

CRTS II型无砟轨道板 预应力钢筋张拉计算理论研究

姚坤锋

(中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

摘要: CRTS II型轨道板为单向预应力结构, 钢筋采用低松弛无粘结预应力钢筋。在轨道板张拉工序中, 由于自重的影响, 钢筋在轴向拉力的作用下会引起径向的垂度变形, 预应力钢筋产生的端点位移不仅与钢筋的横截面积、弹性模量有关, 还与其垂度大小密切相关, 因此, 需要考虑预应力钢筋抗弯刚度的影响。为此, 引入垂度折减系数概念, 对工作状态下钢筋的跨中挠度计算公式进行理论推导, 从而近似修正钢筋自身的垂度效应。同时详细分析了垂度折减系数与预应力钢筋的长细比及张拉轴向应力的非线性关系。

关键词: CRTS II型轨道板; 张拉; 抗弯刚度; 垂度折减系数

中图分类号: U213.243 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)03-0107-04

0 引言

CRTS II型轨道板为单向预应力结构, 横向配有 $60 \times \Phi 10$ mm 和 $6 \times \Phi 5$ mm 预应力钢筋。钢筋采用低松弛无粘结预应力钢筋, 其抗拉强度不低于 1 420 MPa, 屈服强度不低于 1 280 MPa, 断裂延伸率不低于 7%^[1]。由于预应力钢筋自重的影响, 在轨道板张拉工序进行过程中在两端拉力的作用下会引起变形。其变形包括两部分: 一是预应力钢筋材料应变引起的弹性变形; 二是预应力钢筋的自重引起的几何形状改变, 即自重垂度。

在轴向拉力的作用下, 预应力钢筋产生的端点位移不仅与钢筋的横截面积及弹性模量有关, 还与其垂度大小有一定程度的关系。

1 Ernst 公式

用杆单元近似模拟索构件由索垂度引起的单元刚度变化, 常用的处理方法是运用 Ernst 公式, 采用等效弹性模量法来近似的修正垂度效应。即把索视为与它的弦长等长度的桁架直杆, 其等效弹性模量包括材料变形、构造伸长和垂度变化 3 个因素的影响, 其表达式称为 Ernst 公式^[2]

$$E_{eff} = \frac{E_{eff}}{1 + \frac{(WL)^2 AE_{eff}}{12F^3}} \quad (1)$$

式中, E_{eff} 为钢束压密影响下的有效弹性模量; W 为单位长度索的重力; L 为索的水平投影长度; A 为索的横截面面积; F 为索内的张力。

在 CRTS II型无砟轨道板预应力钢筋张拉系统计算中, 钢筋在通常情况下都被定义为索的一种, 在具体工程设计中亦使用索的理论进行计算, 但索单元的理论首先是在抗弯刚度为零这一前提的假定下进行推导的。对于一些细钢丝组成的钢索而言, 其抗弯刚度较小, 很多情况下, 不考虑其抗弯刚度是可行的, 但对于高铁上使用的质量精度较高的混凝土枕件, 必须考虑抗弯刚度的影响。

收稿日期: 2013-01-30

作者简介: 姚坤锋 男 1985 年出生 助理工程师

2 预应力钢筋计算理论推导

2.1 推导假定

在推导预应力钢筋的计算理论时,采用以下基本假定:

- (1) 考虑预应力钢筋的抗弯刚度 EI 。
- (2) 预应力钢筋材料满足胡克定律。
- (3) 考虑预应力筋的自重影响,近似满足抛物线方程。
- (4) 小应变、大位移假定。

2.2 公式推导

预应力筋张拉状态下,其主要承受两端张拉横梁施加的拉力,同时在长线台座上预应力钢筋的自重作用下产生弯矩,因此可以将预应力钢筋看作一根拉弯梁,不过由于其受拉是占主导作用,故整体上是反映的索的特性,同时兼有梁的部分特性,下面的推导即是在自重均布荷载下预应力钢筋的计算公式。

图 1 为索单元受均布载荷的计算简图,拉力为 H ,均布载荷 q ,支座 A 、 B ,高度差为 h ,取其中点为原点。

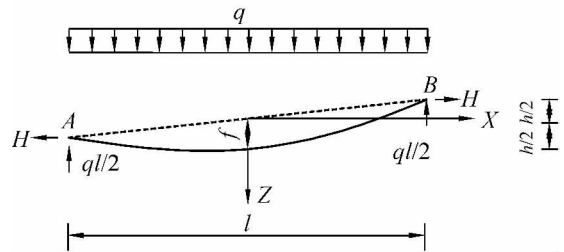


图 1 索单元计算简图

根据索单元受均布载荷的计算理论

$$M = H(Z - hx/l) - ql(l/2 - x)/2 + q(l/2 - x)^2/2 \quad (2)$$

整理得: $M = H(Z - hx/l) - qx^2/2$ 。

$$d^2z/dx^2 - Hz/EI = (-Hhx/l - ql^2/8 + qx^2/2)/EI \quad (3)$$

令 $r^2 = H/EI$, 求解上述微分方程得通解

$$z = c(e^{rx} + e^{-rx}) \quad (4)$$

求微分方程特解,将 $z^* = a_1x^2 + a_2x + a_3$ 代入公式(3): $a_1 = -q/2H$, $a_2 = h/l$, $a_3 = ql^2/8H - EIq/H^2$ 。

可知: $z^* = -qx^2/2H + hx/l + ql^2/8H - EIq/H^2$ 。

$$Z = z + z^* = c(e^{rx} + e^{-rx}) - qx^2/2H + hx/l + ql^2/8H - EIq/H^2 \quad (5)$$

由边界条件: $x = -l/2, z = -h/2$; $x = l/2, z = h/2$, 可知: $c = qEI/H^2(e^{l/2} + e^{-l/2})$, 最终

$$Z = ql^2/8H + qEI(e^{rx} + e^{-rx})/H^2(e^{l/2} + e^{-l/2}) - qx^2/2H + hx/l - EIq/H^2 \quad (6)$$

式中倒数第二项表示的是支座连线的坐标,这是支座的两端不等高时的通式,因此如果不考虑这一项时

$$Z_1 = ql^2/8H + qEI(e^{rx} + e^{-rx})/H^2(e^{l/2} + e^{-l/2}) - qx^2/2H - EIq/H^2 \quad (7)$$

式(7)推导的最终结果即是以 AB 为支座端点基线的预应力钢筋曲线坐标,并且当 $x = 0$ 时,可知跨中挠度为

$$f = ql^2/8H + 2qEI/H^2(e^{l/2} + e^{-l/2}) - EIq/H^2 \quad (8)$$

令 $f_1 = ql^2/8H > 0$; $f_2 = (EIq/H^2)(2/(e^{l/2} + e^{-l/2}) - 1) < 0$ 。由此可以分析得出, f_1 表达式与柔索的挠度公式相同,这反映的是预应力钢筋具有索的特性,对于 f_2 而言则反映的是预应力钢筋自身的抗弯刚度对于减少挠度的影响。因此,可以定义垂度折减系数: $S = -f_2/f_1 = (8/r^2l^2)(1 - 2/(e^{l/2} + e^{-l/2}))$ 。垂度折减系数 S 表征预应力钢筋的自身抗弯刚度对挠度的影响跟柔索特性产生挠度的比例关系。然后令 $\beta = rl/2$, 可知:

$$S = (2/\beta^2)(1 - 2/(e^\beta + e^{-\beta})) \quad (9)$$

对于预应力钢筋的惯性矩 $I = \pi d^4/64$, 故 $\beta = \sqrt{Hl^2/4EI} = l\sqrt{\sigma/E}/d$ 因此,推导的跨中挠度为 $f = ql^2(1 - S)/8H$ 。

3 垂度折减系数的影响因素及意义

基于以上公式推导,可以看出垂度折减系数 S 对于预应力钢筋张拉时的垂度影响不可忽视,这主要是由于推导公式过程中考虑了预应力钢筋自身的抗弯刚度,垂度折减系数 S 的主要影响因素包括两个方面,即预应力钢筋的长细比以及张拉时的轴向应力的大小,其影响可以通过公式(9)得到精确的解析结果。

3.1 张拉长度对垂度折减系数的影响

目前 CRTS II 型无砟轨道板预制生产线已不再局限于 27 块模具的生产模式,施工单位采用 2×33 块模具生产线、 2×41 块模具生产线以及 2×42 块模具生产线的台座模式,目前都有工程实例^[9]。长线台座的长度范围跨度很大,因此预应力钢筋的下料长度及预应力施工的张拉长度都不一样。不同 CRTS II 型无砟轨道板模具生产线的预应力钢筋的张拉长度如表 1 所示。

表 1 CRTS II 型轨道板生产线钢筋长度

模具数量/块	27	29	31	33	35	37	39	41	43
钢筋长度/m	70.85	75.95	81.05	86.15	91.25	96.35	101.45	106.55	111.65

根据不同 CRTS II 型无砟轨道板模具生产线的预应力钢筋的张拉长度,运用前文中推导的垂度折减系数公式,并查取《客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道混凝土轨道板(有挡肩)暂行技术条件》中预应力螺旋肋钢筋的规定的规定,可计算得到分别对应张拉应力 800、870、940 MPa 的预应力钢筋随着模具生产线长度的变化,其相应的垂度折减系数 S 的变化曲线,如图 2 所示。

可知,由于钢筋抗弯刚度的影响,其自重产生的垂度要小于同等条件下的柔索。换一个角度说,预应力钢筋的轴向刚度要大于同等条件下的柔索;随着轨道板预制生产线长度的增加,即预应力钢筋张拉长度的增加,其自身的抗弯刚度对于产生的垂度影响逐渐变小。

3.2 轴向应力对垂度折减系数的影响

图 3 为轨道板张拉台座分别采用 27 块、33 块以及 41 块模具生产线,随着预应力钢筋轴向应力的变化,其垂度折减系数 S 的变化曲线。通过对比分析,可以明显看出,随着预应力钢筋的轴向应力的增加,其自身的抗弯刚度对于产生的垂度影响逐渐变小。

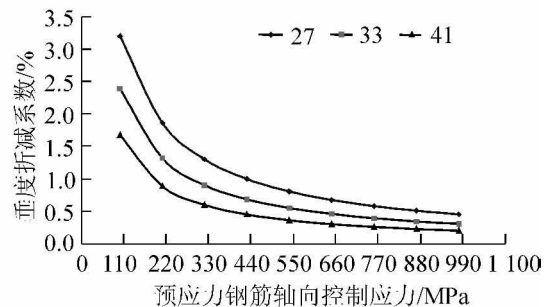
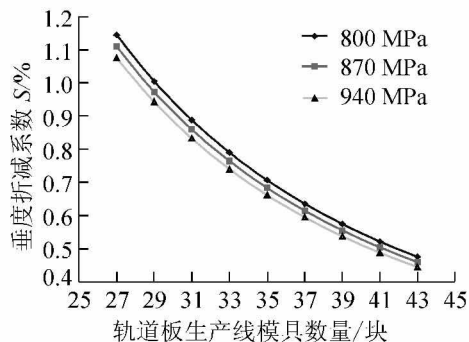


图 2 垂度折减系数 S 与模具生产线长度变化关系 图 3 垂度折减系数 S 与预应力钢筋轴向应力关系

3.3 垂度折减系数的工程意义

在 CRTS II 型轨道板预应力施工中,预应力钢筋的张拉分析需要重点考虑预应力钢筋的伸长、钢筋自重产生的垂度影响以及后期荷载的二阶影响等等,从而建立挠度理论的平衡微分方程。引入垂度折减系数的概念,可方便快捷地得出预应力钢筋加长对于垂度的影响。尤其是近年来,已有越来越多的轨道板场不再拘泥于传统 27 块模具生产线,而是采用加长的长线台座预制轨道板,这使得张拉的几何非线性分析变得更为复杂,钢筋自重产生的垂度影响、张拉伸长量与张拉力不成比例关系、钢筋所受轴力和弯矩影响等都发生较大变化。

4 结论

轨道板张拉长度的变化使得张拉的几何非线性分析变得愈加复杂,需要考虑到钢筋自重产生的垂度

影响、张拉伸长量与张拉力不成比例关系、钢筋所受轴力和弯矩影响等,针对这种几何非线性特点,对 CRTS II 型无砟轨道板预应力钢筋张拉计算理论进行初步研究,得出以下结论:

(1) 为了修正了钢筋自身的垂度效应,引入垂度折减系数概念,同时,用垂度折减系数可定量研究不同轨道板模具长度条件下,预应力钢筋张拉力和伸长量之间的非线性关系,对于轨道板预制施工有一定的指导意义。

(2) 对工作状态下钢筋的跨中挠度计算公式进行了理论推导,创新性的在公式中引入垂度折减系数,得出其挠度计算公式为 $f = ql^2(1-S)/8H$ 。

(3) 随着轨道板预制生产线长度的增大,即预应力钢筋张拉长度的增加,其自身的抗弯刚度对于产生的垂度影响逐渐变小;随着预应力钢筋的轴向应力的增加,其自身的抗弯刚度对于产生的垂度影响逐渐变小。

参 考 文 献

- [1] 铁道部科学技术司. 科技基 [2008] 173 号 客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道混凝土轨道板暂行技术条件 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [2] 张其林. 预应力结构非线性分析的索单元理论 [J]. 工程力学, 1993, 10(4): 93-101.
- [3] 付雷锋. 京沪高速铁路 CRTS II 型轨道板预制生产线设计研究 [J]. 铁道建筑技术, 2011 (1): 122-123.

Theoretical Research on CRTS II Gravelless Rail Board Prestressed Steel Bar Tension Computation

Yao Kunfeng

(China Railway Fifth Survey And Design Institute Group Co., Ltd, Beijing 102600, China)

Abstract: CRTS II gravelless rail board is a unidirectional prestressed structure, and the steel bar uses low relaxation unbonded prestressed steel bar. In the gravelless rail board prestressed process, the steel bar will cause radial stiffness and deformation under the action of axial force because of its own weight. The endpoint displacement of prestressed steel bar is related to the cross-sectional area of the steel, elastic modulus, and also closely related to sag, therefore we need to consider the reinforced effect of bending rigidity. This paper introduces the coefficient of stiffness reduction in order to deduce the theory of steel bar deflection calculation formula and approximately correct the reinforcement stiffness effects. At the same time, this paper analyzes the nonlinear relationship between coefficient of stiffness reduction and prestressed steel bar's slender ratio as well as axial stress.

Key words: CRTS II gravelless rail board; tension; flexural rigidity; coefficient of stiffness reduction

(责任编辑 车轩玉)