

2次预应力筒支组合梁受力性能与技术经济分析

周亚栋, 邵旭东, 聂美春, 杨建军

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:高速铁路预应力混凝土桥梁徐变上拱过大会影响桥上列车运行安全,为了控制预应力混凝土桥梁徐变上拱,将2次施加预应力新技术应用于预应力混凝土梁中,以箱梁为例,设计了4根不同预应力度的2次预应力筒支组合梁,分析了其各施工受力阶段截面应力、强度和抗裂性,并进行了结构尺寸与配筋完全相同的常规预应力混凝土筒支梁和2次预应力筒支组合梁徐变上拱的对比计算分析。结果表明:2次预应力筒支组合梁截面应力梯度小,受力合理,与常规预应力混凝土筒支梁相比,徐变上拱减少约40%~60%;并可以降低梁的建筑高度,节约10%左右的预应力筋和一定数量的混凝土,具有明显技术经济优势。

关键词:预应力混凝土;桥梁工程;徐变上拱;2次预应力组合梁;受力性能;技术经济分析;箱梁

中图分类号:U448.35; U448.217 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)06-0007-08

Mechanical Behavior and Techno-economic Analysis of Twice-prestressed Simply Supported Composite Beam

ZHOU Ya-dong, SHAO Xu-dong, NIE Mei-chun, YANG Jian-jun

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, P. R. China)

Abstract: Excessive creep camber of prestressed concrete bridge would result in risk on the traffic safety in high-speed railway. To control creep camber of prestressed concrete bridge, a new twice-prestressed technology was proposed to prestressed concrete beam. Four twice-prestressed simply supported box girders with different prestressed degrees were designed as an example. Its section stress, strength and crack resistance in different construction stages were analyzed. Compared the creep camber between conventional prestressed simply supported concrete beam and twice-prestressed simply supported composite beam with the same prestressed steels, it was shown that twice-prestressed composite beam has a smaller stress gradient. And the creep camber decreased approximately 40% to 60% with building height reduction, as well as some 10% energy saving and some amount of concrete.

Key words: prestressed concrete; bridge engineering; creep camber; twice-prestressed composite beam; mechanical behavior; techno-economic analysis; box girder

由于混凝土的徐变作用,铁路预应力混凝土桥梁将产生随时间不断增加的徐变上拱,直接影响线路的平顺性,不利于行车安全与旅客舒适性,同时增加了线路的维修养护工作量。高速铁路的高速度、高舒适性、高安全性与高密度连续运营的特点对其

桥梁结构的变形又提出了更严格的要求,我国现行高速铁路规范^[1]规定:“预应力混凝土梁的徐变上拱值应严格限制,轨道铺设后,有碴桥面梁的徐变上拱值不宜大于20 mm,无碴桥面梁的徐变上拱值不应大于10 mm”。对于普通铁路预应力混凝土桥梁,以

收稿日期:2009-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助(项目批准号 50778071)

作者简介:周亚栋(1972-),男,博士生,主要从事大跨与新型桥梁结构研究,(E-mail)zhyd95@163.com。

32 m 跨度简支梁为例,其徐变上拱量一般都在 60 mm 以上^[2],如果在设计中强调经济性,再加上混凝土施工质量控制不严,其徐变上拱量甚至会超过 100 mm^[3],难以满足高速铁路的技术要求。综合国内外的研究成果与高速铁路建设工程实践,预应力混凝土桥梁一般从设计与施工两方面采取措施减小徐变上拱量。设计方面措施有:1)采用部分预应力结构,降低预应力度^[4];2)加大跨高比^[5-6];3)采用无上拱结构概念设计^[3];4)采用体外预应力技术,准确施加预应力^[3]。施工方面的措施有:1)加强混凝土施工质量控制^[6];2)加强预加力大小控制,严格控制超张拉^[6];3)加强预加力施加时间与施加 2 期恒载时间控制,延长施加预应力时混凝土的龄期,2 期恒载在施加预应力后不少于 60 d 进行,使徐变上拱变形尽量在铺轨前完成^[5-6]。上述措施虽然能在一定程度上减小梁的徐变上拱,但不能从根本上解决问题,并且增加了设计与施工的复杂性,延长了工期,降低了混凝土材料与预应力筋的效率,增加了建设成本,技术经济指标不佳。2 次施加预应力技术优化了截面预应力的布置,在保持预应力度不变的前提下降低了截面应力梯度,有望从根本上解决预应力混凝土桥梁徐变上拱大的难题。根据在公路桥梁中应用的理论分析,2 次施加预应力技术可以大幅度降低梁的徐变上拱量,并且节约 13% 左右的预应力钢筋^[7],技术经济指标占有优势,但其尚未在高速铁路桥梁中得到应用,其基本受力性能和技术经济优势都还需要进一步研究,以便为该项技术在高速铁路中的推广应用提供依据。

以简支箱梁为例进行高速铁路 2 次预应力组合梁的应力与变形分析,探讨 2 次预应力组合梁的基本受力性能与应用于高速铁路中的技术经济优势。

1 2 次施加预应力技术的提出和基本原理

预应力混凝土梁徐变上拱产生的根本原因是施加的预应力过大,造成恒载和预应力作用下各截面偏心受压时的应力梯度比较大,因此,控制预应力混凝土结构过大变形的关键也就在于控制预应力度和截面应力梯度。美国的 Burns 曾利用配置在支座截面处组合板中的预应力预制芯棒实现预应力混凝土梁的简支变连续,并把这种构件成功地应用于加拿大的一座桥梁中,试验证实,预制应力芯棒产生了类似预应力作用的加劲功能,推迟了荷载作用下支点上缘混凝土的开裂^[8]。Shaikh 等也通过研究指

出这类细部构件的类似功能^[9]。前苏联也曾使用预应力混凝土薄板(芯棒)作为预应力大梁的受拉面层兼作底模,该结构实际为对截面不大的芯棒或薄板先施以程度相当高的预应力然后再将它结合在现浇混凝土中,使其起到受拉钢筋的作用^[10]。在双预应力混凝土结构中,受压区混凝土中配置了预压力预应力筋对梁体施加预应力,使受压区混凝土获得了预拉应力。若将预应力芯棒和双预应力混凝土结构的特点结合于一体,就可以在不降低预应力度的前提下减小截面应力梯度,预应力混凝土梁中预应力过大引起的一系列问题就能得到很好的解决,由此便产生了 2 次施加预应力技术的构思^[11]。

如图 1 所示,2 次施加预应力技术的基本原理是:先浇筑梁体受拉区中间部分混凝土 a(1 期混凝土),施加 1 期预应力,并使先浇梁在 1 期预应力作用下处于轴心受压状态;然后在先浇梁的基础上现浇梁体剩余部分混凝土 b(2 期混凝土),再施加 2 期预应力,使两期混凝土紧密结合在一起形成一种新型结构形式,即 2 次预应力组合梁。由于一期预应力对 2 期混凝土截面的作用很小,这样就在保证截面下缘有足够预应力储备的前提下分散了结构中的预应力度,降低了截面的应力梯度,梁的初始上拱值就会明显减小,从而使得残余徐变上拱的问题得到有效的解决。

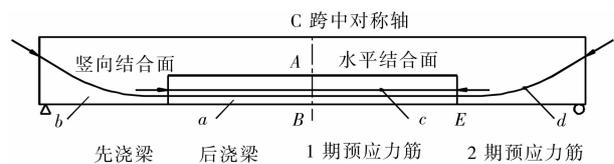


图 1 2 次施加预应力技术基本原理图

2 高速铁路 2 次预应力简支组合梁设计实例

2.1 设计思路

预应力混凝土箱梁因跨越能力大、整体性好、横竖向刚度大、抗扭性能优良等特点而成为高速铁路桥梁首选梁型,我国的高速铁路建设中,尤以 24 m 和 32 m 简支箱梁应用最为广泛,并根据实际需要设计成单线箱梁、双线组合箱梁或双线整体箱梁等不同形式^[12-13]。根据这一特点,笔者以高速铁路 32 m 箱梁为例进行 2 次预应力简支组合梁的设计和应力与变形分析。设计参考了 250 km/h 的客运专线双线有碴箱梁通用图通桥 2227-II^[14],即结构尺寸采用通桥 2227-II,普通钢筋配置也与通桥 2227-II 完

全相同,但按无碴轨道梁进行预应力筋配筋设计;由于2次预应力组合梁是1种1次受力的叠合结构,其设计计算与常规的整体浇筑预应力混凝土梁类似,但需验算2期混凝土结合面的抗剪强度^[15]。

2.2 设计基本资料

1)跨径:标准跨径 $L = 32\text{ m}$,计算跨径 $L_0 =$

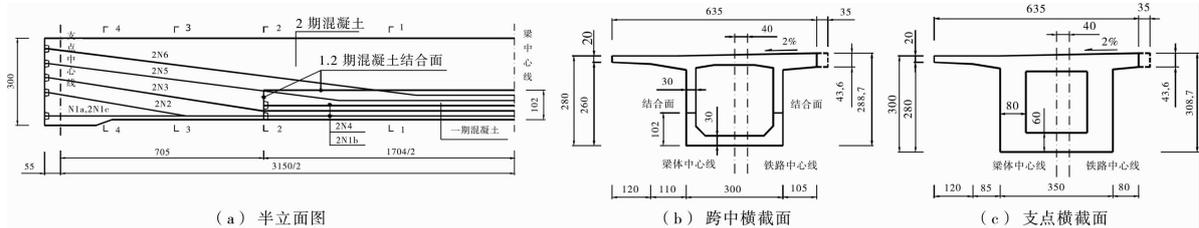


图 2 2次预应力组合梁构造和预应力筋布置/cm

3)设计荷载:梁体自重按 25 kN/m^3 计算,2期恒载按单线直线梁为 92 kN/m 计算,活载采用 ZK 标准活载^[1],如图 3 所示;

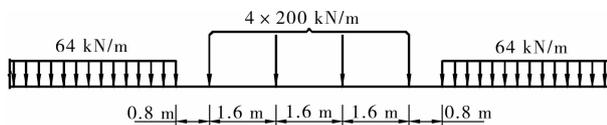


图 3 ZK 标准活载图式

4)动力系数:按文献^[1]的规定取值,计算公式如下

$$\text{计算剪力时: } \varphi_1 = \frac{0.996}{\sqrt{L_\varphi} - 0.2} + 0.913 \quad (1)$$

$$\text{计算弯矩时: } \varphi_2 = \frac{1.494}{\sqrt{L_\varphi} - 0.2} + 0.851 \quad (2)$$

式中, φ_1 、 φ_2 分别为剪力动力系数和弯矩动力系数; L_φ 为加载长度, m; 当 $L_\varphi < 3.61\text{ m}$ 时按 3.61 m 计,简支梁时 L_φ 为梁的跨度;

5)安全系数:强度安全系数 K 不小于 2.0,抗裂安全系数 K_f 不小于 1.2^[16];

6)主要材料:混凝土等级为 C50,预应力筋采用 1860 级 $\Phi 15.24\text{ mm}$ 的钢绞线,张拉控制应力为 1395 MPa ,非预应力筋采用 HRB335 级 $\Phi 12\text{ mm}$ 的热轧带肋钢筋,配置数量与通桥 2227-II 相同;

7)施工:采用后张法施工,混凝土养护 14 d 后施加预应力,1、2 期混凝土龄期差为 60 d,2 期预应力筋张拉锚固后 60 d 施加 2 期恒载;

8)预应力损失计算:锚口及喇叭口损失按控制应力的 6.1% 计算,预应力筋孔道采用抽拔管成孔,管道摩擦系数取 0.628 5,管道偏差系数取 0.001 32,其它各项损失按文献^[16]的规定计算。

31.5 m;

2)主要结构尺寸:截面类型为两片单箱简支箱梁并置组合而成,单片箱梁顶宽 6.35 m,两片单箱间湿接缝宽 70 cm;跨中截面梁高 2.8 m,箱梁底宽 3 m,腹板、底板厚度均为 30 cm,顶板厚 28.6 cm,其余详细尺寸如图 2 所示;

2.3 先浇梁截面尺寸的确定和预应力筋配筋方案

从受力和方便施工的角度分析,确定先浇梁高度为 1.02 m,长度为 17.4 m,如图 4 所示;预应力筋配筋方案共设计了 4 种,各配筋方案预应力筋用量如表 1 所示,先浇梁跨中截面预应力筋布置如图 4 所示,N1b 和 N4 为一期预应力筋,其余为 2 期预应力筋,从竖向结合面截面到支点截面预应力筋配置较少,为了满足斜截面抗剪的需要,对 2 期预应力筋的弯起点和弯起角度进行了适当调整,即弯起点向跨中移动,弯起角度适当增大。

表 1 各配筋方案预应力筋用量/根

方案编号	1 期	2 期	总量
1	32	99	131
2	32	103	135
3	36	99	135
4	48	99	147

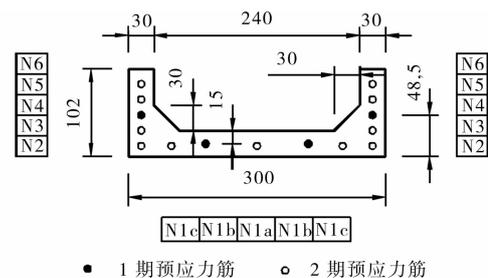


图 4 先浇梁跨中预应力筋布置/cm

3 2次预应力简支组合梁应力分析

3.1 正截面应力分析

把 2 次预应力组合梁的施工分为 5 个阶段:1)施

加 1 期预应力;2)施加 2 期预应力;3)自重作用;4)施加 2 期恒载;5)活载作用。根据设计基本资料和预应力筋配筋方案,计算得到各施工阶段跨中正截面和竖向结合面处正截面应力如图 5 所示,截面应力梯度如

表 2 所示,预应力度、正截面的强度安全系数与抗裂安全系数如表 3 所示。在竖向结合面截面抗裂安全性计算时,考虑到接缝处抗裂性的降低,根据文献 [16]的条文说明,不再计入混凝土塑性的影响。

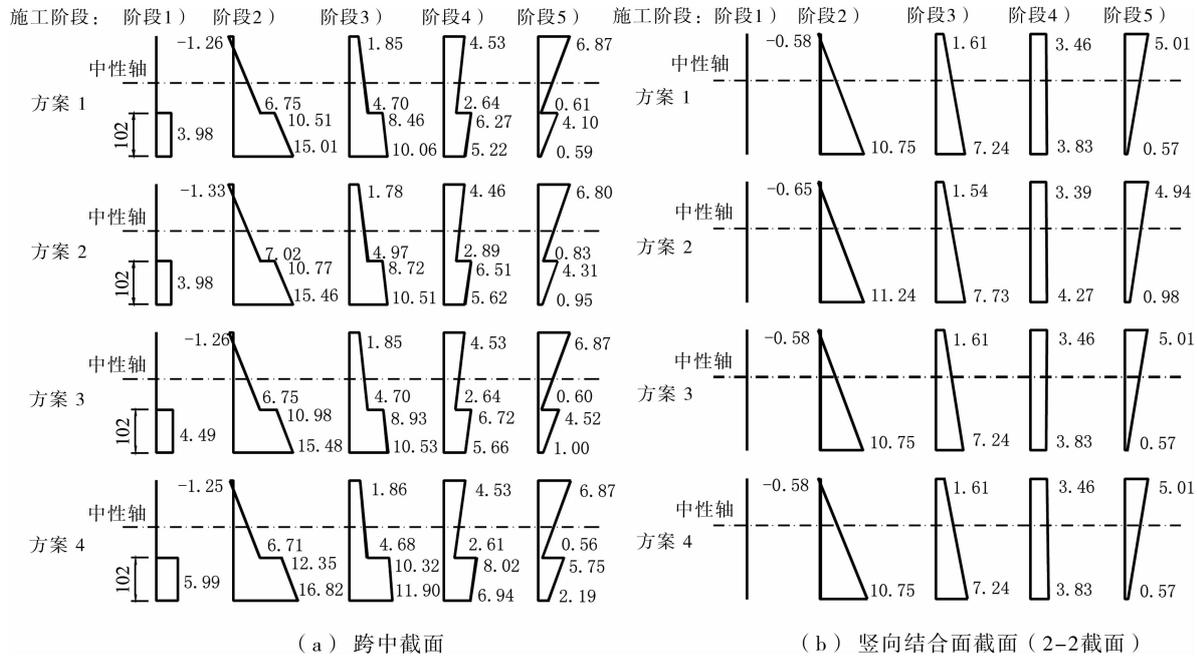


图 5 2 次预应力组合梁正截面应力/MPa

表 2 截面应力梯度/(MPa·m⁻¹)

方案编号	施加 2 期预应力后		自重作用后		施加 2 期恒载后	
	跨中	竖向结合面	跨中	竖向结合面	跨中	竖向结合面
1	4.410	3.995	1.567	1.986	-1.036	0.130
2	4.598	4.191	1.755	2.183	-0.867	0.310
3	4.409	3.995	1.567	1.986	-1.039	0.130
4	4.385	3.995	1.552	1.986	-1.059	0.130

表 3 预应力度、正截面强度安全系数和抗裂安全系数

方案编号	预应力度		强度安全系数		抗裂安全系数		
	全截面	2 期截面	跨中	竖向结合面	跨中全截面	跨中 2 期截面	竖向结合面
1	1.05	1.12	2.28	2.36	1.41	1.86	1.41
2	1.08	1.16	2.35	2.45	1.44	1.90	1.45
3	1.08	1.12	2.35	2.36	1.44	1.86	1.41
4	1.17	1.12	2.54	2.36	1.54	1.86	1.41

由表 2、表 3 和图 5 可知:2 次预应力组合梁因为分散了预应力度,截面应力梯度小,受力更均匀;跨中截面的应力梯度在施加 2 期恒载后变为负值,竖向结合面截面的应力梯度在施加 2 期恒载后也只有 0.13~0.31 MPa/m,这对于控制梁的徐变上拱非常有利;方案 2 和方案 3 预应力筋总量相同,但 1、2 期预应力分配比例不同,随 1 期预应力筋用量的

增加,先浇梁截面压应力储备值增加,跨中全截面预应力度提高,但跨中 2 期截面下缘压应力储备值和抗裂安全系数不变,即 1 期预应力的增加对 2 期截面抗裂性并不产生影响;竖向结合面截面的强度和抗裂安全性与 1 期预应力筋用量增加无关,只与 2 期预应力筋用量有关。

3.2 斜截面强度验算

斜截面强度验算时选取了 4 个有代表性的斜截面,第 1 个斜截面顶端通过先浇梁 4 分点位置的正截面(即 1-1 截面),称为 X-1 斜截面,第 2 个斜截面的顶端通过竖向结合面位置的正截面(即 2-2 截面),称为 X-2 斜截面,第 3 个斜截面顶端通过腹板厚度变化位置处的正截面(即 3-3 截面),称为 X-3 斜截面,第 4 个斜截面顶端通过 4-4 截面,为支点处斜截面承载力的控制截面,称为 X-4 斜截面,4 个斜截面抗弯强度安全系数和抗剪强度安全系数如表 4 所示。

由计算结果和表 4 可知:X-1 斜截面的斜裂缝向支点方向延伸时通过竖向结合面,故 1 期预应力对 X-1 斜截面抗弯强度和抗剪强度的作用均比较弱(表 4 中按偏安全的计算,忽略了 1 期预应力的影响),即 1 期预应力对斜截面承载力作用比较弱,其作用仅限于跨中附近斜截面;X-2、X-3、X-4 3 个斜截面都在竖向结合面以外,其斜截面强度均只受 2 期预应力影响,与 1 期预应力无关;从竖向结合面截面到支点截面之间预应力筋配置较常规预应力混凝土梁显著减少,但在不增大截面的情况下通过调整 2 期预应力筋的弯起点位置与弯起角度,其斜截面承载力仍然能满足要求。

表 4 斜截面强度安全系数

配筋方案	X-1 斜截面		X-2 斜截面		X-3 斜截面		X-4 斜截面	
	抗弯	抗剪	抗弯	抗剪	抗弯	抗剪	抗弯	抗剪
1	2.18	5.88	2.65	3.29	3.77	3.10	6.27	2.79
2	2.27	5.97	2.74	3.37	3.90	3.17	6.49	2.86
3	2.18	5.88	2.65	3.29	3.77	3.10	6.27	2.79
4	2.18	5.88	2.65	3.29	3.77	3.10	6.27	2.79

3.3 水平结合面剪应力和主应力分析

水平结合面抗剪强度 τ_u 按叠合结构专题科研组提出的预应力混凝土叠合梁的叠合面抗剪强度公式计算,计算公式为^[6]:

$$\tau_u = \alpha_\tau f_t + 0.9 \rho_{sv} f_y \quad (3)$$

式中, α_τ 为综合影响系数, $\rho_{sv} < 0.1\%$ 时, $\alpha_\tau = 1.25$; $\rho_{sv} > 1\%$ 时, $\alpha_\tau = 2.5$, ρ_{sv} 为中间值时用内插法求得; f_t 为混凝土抗拉设计强度; ρ_{sv} 为箍筋配筋率; f_y 为箍筋抗拉设计强度。

各配筋方案的 2 次预应力组合梁水平结合面抗剪强度和剪应力如表 5 所示,水平结合面上 2 期混凝土截面下缘、水平结合面下 1 期混凝土截面上缘主应力如表 6 所示。

表 5 水平结合面抗剪强度和剪应力/MPa

配筋方案	水平结合面抗剪强度				水平结合面剪应力	
	箍筋配筋率/%	混凝土抗剪强度	箍筋抗剪强度	总抗剪强度	先浇梁 4 分点	先浇梁端部
1	0.712	3.969	1.794	5.763	0.069	0.621
2	0.712	3.969	1.794	5.763	0.020	0.519
3	0.712	3.969	1.794	5.763	0.069	0.621
3	0.712	3.969	1.794	5.763	0.069	0.621

表 6 水平结合面上下混凝土主应力

配筋方案	点的位置	1-1 截面		2-2 截面跨中一侧		2-2 截面支点一侧		3-3 截面		4-4 截面	
		主拉	主压	主拉	主压	主拉	主压	主拉	主压	主拉	主压
1	面上	0.017	0.272	0.040	1.496	0.038	1.620	0.791	3.496	0.126	2.370
	面下	0	3.766	0.012	5.004	0.038	1.620	0.791	3.496	0.126	2.370
2	面上	0	0.478	0.012	1.699	0.011	1.832	0.828	3.767	0.103	2.466
	面下	0	3.974	0.004	5.213	0.011	1.832	0.828	3.767	0.103	2.466
3	面上	0.018	0.257	0.039	1.537	0.038	1.620	0.791	3.496	0.126	2.370
	面下	0	4.182	0.011	5.475	0.038	1.620	0.791	3.496	0.126	2.370
4	面上	0.025	0.192	0.042	1.442	0.038	1.620	0.791	3.496	2.370	0.126
	面下	0	5.376	0.009	6.629	0.038	1.620	0.791	3.496	2.370	0.126

注:2-2 截面支点一侧、3-3 截面和 4-4 截面的数值为与水平结合面相同高度位置处的主应力

由表 5、表 6 可知:水平结合面的抗剪强度满足要求;2 期混凝土截面下缘和 1 期混凝土截面上缘的主拉应力不超过混凝土轴心抗拉极限强度(3.1 MPa^[16]),主压应力不超过混凝土轴心抗压强度的 0.6 倍(20.1 MPa^[16]),也满足要求。

4 2 次预应力筒支组合梁徐变上拱变形分析

预应力混凝土结构徐变分析方法主要有按龄期调整的有效模量法^[17]、扩展 Dischinger 法^[18]等。其中,按龄期调整有效模量法可应用于变化的弹性模量和无限界的徐变,与有限元法相结合,使混凝土结构的收缩徐变计算能够采用更逼近实际的有限单元法,应用最为广泛。近年来一些研究机构和学者针对轨道交通桥梁结构进行了混凝土徐变的研究,中国铁道科学研究院提出了估算无碴轨道梁施加 2 期恒载后徐变上拱的公式^[19]如下:

$$f(t, t_2) = \left[\frac{f_{pi} + f_{pe}}{2} - f_g \right] \cdot$$

$$[\varphi(t, t_1) - \varphi(t_2, t_1)] - f_d \cdot \varphi(t, t_2) \quad (4)$$

式中: f_{pi} 为初始预应力引起的弹性变形; f_{pe} 为有效预应力引起的弹性变形; f_g 、 f_d 分别为梁自重与 2 期恒载引起的弹性变形; t 为变形计算开始时刻; t_1 、 t_2 分别为施加预应力和铺设线路(施加 2 期恒载)时混凝土的龄期。文献[20]将按龄期调整的有效模时法与有限元法相结合,建立了考虑预应力损失的混凝土梁徐变计算方法;文献[21-22]对轨道交通预应力混凝土梁施工阶段徐变变形进行了时随全过程分析;文献[23-25]基于按龄期调整模量法,编制了步进法时随有限元分析程序,实现了轨道交通预应力混凝土梁徐变变形的时随全过程分析,提出了综合考虑混凝土种类、预应力筋张拉方式、钢筋配筋率及截面上下缘应力差的轨道交通预应力梁徐变变形的设计建议。

2 次预应力组合梁不同混凝土龄期部分截面的恒载应力是不相同的,龄期的不同和恒载应力的差

异,导致纵向纤维的收缩徐变变形不协调,受共同变形的约束,徐变变形不能象常规预应力结构那样与弹性变形保持线性关系。其计算原理是根据 2 期恒载施加完毕的时刻 t_0 至以后任一时刻 t 的时间间隔内,先浇梁与后浇梁的曲率变化相容条件,全截面内力不变以及应变变形协调条件,计算出截面的内力增量(公式详见文献[11]和文献[26]),然后求出截面的曲率增量,从而,通过曲线拟合的方式计算出变形增量^[27-28]。

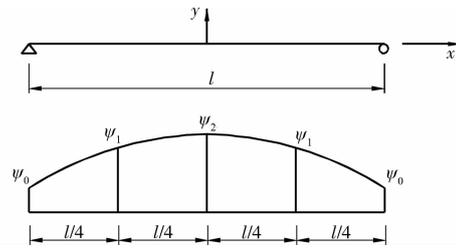


图 6 2 次预应力组合梁徐变增量计算简图

如图 6 所示,假定曲率增量曲线为

$$\Delta\psi(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (5)$$

代入已知的 5 点曲率增量条件可求解,然后根据公式和边界条件得到挠度增量曲线

$$\begin{aligned} \Delta f(x) = & \frac{128(\psi_1 - \psi_2) - 32(\psi_0 - \psi_2)}{45l^4} x^6 + \\ & \frac{(\psi_0 - \psi_2) - 16(\psi_1 - \psi_2)}{9l^2} x^4 - \frac{\psi_2}{2} x^2 + \\ & \frac{\psi_0 + 16\psi_1 + 13\psi_2}{240} l^2 \end{aligned} \quad (6)$$

从而,由徐变而引起的跨中挠度增量为

$$\Delta f_{中} = \frac{\psi_0 + 16\psi_1 + 13\psi_2}{240} l^2 \quad (7)$$

现以预应力度最大的配筋方案 4 为例,计算配筋完全相同的常规预应力混凝土筒支梁和 2 次预应力筒支组合梁的徐变上拱值,常规预应力混凝土梁采用式(4)计算,考虑一定的安全储备,2 期恒载取 1.2 的安全系数,计算结果如表 7 所示。

表 7 常规预应力混凝土梁与 2 次预应力组合梁的徐变上拱值对比/mm

结构形式	1、2 期混凝土龄期差/d	预应力筋传力锚固时上拱	施加预应力时混凝土龄期为 7 d		施加预应力时混凝土龄期为 14 d		施加预应力时混凝土龄期为 28 d	
			W_1	W_2	W_1	W_2	W_1	W_2
			常规梁	—	13.3	28.1	9.3	24.7
2 次梁	60	5.7	14.9	4.1	14.1	3.3	13.2	2.7
		(42.8%)	(53.0%)	(44.1%)	(57.1%)	(44.6%)	(61.1%)	(45.8%)
2 次梁	90	5.7	13.3	3.3	12.7	2.7	12.1	2.2
		(42.8%)	(47.3%)	(35.5%)	(51.4%)	(36.5%)	(56.0%)	(37.3%)

注: W_1 和 W_2 分别为施加 2 期恒载前后跨中终极徐变上拱值;括号内的数字为 2 次梁与常规梁的徐变上拱值之比。

由表7可知:预应力筋传力锚固时,2次预应力组合梁因截面应力梯度小,跨中上拱值仅为常规预应力混凝土梁的42.8%;自重作用后,2次预应力组合梁的残余徐变上拱值也只有常规梁的47.3%~61.1%;施加2期恒载后,常规预应力混凝土梁的残余徐变上拱值超过无碴轨道桥梁的施工实际控制值7 mm^[12],而2次预应力梁的残余徐变上拱值却大幅减小54.2%以上,只有2.2~4.1 mm,完全满足无碴轨道线路的要求;2次预应力组合梁的徐变上拱值不受施加预应力时混凝土龄期的限制,均可以满足要求,因此,在施工中只要混凝土强度达到施加预应力的要求就可以尽早张拉预应力筋,从而加快张拉台座和梁槽的周转速度,提高生产效率和施工企业的经济效益。

5 2次预应力简支组合梁经济性分析

各配筋方案的2次预应力组合梁是采用了2次施加预应力技术的无碴轨道梁,与常规预应力混凝土结构32 m双线无碴轨道箱梁通用图通桥2328-II进行经济对比,如表8所示。

表8 2次预应力组合梁与通桥2328-II经济对比

方案编号	跨中梁高/ m	混凝土		预应力筋	
		用量/m ³	对比	用量/t	对比
通桥2328-II	3.05	172.63	100%	5.056	100%
1	2.8	165.08	95.6%	4.411	87.2%
2	2.8	165.08	95.6%	4.562	90.2%
3	2.8	165.08	95.6%	4.496	88.9%
4	2.8	165.08	95.6%	4.751	94.0%

注:预应力筋数量为直线梁时的用量。

由表8可知:有碴轨道箱梁在采用了2次施加预应力技术之后应用于无碴轨道不仅可以减小梁的徐变上拱约55%~65%,而且可以降低梁的建筑高度0.25 m(亦即可以提高桥下净空0.25 m),减少梁体混凝土方量4.4%,节约预应力筋6.0%~12.8%,经济指标更好。

6 结论

1)2次预应力简支组合梁截面应力梯度小,受力合理,与常规预应力混凝土简支梁相比,混凝土徐变上拱减少约40%~60%,可有效解决预应力混凝土梁徐变上拱大的技术难题;

2)2次预应力简支组合梁从竖向结合面到支点截面之间预应力筋配置比相同条件下的常规梁显著

减小,但通过调整2期预应力筋的弯起点和弯起角度可以使斜截面承载力满足要求,无需扩大截面尺寸;

3)2次预应力组合梁水平结合面抗剪能力相对薄弱,但与常规梁相比,在不增加截面尺寸与箍筋配筋率的情况下,水平结合面抗剪能力仍然能满足要求;

4)2次预应力组合梁在减少梁的徐变上拱的同时,可以降低梁的建筑高度,提高桥下净空,节省一定数量的混凝土和10%左右的预应力筋,技术经济优势明显;

5)2次预应力组合梁徐变上拱变形受施加预应力时混凝土龄期的影响小,故可以尽早进行张拉预应力筋施工,加快张拉台座和梁槽的周转速度,缩短施工工期,提高生产效率和经济效益。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准. 新建时速300-350公里客运专线铁路设计暂行规定[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- [2] BASTOS J N. Innovation aspects of the new oporto railway bridge[J]. FIP notes, 1992(2): 5-8.
- [3] 徐美庚,王凤葛. 高速铁路预应力混凝土简支桥梁徐变上拱控制初探[J]. 中国铁路,1999(11):19-22. XU MEI-GENG, WANG FENG-GE. Camber control of high-speed railway prestressed concrete simple-span beam[J]. China Railway,1999(11):19-22.
- [4] 周建民. 预应力混凝土梁上拱度的预测与控制[J]. 上海铁道大学学报,1997(4):32-36. ZHOU JIAN-MIN. Control and forecast for camber of prestressed concrete beam [J]. Journal of Shanghai Tiedao University,1997(4):32-36.
- [5] 刘建瑞,陈良江. 无碴轨道预应力混凝土梁设计研究[J]. 铁道标准设计,2001,21(9):10-12. LIU JIAN-RUI, CHEN LIANG-JING. Design research of ballastless track prestressed concrete beam [J]. Railway Standard Design,2001,21(9):10-12.
- [6] 王巍,薛伟辰. 高速客运专线轨道梁徐变变形研究进展[J]. 铁道科学与工程学报,2005,2(4):39-43. WANG WEI, XUE WEI-CHEN. Study progress on creep deformation of high-speed dedicated passenger railway track girders[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005,2(4):39-43.
- [7] 邵旭东,刘海波,李立峰. 二次预应力技术应用于桥梁结构的探索研究[J]. 公路,2003(3):89-92. SHAO XU-DONG, LIU HAI-BO, LI LI-FENG. Explorative research on double prestress technique applied to bridge structure[J]. Highway, 2003(3): 89-92.
- [8] BURNS N. Development of continuity between precast prestressed concrete beams[J]. Journal of PCI, 1966, 11(3):23-37.

- [9] SHAIKH A F, BRANSON D E. Non-tensioned steel in prestressed concrete beams[J]. Journal of PCI, 1970, 15(3):14-37.
- [10] BEN C, GRWICH J R. Construction of prestressed concrete structure[M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [11] 邵旭东, 张伟, 彭聪, 等. 二次预应力梁的徐变和承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(39):81-86.
SHAO XU-DONG, ZHANG WEI, PENG CONG, et al. An experimental study on the creep behavior and bearing capacity of twice prestressed concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(8):81-86.
- [12] 邓运清. 高速铁路简支箱梁设计研究[J]. 铁道标准设计, 2004(7):125-129.
- [13] 王召祐. 客运专线桥梁设计研究[J]. 铁道标准设计, 2005(4):26-31.
WANG ZHAO-HU. Study of design for passenger dedicated railway bridge[J]. Railway Standard Design, 2005, (4):26-31.
- [14] 夏建中. 客运专线铁路预应力混凝土简支箱梁通用参考图简介[J]. 铁道标准设计, 2006(11):90-93.
XIA JIAN-ZHONG. Introduction of common drawing of prestressed concrete simply support-ed girder for passenger dedicated railway [J]. Railway Standard Design, 2006(11):90-93.
- [15] 薛伟辰, 杨云俊. 混凝土叠合梁受力性能与设计方法研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(1): 44-48.
XUE WEI-CHEN, YANG YUN-JUN. Research advances on mechanical behaviors and design method of composite concrete beam [J]. China Concrete and Cement Products, 2008(1): 44-48.
- [16] TB 1002.3-2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- [17] BAZANT Z P. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method[J]. ACI Proceedings, 1972, 69(4):212-217.
- [18] BAZANT Z P, OSMAN E. On the choice of creep function for standard recommendations on practical analysis of structures [J]. Cement and Concrete Research, 1975, 5 (2):129 -138.
- [19] 高速铁路无碴轨道预应力混凝土箱型简支梁徐变上拱的限值与控制[R]. 北京:铁道部科学研究院, 1998.
- [20] 文永奎, 陈政清. 考虑预应力损失的混凝土梁徐变计算方法[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(3):36-41.
WEN YONG-KUI, CHEN ZHENG-QING. Creep calculation method of concrete bridge considering the loss of prestressing force[J]. China Railway Science, 2005, 26(3):36-41.
- [21] 薛伟辰, 王巍, 任廷柱. 准高速客运专线轨道梁施工阶段的徐变性能[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40 (6): 138-143.
XUE WEI-CHEN, WANG WEI, REN TING-ZHU. Creep behavior of quasi-high-speed dedicated passenger railway track girders during construction[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40 (6):138-143.
- [22] 薛伟辰, 王巍. 轨道交通预应力混凝土梁施工阶段徐变性能试验研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(1):53-59.
XUE WEI-CHEN, WANG WEI. Study on creep behavior of prestressed concrete beams for rail transportation during construction stage[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(1):53-59.
- [23] 薛伟辰, 王巍. 城市轻轨预应力混凝土轨道梁徐变性能试验研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(6):94-98.
XUE WEI-CHEN, WANG WEI. Experimental study on creep behaviors of urban light rail prestressed concrete track girders[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(6):94-98.
- [24] 薛伟辰, 胡于明, 王巍. 预应力混凝土梁徐变性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4):61-66.
XUE WEI-CHEN, HU YU-MING, WANG WEI. Experiment study on creep behaviors of prestressed concrete beam [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4):61-66.
- [25] 薛伟辰, 王巍, 任廷柱, 等. 准高速客运专线轨道梁的徐变性能[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(4):434-440.
XUE WEI-CHEN, WANG WEI, REN TING-ZHU, et al. Creep behavior of track girders on quasi-high-speed dedicate passenger railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(4):434-440.
- [26] DENG JUN, SHAO XU-DONG, LI LI-FENG, et al. Experimental research on the creep behavior of twice prestressed concrete beam[J]. Structural Engineering International, 2006, 16(1):53-58.
- [27] 邵旭东, 李立峰, 张伟. 二次预应力组合结构试验研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1):75-79.
SHAO XU-DONG, LI LI-FENG, ZHANG WEI. Test study of double pre-stressed composite structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 75-79.
- [28] 邵旭东, 邓军, 李立峰, 等. 二次预应力超薄梁徐变效应试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(4):53-56.
SHAO XU-DONG, DENG JUN, LI LI-FENG, et al. Experimentgal research on creep effects of twice prestressed low hight beam[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(4):53-56.

(编辑 王秀玲)