

文章编号: 1674—8247(2021)06—0032—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.06.007

欧洲标准宽轨距有砟轨道混凝土轨枕设计方法研究

卢野 邓希

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:目前,部分海外项目采用了与我国标准轨距不同的宽轨距,其具有枕中负弯矩较大的结构受力特点,与我国传统的轨枕设计方法不同。本文研究了欧洲标准宽轨距有砟轨道混凝土轨枕设计方法,并以某海外项目1 676 mm宽轨距有砟轨道预应力混凝土轨枕设计为例,通过设计检算和室内试验验证了设计方法的可行性,同时给出了轨枕动压力、特征弯矩计算与钢筋预应力损失的推荐计算方法,研究结论可为类似海外项目轨枕设计提供借鉴与参考。

关键词:轨枕;有砟轨道;结构设计;宽轨距;欧洲标准

中图分类号:U213.3⁺4 **文献标志码:**A

A Study on Design Method of Concrete Sleepers for Ballasted Tracks with Broad Gauge Conforming to European Standards

LU Ye DENG Xi

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: At present, some overseas projects have adopted a broad gauge that is different from the standard gauge in China, and it has the structural stress characteristic of large negative bending moment in the sleeper, which is different from the traditional sleeper design method in China. In this paper, the design method of concrete sleepers for the ballasted track with European standard broad gauge is studied. Taking the design of prestressed concrete sleepers for the ballasted track with 1 676 mm broad gauge in an overseas project as an example, the feasibility of the design method is verified by design check and laboratory test. At the same time, the recommended calculation methods of sleeper dynamic pressure, characteristic bending moment calculation and prestress loss of reinforcement are given. The conclusions can provide a reference for the sleeper design of similar overseas projects.

Key words: sleepers; ballasted track; structural design; broad gauge; European standards

轨枕是铁路轨道结构的重要组成部分,经过多年的发展,混凝土轨枕已成为最主要的应用形式^[1]。目前铁路发展水平较高的国家均已建立各自的混凝土轨枕标准体系^[2]。

近年来,在国家“一带一路”倡议及中国铁路“走出去”的战略下,中国企业承担的海外项目越来越多。

欧洲的EN标准是目前海外项目采用的主流标准之一,与中国标准相比,设计时虽然都是针对轨下和枕中截面,经过枕上动压力计算、设计弯矩计算、应力检算、试验验证等步骤,但在具体设计方法和判定标准上存在显著差异。同时,部分地区采用了与国内标准轨距不同的宽轨距,轨距和轨枕长度的增加使得轨枕受力

收稿日期:2021-03-01

作者简介:卢野(1991-),男,工程师。

引文格式:卢野,邓希.欧洲标准宽轨距有砟轨道混凝土轨枕设计方法研究[J].高速铁路技术,2021,12(6):32-36.

LU Ye, DENG Xi. A Study on Design Method of Concrete Sleepers for Ballasted Tracks with Broad Gauge Conforming to European Standards[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(6):32-36.

特点与标准轨距轨枕不同,国内既有设计经验较少。

本文根据某海外项目的建设需求,以 1 676 mm 宽轨距有砟轨道混凝土轨枕设计为例,研究了基于欧洲标准的有砟轨道轨枕设计方法,研究结论可为类似海外项目轨枕设计提供借鉴与参考。

1 设计方法

本文在混凝土轨枕设计时主要执行欧洲标准委员会(CEN)发布的 EN 13230《铁路应用—轨道—混凝土轨枕和岔枕》系列标准,该系列标准按照一般要求及不同类型轨枕的特殊要求分为一般要求、整体式预应力混凝土轨枕、双块式混凝土轨枕、预应力混凝土岔枕、特殊部件(包括桥枕、无砟轨道板、双块轨枕、电务枕等)和轨枕设计 6 个部分。其中轨枕设计标准是根据 UIC 713R《整体式混凝土轨枕设计方法》^[3] 提升而来,本文在设计时也参考了该规范。

1.1 设计动荷载计算

欧洲标准中混凝土轨枕设计枕上垂直动压力的计算公式为:

$$P_k = \frac{A_{nom}}{2} (1 + k_p k_v) k_d k_r \quad (1)$$

式中: P_k ——轨枕枕上垂直动荷载(kN);

A_{nom} ——设计轴重(kN);

k_p ——扣件弹性衰减系数,该系数与扣件系统的减振性能有关,垫板属于低衰减类型时,取 1.0;属于中等衰减类型时,取 0.89;属于高衰减类型时,取 0.78。 k_p 虽然与扣件垫板的刚度相关,但其衰减类型是根据 EN 13146-3 中相关试验多次结果的平均值所确定的;

k_v ——速度系数,当 $V \geq 200$ km/h 时, $k_v = 0.75$;当 $V < 200$ km/h 时, $k_v = 0.25 + (V - 60)/280$;

k_d ——纵向荷载分配系数,可用弹性基础上的 Winkler 梁等模型通过理论计算得到,欧洲标准给出 60E1 钢轨对应的理论计算典型值为 0.38。同时也提到在典型的地层条件下当钢轨不轻于 46 kg/m 且轨枕间距不大于 65 cm 时,该值也可取为常数 0.5。无论是理论算法或推荐取值均与我国规范中轮重分配系数^[4] 在 0.39~0.48 范围基本吻合。考虑到轨枕设计寿命较长,运营过程中的道床质量和状态在不断变化,本文设计时采用偏保守的常数 0.5 带入计算;

k_r ——支承缺陷引起的纵向荷载分配影响系数,取 1.35。

1.2 设计弯矩计算

在列车运行过程中,轨枕主要受到弯矩的作用,欧洲标准提出混凝土轨枕设计的典型截面为轨下截面和枕中截面,因此,根据上述两个截面的特征弯矩进行结构设计和检算。

特征弯矩的计算受轨枕下部道砟的状态和分布方式等影响较大。本文结合 UIC 713R 的规定,在计算轨下截面正弯矩时,采用的弯矩计算图示如图 1(a) 所示,而在计算枕中负弯矩时,考虑到宽轨距条件下动荷载作用点横向间距较大,且轨枕较长,枕中负弯矩对结构设计的控制作用更为明显,设计时一般采用收腰型底面形状来减小这种影响,采用的弯矩计算图示如图 1(b) 所示,以更准确地反应轨枕底部的道砟支撑特征。

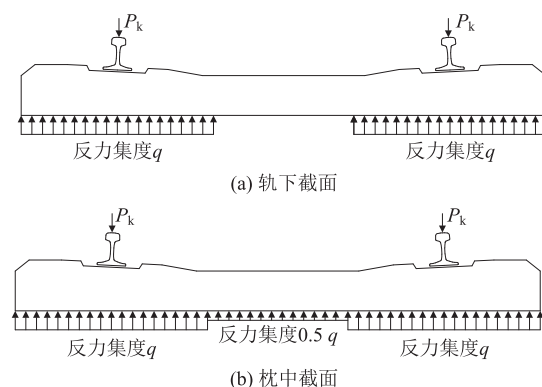


图1 特征弯矩计算模型图

轨下截面设计正弯矩可从弯矩计算图示中推导出,计算公式如下:

$$M_{dr+} = \gamma_i P_d \lambda / 2 \quad (2)$$

式中: M_{dr+} ——轨下截面设计正弯矩(N·m);

γ_i ——轨枕纵向承托装置的不规则性引起的弯曲力矩的动态增量,典型值为 1.6;

P_d ——轨枕垂直动压力(N);

λ ——有效杆臂长度,可通过承轨槽轴线与轨枕端部之间的距离、承轨槽宽度等参数计算(m)。

轨下截面设计负弯矩:

$$M_{dr-} = 0.5 M_{dr+} \quad (3)$$

在枕中截面设计负弯矩 M_{dc-} 时,考虑到轨枕底部的收腰型设计会呈现出两边宽中间窄的特征,计算时参考 UIC 713R 对标准轨距轨枕负弯矩计算的基本思路,假定轨枕底部道床反力面集度相同,线集度与轨枕底面的宽度成正比,由此推导出枕中截面设计正

弯矩:

$$M_{dc+}=0.7M_{dc-} \tag{4}$$

1.3 预应力损失计算

为提高结构抗弯能力,混凝土轨枕大多采用了预应力结构,受弯过程中的拉应力主要由钢丝的预应力以及混凝土自身的抗弯拉强度承受。在混凝土轨枕的设计寿命期内,预应力不可避免地发生损失,从而影响到结构的抗弯能力。

根据 EN 13230-6 的规定,初期钢筋预应力损失是由于轨枕的弹性收缩、钢筋松弛、混凝土徐变收缩等因素造成的^[5]。钢筋总预应力损失可根据 BS EN 1992《钢筋混凝土结构设计》计算或采用估算法,将预应力总损失估算为 25%,这与我国轨枕检算时经验取值 20%~25% 是相符的^[6]。

根据文献[7]中的欧洲标准钢筋预应力损失计算方法,本文计算得到的预应力损失结果如表 1 所示,估算法的结果相对保守。

表 1 预应力损失理论计算结果表

项目	初始张拉应力	一期损失	总损失
预应力大小/kN	430	369	357
损失比例/%	0	14.2	17.0

由于预应力损失与材料特性、张拉工艺以及运营环境等多因素相关,各项损失的具体数值难以准确计算,且轨枕的设计寿命较长,因此本文在设计时根据欧洲标准计算一期损失,而总损失采用估算法,取为 25%。

1.4 正常使用极限状态混凝土拉应力检算

通常而言,轨枕的设计最小使用年限为 40 年,EN 13230-6 要求在轨枕的整个服役期内,混凝土最大拉应力不应超过混凝土疲劳强度,其表达式如下:

$$\sigma_{ct,max} = \frac{N_p(t=40\text{年})}{A} \frac{N_p(t=40\text{年}) \times e_p}{W} + \frac{M_k}{W} < f_{ct,fl,fat} \tag{5}$$

式中: $N_p(t=40\text{年})$ ——40 年后钢筋中剩余的预应力(N);

A ——轨下或枕中截面换算面积(m^2);

e_p ——预应力钢筋偏心距(m);

W ——截面抵抗系数;

M_k ——外荷载引起的弯矩(设计弯矩)($\text{N}\cdot\text{m}$);

$f_{ct,fl,fat}$ ——混凝土在疲劳荷载作用下的抗弯强度(MPa)。

设计时应按照式(5)分别对轨下截面正、负弯矩和枕中截面正、负弯矩作用下的混凝土拉应力进行

检算。

1.5 试验荷载计算

根据 EN 13230-2 的试验要求,应分别对混凝土轨枕的轨下截面和枕中截面进行静态、动态和疲劳试验^[8],以轨下正弯矩试验为例,初始试验荷载 Fr_0 的计算公式如下,其余情况可参照执行。

$$Fr_0 = \frac{4M_{k,r,pos}}{L_r - 0.1} \tag{6}$$

由于轨枕裂纹萌生时的弯矩大小受试验轨枕的养护时间影响较大。因此,EN 13230-6 规定通过适当增加轨枕特征弯矩的方式来体现不同时间因素下的钢筋预应力损失与混凝土抗弯强度对试验弯矩的影响。如养护了 28 d 的混凝土在做轨下正弯矩试验时,试验正弯矩计算公式为:

$$M_{l,r,pos} = M_{k,r,pos} + [(f_{ct,fl,t=28\text{days}} - f_{ct,fl,fat}) + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40\text{years}} - \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28\text{days}})] \times W_{r,bottom} = k_t \times M_{k,r,pos} \tag{7}$$

式中: $f_{ct,fl,t=28\text{days}}$ ——28 d 后混凝土抗拉强度(MPa);

$f_{ct,fl,fat}$ ——疲劳荷载作用下混凝土抗弯强度(MPa);

$\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40\text{years}}$ ——40 年后混凝土预应力损失(N);

$\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28\text{days}}$ ——28 d 后混凝土预应力损失(N);

k_t ——通过特征弯矩计算试验弯矩系数。

设计验收试验分为静态试验、动态试验和疲劳试验 3 部分。针对轨枕不同开裂情况的试验荷载通过 Fr_0 乘以一个系数确定,不同情况下的系数取值如表 2 所示。

表 2 设计验收试验系数取值表

项目	静载试验	动载试验	疲劳试验
第一条裂缝产生时对应系数	k_t	-	-
裂缝宽度为 0.05 mm 时对应系数 $k1$	1.8	1.5	-
裂缝宽度为 0.5 mm 时对应系数 $k2$	-	2.2	-
最大试验荷载对应系数	2.5	2.5(推荐值)	2.5(推荐值)

2 轨枕设计案例

2.1 适用条件及设计参数

某海外项目宽轨距(1 676 mm)有砟轨道预应力混凝土轨枕的适用条件如表 3 所示。轨枕长 2.75 m,设计采用 10 根 $\phi 7$ mm 消除应力螺旋肋钢丝,张拉力为 430 ± 5 kN,并配备箍筋及扣件套筒处的螺旋钢筋,混凝土强度等级为 C60。钢筋保护层厚度满足

EN 13230-1的要求:底面不小于 30 mm,其余位置不小于 20 mm。其外型尺寸如图 2 所示。

表 3 宽轨距有砟轨枕适用条件表

轴重 /kN	最高行车速度 /(km/h)	钢轨类型	铺枕根数 /(根/km)
250	160	UIC 60kg	1 667

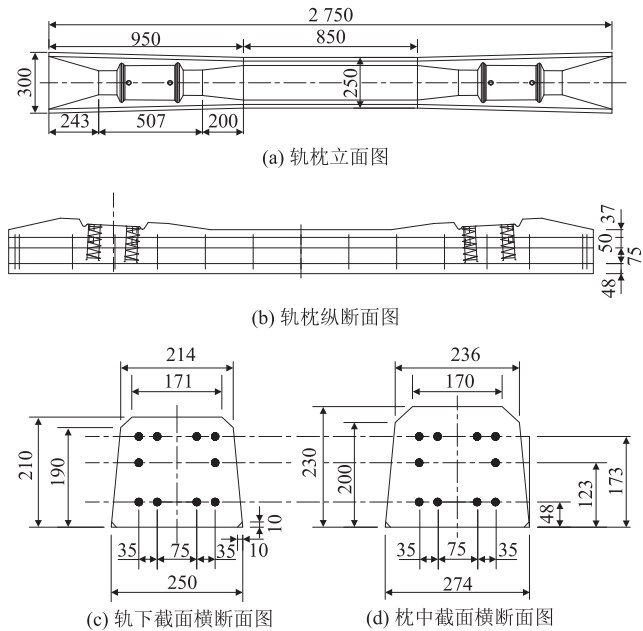


图 2 混凝土轨枕外型尺寸图 (mm)

2.2 轨枕受力参数计算

根据欧洲标准计算方法,结合宽轨距有砟轨枕的几何及材料参数,求得其受力情况如表 4 所示。

表 4 宽轨距有砟轨枕的受力参数表

项目		数值
特征荷载	枕上特征动压力/kN	117.28
特征弯矩	轨下截面正弯矩/(kN·m)	14.19
	轨下截面负弯矩/(kN·m)	7.10
	枕中截面正弯矩/(kN·m)	11.96
	枕中截面负弯矩/(kN·m)	17.09
预应力	初始张拉力/kN	430
	28 d 后预应力钢筋张拉力/kN	369
	40 a 后预应力钢筋张拉力/kN	323

2.3 轨枕应力检算

计算得到宽轨距有砟轨枕轨下截面和枕中截面分别在正、负弯矩作用下的混凝土拉应力如表 5 所示。

表 5 宽轨距有砟轨枕拉应力检算结果表

检算工况		混凝土拉应力/MPa
轨下截面	正弯矩情况下	1.35
	负弯矩情况下	-2.46
枕中截面	正弯矩情况下	2.70
	负弯矩情况下	1.91

从表 5 可以看出,混凝土拉应力均小于材料容许限值,因此宽轨距有砟轨枕满足检算要求。

2.4 轨枕试验荷载计算

根据 EN 13230-2 要求,计算得到宽轨距有砟轨枕进行静态试验、动态试验和疲劳试验的试验荷载如表 6 所示。

表 6 宽轨距有砟轨枕试验荷载表

项目		轨下截面	枕中截面 (负弯矩)	枕中截面 (正弯矩)
静载试验	第一条裂纹产生时的试验荷载 F_{T1} /kN	170.81	55.49	44.16
	裂缝宽度为 0.05mm 时的试验荷载 $F_{T0.05}$ /kN	204.35	73.89	51.72
	最大试验荷载 F_{TB} /kN	283.82	123.14	86.20
动载试验	裂缝宽度为 0.05 mm 时的试验荷载 $F_{T0.05}$ /kN	170.29	—	—
	裂缝宽度为 0.5 mm 时的试验荷载 $F_{T0.5}$ /kN	249.76	—	—
	最大试验荷载 F_{TB} /kN	249.76	—	—
疲劳试验	最大试验荷载 F_{TB} /kN	283.82	—	—

2.5 室内试验验证

为进一步验证宽轨距有砟轨枕能满足运营要求,参照 EN 13230-2 的支撑形式和加载要求,在实验室中进行了轨枕的轨下截面(正弯矩)静态试验、枕中截面(负弯矩)静态试验、枕中截面(正弯矩)静态试验、轨下截面动态试验和轨下截面疲劳试验,其试验支撑形式如图 3~图 5 所示,试验中采用裂缝宽度测试仪实时观测裂缝宽度变化。

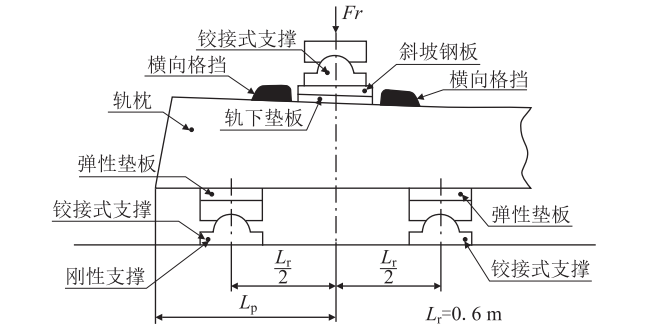


图 3 轨下截面(正弯矩)静态试验支撑形式图

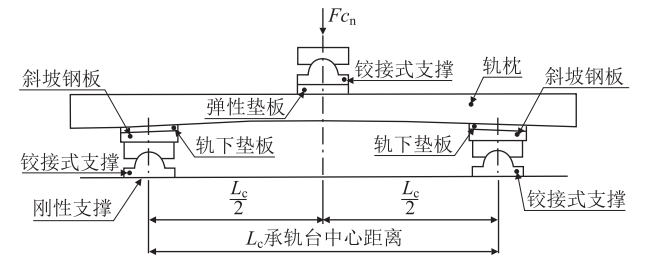


图 4 枕中截面(负弯矩)静态试验支撑形式图

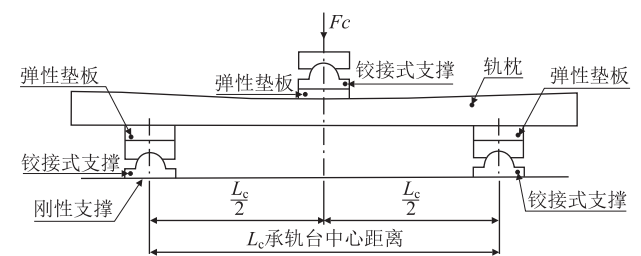


图 5 枕中截面(正弯矩)静态试验支撑形式图

宽轨距有砟轨枕检验结果如表 7 所示。从表 7 可以看出,宽轨距有砟轨枕能满足检验要求,并且具有一定的安全富余量。

表 7 宽轨距有砟轨枕检验结果表

检验项目		标准要求	检验结果
轨下截面(正弯矩) 静态试验	Fr_r/kN	>170.81	222.59 ~ 252.59
	$Fr_{0.05}/\text{kN}$	>204.35	352.59 ~ 392.59
	Fr_B/kN	>283.82	432.31 ~ 469.83
枕中截面(负弯矩) 静态试验	Fc_m/kN	>55.49	74.25 ~ 79.25
	$Fc_{0.05n}/\text{kN}$	>73.89	109.25 ~ 119.25
	Fc_{Bn}/kN	>123.14	123.99 ~ 131.19
枕中截面(正弯矩) 静态试验	Fc_r/kN	>44.16	67.47 ~ 77.47
	$Fc_{0.05}/\text{kN}$	>51.72	92.47 ~ 97.47
	Fc_B/kN	>86.20	110.91 ~ 114.20
轨下截面 动态试验	$Fr_{0.05}/\text{kN}$	>170.29	307.70 ~ 327.70
	$Fr_{0.5}/\text{kN}$	>249.76	367.70 ~ 387.70
	Fr_B/kN	>249.76	389.91 ~ 411.28
轨下截面 疲劳试验	负荷 Fr_0 时裂缝 宽度/mm	<0.1	0.03
	卸载后裂缝 宽度/mm	<0.05	0.01
	Fr_B/kN	>283.82	382.90

3 结论

本文研究了欧洲标准宽轨距有砟轨道混凝土轨枕设计方法,并以某海外项目 1 676 mm宽轨距有砟轨道预应力混凝土轨枕设计为例,通过设计检算和室内试验验证了设计方法的可行性,得到以下结论:

(1) 欧洲标准计算轨枕特征动压力时影响因素较多,轮重分配系数建议按照推荐数值取0.5。扣件垫

板衰减系数需通过试验测得,在实际设计时应根据扣件的接口条件研究确定。

(2) 欧洲标准的轨枕弯矩计算图示主要针对标准轨距,而宽轨距轨枕的枕中截面负弯矩对结构设计影响更大,一般采用收腰形底部设计来降低此影响,计算特征弯矩时可参考欧洲标准枕中弯矩计算原理,采用面集度相同的方式,以更好模拟实际情况。

(3) 预应力损失是一个长期且复杂的过程,与材料参数、生产工艺及运营环境等多因素有关。海外项目由于不可预见因素较多,根据欧洲标准设计时推荐采用估算法,取预应力总损失为初始张拉应力的 25%。

参考文献:

[1] 练松良. 轨道工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
LIAN Songliang. Railway Track[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.

[2] 尤瑞林. 欧洲与中国混凝土轨枕标准对比研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(9): 112 ~ 117.
YOU Ruilin. Comparison Research on Concrete Sleeper Standards of Europe and China[J]. Railway Engineering, 2016, 56(9): 112 ~ 117.

[3] UIC 713R Design of Monoblock Concrete Sleepers[S].

[4] Q/CR 9130-2018 铁路轨道设计规范[S].
Q/CR 9130-2018 Code for Design of Railway Track[S].

[5] EN 13230-6 Railway Applications-Track-Concrete Sleepers and Bearers-Part 6: Design[S].

[6] 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所. 预应力混凝土轨枕设计方法[R]. 北京:中国铁道 科学研究院铁道建筑研究所,1994.
Institute of Railway Architecture, Chinese Academy of Railway Sciences. Design Method of Prestressed Concrete Sleeper[R]. Beijing:Institute of Railway Architecture,Chinese Academy of Railway Sciences,1994.

[7] 代丰, 林红松. 基于欧标的埋入式无砟轨枕结构设计方法研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 30 ~ 36.
DAI Feng, LIN Hongsong. Research on the Design Method of Embedded Sleeper for Ballastless Track Based on European Standard[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 30 ~ 36.

[8] EN 13230-2 Railway Applications-Track-Concrete Sleepers and Bearer-Part 2:Prestressed Monoblock Sleepers[S].