

先张法折线预应力钢束放张工序优化分析

郭增伟¹,朱 华¹,谢新龙²,刘 兵³

(1. 重庆交通大学土木工程学院,重庆 400074;2. 江西省高速公路投资集团有限责任公司,
江西 南昌 330025;3. 江西交通建设工程质量监督管理局,江西 南昌 330025)

摘 要 目的 精细化分析折线先张法混凝土 T 梁分批次放张过程中混凝土梁体应力变化,缓解折线先张法混凝土 T 梁预应力钢束弯折位置的应力集中现象. 方法 基于 ANSYS 中 SOLID65 钢筋混凝土整体式模型,建立折线预应力混凝土 T 梁的非线性有限元实体分析模型,分析和探讨分次放张预应力钢束过程中折线钢束弯折点附近混凝土主压应力、主拉应力、应力集中系数的变化. 结果 相比一次放张而言,钢束分批次放张后预应力筋弯折点处混凝土主压应力波峰数量和应力极值均有明显减小,但主拉应力波峰数量和应力极值却有明显增大;钢束分批放张时折线钢束弯折点位置处的最大拉应力、平均应力随着放张的预应力钢束的增多而逐渐增大,应力集中系数前期变化较大,后期逐渐减小趋于平稳. 结论 先将所有直线筋张拉然后再张拉折线筋对于减小弯折点附近最大拉应力和应力集中系数有显著作用,能够明显缓解弯折位置的应力集中现象.

关键词 桥梁工程;T 梁;折线配筋;分次放张;应力集中

中图分类号 U441.3

文献标志码 A

Optimization Analysis of Prestressed Tendons' Tensing Order of Pre-tensioned Girder

GUO Zengwei¹, ZHU Hua¹, XIE Xinlong², LIU Bing³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China, 400074; 2. Highway Investment Group of Jiangxi Co. Ltd., Nanchang, China, 330025; 3. Traffic Construction Engineering Quality Supervision Administration of Jiangxi, Nanchang, China, 330025)

Abstract: In order to figure out the stress changing of pre-tensioned concrete T-beam in the process of releasing tendons in batches, and alleviate the stress concentration phenomenon near the break point of prestressing tendons, this paper proposed the nonlinear finite element model of the prestressed concrete T-beam based on SOLID65 reinforced concrete integral model in ANSYS to analyze the principal compressive stress, the principal tensile stress, and the stress concentration factor near the break point of prestressing tendons during the process of releasing tendons. Analysis results shows that comparing to releasing tendons all at once, releasing tendons in batches causes

收稿日期:2019-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51878106, 51478072);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjBX0022);桥梁工程结构动力学国家重点实验室开放基金项目(201501)

作者简介:郭增伟(1985—),男,副教授,博士,主要从事桥梁振动及控制、长期性能等方面研究.

the peak number and the peak value of principal compressive stress near the break point of the prestressing tendons decreased largely and the principal tensile stress increased largely. The maximum principal tensile stress and mean stress rise with the increase of the number of released prestressing tendons. At prophase, the stress concentration factor changes greatly and gradually decreases and stabilizes at later stage. Releasing all straight prestressing tendons first then releasing polyline prestressing tendons has a significant effect on reducing the maximum value of principal tensile stress and stress concentration factor, which can significantly alleviate the stress concentration phenomenon near the break point of prestressing tendons.

Key words: bridge engineering; T-beam; polyline prestressing tendons; releasing tendons in batches; stress concentration

随着我国城镇化进程加快,公路运输建设快速发展,特别是高速公路建设向中西部地区的不断推进,桥梁工程建设规模越来越大.在桥梁上部结构建设中,预制T梁以其施工周期短、经济实惠等特点,在我国的桥梁建设中得到了极为广泛的应用^[1].预制T梁一般为预应力钢筋混凝土结构,按施工方法先张法和后张法,分为先张T梁和后张T梁两种^[2].先张法是在浇筑混凝土前张拉预应力筋,并将张拉的预应力筋临时锚固在台座上,然后浇筑混凝土,待养护达到一定设计强度,保证预应力筋与混凝土有足够粘结时,放松预应力筋,借助于混凝土与预应力筋的粘结力,对混凝土施加预应力的施工工艺^[3].与后张法工艺相比,折线先张法虽然增加了张拉台座的费用,但可减少锚具的费用,省去预留孔道、穿筋、压力灌浆等工序^[4].工程实践表明,对于构件数量较多的公路桥或铁路桥,折线先张预应力混凝土梁的总体造价低于目前应用的后张预应力梁^[5].但在目前的先张法实践中,构件中的预应力筋普遍为直线束筋,难以依据弯矩包络线布设束筋,使得构件中的预应力在构件的不同截面上与对应的荷载效应不能较好的匹配,因而不能像后张法构件利用弯起段预应力筋的抗剪作用,造成了材料的利用率相对较低^[6].基于上述情况提出的折线配筋预应力混凝土先张梁结合了先张法、后张法的优点,是一种力学性能优越、施工技术先进的新型预应力混凝土结

构^[7].不过折线先张预应力梁混凝土钢束弯折位置附近钢绞线数量较多,黏结应力传递集中,有明显的应力集中的现象,易引起弯折处混凝土开裂,从而引起承载能力及耐久性的下降^[8].

为了将这种新型结构更好的应用到工程实践中,学者们进行了许多的研究.张海龙等^[9]运用计算机仿真技术建立了先张法折线预应力混凝土梁的有限元模型,对其关键技术进行了研究,包括折线筋转折处的应力集中、合理的锚固拉杆数及与后张曲线预应力混凝土梁受力的对比分析,计算结果表明:导向辊的半径由0.01 m增加到0.04 m时应力集中因子迅速减小,当其半径大于0.04 m时,应力集中因子变化趋于平缓,而当其半径大于0.10 m以后,应力集中效应已不再明显;王新宇等^[10]以跨度为35 m的折线预应力混凝土箱梁为研究对象,对其进行受力性能试验,分析了钢绞线的预应力损失,混凝土的应力,箱梁的抗裂性能、挠度以及承载力,发现折线先张预应力混凝土箱梁的受力性能良好,为工程应用提供了依据.陈汉昌等^[11]通过对钢绞线在弯起器上经弯折后的拉力试验,分析弯折角对抗拉强度和延伸率的影响规律,得出钢绞线弯折极限抗拉强度计算建议公式,并提出为实现预应力结构延性破坏的弯折角建议值;国内其他学者也对折线先张法预应力混凝土梁从钢束力学性能^[12]、张拉工艺^[13]、张拉台座施工^[14]、计算方法^[15]、

经济指标^[16]等方面进行了分析和探讨.虽然国内外对折线先张法的研究并不少,但这些研究大多集中在折线先张法的施工技术方面^[17],对于考虑钢束分次放张对折线先张预应力混凝土梁性能的研究却相对较少,针对这个问题,笔者探讨了考虑钢束分次放张的条件下先张梁预应力筋折点部位应力集中现象的特点以及折线束和直线束放张顺序对折点位置应力集中的影响.研究表明,先将所有直线筋张拉然后再张拉折线筋对于减小弯折点附近最大拉应力和应力集中系数有显著作用,能够明显缓解弯折位置的应力集中现象.

1 工程背景

鄱阳湖二桥是鄱阳湖上的第二座公路大桥,全长 5 589.0 m,主桥为跨径 420 m 的钢砼组合梁斜拉桥,引桥为跨径 35 m 的先简支后连续先张预应力混凝土 T 形截面梁,其截面尺寸及预应力筋编号如图 1 所示.

T 梁采用先张法折线预应力配筋,预应力钢束包含有直线束(a1 ~ a4,b1 ~ b4,c1 ~

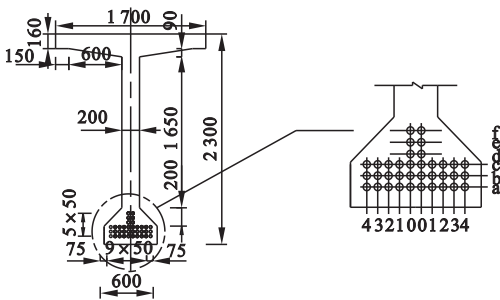


图 1 35 m 跨 T 梁标准横断面及预应力筋编号
Fig. 1 Standard cross section of 35 m span T-beam and the number of prestressing tendons

c4,d1 ~ d4,e1 ~ e4,f1 ~ f4) 和折线束(a0 ~ f0),其纵向布置如图 2 所示,折线预应力筋在距梁端 9.005m 处起弯,弯折处的过渡半径 $R = 10\text{ cm}$,从上到下 6 组折线预应力筋弯起角度分别为 7.33° 、 7.67° 、 8.00° 、 8.33° 、 8.67° 、 9.00° .钢束的放张顺序设定为:d0(步骤 1)→b1、b3(步骤 2)→c0(步骤 3)→b2、b4(步骤 4)→e0(步骤 5)→a1、a3(步骤 6)→b0(步骤 7)→a2、a4(步骤 8)→f0(步骤 9)→c1、c3(步骤 10)→a0(步骤 11)→c2、c4(步骤 12).

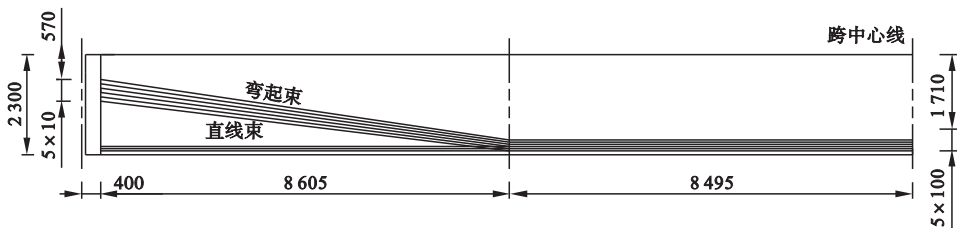


图 2 35m T 梁纵向预应力筋布置

Fig. 2 The position of prestressing tendons of 35m span T-beam

2 基于 ANSYS 的有限元模拟及正确性验证

为分析分批次放张对先张法折线预应力 T 梁钢束弯折点附近应力集中及钢束预应力损失的影响,利用 ANSYS 建立 35m T 梁的实体有限元模型(见图 3),以中跨端部为坐标原点,顺桥向为总体坐标系 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖向为 Z 轴.混凝土使用 Solid65 单元模拟,普通钢筋通过设置 SOLID65 单元实

常数中的体积配筋率进行模拟,1×7 标准型钢绞线使用带有初始应变的 link8 单元进行模拟,并通过节点自由度耦合的方法实现钢束预应力效应的施加.钢束有效预应力取 1 395 MPa,并据此计算得到 link 8 单元的初始应变为 7.15×10^{-3} ,预应力筋的分次放张通过在不同荷载步激活相应预应力筋单元来实现.为保证计算精度并减小计算成本,利用结构的对称性仅建立 1/4 梁模拟,使用六面体网格并以扫掠的方式生成映射网格(网格

尺寸为 0.025 m),并在预应力筋弯折段附近加密对网格,整个模型共 951 166 个节点,776 380 个单元,滑动支座通过约束主梁底板相应位置处节点的竖向和横向自由度进行模拟,固定支座则通过约束主梁底板相应位置处节点的竖向、横向和顺桥向自由度进行模拟,1/4 梁横向和纵向的对称面上施加对称约束来模拟全梁受力^[18].需要特别说明的是,为考虑折线预应力拐点处应力集中所造成的混凝土应力开裂释放的行为,依据文献[19]中提出的一种可以考虑不同破坏模式的二维混凝土本构模型及其在 ANSYS 中的实现方式,将 SOLID65 单元张开裂缝的剪力传递系数 β_t 设置为 0.5,闭合裂缝的剪力传递系数 β_c 设置为 1.0,拉应力释放系数 T_c 设置为 0.6,该模型将混凝土按不同应力组合进行分区,按分区设定加卸载力学行为和非线

性指标,可以较好地模拟混凝土在非比例加载情况下的力学行为.

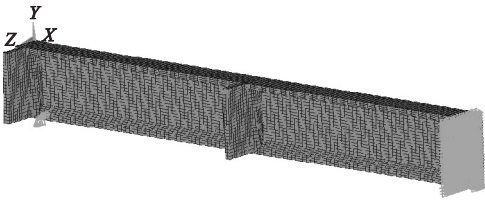


图3 T梁有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the T-beam

为检验有限元模型的正确性,表 1 给出了 T 梁在自重荷载下跨中截面翼板顶缘和马蹄底缘应力的有限元和理论计算值,理论计算值通过材料力学的方法计算得到.不难发现有限元模型的计算值和理论值相对误差不超过 6%,证实了文中 ANSYS 模型的正确性.

表 1 应力的理论结果与模型结果对比

Table 1 Comparison of theoretical results with model results

位置	应力理论值/MPa	应力有限元结果/MPa	绝对误差/MPa	相对误差/%
翼板顶缘	-5.39	-5.61	0.22	4
马蹄下底缘	7.90	8.39	0.49	6

注:有限元分析时采用 1/4 建模会造成跨中截面受力状态失真,故表 1 有限元结果为距跨中 10 cm 处应力值,后续讨论的弯折点附近应力,因弯折点距离跨中较远并不受此影响.

3 考虑分批放张的先张法折线预应力 T 梁有限元分析

钢束的分批次放张在 ANSYS 中是通过在求解前杀死所有单元(EKILL),在第一荷载步(步骤 1)激活(EALIVE)所有 T 梁单元以及第一批放张的预应力束,并在后续荷载步中依次激活相应预应力束进来模拟的.由于在前期建模时预应力束张拉力的施加是通过初应变考虑的,因此在相应荷载步激活相应钢束单元时预压力即通过预应力束施加到 T 梁.

为研究分批次放张对先张法折线预应力 T 梁中混凝土应力的影响,按照前文给出的放张顺序分 12 个阶段依次放张预应力钢束,

对比分析各放张阶段预制 T 梁的折线钢束预应力效应.为考虑普通钢筋,按照中华人民共和国交通行业《公路桥梁通用图》(T 梁系列)中 35 m T 梁内普通钢筋构造要求计算 T 梁三个方向钢筋的体积配筋率(纵向钢筋配筋率 $\rho_x = 0.62\%$ 、竖向箍筋配筋率 $\rho_y = 0.33\%$ 、横向拉结钢筋配筋率 $\rho_z = 0.03\%$)^[20],并据此设置 SOLID65 单元的实常数使用整体钢筋混凝土模型.

为说明 T 梁弯折点附近的应力集中现象以及分次放张对 T 梁弯折点附近应力的影响,图 4 给出了考虑钢束分批放张与否的条件下钢束弯折点附近 30cm 范围内(中心取在离马蹄底缘最近折线筋位置)梁体第一主应力的分布云图,图中“+”表示折线钢束

弯折点位置.从图4中可以发现,预应力筋弯折点处附近混凝土主应力呈现出明显的应力集中的现象,且主压应力峰值位置皆与折线预应力筋弯折点重合,而主拉应力峰值则出现在弯折点附近.由此可以推断:钢束分批次放张后预应力筋折点处主压应力波峰数量和应力极值大小均有明显减少,但主拉应力波峰数量和应力极值大小却有明显增多.

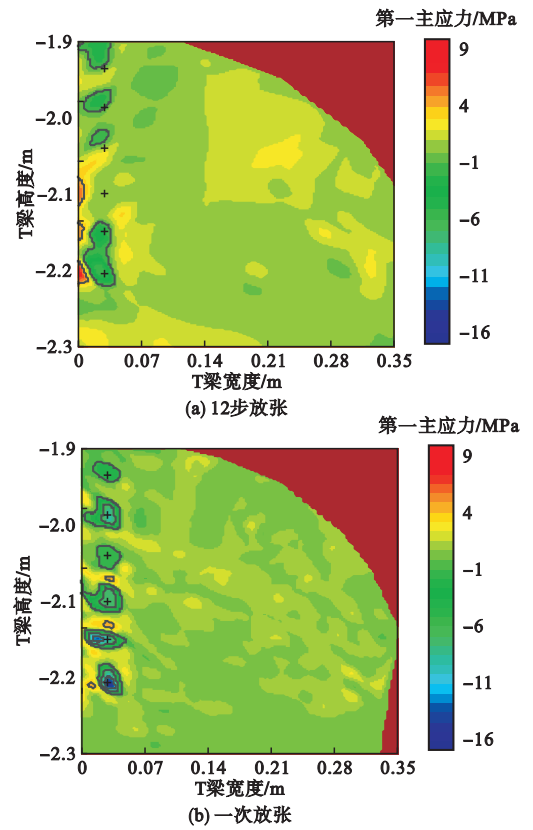


图4 考虑施工阶段与否对预应力钢束弯折点附近第一主应力分布的影响

Fig. 4 Influence of releasing in batches on the distribution of the principal tensile stress near the break point of prestressing tendons

为了更好的描述和理解弯起位置附近的应力集中现象,特引入应力集中系数 K 作为衡量弯起位置应力集中程度的指标:

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}}.$$

(1)

式中: σ_{\max} 为最大拉应力; $\bar{\sigma}$ 为弯折处 30 cm 范围内平均应力.

表2给出了分批放张各阶段及一次放张时预应力折点处附近 30 cm 的最大拉应力、平均应力、应力集中系数.

表2 各施工阶段及一次放张时折点附近混凝土的第一主应力

Table 2 The principal tensile stress near the break point of prestressing tendons at each construction stage and one-time releasing

步骤	最大拉应力/MPa	平均应力/MPa	应力集中系数
步骤 1	3.53	0.08	44.99
步骤 2	3.33	0.19	17.56
步骤 3	8.89	0.26	34.12
步骤 4	8.75	0.40	21.63
步骤 5	8.68	0.44	19.76
步骤 6	8.49	0.55	15.41
步骤 7	7.18	0.45	16.02
步骤 8	7.33	0.53	13.80
步骤 9	7.74	0.50	15.34
步骤 10	7.91	0.60	13.27
步骤 11	8.19	0.65	12.57
步骤 12	8.72	0.81	10.82
一次放张	6.43	0.87	7.39

从表2中可以发现:钢束分批放张后折线钢束弯折点位置处的最大拉应力、应力集中系数较一次放张均明显增大,平均应力减小;随着放张的预应力钢束的增多,折点附近最大拉应力、平均应力也逐渐增大,应力集中系数则呈现出先增大后减小的变化趋势,这可能是因为放张初期预应力筋较少,折线钢束的应力集中效应相比直线钢束产生的预压应力更为显著,故放张前期随着放张的预应力筋的增加折点附近应力集中系数逐渐增加,但放张后期随着预压应力作用面积的大幅增加,应力分布变得更加均匀,应力集中系数也随之减小.显然,考虑预应力钢束的分阶段放张与否对弯折位置的应力集中现象是有很大影响的,因此需要对预应力钢束放张顺序进一步优化.

4 预应力筋张拉工序的优化

为进一步分析直线预应力筋和折线预应力筋放张次序对钢束弯折位置附近应力的影响,将折线束弯起半径设置为 10 cm,普通钢

筋按照《公路桥梁通用图》中构造进行配置,在原始张拉顺序的基础上调整折线束和直线束的放张顺序,拟定了 4 个不同的放张次序,具体情况如表 3 所示.

表 3 各工况钢束放张次序

Table 3 The releasing order of tendons under different conditions

工况	钢束张拉次序
原始顺序,先折线再直线(交替)	d0(步骤1)→b1、b3(步骤2)→c0(步骤3)→b2、b4(步骤4)→e0(步骤5)→a1、a3(步骤6)→b0(步骤7)→a2、a4(步骤8)→f0(步骤9)→c1、c3(步骤10)→a0(步骤11)→c2、c4(步骤12)
交换1、2步	b1、b3(步骤1)→d0(步骤2)→c0(步骤3)→b2、b4(步骤4)→e0(步骤5)→a1、a3(步骤6)→b0(步骤7)→a2、a4(步骤8)→f0(步骤9)→c1、c3(步骤10)→a0(步骤11)→c2、c4(步骤12)
先直线后折线(交替)	b1、b3(步骤1)→d0(步骤2)→b2、b4(步骤3)→c0(步骤4)→a1、a3(步骤5)→e0(步骤6)→a2、a4(步骤7)→b0(步骤8)→c1、c3(步骤9)→f0(步骤10)→c2、c4(步骤11)→a0(步骤12)
先直线后折线	b1、b3(步骤1)→b2、b4(步骤2)→a1、a3(步骤3)→a2、a4(步骤4)→c1、c3(步骤5)→c2、c4(步骤6)→d0(步骤7)→c0(步骤8)→e0(步骤9)→b0(步骤10)→f0(步骤11)→a0(步骤12)

为检验分步放张有限元模型的正确性,表 4 给出了一次放张时各工况 T 梁跨中截面的内力及挠度,从表中可以看出各工跨中截面轴力、弯矩、挠度与一次放张时相差不大,证实各工况计算结果的可靠性.

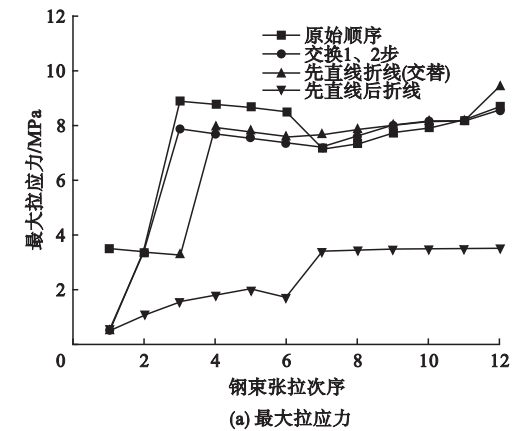
表 4 各工况 T 梁跨中内力及挠度

Table 4 Internal force and deflection of T-beam under different conditions of the mid-span

工况	轴力/kN	跨中弯矩/(kN·m)	跨中挠度/mm
一次放张	-2 703.7	1 936.4	26
原始顺序	-2 707.0	1 935.9	26
交换步骤 1、2	-2 703.0	1 935.2	27
先直线后折线(交替)	-2 699.6	1 938.1	27
先直线后折线	-2 675.5	1 908.8	26

图 5 给出了不同工况下各个步骤下预应力筋弯折点附近混凝土平均应力和最大拉应力.从图中可以看出:最大拉应力随着张拉钢束的增多先上升后趋于平缓,折线预应力筋张拉时最大拉应力变化较直线筋张拉时更为

明显;对比 4 个工况,先放张直线束再放张折线束的最大拉应力明显小于其余几个工况,说明先张拉直线筋再张拉折线筋对于减小弯折点附近最大拉应力有显著作用,是先张拉的直线预应力束在 T 梁中储存了压应力,可以抵消部分折线预应力筋张拉带来的拉应力;对于平均应力,除了先放张直线束再放张折线束的工况外,其余各工况随着张拉钢束的增加平均应力均稳步增加.



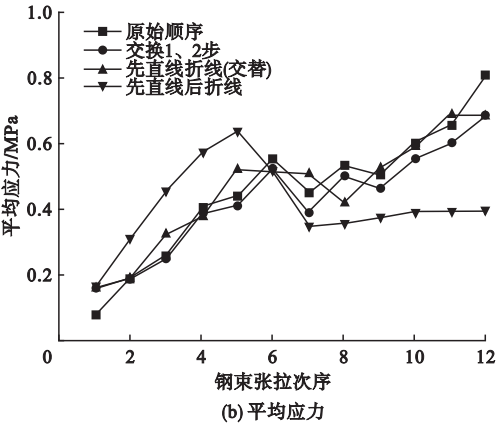


图5 预应力筋弯起位置附近混凝土应力受钢束放张次序的影响

Fig. 5 Effect of releasing order of prestressing tendons on the stress near the break point

图6给出了不同张拉次序下预应力筋弯折点附近混凝土的应力集中系数,显然先放张直线束再放张折线束,能最大程度的改善弯折点的应力集中现象.其他几个工况由于前期有折线束的张拉,造成了拉应力集中,另外此时张拉钢束数量较少,T梁内整体应力水平较低,从而导致应力集中系数较大.

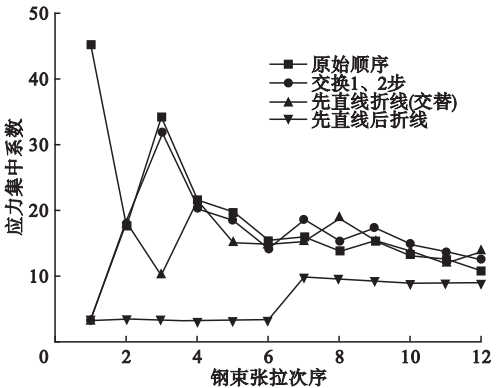


图6 预应力筋弯起位置的应力集中系数受钢束放张次序的影响

Fig. 6 Effect of releasing order on stress concentration factor near the break point of prestressing tendons

5 结 论

(1)与一次放张相比,钢束分批次放张时钢束弯折点处混凝土主压应力波峰数量和

应力极值均有明显减小,但主拉应力波峰数量和应力极值却有明显增大,考虑预应力钢束的分批次放张与否对弯折位置的应力集中现象有很大影响.

(2)钢束分批放张时折线钢束弯折点位置处的最大拉应力、平均应力随着放张的预应力钢束的增多而逐渐增大,应力集中系数前期变化较大,后期逐渐减小趋于平稳.

(3)先将所有直线筋放张然后再放张折线筋对于减小弯折点附近最大拉应力和应力集中系数有显著作用,能够明显缓解弯折位置的应力集中现象,建议在施工时先放张直线预应力筋.

参考文献

[1] 王俊,尚世宇,刘立新.折线先张法预应力混凝土梁长期变形试验研究[J].混凝土,2013(7):110-113.
(WANG Jun, SHANG Shiyu, LIU Lixin, Experimental study on long-term deformation of prestressed concrete beams with pretensioned bent-up tendons [J]. Concrete, 2013(7):110-113.)

[2] 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(4):6-9.
(LIU Lixin, HU Dandan, YU Qiubo, et al. Experimental studies on prestressing frictional loss of the fold-line pretension prestressed beam [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2006(4):6-9.)

[3] 刘立新,王新宇.折线先张预应力混凝土箱梁钢绞线锚固区应力研究[J].郑州大学学报(工学版),2010,31(5):74-77.
(LIU Lixin, WANG Xinyu. Study on local stress of strand anchorage zone for prestressed concrete box beams with pre-tensioned bent-up tendons [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2010,31(5):74-77.)

[4] 唐芳.基于折线先张法的预应力混凝土箱梁计算分析[J].山东农业大学学报(自然科学版),2017,48(4):629-632.
(TANG Fang. Calculation and analysis on prestressed concrete box girder based on broken line [J]. Journal of Shandong agricultural university (natural science edition), 2017, 48(4):629-632.)

[5] 王俊,苏聪聪,王博.折线先张法预应力混凝土梁长期变形有限元分析[J].工业建筑,2017,47(增刊I):163-166.
(WANG Jun, SU Congcong, WANG Bo. Finite element analysis of long-term deformation of prestressed concrete beams with pre-tensioned

- tendons [J]. Industrial construction, 2017, 47 (S1):163-166.)
- [6] SENNAH K M, KENNEDY J B. Literature review in analysis of box-girder bridges [J]. Journal of bridge engineering, 2002, 7 (2): 134-143.
- [7] 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.
(WANG Xinyu. Study on loading property and application of prestressed concrete box beam with pretensioned bent-up tendons [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.)
- [8] HEWSON N R. Prestressed concrete bridges: design and construction [M]. London: Thomas Telford Ltd, 2003.
- [9] 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.
(ZHANG Hailong, DAI Yunjie, ZHENG Mingwan. Simulation and analysis of broken-line pre-tensioned prestressed concrete beams [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science edition), 2010, 38(9): 98-100.)
- [10] 王新宇, 刘家慧, 刘立新. 折线先张预应力混凝土箱梁受力性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2010, 40(10): 94-96.
(WANG Xinyu, LIU Jiahui, LIU Lixin. Experimental study on bending behavior of prestressed concrete box beam with pretensioned bent-up tendons [J]. Building structure, 2010, 40(10): 94-96.)
- [11] 陈汉昌, 刘立新, 宋明慧, 等. 折线先张梁中钢绞线力学性能的试验研究 [J]. 建筑技术, 2010, 41(12): 1108-1111.
(CHEN Hanchang, LIU Lixin, SONG Minghui, et al. Test research on mechanical property of steel strand in fold-line pre-tension concrete beam [J]. Architecture technology, 2010, 41(12): 1108-1111.)
- [12] 王艳, 赵志有, 章建平. 先张法折线配筋预应力混凝土箱梁施工技术 [J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(4): 100-105.
(WANG Yan, ZHAO Zhiyou, ZHANG Jianping. Construction technology of broken-line prestressed concrete box beam [J]. Journal of railway science and engineering, 2013, 10(4): 100-105.)
- [13] 和民锁, 马新安, 曹新刚. 大跨度先张法折线配筋预应力混凝土简支梁预制施工技术 [J]. 铁道工程学报, 2004(2): 43-45.
(HE Minsuo, MA Xin'an, CAO Xingang. Construction technique of pre-casting for pre-stressed concrete simple-supported beam with long span pretensioned broken-line [J]. Journal of railway engineering society, 2004 (2): 43-45.)
- [14] ZENG Y, ZHANG G B, WANG Z Y. Experiment study on mechanical characteristics box girder bridge considering deck pavement [J]. Applied mechanics and materials, 2011, 90: 1216-1219.
- [15] 王辉, 王健, 王用中. 折线配束先张法预应力混凝土梁的研究与应用 [J]. 公路, 2007(7): 55-60.
(WANG Hui, WANG Jian, WANG Yongzhong. Research and application of prestressed concrete beam with pre-tensioned folding [J]. Highway, 2007(7): 55-60.)
- [16] 郭荣春. 折线力筋先张法箱梁的预制工艺研究 [J]. 西部探矿工程, 2011, 23(3): 208-210.
(GUO Rongchun. Study on prefabrication technology of pre-tensioned box girder with broken line force [J]. West-China exploration engineering, 2011, 23(3): 208-210.)
- [17] 刘立峰, 黄琳, 杨文军. 折线先张梁长线法工艺研究 [J]. 施工技术, 2005(7): 31-32.
(LIU Lifeng, HUANG Lin, YANG Wenjun. Study of the long line method of fold line pre-tension beams [J]. Construction technology, 2005(7): 31-32.)
- [18] WANG Xinyu, LIU Lixin, HU Dandan. Experimental study on the bending behavior of pre-stressed concrete beams by pre-tensioned method with bent-up tendons [C]// Proceedings of international symposium on innovation & sustainability of structures in civil engineering. [S. l.]: [s. n.], 2007: 707-715.
- [19] 陆新征, 江见鲸. 考虑不同破坏模式的二维混凝土本构模型 [J]. 土木工程学报, 2003(11): 70-74.
(LU Xingzheng, JIANG Jianjing. Constitutive model for concrete with various failure types ansys [J]. China civil engineering journal, 2003(11): 70-74.)
- [20] 交通部专家委员会. 公路桥梁通用图 (T 梁系列) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
(Expert Committee of the Ministry of Communications. General design of highway bridges (T beam series) [M]. Beijing: China Communication Press, 2014.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)