

不同加载方式及配束比下节段预制箱梁 受力性能试验

袁爱民¹, 何 雨¹, 戴 航², 孙大松³

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

摘 要: 体内体外不同配束比的节段预制混凝土箱梁已在桥梁建造中得到了广泛的应用, 其受力性能主要受配束比和加载方式的影响。将 4 种不同配束比的节段预制箱梁在 2 种不同加载方式下的受力行为进行对比分析, 并将试验结果与国内外类似试验结果进行对比, 提出了节段预制箱梁正截面抗弯极限承载力计算公式。研究结果表明: 不同加载方式下, 最大挠度及胶接缝张开位置不同; 弯剪耦合作用使梁体承受的竖向荷载和竖向挠度降低; 单点集中加载使受压区高度和胶接缝张开宽度增大。不同配束比时, 体内束越多, 开裂弯矩和极限弯矩均越大; 受压区高度越大, 胶接缝宽度越小; 体外束的极限应力增量可以达到 35%~55%。单点集中加载且预应力配筋率 $\rho < 2\%$ 时, 破坏模式为箱梁顶板混凝土压溃后的脆性弯曲破坏; $\rho > 2\%$ 时, 破坏模式为弯剪破坏, 节段间有错动; 1/3 点处两点加载时均为弯曲破坏; 提出的公式在充分考虑预应力筋极限应力和受压区预应力筋增量的基础上, 计算值与试验值吻合较好。

关键词: 桥梁工程; 节段预制混凝土梁; 混合配束; 组合加载; 受力行为; 抗弯承载力

中图分类号: U441 **文献标志码:** A

Force bearing performance test of precast segmental bridge beams with different tendon ratios under different loads

YUAN Ai-min¹, HE Yu¹, DAI Hang², SUN Da-song³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Province
Communications Planning and Design Institute Limited Company, Nanjing 210005, Jiangsu, China)

Abstract: Segmental prestressed concrete beams (SPCB) with hybrid tendons have been widely used in construction of bridge structures, and the performance of which is affected by two important factors: tendon ratio and combined load(bending and shear). This paper presented an experimental investigation of structural behaviors of SPCB under four different tendon ratios and two types of loads. Comparison between this test results and the similar tests at home and abroad was carried out, and a new calculation formula of flexural bearing capacity was presented. The results show that the maximum deflection and the joint opening location are different under

different types of load. The interaction of shearing and bending reduces the vertical load and vertical deflection, and the concentrated loading increases the height of compressive region for beams and the width of joint opening. For beams with different tendon ratios, the more internal tendons it has, the higher the cracking moment and the failure moment are, and the greater the height of compressive region is, the smaller the width of joint opening will be. Furthermore, the stress increment of external tendons is approximately 35%-55% of the ultimate strength. When the segmental beam is subjected to concentrated load and the reinforcement ratio ρ is less than 2%, flexural failure occurs after concrete crushing. When the reinforcement ratio ρ is greater than 2%, flexural and shear failure occurs, and there is a sliding between segments. If beams are subjected to one-third loading, only flexural failure occurs. Formula presented in this paper is in accordance well with the test results on the basis of considering fully of the ultimate stress of prestressed steel and the effect of prestressed steel in compressive region. 3 tabs, 11 figs, 21 refs.

Key words: bridge engineering; segmental prestressed concrete beam (SPCB); hybrid tendon; combined load; structural behavior; bending bearing capacity

0 引 言

短线法节段预制拼装施工具有施工快捷、经济、安全的特点,因此,在国内外大跨度桥梁中得到了广泛的应用^[1-2]。体内体外混合配束预应力混凝土桥梁是这几年出现的新型预应力混凝土桥梁结构。将体内体外混合配束与短线法节段预制拼装施工技术相结合,中国已经修建多座桥梁,譬如广州鳧洲大桥引桥、南京长江四桥引桥^[3-5]。

对于这种混合配束的节段预制拼装混凝土桥梁,国内外专家和学者开展了相关试验研究工作,并取得了一些有价值的成果。在国外,Algorafi 等考虑不同体外束的布置、接缝形式以及不同加载方式进行研究,结果表明扭转不仅改变了极限承载力和位移的大小,还改变了梁体破坏的模式^[6];Rabbat 等将配置纯体外预应力束和纯体内预应力束的节段梁体的受力行为进行了对比,结果表明仅含体内预应力束的梁体可以通过经典的弯曲理论得到其抗弯强度,而仅含体外预应力束的梁体抗弯强度却超过了 AASHTO 规范规定的限值^[7-8];Aparicio 等比较了 5 根整体式体外预应力梁和 3 根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^[9]。

在中国,同济大学李国平教授通过设计节段预应力混凝土连续梁,对其在负弯矩区的抗剪性能进行了试验研究。结果表明,梁体的破坏裂缝为网状裂缝,与节段接缝的位置和倾斜角无关;裂缝产生后梁体变形很快,属脆性破坏;预应力筋增量达到了极限抗拉强度的 20%~24%,相比于整体式梁来说更

大^[10];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、极限挠度的差异以及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^[11]。东南大学刘钊教授以南京长江第 4 大桥引桥为背景,开展了节段预制拼装箱梁的足尺模型试验,研究了该类箱梁在正常使用阶段和施工状态下的结构行为。研究结果表明,在正常使用阶段,梁体受力行为基本符合平截面假定,整体性较好;在梁上运梁工况下,实测梁体下缘压应力储备充足,满足运梁安全性要求,此外他还采用 ANSYS 建立试验梁实体有限元模型,并与足尺模型进行了对比分析^[12-13]。长沙理工大学李传习教授针对现有体外预应力结构设计计算方法的不足,设计了将体外预应力桥梁视为由体外索构件和主梁构件构成的组合结构进行受力分析的计算方法。依据普通预应力混凝土梁截面配筋的估算方法对混合配束梁的预应力筋用量进行估算,阐述了体外预应力筋索力及偏心距的确定方法,并以实桥为例进行了验算^[14]。河海大学袁爱民等依据某实桥箱梁模型,按 1:10 缩尺浇筑试件,进行破坏性试验,以研究节段预制 PC 梁桥在弯剪复合作用下梁体变形、破坏裂缝开展规律等问题。研究表明,节段 PC 箱梁在弯剪作用下,破坏主要发生在弯矩、剪力突变的节段接缝处,而两侧弯剪段完好;对于不同配束比的梁体,配束较多的梁体破坏是以剪切为主的弯剪破坏,而配束较少梁体则是以弯曲为主的弯剪破坏^[15]。此外,袁爱民还通过设计 3 根不同配束比的节段预制拼装

试验共 5 根梁,根据不同试验目的分为 A、B、C 三组,每组有 2 根试验梁进行对比,构件的试验参数见表 1。A 组主要比较弯剪作用下只含体内筋但配束比不同的 2 根梁的受力特性;B 组比较体内体外相同配束比下,不同加载模式所引起的梁的受力行为的不同;C 组比较同一种加载方式下,体内体外不同配束比引起的梁体力学特性的差异。梁体按照与实际结构 1:10 的比例浇注而成,共划分为 12 个节段,5 个类型。其中节段类型 E 是跨中标准段,类型 D 是转向块段,类型 B 和 C 靠近支座,类型 B 底板加厚至 12 cm,类型 A 位于梁端支承处,具体划分如图 1 所示,试件横截面及预应力束布置如下页图 2 所示。

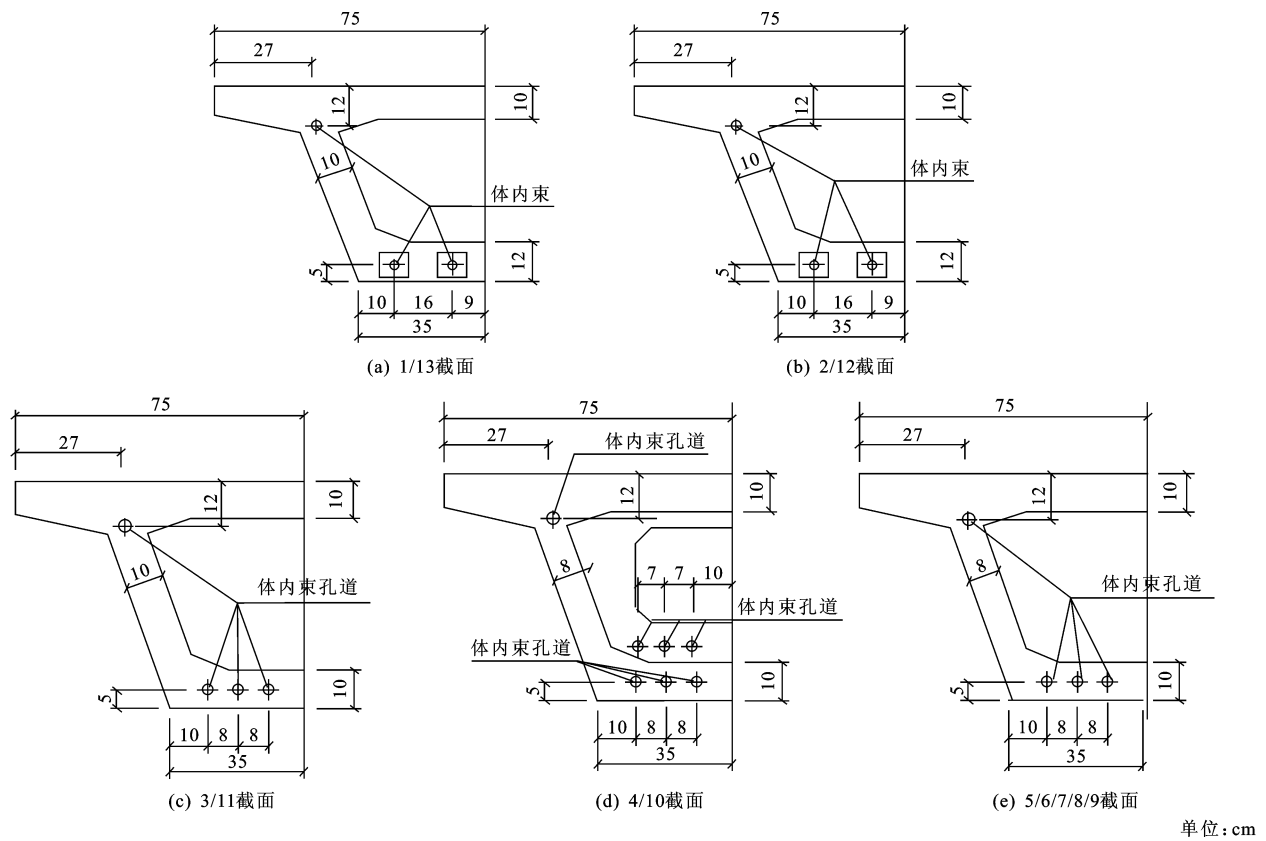


图 2 试件横截面及预应力束布置

Fig. 2 Cross section of beam specimen and arrangement of prestressing tendons

1.4 试验装置

弯剪试验采用单点加载方式,加载位置作用在转向节箱梁顶板上(第 9 节段箱梁),纯弯试验采用在梁跨 1/3 处两点加载方式。采用荷载传感器测量千斤顶施加的荷载值大小,应变片和电测位移计分别测应变及变形。荷载的加载方式和测点布置如下页图 3 所示。

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,全程记录每级加载后应变片、百分表和传感器的测量结果。梁体加载上升段,以力控制为主。混凝土尚未开裂时,每级加载 50 kN,接近破坏荷载时为 25 kN。加载速率保持匀速适中,每级加载后停顿 10 min 左右,使变形充分发展。当梁体达到极限承载力(承载力不在上升)时,转为采用位移控制加载,继续分级加载,每次位移控制值为 10 mm,直至试验构件破坏。

2 试验结果分析

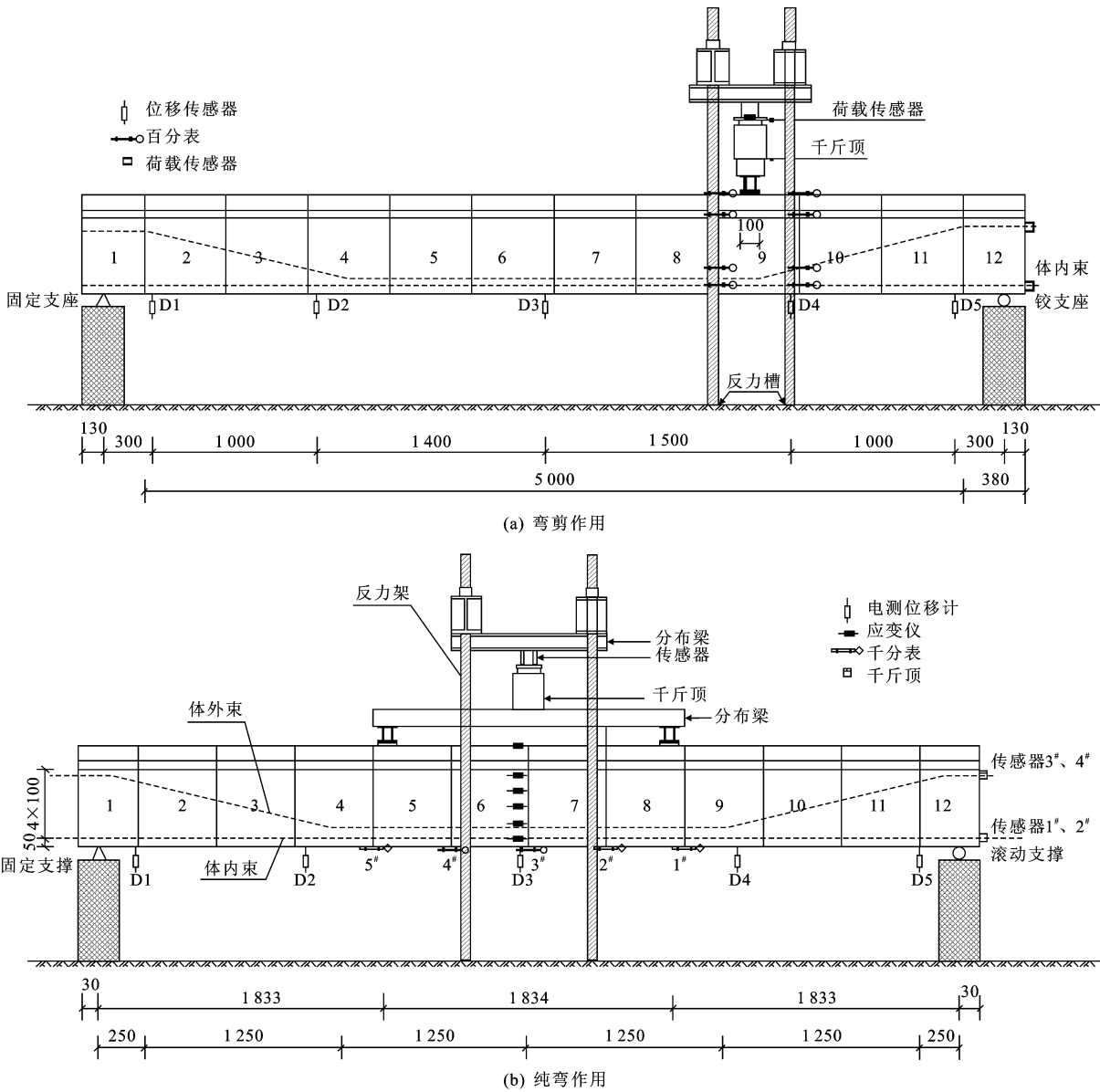
2.1 梁体变形特征

下页图 4 为各梁体的变形特征。从图中可见,加载初期,梁体发生整体变形;随着竖向荷载 P 的

增加,梁体下挠值也逐渐增加,但由于加载方式的不同,最大挠度和最大裂缝出现位置也不相同。对于单点加载方式,SPCB1、SPCB2、SPCB3 的最大位移及最大裂缝出现在集中力作用的位置,而对于梁跨 1/3 处两点加载方式,SPCB4 梁体的最大位移和最大裂缝则出现在跨中位置。

下页图 5 为各梁体的荷载-挠度曲线。由图可见,不同配束比的箱梁都经历了 3 个阶段:开裂前弹性阶段;开裂后弹塑性阶段;极限承载力阶段^[19-20]。但不同体内体外配束比和不同的加载方式,节段胶接缝拼装箱梁的荷载-挠度曲线却不完全相同。梁段接缝的张开,导致了梁体整体刚度的降低;张开的接缝使受压区高度逐渐减小,压应力逐渐增大,混凝土进入弹塑性阶段。以上两者是体内体外混合配束节段预制梁体受力行为呈现非线性特征的主要原因。

在下页表 2 中,比较了 A、B、C 这 3 组试件的开裂荷载、极限荷载及极限挠度。比较 A 组试件,可以发现体内束越多,开裂荷载越大,极限承载力也越大。比较 B 组试件,可以发现不同的加载方式,开裂荷载和极限承载力也不同。弯剪荷载作用时,由



单位:cm

图 3 试验加载

Fig. 3 Loading of tested beams

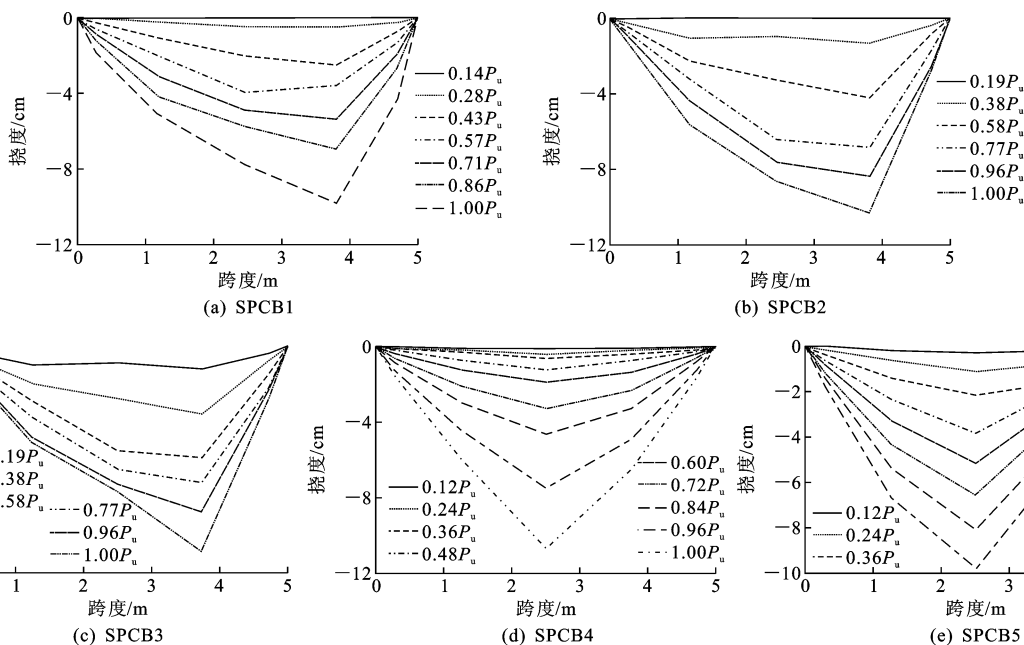
表 2 各组构件的内力与挠度比较

Tab. 2 Comparison on bearing capacity and deflection among different beam components

组编号	构件名称	开裂竖向荷载/kN	开裂弯矩/(kN·m)	极限竖向荷载/kN	极限弯矩/(kN·m)	极限挠度/cm
A	SPCB1	25	27.27	139.37	120.00	15.3
	SPCB2	45	49.09	371.41	392.73	12.2
B	SPCB3	55	60.00	537.18	589.09	15.6
	SPCB4	105	96.25	922.00	771.13	10.7
C	SPCB4	105	96.25	922.00	771.13	10.7
	SPCB5	100	91.67	724.00	695.85	10.4

于体外束在转向块处弯起,截面抵抗矩减小,因此,9#节段和10#节段之间的胶接缝首先开裂,开裂荷载和极限荷载均比纯弯荷载作用下梁体的开裂荷载和极限荷载小。梁体承受弯剪耦合作用,梁体的竖

向承载能力降低。比较C组构件,可以发现同一种加载方式,但体内体外配束比不同时,体内体外配束比较大的梁体的开裂荷载和极限承载力均较大。这是由于体内束配置在底板内,距离截面中性轴更



注: P_u 为梁体所能承受的极限荷载。

图 4 梁体变形

Fig. 4 Deformation of beams

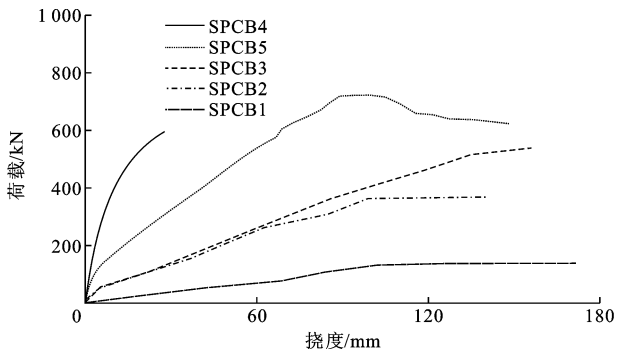


图 5 梁体荷载-挠度变形

Fig. 5 Deformation between beam deflection and vertical load

远,而体外束布置在箱梁内部的箱室中,距离截面中性轴近,提供的抗力效率较低;同时,体内束与周围混凝土有良好的粘结作用,而体外束具有二次效应。

2.2 受压区高度及胶接缝宽度

节段接缝在各级荷载作用下胶接缝张开宽度沿梁高变化的关系曲线如下页图 6 所示。从图中可以看出,开始加载时,梁体处于全截面受压状态,外荷载在下翼缘产生的拉应力不断抵消梁体中的预压应力,梁体处于消压状态,接缝始终处于闭合状态;随着外荷载的增加,接缝处由受压变为受拉。由于胶接缝的抗拉强度为 12.5 MPa,比素混凝土的极限抗拉强度高,因此,当拉应力超过素混凝土的极限抗拉强度时,节段接缝张开或沿节段胶接缝边缘的素混凝土开裂,受拉区退出工作,受压区高度变小,截面发生应力重分布。比较下页图 6(a)~(e),SPCB1~

SPCB5 破坏时各自的受压区高度分别为 3、5、13、7 和 4 cm,接缝的最大宽度分别为 11、14、19、4 和 12 mm。可见体内束越多,梁体相应的受压区高度越大,接缝宽度也越大;相同配束,弯剪荷载作用时的受压区高度大,接缝宽度也大;相同加载方式不同配束比时,体内束越多,受压区高度越大,接缝宽度却越小。

2.3 体外预应力筋应力增量

下页图 7 给出了 SPCB3、SPCB4 和 SPCB5 体外预应力筋的应力增量值。从图中可以看出,梁体未开裂之前,体外束的应力增量较小;当梁体开裂后,梁体发生较大的变形,体外束应力逐渐增加。直至破坏时,体外预应力筋的应力增量可以达到破坏极限应力的 35%~55%。比较每条曲线出现应力增长时对应的荷载,发现单点集中加载时荷载较小,而 1/3 点加载时荷载较大,这是由于 1/3 点加载时,体外束二次效应明显,而单点集中力作用在转向块处时,体外束二次效应较弱所致。

2.4 破坏模式

下页图 8 给出了考虑不同因素的试验梁的破坏模式。可以看出,不同配束比的预应力混凝土简支箱梁的破坏模式与预应力筋的配束比和加载方式有着密切的关系。构件 SPCB1、SPCB4 和 SPCB5 的破坏模式是弯曲破坏,其特征为关键截面的胶接缝张开,箱梁顶板混凝土压溃;但对于 SPCB1,为靠近加载点附近的接缝张开;而对于 SPCB4 和 SPCB5,

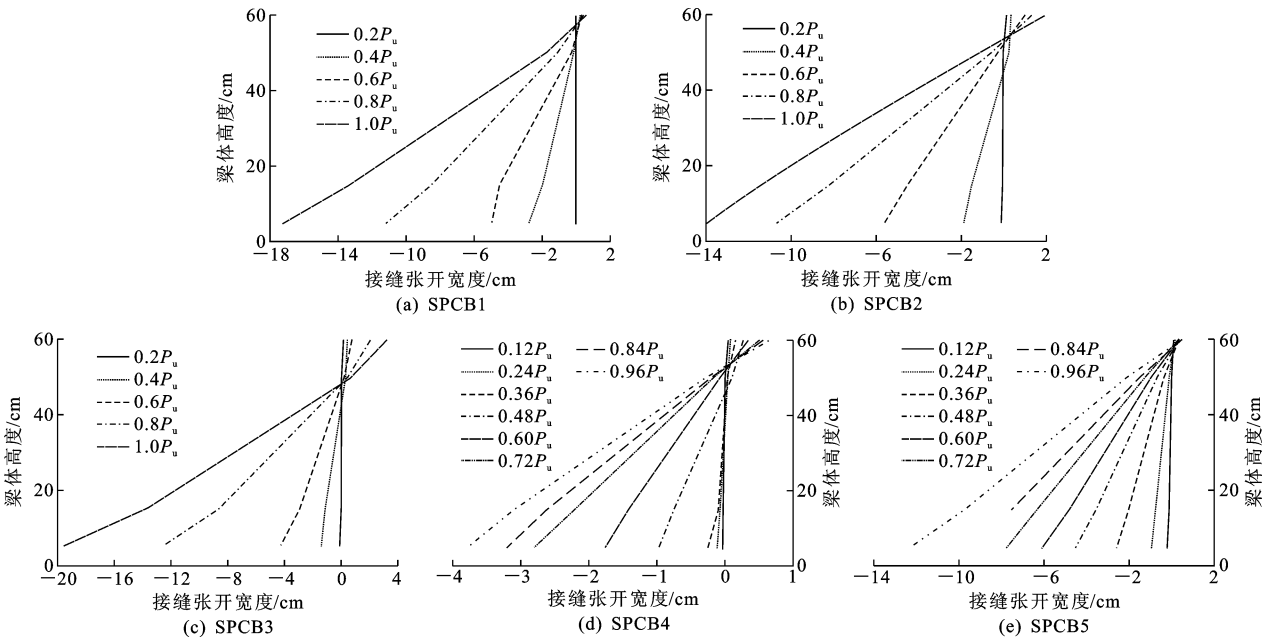
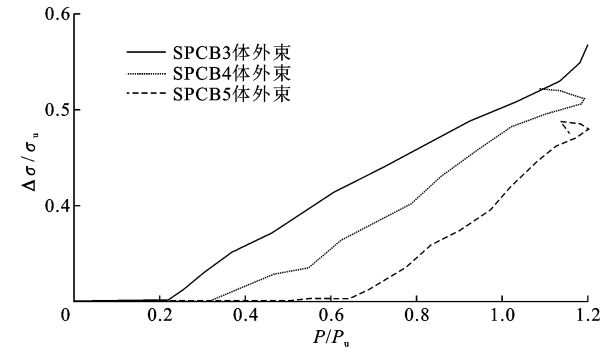


图 6 接缝张开宽度沿梁高分布
Fig. 6 Width distribution across opening joint section along depth



注: $\Delta\sigma$ 为体外预应力筋的应力增量; σ_u 为体外预应力筋破坏极限应力; P 为施加的荷载值。
图 7 梁体 P/P_u 与 $\Delta\sigma/\sigma_u$ 的关系
Fig. 7 Relationship between P/P_u and $\Delta\sigma/\sigma_u$

则为纯弯段内胶接缝张开; 构件 SPCB2、SPCB3 的破坏模式是弯剪破坏, 其特征为关键截面的胶接缝张开, 接缝剪压区混凝土压溃, 并且左右节段发生错动。对于 SPCB2 和 SPCB3, 左右节段发生的错动量分别为 50 mm 和 30 mm。

3 国内外试验结果对比

针对国内外类似试验, 将本文试验结果与其进行对比, 发现许多结论存在一致性。

国外方面, Algorafi 等 mainly 对节段拼装梁进行了弯剪扭共同作用下的试验。对于试验结果, 在破坏模式方面, 随着荷载的增加, 试验梁在加载点附近的接缝下部首先张开, 同时, 在中间节段加载点处出现裂缝, 并逐渐向接缝处延伸。这与本试验弯剪段

所得结果相符, 属于弯剪破坏, 特征为关键截面接缝张开和接缝剪压区混凝土压溃破坏。对于梁体的荷载挠度曲线, 其结果也与本文试验数据类似, 随着荷载的增加, 主要经历由线性阶段转变为非线性阶段的过程, 原因主要是接缝张开所引起的应力重分布^[6]。

Aparicio 等 mainly 对 5 根整体梁和 3 根节段梁在弯曲和弯剪 2 种不同作用下的受力行为进行了研究, 其中有 3 根整体梁和 3 根节段梁为简支梁, 其余为连续梁。对于简支梁而言, 在弯曲试验中, 当体内钢筋达到屈服强度后, 体外束还未屈服, 这与本文结论相似, 即体外束的应力增长滞后现象。对于弯剪试验, 梁体的破坏模式为梁体顶板混凝土压溃后的弯剪破坏, 节段间有明显的错动现象, 而节间的摩擦作用, 使梁体剪力得以从一个节段传递到另一个节段。而对比同一梁体在弯曲试验和弯剪试验中极限承载力的结果, 可以发现弯剪作用下梁体的承载能力有所下降, 以上结果都与本文结论相符^[9]。

中国方面, 李国平教授对 8 根 2 组不同高跨比、不同设计参数的节段式体外预应力混凝土简支梁进行弯曲试验, 从施加预应力开始全过程测量梁的变形、体外预应力筋与梁体的相对位移、混凝土和普通钢筋及预应力筋应变随荷载变化的规律, 观察混凝土裂缝形成发展、接缝消压开展的规律以及梁体弯曲破坏形态。试验结果表明, 模型梁在接缝混凝土开裂前, 梁的挠度基本呈线性变化, 随后进入弹塑性



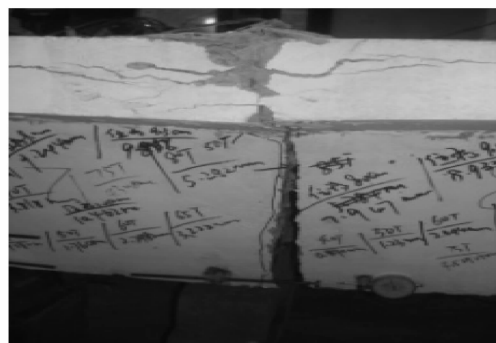
(a) SPCB1



(b) SPCB2



(c) SPCB3



(d) SPCB4

图 8 试件破坏模式

Fig. 8 Failure modes of specimen

阶段直至破坏,这与本文箱梁挠度随荷载变化的 3 阶段相符。而梁体的破坏集中在跨中附近截面(或接缝)和加载点附近截面(或接缝),这也与本文纯弯荷载作用下梁体纯弯段内胶接缝均张开的结论相同。就配束比对梁体极限承载力的影响而言,其结

果也与本文相同,体内束越多,梁体的极限承载力越大。

刘钊教授为研究节段预制拼装箱梁在正常使用阶段和施工状态下的结构行为,结合南京长江第 4 大桥开展了 1 孔 48 m 跨径该类箱梁的足尺模型试验。结果表明,在各级荷载作用下,梁体挠度和应力增量与跨中挠度基本呈线性变化,这与本文混凝土开裂前挠度与荷载关系曲线规律相同。此外,在加载工况下,各截面纵向应变沿梁高大致呈线性变化,节段接缝截面应变分布符合平截面假定,该结论也与本文胶接缝在荷载作用下张开宽度沿梁高变化的关系曲线很好地吻合^[12-13]。

4 节段预制梁正截面抗弯承载力计算

体内体外混合配束节段预制拼装混凝土桥梁是一种新型的预应力混凝土桥梁结构形式,其正截面抗弯承载力计算公式仍然处于探索之中,很多学者提出了许多实用的计算公式。目前对于混合配束节段预制箱梁正截面抗弯极限承载能力的计算公式主要还是采用截面法。

4.1 同济大学李国平教授提出的公式

(1)基本假定

①平截面假定:假设构件在弯矩作用下,变形后截面仍保持为平面;

②钢筋与混凝土共同工作:钢筋与混凝土之间无粘结滑移破坏,钢筋应变与其所在位置混凝土的应变一致;

③不考虑受拉区混凝土参与工作:受拉区混凝土开裂后退出工作;

④材料的本构关系:混凝土的受压本构关系和钢筋的受拉本构关系均采用理想简化模型。

(2)极限承载力计算

下页图 9 为混合配束节段混凝土箱梁抗弯承载能力的计算图示,综合体外预应力筋极限应力效应及受压区混凝土应力简化计算方法,建立如下平衡方程^[11]

$$\gamma_0 M_d \leq A_{p,e} \sigma_{pu,e} (h_{pu,e} - x/2) + A_{p,i} f_{pd,i} (h_{p,i} - x/2) + A_s f_{sd} (h_s - x/2) + A'_s f'_{sd} (x/2 - h'_s) \quad (1)$$

$$A_{p,e} \sigma_{pu,e} + A_{p,i} f_{pd,i} + A_s f_{sd} = A'_s f'_{sd} + f_{cd} b x \quad (2)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; M_d 为计算截面弯矩的组合设计值; x 为截面混凝土受压区(矩形分布)高度; $A_{p,e}$ 为体外预应力筋的截面面积; $\sigma_{pu,e}$ 为体外预应力筋的极限应力; $h_{pu,e}$ 为体外预应力筋的极限有效高度; $A_{p,i}$ 为体内预应力筋的截面面积; $f_{pd,i}$ 为体

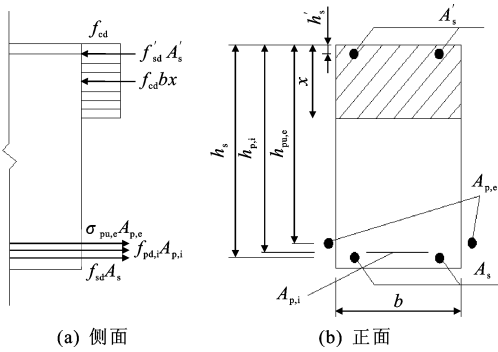


图 9 计算图示

Fig. 9 Calculation chart

内预应力筋的抗拉强度设计值; $h_{p,i}$ 为体内预应力筋至截面受压边缘的距离; A_s 为体内纵向受拉普通钢筋面积; f_{sd} 为体内纵向受拉普通钢筋的抗拉强度设计值; h_s 为体内纵向受拉普通钢筋至截面受压边缘的距离; A'_s 为体内纵向受压普通钢筋的面积; f'_{sd} 为体内纵向受压普通钢筋的抗压强度设计值; h'_s 为体内纵向受压普通钢筋至截面受压边缘的距离; f_{cd} 为混凝土的抗压强度设计值; b 为截面混凝土受压区宽度。

4.2 长安大学王春生教授提出的公式^[21]

(1) 基本假定

① 无论在弹性阶段还是在极限状态, 主梁的变形均符合平截面假定;

② 不考虑体外钢筋的摩阻损失, 并设体外束的应力沿其长度大小相同;

③ 混凝土受压时的应力应变关系采用二次抛物线及水平直线组成的曲线, 不考虑混凝土的抗拉强度;

④ 体内束体外束均采用简化的理想弹塑性应力应变关系;

⑤ 梁的失效状态为受弯破坏;

⑥ 梁体配筋适当, 破坏为塑性破坏, 破坏时在最大弯矩截面处形成塑性铰;

⑦ 梁体在极限破坏时, 受压区混凝土的极限应变为 0.003。

(2) 截面平衡方程

如图 10 所示, 对受压区混凝土合理作用点取矩

$$\gamma_0 M_d = \frac{1}{\gamma_s} A_s f_{sd} (h_s - h'_s) + \frac{1}{\gamma_s} A_y \sigma_{yu} (h_y - h'_s) - \frac{1}{\gamma_c} f_{cd} b x \left(\frac{x}{2} - h'_s \right) \quad (3)$$

$$A_s f_{sd} + A_y \sigma_{yu} = f_{cd} b x + A'_s f'_{sd} \quad (4)$$

式中: γ_s 、 γ_c 分别为钢筋与混凝土的材料安全系数,

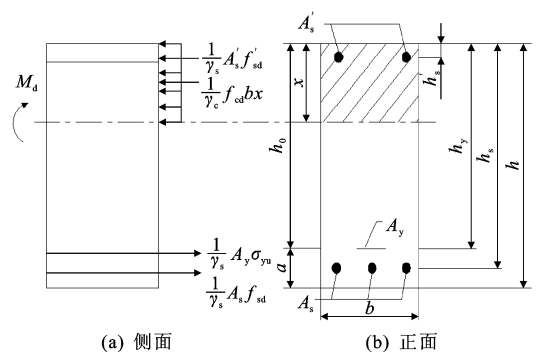


图 10 计算图示

Fig. 10 Calculation chart

按规范取 1.2; A_y 为无粘结预应力筋面积; σ_{yu} 为无粘结预应力筋极限应力; h_y 为无粘结预应力筋重心到梁上缘距离。

4.3 本文提出的公式

(1) 基本假定

① 无论在弹性阶段还是在极限状态, 主梁胶接缝处的变形均符合平截面假定;

② 不考虑体外钢筋的摩阻损失, 并设体外束的应力沿其长度大小相同;

③ 混凝土受压等效原则适用;

④ 根据前面的试验测试数据, 梁体破坏时, 体内束达到极限强度;

⑤ 梁的失效状态为受弯破坏;

⑥ 梁体配筋适当, 破坏为塑性破坏, 破坏时在最大弯矩截面处形成塑性铰;

⑦ 梁体在极限破坏时, 受压区混凝土的极限应变为 0.003。

(2) 实用公式推导

如图 11 所示, 由水平合力为 0 可得

$$\gamma_0 M_d \leq A_{p,e} f_{p,e} (h_{p,e} - x/2) + A_{p,i} f_{p,i} (h_{p,i} - x/2) + A'_p (f'_{pd} - \sigma_{p0}) (x/2 - h'_p) \quad (5)$$

$$A_{p,e} f_{p,e} + A_{p,i} f_{p,i} = A'_p (f'_{pd} - \sigma_{p0}) + f_{cd} b x \quad (6)$$

式中: h'_p 为体内纵向受压区预应力筋至截面受压边

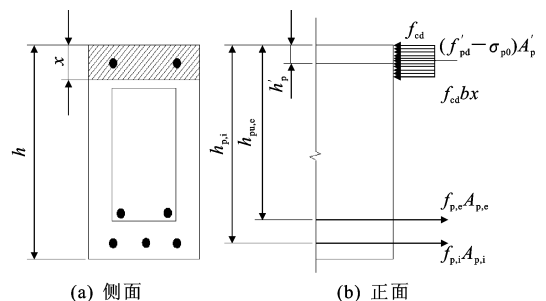


图 11 计算图示

Fig. 11 Calculation chart

缘的距离; A_p 为体内纵向受压区预应力钢筋的面积; f_{pd}' 为体内纵向受压区预应力筋的抗压强度设计值; $f_{p,i}$ 为体内预应力筋的抗拉强度极限值,可取 $1.1f_{py}$; σ_{p0} 为受压区混凝土应力为 0 时,预应力筋应力值; $f_{p,e}$ 为体外预应力筋极限应力值,可取 $1.05f_{py}$; f_{py} 为预应力筋抗拉强度设计值。

4.4 计算结果比较

按照上述几种方法求混合配束节段箱梁的抗弯承载力,将其与试验值进行对比分析,结果见表 3。

表 3 计算结果与试验值的对比

计算公式	试验梁编号	计算值/ (kN·m)	试验值/ (kN·m)	相对误差/%
李国平 ^[11]	SPCB4	682.03	771.13	11.55
	SPCB5	652.65	695.85	6.20
王春生 ^[21]	SPCB4	564.10	771.13	26.84
	SPCB5	539.63	695.85	22.45
本文公式	SPCB4	782.00	771.13	1.40
	SPCB5	726.84	695.85	4.45

从表 3 可以看出,本文提出的抗弯承载力计算公式,将体内预应力筋极限抗拉强度取为 1.1 倍抗拉强度设计值,体外预应力筋极限抗拉强度取 1.05 倍抗拉强度设计值,计算结果与试验值吻合最好。相对于其他公式来说,由于节段预制梁在接缝处普通钢筋是断开的,所以未考虑普通钢筋的作用,同时对于此类梁体梁顶一般布置预应力筋,本文公式考虑了受压区预应力钢筋的作用,使计算结果更贴合实际情况。王春生教授的公式主要考虑的是无粘结部分预应力梁的抗弯承载力,与本试验梁情况有所出入(体内体外混合配束),所以计算结果偏差较大。

5 结 语

(1)弯剪荷载作用下,梁体最大挠度及胶接缝张开位置在加载点附近,纯弯荷载作用下,梁体最大挠度发生在跨中,纯弯段内胶接缝均张开。

(2)仅配体内束的梁体,底板配束越多,开裂荷载越大,极限承载力也越大;对于体内体外混合配束梁体,相同配束比不同加载情况下,由于弯剪耦合作用,单点加载的梁体承载能力比 1/3 处两点加载的梁体承载能力小;同一种加载方式不同配束比情况下,底板体内束越多,开裂荷载和极限承载力越大。

(3)仅配体内束的梁体,底板配束越多,受压区高度大,胶接缝的张开宽度小;对于体内体外混合配束梁体,相同配束比不同加载情况下,弯剪荷载作用下梁体的受压区高度大,胶接缝张开宽度也大;同一

种加载方式不同配束比情况下,底板体内束越多,受压区高度越大,而胶接缝的宽度越小。

(4)荷载作用下,体外束应力增长滞后;梁体达到极限承载力时,体外束的极限应力增量可以达到 35%~55%。

(5)仅配体内束的梁体,当梁体受拉区预应力筋配筋率 $\rho < 2\%$ 时,破坏模式为箱梁顶板混凝土压溃后的脆性弯曲破坏;若 $\rho > 2\%$,则梁体的破坏模式为弯剪破坏,节段间有错动。对于体内体外混合配束梁体,相同配束比不同加载情况下,弯剪荷载作用下梁体的破坏模式为弯剪破坏,节段间有错动,1/3 处两点加载时梁体的破坏模式为弯曲破坏。同一种加载方式不同配束比情况下,梁体的破坏模式均为弯曲破坏。

(6)对于梁体正截面抗弯承载力的计算,本文将体内预应力筋极限抗拉强度取为 1.1 倍抗拉强度设计值,体外预应力筋极限抗拉强度取为 1.05 倍抗拉强度设计值,在考虑受压区预应力筋作用,结合节段预制梁特点,并不考虑普通钢筋作用的情况下,提出了实用计算公式,其结果与试验值吻合较好。

(7)本次试验研究虽然对不同加载方式和不同配束比的节段预制箱梁的受力性能进行了初步的研究,但提出的公式还需要更多的试验数据进行验证,以完善公式中的参数取值。下一步应将有限元模拟结果与试验结果进行对比,进一步验证试验结果的准确性。

参考文献:

References:

[1] 张立青. 节段预制拼装法建造桥梁技术综述[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(12): 63-66.
ZHANG Li-qing. The summary of technologies for building bridges with assembled precast segments[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(12): 63-66. (in Chinese)

[2] 林三国. 节段预制拼装箱梁施工技术[J]. 铁道建筑, 2014(12): 21-24.
LIN San-guo. Construction technologies of box-girder using segmental precasting and assembling method[J]. Railway Engineering, 2014(12): 21-24. (in Chinese)

[3] 彭德运, 吴艳丽, 朱 颖. 节段预制逐跨拼装连续梁桥的设计与施工[J]. 公路, 2012(3): 5-9.
PENG De-yun, WU Yan-li, ZHU Ying. Design and construction of continuous girder bridge by precast segments span by span[J]. Highway, 2012(3): 5-9. (in Chinese)

- [4] 陈万里. 体外、体内预应力混合配筋与节段预制拼装技术[J]. 交通科技与经济, 2006(5): 27-29.
CHEN Wan-li. The internal and external prestressed placing of reinforcement and the section prestressed assembly technique[J]. Technology and Economy in Areas of Communications, 2006(5): 27-29. (in Chinese)
- [5] 孙 莉. 体内-体外混合配束节段预制拼装桥梁设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
SUN Li. Design of precast segmental bridge with mixed post-tensioning [D]. Nanjing: Southeast University, 2009. (in Chinese)
- [6] ALGORAFI M A, ALI A A A, OTHMAN I, et al. Experimental study of externally prestressed segmental beam under torsion[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3528-3538.
- [7] RABBAT B G, APARICIO A C. Testing of segmental concrete girders with external tendons[J]. PCI Journal, 1987, 32(1): 86-107.
- [8] RABBAT B G, SOWLAT K. Behavior of 1 : 5 scale segmental concrete girders with external and internal tendons[J]. International Concrete Research & Information Portal, 1990, 120(1): 305-314.
- [9] APARICIO A C, RAMOS G, CASAS J R. Testing of externally prestressed concrete beams[J]. Engineering Structure, 2002, 24(1): 73-84.
- [10] 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.
- [11] 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)
- [12] 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): 9-12.
LIU Zhao, WU Huan-ling, CHONG 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): 9-12. (in Chinese)
- [13] 郑开启, 卜红旗, 刘 钊, 等. 体内-体外混合配束节段预制拼装箱梁足尺模型试验研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(8): 89-94.
ZHENG Kai-qi, BU Hong-qi, LIU Zhao, et al. Full scale model test of segmental precast concrete box girder with external and internal tendons[J]. Engineering Science, 2013, 15(8): 89-94. (in Chinese)
- [14] 李传习, 李红利, 杨美良. 体内外混合配束预应力连续梁桥的设计计算方法研究[J]. 长沙交通学院学报, 2006, 22(1): 7-11.
LI Chuan-xi, LI Hong-li, YANG Mei-liang. Study on the design and calculation method of prestressed continuous bridge with internal and external tendon[J]. Journal of Changsha Communications University, 2006, 22(1): 7-11. (in Chinese)
- [15] 袁爱民, 程磊科, 周元华, 等. 节段预制 PC 箱梁弯剪变形和开裂规律试验研究[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 421-425.
YUAN Ai-min, CHENG Lei-ke, ZHOU Yuan-hua, et al. Experimental investigation of deformation and crack variation rules of segmental pre-stressed concrete box beams under bending and shearing[J]. China Science Paper, 2013, 8(5): 421-425. (in Chinese)
- [16] YUAN A M, DAI H, SUN D S, et al. Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 623-634.
- [17] 徐 勋, 强士中. 体外预应力混凝土梁承载全过程分析新模型[J]. 西南交通大学学报, 2008, 42(6): 732-738.
XUN Xun, QIANG Shi-zhong. New model for full process analysis of bearing behavior of externally prestressed concrete beams [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 42(6): 732-738. (in Chinese)
- [18] 沈 殷, 李国平, 陈艾荣. 体外预应力混凝土梁的非线性有限元分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(7): 803-807.
SHEN Yin, LI Guo-ping, CHEN Ai-rong. Nonlinear models of externally prestressed concrete beams[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(7): 803-807. (in Chinese)
- [19] 牛 斌. 体外预应力混凝土梁弯曲性能分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 37-44.
NIU Bin. The analysis of flexural behavior of externally prestressed concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 37-44. (in Chinese)
- [20] 曾永革, 李传习. 节段施工体外预应力混凝土梁弯曲性能研究[J]. 工程力学, 2011(1): 110-115.
ZENG Yong-ge, LI Chuan-xi. Analysis on flexural behavior of segmental externally prestressed concrete beams[J]. Engineering Mechanics, 2011(1): 110-115. (in Chinese)
- [21] 王春生, 徐 岳. 无粘结部分预应力混凝土梁正截面抗弯强度计算方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(1): 32-35.
WANG Chun-sheng, XU Yue. Calculating method of ultimate flexural strength of unbonded partially prestressed concrete (UPPC) beam bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002(1): 32-35. (in Chinese)