

文章编号:1674-2869(2019)01-0069-05

装配式先张工字梁模拟和分析

杨宏印¹, 柏超¹, 肖晨², 边晓亚¹, 卢海林¹

1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074;
2. 武汉市城市路桥收费管理中心, 湖北 武汉 430000

摘要:采用ABAQUS软件,建立了先张法折线预应力工字梁精细模型,研究了普通钢筋对工字梁受力性能的影响,讨论了转向器拉杆对折点部位局部应力的影响。结果表明:计算的梁体应力及预应力损失和测试结果一致,建立的工字梁精细模型合理有效;不考虑普通钢筋影响将使梁体竖向变形增加14%,纵向变形增加11%,混凝土应力增加11%;转向器竖向拉杆能显著减缓钢束折点处的应力集中作用,钢束预应力损失随高度增加而呈线性减小;折线钢束预应力损失沿梁长变化显著,呈折线分布趋势。

关键词:工字梁;预应力混凝土;先张法;折线钢束;精细化建模;预应力损失

中图分类号:U44 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2019.01.011

Simulation and Analysis of Prefabricated Pretensioned Flanged Beam

YANG Hongyin¹, BAI Chao¹, XIAO Chen², BIAN Xiaoya¹, LU Hailin¹

1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China
2. Wuhan Urban Road and Bridge Toll Management Center, Wuhan 430000, China

Abstract: To study the influence of conventional bars on the mechanical behavior of the flanged beam, we established a refined numerical model of fold-line pretensioned prestressed flanged beam using the ABAQUS software. The influence of steering gear bolts on the local pressure of break points was investigated. The results demonstrate that the calculated beam stress and loss of prestress were consistent with the test results, which indicates that the established refined model is reasonable and effective. The negligence of the influence of conventional bars makes the vertical deformation, the longitudinal deformation and the stress of beam increase by 14%, 11% and 11% respectively. It is also found that the stress concentration effects of break points can be attenuated significantly by the steering gear bolts, the loss of prestress linearly decreases with increasing height, and the loss of prestress of fold-line steel strand changes significantly along the longitudinal direction, tending to a fold-line distribution.

Keywords: flanged beam; prestressed concrete; pretension method; folding line prestress; refined model; prestress loss

预应力混凝土具有耐久性强、抗裂性好及跨越能力强等优点,已被广泛应用于桥梁结构中,可分为先张法和后张法两种类型^[1]。国内已建预应力混凝土连续梁和简支梁大多采用后张法^[2],但施工中容易出现堵孔、预应力不足及压浆不实等质量问题^[3],运营中容易出现开裂和梁体持续下挠等

问题^[4]。而先张法具有预应力(损失)明确及无需管道和压浆等优点,能很好地避免上述问题^[5]。许多研究采用有限元方法来分析先张梁的受力性能^[6-7],但大多忽视了普通钢筋的影响。采用折线配筋能很好地适应梁体受力^[8],解决了传统直线配筋跨径较小的缺点。折线预应力通过转向器来实现钢束

收稿日期:2018-07-24

基金项目:国家自然科学基金(51708429,51708428);武汉工程大学科学研究基金(K201734);桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(2017-04-GF)

作者简介:杨宏印,博士,讲师,硕士研究生导师。E-mail: yanghongyin@hust.edu.cn

引文格式:杨宏印,柏超,肖晨,等. 装配式先张工字梁模拟和分析[J]. 武汉工程大学学报, 2019, 41(1): 69-73.

弯折^[9],钢束折点处容易出现应力集中。先张梁主要通过钢束放张来实现预应力施加^[10],但放张会引起梁体变形,进而产生预应力损失,导致梁体有效预应力降低。此外,已有关于先张梁的研究大多针对箱梁^[11]、矩形梁^[12]和T梁^[6],而先张折线预应力工字梁的受力性能有待进一步深入研究。

为全面了解装配式先张法折线预应力混凝土工字梁的受力性能,采用ABAQUS有限元软件,建立了考虑普通钢筋和转向器拉杆影响的工字梁精细模型,进而研究了普通钢筋对工字梁受力性能的影响,讨论了转向器拉杆对折点部位局部应力的影响,分析了钢束放张后预应力损失情况,得到了一些有益结论。

1 法折线预应力梁精细模拟

先张法工艺具有预应力明确、无需管道以及省却压浆等优点,能很好地避免堵孔及预应力不足等影响结构质量的问题。而折线形预应力布置能很好地适应结构受力,解决了传统先张法直线配筋跨径较小的不足。先张法折线预应力混凝土工字梁立面和横截面构造如图 1 所示,梁长为 22.5 m,梁高 1.5 m。

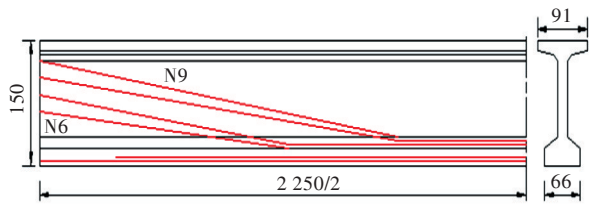


图 1 先张工字梁半立面和横截面(单位:cm)

Fig. 1 Half elevation drawing and cross section of pretensioned flanged beam (unit:cm)

通过折线钢束并结合短钢束来实现与梁体受力协调的配筋,共有 22 束预应力钢束(N1~N9),其中 N1~N5 为直线钢束,除 N1 为通长布置外,在 N2~N5 钢束两端设置一定长度套管,防止钢束和混凝土粘结,实现短钢束配筋;N6~N9 为折线钢束,通过梁底转向器而实现钢束向上弯起。工字梁跨中和梁端截面预应力筋布置及普通钢筋布置见图 2,采用 C50 混凝土预制。

基于大型通用有限元分析软件 ABAQUS 来精细模拟先张折线预应力工字梁的受力性能,采用实体单元模拟混凝土梁,其容重和弹性模量分别为 26 kN/m³ 和 3.45×10⁴ MPa;采用杆单元模拟预应力钢束,弹性模量为 1.95×10⁵ MPa,通过降温(572 ℃)来实现预应力(1 339.2 MPa)施加;采用杆

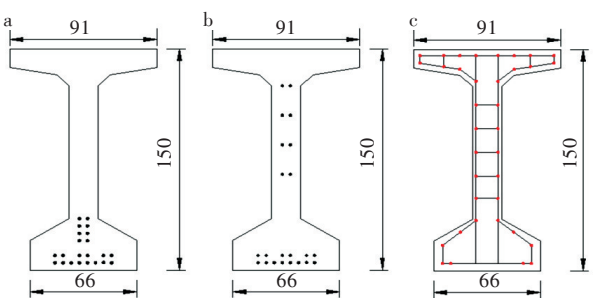


图 2 工字梁预应力筋和普通钢筋布置(单位:cm):

(a) 跨中预应力筋,(b) 梁端预应力筋,(c) 普通钢筋

Fig. 2 Layout of prestressing tendons and conventional bars of flanged beam (unit:cm):

(a) mid-span prestressing tendons,(b) beam end prestressing tendons,(c) conventional bars

单元模拟普通钢筋,弹性模量为 2.0×10⁵ MPa;实体单元和杆单元采取共节点实现耦合。预应力转向器具有定位、导向和转向的功能,是折线预应力实现效应的关键设备。转向器直接参与折线钢束的传力分配,对钢束折点部位的局部应力影响很大,采用较粗的钢筋拉杆模拟其影响,如图 3 所示。预应力钢束、普通钢筋和转向器拉杆均通过 ABAQUS 软件特有的“嵌入”功能实现和混凝土的协同受力,如图 4 所示,工字梁梁端采用简支约束,即将梁两端截面节点分别与一形心处虚拟节点刚性耦合后再在虚拟节点上施加简支边界条件。

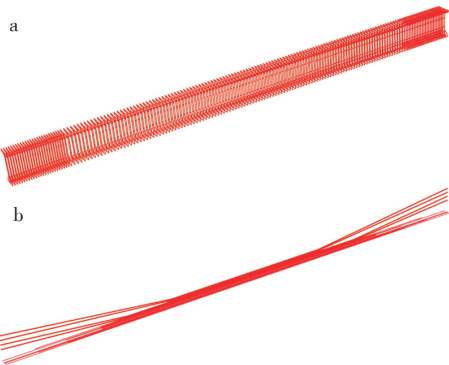


图 3 先张工字梁箍筋和预应力钢束模型:

(a) 箍筋,(b) 预应力钢筋

Fig. 3 Model of stirrup and prestressing tendons of pretensioned flanged beam:

(a) stirrup,(b) prestressing tendons

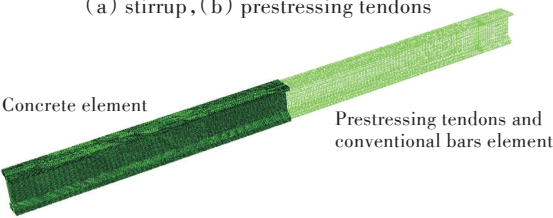


图 4 先张预应力工字梁有限元模型

Fig. 4 Finite element model of pretensioned pre-stressed flanged beam

2 放张后工字梁受力性能分析

工字梁在预制台座上浇筑并达到一定龄期后,需对两端的预应力筋进行切割放张,以实现对工字梁混凝土梁的预应力作用^[13]。放张时工字梁受到预应力和自重荷载的作用,会使梁体产生变形;而梁体变形会引起预应力损失,进而影响梁体应力分布。采用本文建立的工字梁精细模型对预应力筋放张后梁体受力性能进行分析。

2.1 普通钢筋对梁体受力性能的影响

工字梁普通钢筋和混凝土黏结在一起,共同承受外荷载作用,而普通钢筋对预应力梁结构受力性能的影响还有待进一步深入研究^[1,14]。通过对比分析考虑和不考虑普通钢筋影响的2种模型来说明普通钢筋对先张折线预应力工字梁受力性能的影响。通过释放预应力筋一端约束实现预应力放张,预应力筋放张后工字梁竖向变形(挠度)沿梁长的分布如图5(a)所示,可见相同模型下,计算的梁顶和梁底挠度符合一致,说明梁体竖向相对变形很小;而相较于考虑普通钢筋影响的模型,不考虑普通钢筋影响的模型计算结果明显更大,2种模型的最大挠度分别为14.0 mm和16.0 mm,后者是前者的1.143倍,说明普通钢筋能明显提高工字梁的刚度。

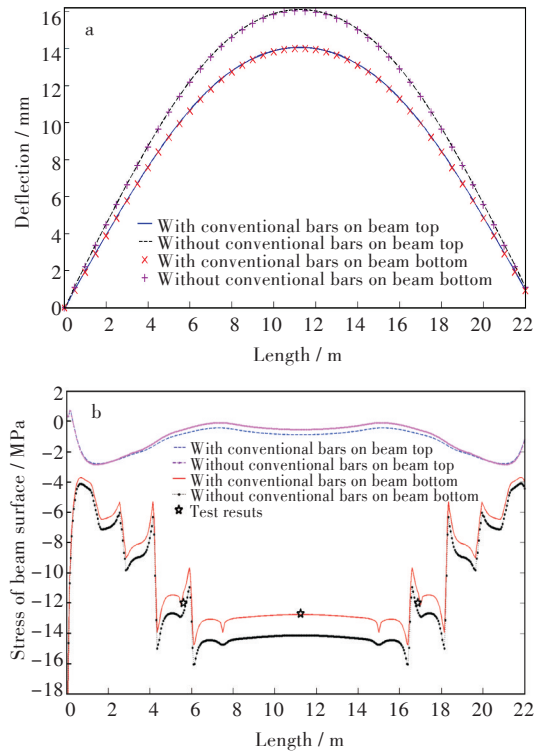


图5 放张后工字梁挠度和应力分布:(a) 挠度,(b) 应力
Fig. 5 Deflection and stress distribution of flanged beam after prestressed stretching:(a) deflection,(b) stress

预应力筋放张后工字梁表面混凝土纵向应力沿梁长的分布如图5(b)所示,可见预应力筋放张后工字梁全截面受压,呈压弯状态,跨中附近梁底压应力较大,梁顶压应力储备相对较小;对梁顶应力而言,考虑普通钢筋的影响能使梁顶压应力略微增大;对梁底应力而言,考虑普通钢筋影响的计算结果和预应力筋放张时现场测试结果基本一致,说明模型合理,而不考虑普通钢筋影响的计算结果明显偏大。放张后工字梁跨中截面混凝土纵向应力分布如图6所示,可见截面应力沿横向分布比较均匀,2种模型的梁底最大压应力分别为12.77 MPa和14.14 MPa,不考虑普通钢筋影响会使结果偏大11%,说明普通钢筋对工字梁应力分布影响也较大。

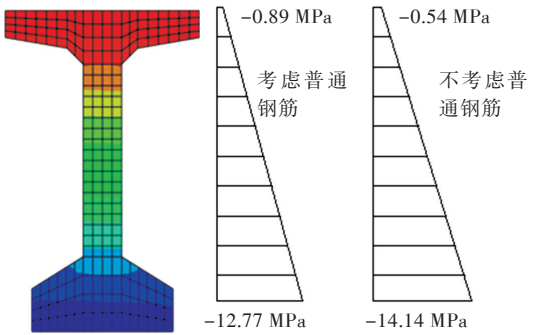


图6 放张后工字梁跨中混凝土应力分布
Fig. 6 Stress distribution of concrete at mid-span of flanged beam after prestressed stretching

不考虑普通钢筋影响也会使计算的工字梁纵向压缩量偏大,最大7.64 mm,是考虑普通钢筋影响结果(6.92 mm)的1.11倍。进而分析放张时普通钢筋的受力,箍筋最大拉应力为26.67 MPa,压应力为22.87 MPa;纵向钢筋最大拉应力为14.33 MPa,压应力为77.2 MPa,说明普通钢筋直接参与了先张工字梁的受力,提高了梁体的刚度和承载能力。

2.2 转向器竖向拉杆对梁体受力性能的影响

先张法折线预应力工字梁通过转向器实现折线配筋,转向器通过竖向拉杆锚于预制台座上,放张时将拉杆切断,拉杆直接参与钢束折点处局部受力。考虑和不考虑转向器拉杆影响计算的钢束折点处混凝土截面竖向应力分布如图7所示,可见不考虑拉杆影响时出现了明显的应力集中现象,最大拉应力、压应力分别为1.23 MPa和2.22 MPa;而考虑拉杆影响时混凝土几乎没有竖向拉应力,最大压应力仅1.13 MPa,为不考虑拉杆影响的51%,说明转向器拉杆能显著减缓钢束折点处的应力集中作用,分析中需要考虑其影响。

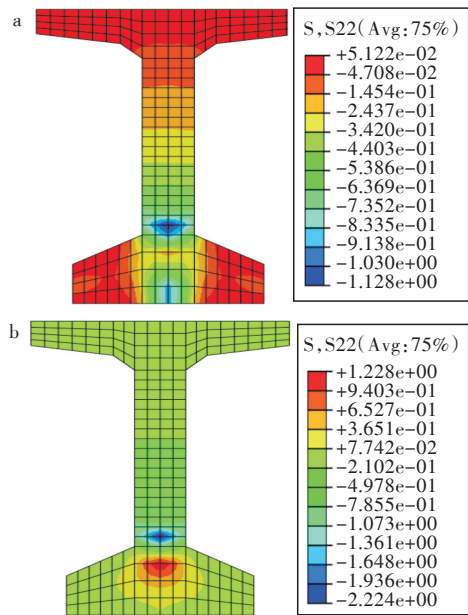


图 7 工字梁钢束折点处混凝土应力分布(单位:MPa):
(a) 考虑转向器拉杆,(b) 不考虑转向器拉杆
Fig. 7 Stress distribution of concrete at break point of steel strands of flanged beam (unit: MPa):
(a) with steering gear bolt, (b) without steering gear bolt

2.3 钢束预应力损失分析

由前文可知钢束放张后工字梁会产生纵向压缩,从而使钢束预应力水平降低,产生预应力损失,进而影响工字梁的受力性能^[15-16]。预应力筋放张后工字梁跨中截面最底排钢束预应力损失见表 1,可见钢束横向位置对其预应力损失影响较小;普通钢筋会影响钢束预应力损失,但影响不显著,预应力筋放张引起的钢束预应力损失约为张拉控制应力的 5.4%,与现场测试值 5.6% 基本一致。跨中截面不同高度钢束预应力损失见表 2,可见钢束预应力损失随着距梁底高度的增加而呈线性减小,这是由于工字梁放张时梁体处于弹性受力,截面满足平截面假设。

表 1 放张后跨中截面底排钢束预应力损失
Tab. 1 Prestress loss of the bottom steel strands at mid-span after prestressed stretching

| 横向位置 / cm | 考虑普通钢筋 | | 不考虑普通钢筋 | |
|--------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | 预应力损失 / MPa | 损失 率 / % | 预应力损失 / MPa | 损失 率 / % |
| -17.5 | 71.87 | 5.37 | 79.76 | 5.96 |
| -12.5 | 71.72 | 5.36 | 79.76 | 5.96 |
| -7.5 | 71.74 | 5.36 | 79.75 | 5.96 |
| -2.5 | 71.77 | 5.36 | 79.75 | 5.96 |
| 2.5 | 71.77 | 5.36 | 79.75 | 5.96 |
| 7.5 | 71.74 | 5.36 | 79.75 | 5.96 |
| 12.5 | 71.72 | 5.36 | 79.76 | 5.96 |
| 17.5 | 71.87 | 5.37 | 79.76 | 5.96 |

表 2 放张后跨中截面不同高度钢束预应力损失
Tab. 2 Prestress loss of steel strands of different heights at mid-span after prestressed stretching

| 距梁底 高度 / cm | 考虑普通钢筋 | | 不考虑普通钢筋 | |
|----------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | 预应力损失 / MPa | 损失 率 / % | 预应力损失 / MPa | 损失 率 / % |
| 35 | 57.77 | 4.31 | 63.59 | 4.75 |
| 30 | 60.08 | 4.49 | 66.30 | 4.95 |
| 25 | 62.40 | 4.66 | 69.00 | 5.15 |
| 20 | 64.75 | 4.83 | 71.69 | 5.35 |
| 10 | 69.34 | 5.18 | 77.07 | 5.75 |
| 5 | 71.77 | 5.36 | 79.75 | 5.96 |

预应力筋放张后工字梁梁底钢束(直线)预应力损失及其邻近普通纵向钢筋应力沿梁长的变化如图 8 所示。由图 8 可见,钢束预应力损失及普通钢筋应力大致呈阶梯形分布,而钢束预应力损失变化剧烈的位置均为直线短钢束的端点,表明采用短钢束能实现特定区域的预应力施加,但应注意短钢束端头的应力集中效应;钢束预应力损失越大,说明梁纵向压缩越明显,从而纵向普通钢筋压应力也越大。跨中处钢束预应力损失和普通钢筋应力对应的应变增量分别为 3.69×10^{-4} 和 3.70×10^{-4} ,两者基本一致,表明钢束预应力通过混凝土握裹力很好地传递到普通钢筋上。

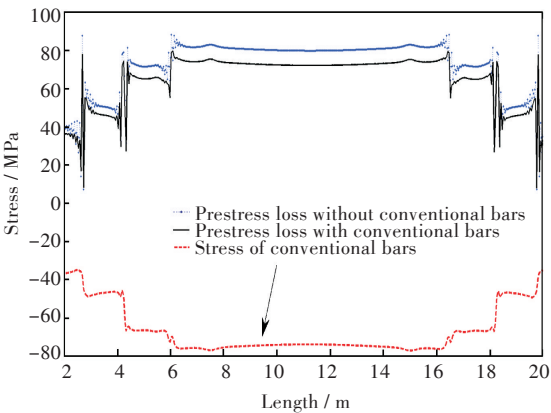


图 8 工字梁预应力损失及普通纵筋应力
Fig. 8 Prestress loss and stress of conventional bars of flanged beam

图 9 为工字梁折线钢束(图 1 中 N9)预应力损失沿梁长的分布,可见在跨中附近直线段上钢束预应力损失基本保持不变,在转向器处有略微突变;而钢束通过转向器后,预应力损失随着距梁底高度的增加而逐渐减小;在梁端附近(预应力传递长度范围)由于混凝土对钢束约束有限,使得预应力损失急剧增大。折线钢束预应力损失沿梁长变化很明显,变化趋势不同于直线钢束(图 9),设计和施工中应予注意。

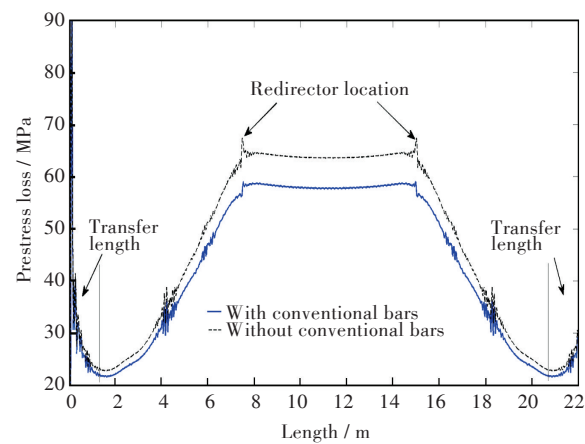


图9 工字梁预应力损失沿梁长的分布

Fig. 9 Prestress loss distribution along the beam of flanged beam

3 结 语

为全面了解先张法折线预应力混凝土工字梁的受力性能,建立了考虑普通钢筋和转向器拉杆影响的工字梁精细有限元模型,进而研究了普通钢筋对工字梁受力性能的影响,讨论了转向器拉杆对折点部位局部应力的影响,分析了放张后钢束预应力损失情况,得到如下结论:

1)工字梁通过折线预应力布置能较好地适应结构受力,计算的梁体应力及钢束预应力损失和现场测试结果基本一致,说明建立的先张法折线预应力工字梁精细模型合理有效。

2)普通钢筋对梁体变形及应力影响较大,不考虑普通钢筋影响将使梁体竖向变形增加14%,使纵向变形增加11%,使梁底混凝土应力增加11%,也会使钢束预应力损失偏大。普通钢筋直接参与了梁体受力,提高了梁体刚度和承载能力,设计及计算分析中应予考虑。

3)转向器竖向拉杆参与了钢束折点处局部受力,能显著减缓折点处的应力集中作用。

4)工字梁钢束预应力损失与钢束横向位置相关性较小,而随距梁底高度增加而呈线性减小,最大损失率约为5.4%。钢束预应力能很好地传递到邻近混凝土和普通钢筋上;折线钢束预应力损失沿梁长变化显著,呈折线分布趋势。

参考文献

[1] 黄文雄. 基于新型弯起器的折线配筋先张梁力学性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

[2] 邵旭东,顾安邦. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

[3] 杨庆国,易志坚,刘占芳. 混张工艺制作先张折线预应力混凝土构件的设想[J]. 桥梁建设,2005,35(4): 79-81.

[4] 王新宇. 折线先张法预应力混凝土箱梁受力性能及工程应用研究[D]. 郑州:郑州大学,2010.

[5] 邵莲芬. 先张法折线形预应力筋混凝土梁受力性能的数值分析[D]. 郑州:郑州大学,2006.

[6] 张海龙,代筠杰,郑明万. 先张法折线预应力混凝土梁的仿真分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(9):98-100.

[7] HWAN O B, SUNG K E, CHEOL C Y. Theoretical analysis of transfer lengths in pretensioned prestressed concrete members[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006,132(10):1057-1066.

[8] 黄文雄,谭利英. 折线配筋先张梁中弯起器的模拟及其对局部应力的影响分析[J]. 中外公路,2012,32(5):132-135.

[9] 刘立新,胡丹丹,于秋波,等. 先张法折线形预应力梁钢绞线摩擦损失试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2006,27(4):6-9.

[10] NANNI A, TANIGAKI M. Pretensioned prestressed concrete members with bonded fiber reinforced plastic tendons: development and flexural bond lengths[J]. ACI Structural Journal,1992,89(4):433-441.

[11] 刘立新,安鸿飞,于秋波,等. 淮河大桥35 m先张折线形箱梁预应力损失的研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2007,28(4):12-15.

[12] 单成林. 综合施加预应力法加固钢筋混凝土板桥理论及试验[J]. 中国公路学报,2013,26(1):67-73.

[13] 汪小林,刘立新. 折线配筋先张梁疲劳性能试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(5): 113-116.

[14] 徐新瑞. 折线形先张法预应力混凝土箱梁受力性能的分析[D]. 郑州:郑州大学,2010.

[15] 黄建华,彭浪,朱永涛. 先张法预应力混凝土波形板桩力学性能研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(3):688-696.

[16] 熊锦鹏. 折线先张法 Bulb-T 梁张拉台座设计与应用[J]. 市政技术,2018,36(5):70-73.