

收缩徐变效应对铁路预应力混凝土 轨枕关键尺寸影响研究

尤瑞林¹, 范佳¹, 谭振宇², 陈扬²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081;

2. 河北首科铁路器材有限公司, 河北 邢台 054200)

摘要:结合欧洲混凝土结构设计规范,介绍了收缩徐变效应的计算方法,并以常见的预应力混凝土轨枕为例,开展了理论计算和长期跟踪测试,研究分析了收缩徐变效应对预应力混凝土轨枕关键尺寸的影响。结果表明:收缩和徐变效应 2 种因素对轨枕尺寸的影响较大,且影响主要在轨枕生产完成后的早期时间段,轨枕生产完成后的 2 个月内变形量可达到总变形量的 60% 以上,3 a 内变形量约达到总变形量的 95%,此后逐渐趋于稳定;对于我国常用预应力混凝土轨枕,按使用 40 a 考虑,新 II 型轨枕的两承轨槽外侧底角间距最大收缩量为 1.55 mm, III 型轨枕两承轨槽外侧底角间距最大收缩量为 1.48 mm。室内试验的实测结果与理论计算结果变化规律基本吻合。

关键词:预应力混凝土;铁路轨枕;收缩效应;徐变效应;欧洲规范;试验研究

中图分类号: U213.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)04-0024-06

1 概述

相对于其他交通系统,铁路具有方便快捷、绿色节能、运输能力大等优点,目前逐渐成为货物运输和旅客出行的优先选择。轨道结构是铁路系统中的重要子系统,是铁路运营安全可靠、舒适高效的重要保证。轨道结构可分为有砟轨道和无砟轨道 2 种类型,前者主要用于高速铁路和其他类型铁路的特殊区段(如长大隧道内)^[1-2],从运营里程来看,有砟轨道仍然是铁路线路的主要轨道结构形式。有砟轨道结构中包括钢轨、扣件、轨枕以及有砟道床^[3]。

轨枕是轨道结构的关键部件,主要功能包括两部分,一是承受着来自钢轨的各向荷载,并将荷载向下部道床传递;二是有效保持线路的轨距、轨向等几何形位。轨枕按其材质分为木枕、混凝土枕、钢枕和复合材料轨枕等^[4],其中预应力钢筋混凝土轨枕是目前用量最大的一种轨枕类型^[5]。

结合我国的具体运营情况,前期相关研究工作者针对预应力混凝土轨枕的设计方法、试验标准、生产制造技术等开展了相关分析工作^[2, 3, 5, 6],同时也对轨枕的振动特性进行了计算分析^[7-8]。国内外既有研究成果表明,作为预应力钢筋混凝土构件,混凝土轨枕的承载强度和变形特征会受到收缩徐变效应的影响^[9-10]。结合欧洲混凝土结构设计规范中对收缩徐变效应长期效应的规定^[11-13],介绍了收缩徐变效应的理论计算方法,并以我国常见的预应力混凝土轨枕类型为例,开展了理论计算和长期跟踪测试,研究分析了收缩徐变效应对预应力混凝土轨枕关键尺寸影响。结合研究得出的结论,对预应力混凝土轨枕的设计、生产和产品检验工作提出了有益的建议,可为我国铁路轨枕技术的发展提供参考。

收稿日期:2019-08-09 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20190129

基金项目:中国铁道科学研究院科研项目(2018YJ043)

作者简介:尤瑞林(1986—),男,副研究员,研究方向铁路轨道结构、轨枕、无砟轨道。E-mail:youruilin0731@126.com

尤瑞林,范佳,谭振宇,等.收缩徐变效应对铁路预应力混凝土轨枕关键尺寸影响研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(4):24-29.

2 理论计算方法

2.1 收缩效应计算方法

混凝土在硬化过程中要发生体积变化,最大的变化是当混凝土在大气中或湿度较低的介质中硬化时产生的体积减小,这种变形称为混凝土收缩。一般认为,混凝土的收缩包括自生收缩、干燥收缩。

2.1.1 干燥收缩

欧洲混凝土结构设计规范考虑混凝土龄期、混凝土强度等级、水泥类型、环境相对湿度、外部约束条件等因素,通过对试验数据的统计分析,给出了以下干燥收缩和自生收缩的计算公式^[14]。

在特定龄期 t 时,混凝土由干燥收缩产生的应变

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0} \quad (1)$$

式中, $\epsilon_{cd,0}$ 为名义无约束干燥收缩值。用于计算收缩时间随时间变化速率的系数

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 \sqrt{h_0^3}} \quad (2)$$

式中, t_s 为混凝土养护的时间; h_0 为名义构件尺寸。

2.1.2 自生收缩

在特定龄期 t 时,混凝土由自生收缩产生的应变

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \epsilon_{ca}(\infty) \quad (3)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0.2t} \quad (4)$$

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2.5(f_{ck} - 10) \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中, f_{ck} 为混凝土 28 d 圆柱体抗压强度。

2.2 徐变效应计算方法

混凝土结构或者材料在长期恒定荷载作用下,变形随时间增长的现象称为徐变。混凝土的徐变特性主要与时间参数有关,通常表现为前期增长较快,而后逐渐变缓,经过 2~5 a 后趋于稳定^[15]。对于预应力混凝土轨枕,由于在较小的截面中施加了高预应力,因此徐变效应不可忽视。

徐变效应对预应力混凝土轨枕压缩变形的影响

$$\epsilon_{cc}(t) = \varphi(t, t_0) \epsilon_p \quad (6)$$

式中, ϵ_p 为预应力导致的轨枕截面压缩应变; $\varphi(t, t_0)$ 为徐变系数,用于表示混凝土在计算时 t 的徐变影响。

欧洲规范通过对试验数据的统计分析,规定徐变系数

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (7)$$

式中, $\beta_c(t, t_0)$ 为加载后混凝土徐变随时间变化系数

$$\beta_c(t, t_0) = \frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \quad (8)$$

式中, β_H 为计算系数,对于常用预应力混凝土材料

$$\beta_H = 1.5[1 + (0.012RH)^{18}]h_0 + 250\alpha_3 \quad (9)$$

名义徐变系数

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (10)$$

式中, φ_{RH} 为相对湿度 RH 对名义徐变系数的影响系数,对于常用预应力混凝土材料

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \sqrt[3]{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2 \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.7} \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.2} \quad (13)$$

混凝土强度对名义徐变系数的影响系数

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (14)$$

混凝土加载时刻的龄期对名义徐变系数的影响系数

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0.1 + t_0^{0.2})} \quad (15)$$

式中, t_0 为加载时的混凝土龄期。

3 常用轨枕计算分析

保持轨道几何的稳定性是轨枕的重要功能之一,对于我国常用的预应力钢筋混凝土轨枕,保持轨道几何稳定的关键尺寸为保持轨距的 2 个承轨槽外侧底角间距。由上述理论分析可以看出,对于预应力钢筋混凝土结构,收缩徐变效应不可避免地使 2 个承轨槽外侧底角间距缩小。以下将以我国常用的预应力混凝土轨枕类型为例,计算分析收缩徐变效应对轨枕该关键尺寸的影响。

3.1 常用轨枕概况

目前,我国有砟轨道线路常用的预应力混凝土轨枕主要是新 II 型和 III 型 2 种类型,2 种轨枕的外形尺寸如表 1 所示^[16]。

表 1 新 II 型及 III 型轨枕主要尺寸表

项目	长度/mm	截面高度/mm		顶面宽度/mm		底面宽度/mm		预应力钢筋			总张 拉力/kN	两承轨槽外侧 底角间距/mm
		轨下	枕中	轨下	枕中	轨下	枕中	直径/mm	根数	质量/kg		
新 II 型轨枕	2 500	205	175	169	190	280	250	Φ6.25	10	6.04	348	1 818±2.0
III 型轨枕	2 600	232	185	170	220	304	280	Φ7	10	7.85	415	1 818±2.0

3.2 计算分析

根据我国预应力钢筋混凝土轨枕的实际生产情况,计算时水泥采用普通硅酸盐水泥,强度等级 42.5 级;轨枕用混凝土脱模强度为 50 MPa,脱模弹性模量为 3.45×10^4 MPa,轨枕用混凝土 28 d 强度为 62 MPa,28 d 弹性模量为 3.65×10^4 MPa。根据我国铁路轨枕的设计图纸及其中的截面尺寸和配筋设计情况,新 II 型轨枕的永存预应力为 9.6 MPa,III 型轨枕的永存预应力为 9.0 MPa。计算过程中,考虑养护时间 7 h,养护完成至脱模时间按 3 h 计。轨枕的主要截面参数见 3.1 节,在计算过程中,考虑轨下截面和枕中截面的差异,采用分段计算收缩量后取总和的方式,对于新 II 型轨枕,两承轨槽外侧底角间的轨枕分为 3 段,中间段长度为 500 mm(尺寸为中间截面尺寸),两侧 2 段相同长度都为 569 mm(尺寸按等效截面尺寸计);对于 III 型轨枕,两承轨槽外侧底角间的轨枕也分为 3 段,中间段长度为 400 mm(尺寸为中间截面尺寸),两侧 2 段相同长度都为 709 mm(尺寸按等效截面尺寸计)。

以环境的相对湿度为 75%,计算不同时间点新 II 型和 III 型轨枕两承轨槽外侧底角间距变形量随时间的变化趋势,如图 1 和图 2 所示。

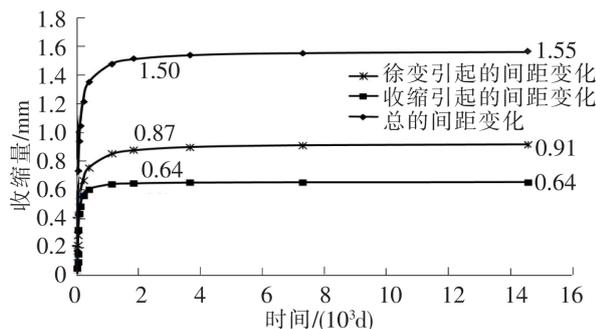


图 1 收缩徐变对新 II 型轨枕尺寸影响

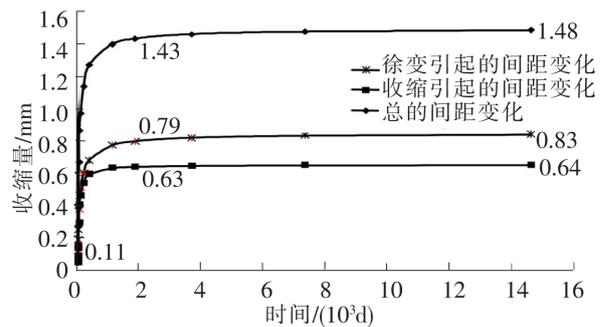


图 2 收缩徐变对 III 型轨枕尺寸影响

由图 1、图 2 的计算结果可以看出:

(1)收缩和徐变效应 2 种因素对轨枕尺寸的影响在轨枕生产完成后早期影响较大,随着时间的增加,轨枕的两承轨槽外侧底角间距不断缩小,轨枕生产完成后的 2 个月内变形量可达到总变形量的 60% 以上,3 a 内变形量约达到总变形量的 95%,此后逐渐趋于稳定。

(2)徐变效应和收缩效应对轨枕承轨槽外侧底角间距影响的规律一致,其中徐变效应对于轨枕尺寸的影响大于收缩效应,对于我国常用的轨枕类型,徐变引起的承轨槽外侧底角间距变化量约占总变化量的 60%。

(3)按轨枕使用 40 a 考虑,新 II 型轨枕的两承轨槽外侧底角间距最大缩小量为 1.55 mm,III 型轨枕两承轨槽外侧底角间距最大缩小量为 1.48 mm,III 型轨枕缩小量值小于新 II 型轨枕主要是由于其截面的预压应力相对较小、徐变效应的影响相对较弱。

环境的相对湿度对预应力混凝土的收缩徐变效应影响明显,以下以新 II 型轨枕为例,计算不同相对湿度条件下,制造完成 3 a 时间内,两承轨槽外侧底角间距的变化量,取相对湿度范围 45%~95%,计算结果如图 3 所示。

由图 3 的计算结果可以看出:

(1)不同环境相对湿度条件下,预应力混凝土轨枕的尺寸变化随时间变化的规律相同。同一预应力混凝土构件,环境相对湿度越小,构件的收缩量越大,对于新 II 型轨枕,环境相对湿度 45% 时,3 a 后两承轨槽底角的间距收缩量最大值可达到 1.97 mm,而环境相对湿度为 95% 时,3 a 后两承轨槽底角的间距收缩量最大值为 0.85 mm。

(2)我国幅员辽阔,各地气候差异较大,南方多雨湿润,北方少雨干燥,另外,同一地区四季的环境相对湿度差异也较大,总体来看,我国环境的相对湿度范围较宽,为 40%~90%,因此在轨枕设计和产品模型制作过程中需要考虑收缩徐变效应的影响,尤其对于干燥地区,应预留轨枕尺寸的收缩量。

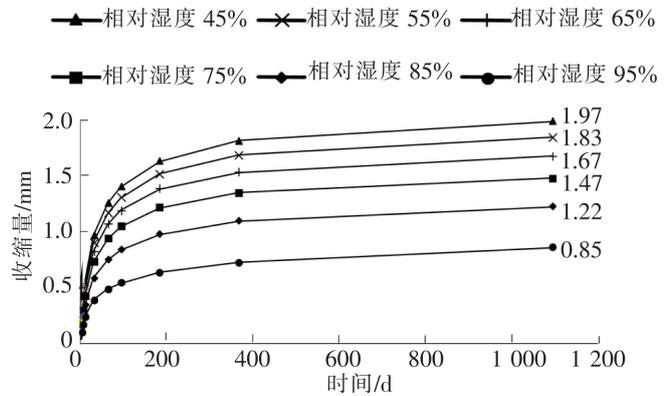


图 3 环境的相对湿度对预应力混凝土的收缩徐变效应影响

4 室内跟踪测试

为进一步研究分析收缩徐变效应对轨枕关键尺寸的影响,选择新 II 型轨枕进行尺寸变化的跟踪观测。

本项试验自脱模时开始对 5 根轨枕进行跟踪观测,测试的位置为两承轨槽外侧底角的间距,测试过程中对每根轨枕做编号和测量位置标记,每次测量确保是同位置测量。

本次测试在河北某轨枕厂内进行,测试期间环境相对湿度平均值约为 70%,轨枕采用水泥 28 d 强度为 42.5 MPa,轨枕脱模时混凝土强度为 50 MPa,脱模弹性模量为 3.45×10^4 MPa;轨枕用混凝土 28 d 强度为 62 MPa,28 d 弹性模量为 3.65×10^4 MPa。轨枕的两承轨槽外侧间距标准值为 1 818 mm,目前钢模加工时该值按标准值控制。对选取的轨枕跟踪观测得到的两承轨槽外侧间距变化量如表 2 所示,对于测试结果与环境相对湿度同为 70% 条件下理论计算结果的对比如图 4 所示。

表 2 新 II 型轨枕收缩徐变影响跟踪观测

养护完成时间/d	X-1	X-2	X-3	X-4	X-5
1	0.4	0.6	0.4	0.6	0.3
2	0.6	0.9	0.5	0.7	0.6
3	0.6	0.9	0.6	0.8	0.6
7	0.6	1	0.6	0.8	0.6
14	0.6	1.1	0.6	1	0.8
28	0.65	1.1	0.7	0.95	0.8
60	0.7	1.1	0.8	0.9	0.8
90	0.9	1	0.8	1.1	0.9
180	1.1	0.9	1	1.2	0.95

由表 2 和图 4 中的结果,可以看出:

(1) 由于系统误差和偶然误差的影响,新 II 型轨枕收缩徐变效应实测结果具有一定的离散型,但收缩徐变效应对预应力混凝土轨枕的尺寸的影响实测结果与理论计算结果变化规律基本吻合。

(2) 在混凝土轨枕养护完成 14 d 之内,实测的预应力混凝土轨枕尺寸的收缩量大于理论计算结果,此后实测收缩变化量相对小于理论计算结果,60 d 后实测结果平均值(0.86 mm)与理论计算结果的数值(1.0 mm)相差不大,60 d 以后,理论计算结果大于实测结果,计算结果偏于不利。

造成收缩徐变效应的实测结果与理论计算结果差异的可能原因包括:长期跟踪测试过程中环境的相对湿度是变化的,这与理论计算中的假定取值不相符;预应力混凝土轨枕生产过程中,混凝土的强度和弹性模量也是随时间变化的,这也很难通过理论计算完全如实反映;由于测试误差的影响,实测结果本身也具有一定的离散性。

5 结论与建议

轨枕是有砟轨道线路中重要的轨道部件,其作为预应力钢筋混凝土构件,自身的承载强度和变形特征受到混凝土收缩徐变效应的影响。结合欧洲混凝土结构设计规范中对收缩徐变效应长期效应的规定,介绍了收缩徐变效应的理论计算方法,并以我国常见的预应力混凝土轨枕类型为例,开展了理论计算和长期跟踪测试,研究分析了收缩徐变效应对预应力混凝土轨枕关键尺寸影响。理论计算结果和跟踪测试结果综合分析,得出以下主要结论:

(1) 收缩和徐变效应 2 种因素对轨枕尺寸的影响较大,且影响的时间主要在轨枕生产完成后的早期时间段。轨枕生产完成后的 2 个月内变形量可达到总变形量的 60% 以上,3 a 内变形量约达到总变形量的 95%,此后逐渐趋于稳定。

(2) 承轨槽外侧底角间距是预应力混凝土轨枕的关键尺寸,不仅影响线路建设过程中的扣件安装,而且影响后期线路的养护维修工作。对于我国常用预应力混凝土轨枕,按使用 40 a 考虑,新 II 型轨枕的两承轨槽外侧底角间距最大缩小量值为 1.55 mm,III 型轨枕两承轨槽外侧底角间距最大缩小量值为 1.48 mm。

(3) 预应力混凝土构件的收缩和徐变效应受到环境相对湿度条件的影响,环境相对湿度越小,构件的收缩量越大,对于新 II 型轨枕,环境相对湿度 45% 时,3 a 后两承轨槽底角的间距收缩量最大值可达到 1.97 mm,而环境相对湿度为 95% 时,3 a 后两承轨槽底角的间距收缩量最大值为 0.85 mm。

(4) 室内试验结果表明,收缩徐变效应对预应力混凝土轨枕的尺寸的影响实测结果与理论计算结果变化规律基本吻合,混凝土轨枕生产完成 60 d 后实测结果平均值(0.86 mm)与理论计算结果的数值(1.0 mm)相差不大,60 d 以后,理论计算结果大于实测结果,计算结果偏于不利。

基于上述研究分析结论,对于我国预应力混凝土轨枕技术的发展,提出以下建议:

(1) 在轨枕设计和生产过程中,要考虑收缩及徐变效应对轨枕性能的影响,尤其对于气候干燥地区,更需要设计和模型制造过程中预留轨枕尺寸的变形量。

(2) 在预应力混凝土轨枕标准制订和产品检验过程中,也要考虑收缩及徐变效应对预应力混凝土轨枕尺寸的影响,过于严格的尺寸公差,预应力混凝土构件是很难在全寿命中保证的。

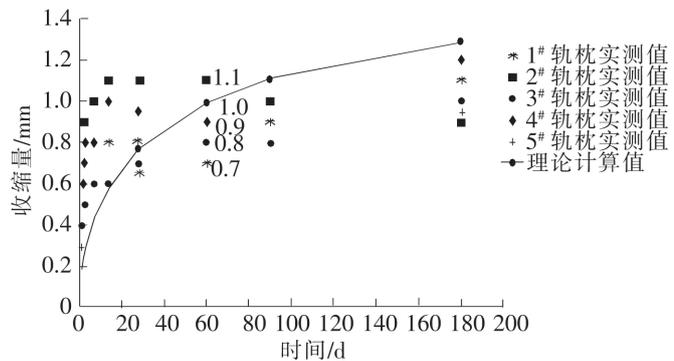


图 4 新 II 型轨枕收缩徐变效应实测结果与理论计算对比

参 考 文 献

- [1] 尤瑞林, 刘伟斌, 仇鹏, 等. 国内外弹性轨枕的研究与应用[J]. 铁道建筑, 2018, 58(7): 5-8.
 [2] 尤瑞林, 范佳, 刘伟斌, 等. 30 t 轴重重载铁路预应力混凝土轨枕设计研究[J]. 铁道建筑, 2015, 55(1): 113-118.

- [3]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.
- [4]尤瑞林, Silva R A, Kaewunruen S. 铁路用塑料轨枕与合成材料轨枕设计方法分析[J]. 铁道建筑, 2017, 56(9): 115-120.
- [5]汪加蔚. 我国铁路预应力混凝土轨枕的研究发展动态[J]. 混凝土与水泥制品, 1997(5): 23-27.
- [6]洪晓龙. 重载铁路轨枕受力特性分析与参数优化[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
- [7]朱剑月, 张艳. 轨枕吊空对轨道结构动力性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 8-15.
- [8]李斌, 刘学毅. 混凝土轨枕抗力的影响因素及其计算方法研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(6): 94-8.
- [9]Bezgin N. Design evaluations for the time dependent contractions of prestressed concrete high speed railway sleepers [C]// TRB 2014 Annual Meeting. Istanbul:[s. n], 2014.
- [10]Bezgin N O. Climate effects on the shoulder width measurements of prestressed concrete high speed railway sleepers of ballasted tracks[J]. Measurement, 2015, 75:201-209.
- [11]EN 1992-2 Design of concrete structures. part 2: concrete bridges design and detailing rules[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [12]余顺新. 欧洲规范中混凝土结构收缩徐变计算详解[J]. 中国公路, 2014(z1):101-110.
- [13]丁文胜, 吕志涛, 孟少平, 等. 混凝土收缩徐变预测模型的分析比较[J]. 桥梁建设, 2004(6): 13-16.
- [14]EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures -Part 1-1 : General rules and rules for buildings[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [15]莱昂哈特. 钢筋混凝土结构设计原理[M]. 北京:人民交通出版社, 1991.
- [16]汪加蔚, 白玲. 我国预应力混凝土枕产品类型综述[J]. 混凝土世界, 2013(4): 18-28.

Research on the Influence of Shrinkage and Creep Effect on Critical Dimensions of Railway Prestressed Concrete Sleepers

You Ruilin¹, Fan Jia¹, Tan Zhenyu², Chen Yang²

(1. Railway Engineering Research Institution, China Academy of Railway Sciences Corporation Ltd., Beijing 100081, China;
2. Hebei Shouke Railway Equipment Co., Ltd. Xingtai 054200, China)

Abstract: This paper introduced the calculation method of shrinkage and creep effect based on the European concrete structure design code. Taking the commonly used prestressed concrete sleepers in China for example, theoretical calculation and long-term tracking tests were carried out. The influence of shrinkage and creep effects on the key dimensions of prestressed concrete sleepers was studied and analyzed. The research results show that shrinkage and creep effect have great influence on sleeper dimension, and the influence is mainly on the early period after completion of sleeper production. The deformation amount can reach 60% of the total deformation within two months after completion of sleeper production, and the deformation amount can reach 95% of total deformation in the early three years, and then tends to stability. For the commonly used prestressed concrete sleepers in China, the maximum shrinkage of the outer bottom angle of the new two sleeper track for the type- II sleeper is 1.55 mm, and the maximum shrinkage of the outer bottom angle of the two rail socket of the type- III sleeper is 1.48 mm. The laboratory test results are basically consistent with the theoretical results.

Key words: prestressed concrete; railway sleeper; shrinkage effect; creep effect; Eurocode; experimental study