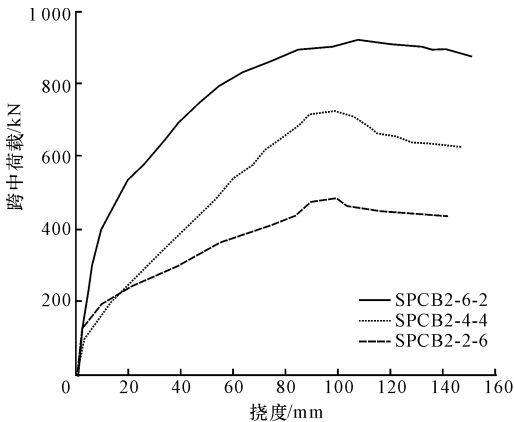
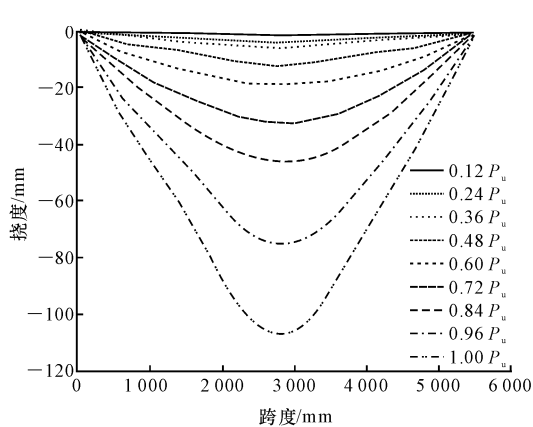


图 7 跨中荷载-挠度关系曲线

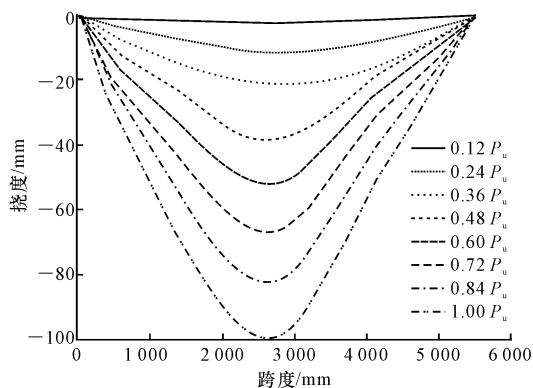
Fig. 7 Relationship between deflection and vertical load of span centre

增大，3 根梁的变形曲线与正弦平波曲线基本吻合；体内体外束比值越大，梁体的塑性变形能力越强，达到极限承载力时变形越大，见下页图 8 所示。

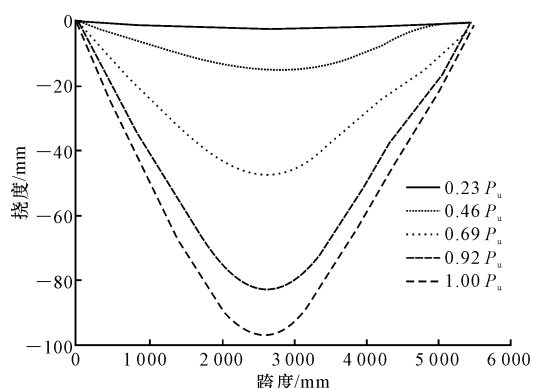
3 种不同配束比下的箱梁都经历了与体外预应力混凝土梁荷载-挠度关系相似的 3 个阶段：①裂前弹性阶段；②裂后弹塑性阶段；③非线性（极限）阶段<sup>[11]</sup>。



(a) SPCB-2-6-2



(b) SPCB-2-4-4



(c) SPCB-2-2-6

注:  $P_u$ 为梁体能承受的极限荷载值。

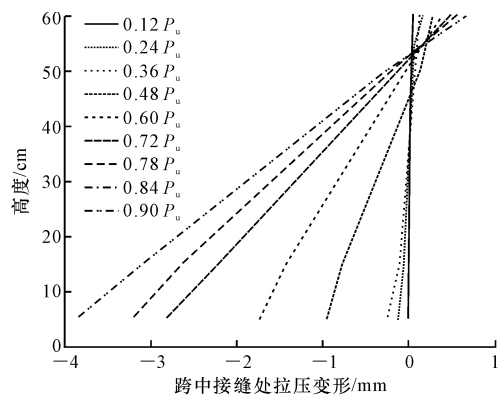
图 8 梁体的变形曲线

Fig. 8 Deformation curves of each segmental prestressed concrete beam

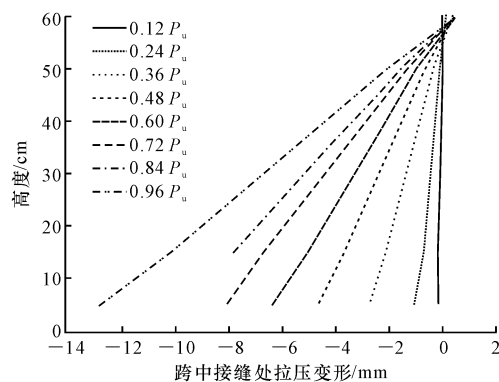
## 2.2 箱梁跨中节段间接缝宽度沿梁高分布分析

在跨中节段接缝处布置沿梁高方向的千分表,测得跨中节段接缝处拉压变形沿梁高的分布,如图 9 所示。

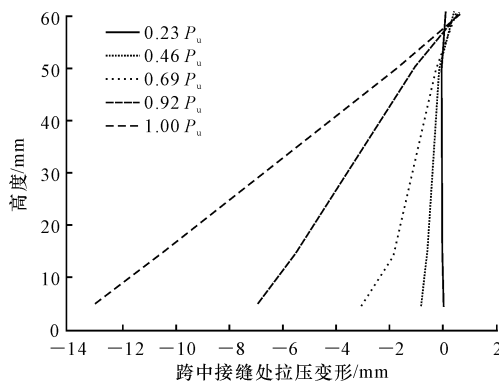
从图 9 中可以看出,开始加载梁体处于全截面受压状态,荷载产生的拉应力不能抵消预应力所施加的预压力,接缝处于闭合状态;随荷载增加,接缝处受压开始变为受拉,由于接缝只能承受压应力,当



(a) SPCB2-6-2



(b) SPCB2-4-4



(c) SPCB2-2-6

图 9 随荷载增加接缝宽度沿梁高的分布

Fig. 9 Width distribution across opening joint section at various loading increments along the depth

受压转化为受拉状态时,节段预应力结构立即表现出明显的接触非线性<sup>[12]</sup>。3 根梁接缝张开前,节段间整体性较好,跨中截面应变基本符合平截面假定。随荷载进一步增加,接缝开始陆续张开,中和轴不断上移,中和轴上移至距顶板最近时,达到极限荷载,如荷载继续增加,顶板混凝土压碎,梁体破坏。体外束比重越大,达到极限承载能力时,中和轴距梁顶板越近,梁体的裂缝主要集中在节段间接缝的素混凝土处。跨中接缝沿梁高张开宽度显示,接缝张开后跨中截面应变仍符合平截面假定。

### 2.3 箱梁节段接缝间荷载-接缝宽度分析

箱梁底板纯弯段节段接缝处布置百分表,测得接缝张开宽度,绘制荷载-接缝张开宽度关系曲线,如图 10 所示,其中 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup> 接缝的位置见图 6。

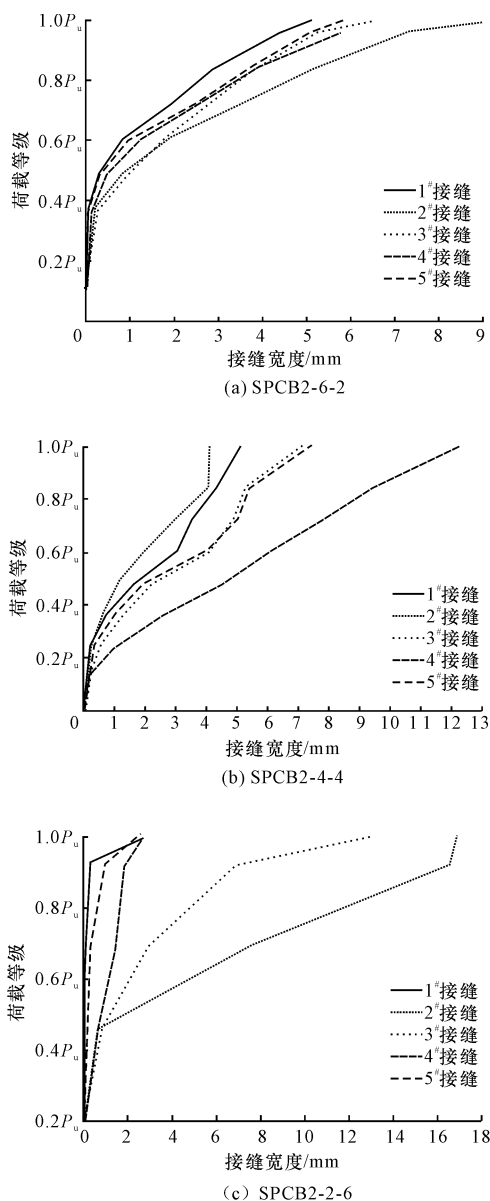


图 10 箱梁荷载-节段接缝张开宽度关系曲线

Fig. 10 Relationship between the width of the joint opening and the vertical load for each beam segment

从图 10 可以看出,加载前期所有接缝处于闭合状态,随荷载增加接缝陆续张开。梁 SPCB2-6-2 中加载至  $0.35 P_u$  时,接缝开始张开,随荷载增加,2<sup>#</sup> 接缝发展较快,荷载达到  $P_u$  时 2<sup>#</sup> 接缝处形成塑性铰;梁 SPCB2-4-4 中加载至  $0.12 P_u$  时,接缝开始张开,4<sup>#</sup> 接缝发展最快,荷载达到  $P_u$  时,4<sup>#</sup> 接缝处形成塑性铰;梁 SPCB2-2-6 加载至  $0.22 P_u$  时,接缝迅速张开,达到  $0.48 P_u$  时,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 接缝张开明显加

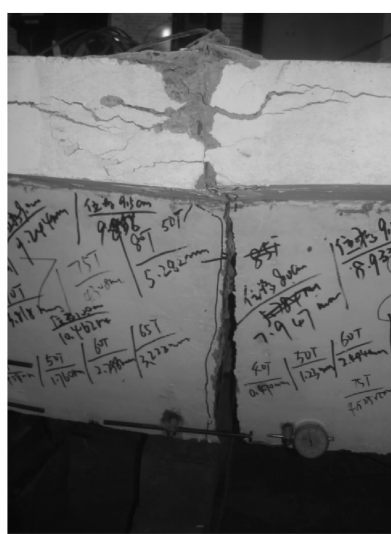
快,抑制了其他接缝开展;因此,其余 3 条接缝的张开宽度均较小。特别是图 10(c)中加载至  $P_u$  时,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 接缝处顶板混凝土均被压溃,形成双塑性铰,2<sup>#</sup> 接缝张开最大达到 16.797 mm。

体内预应力使节段预制箱梁受力性能得到改善,表现为体内束提高开裂荷载和有效抑制接缝分布及最大接缝宽度。梁 SPCB2-6-2 的开裂荷载明显高于梁 SPCB2-4-4 和梁 SPCB2-2-6,其原因是体内束远离截面中性轴,比体外束提供更多的抵抗矩,增加了梁体压应力储备。当达到极限荷载  $P_u$  时,梁 SPCB2-6-2 接缝张开的最大宽度最小,且所有接缝张开较均匀,体外预应力混凝土箱梁的裂缝分布和平均裂缝间距的大小与体外预应力无关<sup>[13]</sup>,因此,体外预应力对接缝的张开宽度影响较小。

混合配束节段箱梁的破坏模式为随体内束增多变形集中于关键接缝的破坏模式,转变为多个接缝张开,极限状态下,体内束屈服,顶板混凝土压碎,如下页图 11 所示。体内束屈服时,图 11(a)、图 11(b)中的 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 接缝达到临界裂缝形成塑性铰,截面发生了明显的塑性变形,破坏时对应顶板混凝土被压碎。2<sup>#</sup> 接缝处首先形成临界裂缝,随荷载继续增加,转向块发生破坏,见图 11(c),体外预应力放松,梁体内力重分布,曲线有明显的转折点,所有接缝张开宽度的速率随荷载增加而加快。由于转向块破坏,折线布置的体外束提供的竖向力分量减小,靠近转向块破坏的一侧所承受的弯矩变大,而 2<sup>#</sup> 接缝已经达到塑性屈服,故弯矩向中间转移,3<sup>#</sup> 接缝达到塑性屈服形成双塑性铰后梁体破坏。

因此,体外预应力混凝土结构中必须注意转向块破坏导致体外束失效,有必要对转向块进行合理的配筋设计改善其承载力。而转向块属于结构的 D 区,受力复杂,设计中可以运用有限元分析转向块的受力情况,拉压杆模型进行转向块的配筋设计。其关键点是:①确定合理的拉压杆模型;②根据拉压杆模型确定吊筋和箍筋的数量。本试验中箱梁转向块形式为横梁式,而对于横梁式转向块,目前用于配筋设计的拉压杆模型有以下几种:徐栋等提出了能够单独确定转向管道箍筋的拉压杆模型<sup>[14]</sup>,见下页图 12(a);李传习等提出了能够确定吊筋数量的拉压杆模型<sup>[15]</sup>,见下页图 12(b)。

在上述研究成果的基础上,通过 ANSYS 软件对转向块进行了详细的有限元分析,得出转向块处的有限元应力云图和矢量图,见下页图 13。进而建立了既能计算箍筋用量,又可以计算吊筋用量的拉



(a) SPCB2-6-2



(b) SPCB2-4-4



(c) SPCB2-2-6

图 11 箱梁破坏模式

Fig. 11 Failure mode of box beams

压杆模型,见下页图 14。

2.4 梁体体外预应力筋荷载-应力增量分析

在体外束锚固端布置穿心式压力传感器,测得体外预应力束的拉力,换算成体外束的应力,绘制体外束荷载-应力增量关系曲线,见下页图 15。

从图 15 中可以看出,梁体在预压应力下存在反拱,加载前期,梁体处于消压状态,体外束应力增量均为 0;梁体开裂时体外束应力增加,达到极限承载力时,体外束的极限应力达到 1 400~1 600 MPa,应力增量达到 35%~45%。因此,体外预应力筋对箱梁结构极限抗弯承载力的贡献不能忽略<sup>[16]</sup>。

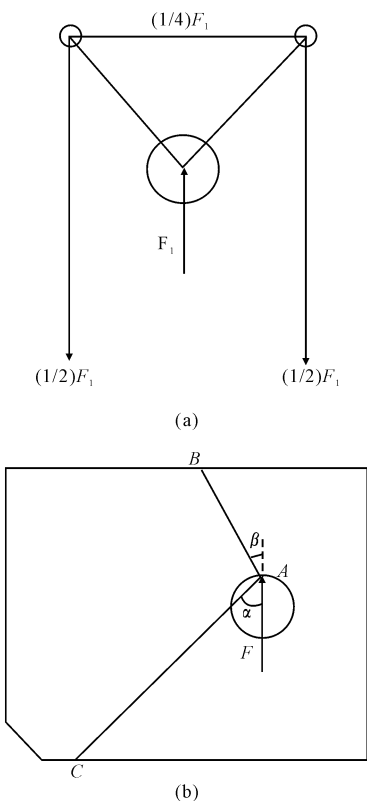


图 12 转向块的拉压杆模型

Fig. 12 Strut-and-tie model of deviator

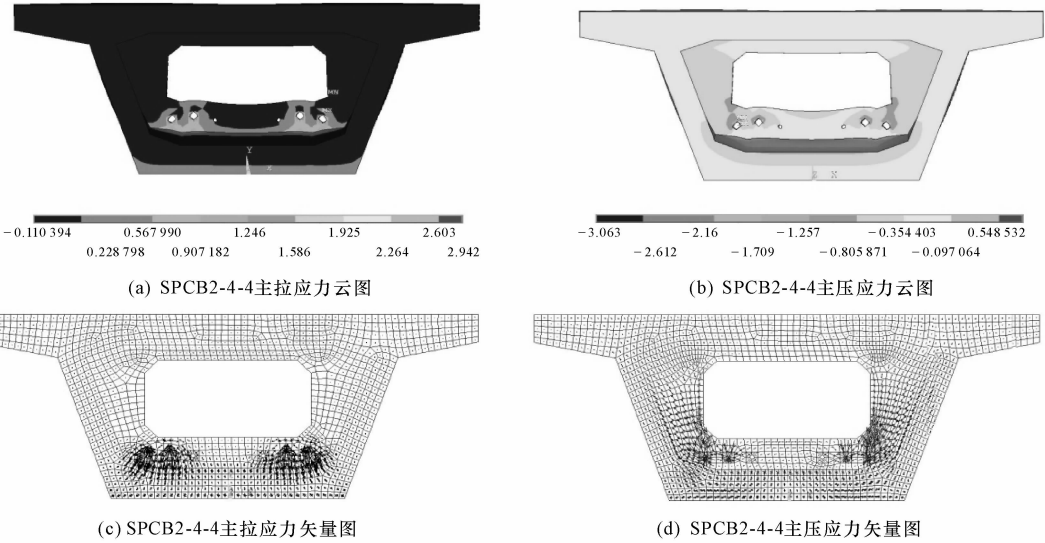
2.5 箱梁底板普通钢筋应变分析

浇筑前,箱梁跨中底板普通钢筋上粘贴应变片,试验时测得箱梁跨中底板普通钢筋应变情况,绘制不同配束比的荷载-底板普通钢筋应变关系曲线,见下页图 16。

从图 16 中可以看出,普通钢筋的荷载-应变曲线在梁体开裂点有明显拐点,开裂后应变增长速率变快;由于箱梁普通钢筋在节段间是断开的,当接缝张开后,底板拉力主要由预应力束承担,受力后节段间接缝张开会抑制混凝土开裂,普通钢筋受力较小,不同配束比的普通钢筋最大应变都不大于  $220 \times 10^{-6}$ ,远小于钢筋的屈服应变。当梁体破坏时,普通钢筋累积应变仍小于钢筋屈服应变。因此,梁底板受拉区普通钢筋对提高箱梁抗弯承载力效果不明显,建议节段预制箱梁在抗弯设计时普通钢筋按照构造配筋配置。

3 结 语

(1)体内体外混合配束节段预制箱梁在 3 种不同的配束比下都经历了与体外预应力混凝土梁相似的 3 个阶段:①裂前弹性阶段;②裂后弹塑性阶段;



单位: MPa

图 13 SPCB2-4-4 的应力云图与矢量图

Fig. 13 Stress nephogram and vector diagram of SPCB2-4-4

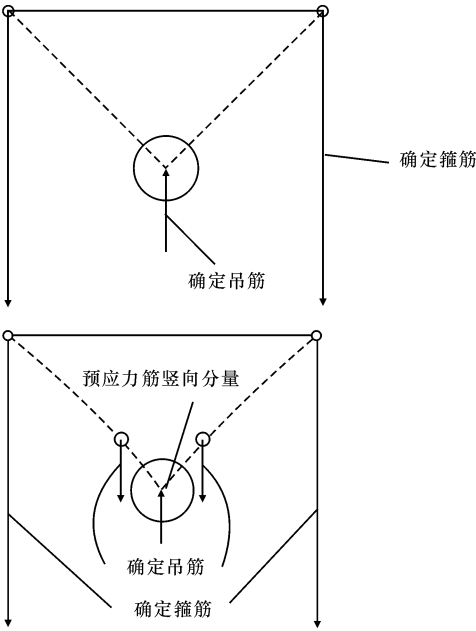


图 14 转向块的拉压杆模型

Fig. 14 Strut-and-tie model of deviator

③极限承载力阶段。体内体外配束比越大,荷载-挠度曲线越饱满,极限承载力越大;变形曲线与正弦平波曲线吻合,体内束可以提高梁体的塑性变形。

(2)3 根梁接缝张开前,节段间整体性较好,跨中截面应变基本满足平截面假定;接缝张开后,节段接缝沿梁高方向亦符合平截面假定,梁体裂缝主要源自于节段间胶接缝附近的素混凝土开裂。

(3)节段预制箱梁体内体外束总数一定时,体外束配置比重越大,中和轴的位置离梁顶板越近,受压区高度越小;体内束比重越大,梁体接缝开裂荷载越

高;体内束能有效抑制接缝的开展,且体内束越多,接缝开裂的宽度越均匀,体外束对接缝张开影响较小。

(4)达到极限承载力时,体外束的极限应力达到 1 400~1 600 MPa,应力增量达到 35%~45%。因此,体外预应力筋对结构极限抗弯承载力的贡献不能忽略。而节段预制箱梁底板受拉区普通钢筋对提高箱梁抗弯承载力效果不明显,建议节段预制箱梁在抗弯设计时普通钢筋按照构造配筋配置。

(5)通过有限元分析提出了可以确定转向块箍筋及吊筋的拉压杆模型,发现混合配束节段预制箱梁体外束应力增量与整体式箱梁的体外束应力增量存在差异,其具体原因尚不明确;另外,提出的拉压杆模型中,如何合理分配竖向力计算吊筋的配筋量和箍筋的配筋量值得进一步研究。

参考文献:

References:

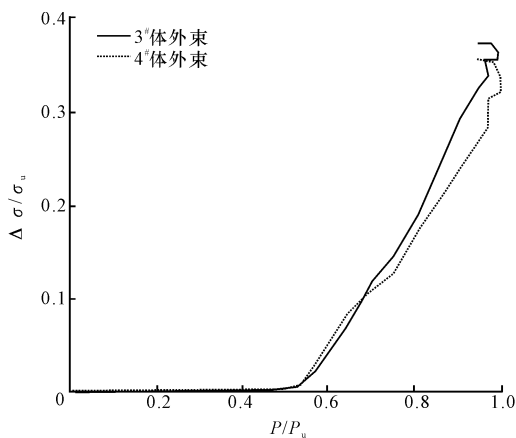
[1] Rabbat B G, Sowlat K. Testing of segmental girder with external tendons[J]. PCI Structural Journal, 1987, 32(2): 86-107.

[2] Algorafi M A, Ali A A, Othman I, et al. Experimental study of externally prestressed segmental beam under torsion[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3528-3538.

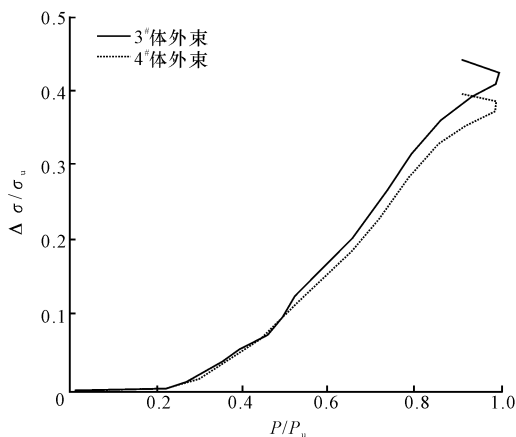
[3] Aparicio A C, Ramos G, Casas J R. Testing of externally prestressed concrete beams[J]. Engineering Structures, 2002, 24(1): 73-84.

[4] 李 坚, 陆元春. 预制节段混凝土桥梁的设计与工程

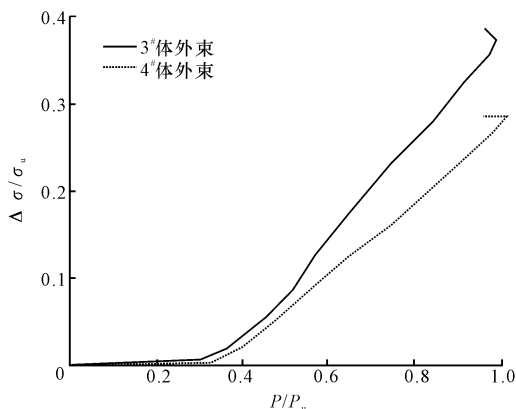




(a) SPCB2-6-2



(b) SPCB2-4-4



(c) SPCB2-2-6

注:  $\Delta \sigma$  为体外预应力筋的应力增量;  $\sigma_u$  为体外预应力筋的破坏极限应力;  $P$  为承载力。

图 15 体外束荷载-应力增量关系曲线

Fig. 15 Load-stress increment relationship for the external tendons

实践[J]. 城市道桥与防洪, 2003(6): 35-38.

LI Jian, LU Yuan-chun. Design of precast segment concrete bridges and project practice [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2003(6): 35-38. (in Chinese)

[5] 李国平, 张国泉. 体外预应力混凝土连续梁弯曲性能

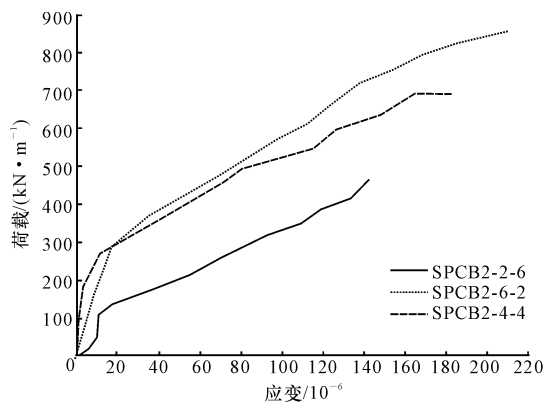


图 16 荷载-底板普通钢筋应变关系曲线

Fig. 16 Load-Strain variation of the plain bar at the bottom slab

试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 53-57.

LI Guo-ping, ZHANG Guo-quan. Experimental study on the flexural behavior of externally prestressed concrete continuous beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 53-57. (in Chinese)

[6] Li G P, Zhang C L, Niu C Y. Experimental study on shear behavior in negative moment regions of segmental externally prestressed concrete continuous beams[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(4): 328-338.

[7] 李国平. 体外预应力混凝土桥梁设计计算方法[D]. 上海: 同济大学, 2006.

LI Guo-ping. Calculating method for design of externally prestressed concrete bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)

[8] 徐海军, 徐 栋. 体外预应力混凝土桥梁弯曲性能非线性分析[J]. 上海公路, 2003(增 1): 104-109.

XU Hai-jun, XU Dong. Nonlinear analysis on flexural behavior of externally prestressed concrete bridge [J]. Shanghai Highways, 2003(S1): 104-109. (in Chinese)

[9] 刘 钊, 武焕陵, 种艾秀, 等. 南京长江第四大桥节段预制拼装箱梁足尺模型试验[J]. 桥梁建设, 2011(3): 9-16.

LIU Zhao, WU Huan-ling, ZHONG Ai-xiu, et al. Full-scale model test for precast and assembled segmental box girder of the fourth Nanjing Changjiang river bridge[J]. Bridge Construction, 2011(3): 9-16. (in Chinese)

[10] 黄民元. 体外预应力结构转向块的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(1): 143-145.

HUANG Min-yuan. Research on the deviators of external pre-stressing structure[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2008, 28(1): 143-145. (in Chinese)

(下转第 103 页)