

先简支后结构连续 T 梁主梁间不均匀收缩效应分析

张文远,王朝锋,王 龙

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075)

摘要:预应力混凝土先简支后结构连续 T 梁桥在 T 梁预制、存放、架设安装及后期梁体更换过程中,各主梁间易因龄期差而在梁内产生次内力。为计算 T 梁桥各主梁间因龄期差产生的不均匀收缩效应,通过合理选择收缩预测模型、理论推导及有限元计算,对该效应进行了分析。结果表明,各主梁间不均匀收缩效应对结构影响较大,效应值可达梁内预应力效应 22% 及以上,应在结构设计及施工过程中加以控制,减小该效应对结构的不利影响。

关键词:桥梁工程;T 梁;不均匀收缩;次内力

中图分类号:U44,U45 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2019)01-0062-05

先简支后结构连续 T 梁桥是一种技术成熟的桥梁结构,该桥型具有施工工序简单,机械化程度高,施工周期短,梁体质量可靠,经济效益好等多种优点,使得该种桥型得到大力推广^[1-3]。

混凝土收缩是混凝土材料自身的时变特性。混凝土收缩可使结构内部产生微裂缝;收缩进一步发展,导致结构开裂;对于预应力结构,混凝土收缩将直接导致预应力损失;此外,混凝土收缩是导致结构内力重分布及长期变形的重要因素之一^[4-5]。部分学者采用不同混凝土预测模型对连续梁桥不均匀收缩效应进行分析^[6-7],认为该效应对主梁变形具有重要影响;部分学者通过公式推导对 T 梁截面不均匀收缩效应进行分析,认为截面不均匀收缩效应对 T 梁结构受力性能存在较大影响^[8]。预应力混凝土先简支后结构连续 T 梁桥作为典型装配式桥梁,在生产过程中,通常需要进行大规模预制,存放、架设等过程,在成桥过程中,各主梁间则易产生龄期差异,随着时间的推移,各主梁间则产生收缩差异,在梁内产生次内力。此外,随着 T 梁运营使用,部分 T 梁由于种种原因而不能继续服役时,往往需要进行部分梁体的更换,新做梁体与其余梁体间存在较大的龄期差异,随着时间的推移,各主梁间将产生较大次

内力。

为明确及量化各主梁间不均匀收缩效应,通过选择合理预测模型,进行理论推导及有限元计算,分析主梁间由于不均匀收缩效应对 T 梁结构的影响。

1 混凝土收缩预测模型的比较

国内外学者对混凝土收缩徐变模型做了大量的对比分析,由于各种收缩预测模型试验,选择的试验数据不同,选择的评判标准不同,考虑的影响因素也存在差异,常用的收缩预测模型有 CEB-FIP1990、ACI、GL2000。以预应力混凝土 T 梁腹板为例,其理论厚度为 200 mm,体积与表面积比 100 mm,取每立方米混凝土中,水泥含量 480 kg、细骨料为中砂 690 kg、粗骨料 1 130 kg,水泥为普通硅酸盐水泥,混凝土坍落度 120 mm,空隙率 10%。混凝土强度等级为 C50,圆柱体抗压强度标准值 $f_{ck} = 0.8 \times 50 = 40$ MPa,圆柱体抗压强度平均值为 $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 48$ MPa,环境相对湿度取 70%,平均气温为 20 ℃,养护龄期为 7 d,润湿养护。根据上述参数,分别按 CEB-FIP1990、ACI、GL2000 3 种收缩预测模型进行混凝土收缩计算,收缩应变发展曲线如图 1 所示。

收稿日期:2018-09-05

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B05)

作者简介:张文远(1988—),男,陕西扶风人,工程师,硕士,主要研究方向为桥梁设计。

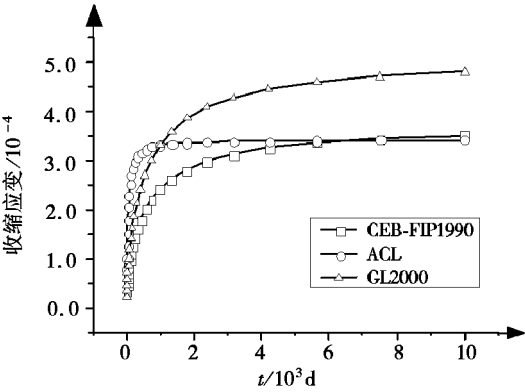


图 1 不同收缩预测模型对比
Fig.1 Comparison of different shrinkage prediction models

根据图 1 分析可知,CEB-FIP1990 模型对混凝土收缩估计较低;ACI 预测模型对混凝土早期收缩发展估计较高,认为混凝土收缩主要发生在混凝土浇筑早期,其终极值与 CEB-FIP1990 接近;GL2000 预测模型的收缩发展趋势与 CEB-FIP1990 接近,但其发生速率高于 CEB-FIP1990,且其终极值高于其他两模型,认为混凝土收缩量较大。综合而言 GL2000 模型计算结果更适用,使用范围更广,且计算公式更为简单通用。本文取 GL2000 收缩预测模型进行不均匀收缩效应分析。

2 混凝土龄期差收缩效应

先简支后连续 T 梁桥是一种多梁式结构,各梁体在预制过程中,均存在一定的龄期差异。其次,桥面铺装混凝土现浇层与预制梁体也存在相当的龄期差。由于混凝土抗拉强度低,过大的收缩差则易使混凝土产生收缩裂缝。假定先浇筑 T 梁与后浇筑 T 梁间混凝土龄期差为 Δt_0 ,两梁体在 Δt_1 时间后进行整体化装配。两梁的收缩应变发展规律如图 2 所示。

由于先浇混凝土与后浇混凝土间存在龄期差,构件比表面积不同,其收缩终极值与收缩速率均有不同。GL2000 中收缩应变发展函数采用式 (1) 表示^[9]:

$$\varepsilon_s(t,t_s) = \varepsilon_{s,\infty} \beta(RH) \beta(t - t_s) \tag{1}$$

式中: $\varepsilon_s(t,t_s)$ 为收缩开始时的龄期为 t_s , 计算考虑的龄期为 t 时的收缩应变; $\varepsilon_{s,\infty}$ 为名义收缩系数; $\beta(RH)$ 为与年平均相对湿度相关的系数; $\beta(t - t_s)$ 为收缩随时间发展的系数。

① 令先浇混凝土收缩应变计算公式为:

$$\varepsilon_s(t,t_s)_1 = \varepsilon_{s,\infty 1} \beta(RH)_1 \beta(t - t_s)_1 \tag{2}$$

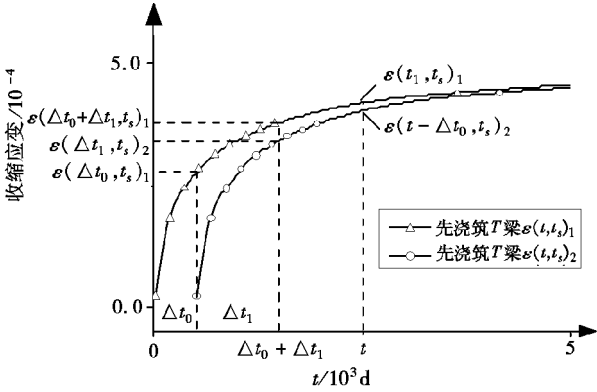


图 2 不同龄期混凝土收缩应变曲线
Fig.2 Shrinkage strain curve of concrete at different ages

在时间 ($\Delta t_0 + \Delta t_1 \sim t$) 内,混凝土收缩应变增量为:

$$\Delta \varepsilon_s(t,t_s)_1 = \varepsilon_s(t,t_s)_1 - \varepsilon_s(\Delta t_0 + \Delta t_1,t_s)_1 \tag{3}$$

② 令后浇混凝土收缩应变计算公式为:

$$\varepsilon_s(t,t_s)_2 = \varepsilon_{s,\infty 2} \beta(RH)_2 \beta(t - t_s)_2 \tag{4}$$

在时间 ($\Delta t_0 + \Delta t_1 \sim t$) 内,混凝土收缩应变增量为:

$$\Delta \varepsilon_s(t,t_s)_2 = \varepsilon_s((t - \Delta t_0),t_s)_2 - \varepsilon_s(\Delta t_1,t_s)_2 \tag{5}$$

若不考虑构件比表面积发生变化,先浇混凝土与后浇混凝土间收缩应变差为:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_s(t,t_s) &= \Delta \varepsilon_s(t,t_s)_2 - \Delta \varepsilon_s(t,t_s)_1 = \\ &= [\varepsilon_s((t - \Delta t_0),t_s)_2 - \varepsilon_s(t,t_s)_1] + \\ &+ [\varepsilon_s((\Delta t_1 + \Delta t_0),t_s)_1 - \varepsilon_s(\Delta t_1,t_s)_2] \end{aligned} \tag{6}$$

根据式 (6) 可知,先浇混凝土与后浇混凝土收缩差主要来自两部分。第一部分:先浇筑 T 梁与后浇筑 T 梁收缩速率差 $\varepsilon_s((t - \Delta t_0),t_s)_2 - \varepsilon_s(t,t_s)_1$; 第二部分:先浇筑 T 梁与后浇筑 T 梁在时间 $\Delta t_0 + \Delta t_1$ 内产生的应变差 $\varepsilon_s((\Delta t_1 + \Delta t_0),t_s)_1 - \varepsilon_s(\Delta t_1,t_s)_2$ 。假设先浇混凝土初始收缩速率为 V_1 ,后浇混凝土初始收缩速率为 V_2 ,混凝土收缩差随时间变化曲线如图 3 所示。

根据 GL2000 收缩模型计算方式可知,混凝土收缩应变终极值相同,随着时间的推移,混凝土收缩差终极值为第二部分 $\varepsilon_s((\Delta t_1 + \Delta t_0),t_s)_1 - \varepsilon_s(\Delta t_1,t_s)_2$ 。当后浇混凝土收缩速率 V_2 大于 V_1 时,收缩应变差会随时间先增长后不断减小至收缩差终极值;当收缩速率 V_2 等于或小于 V_1 时,收缩应变差规律相似,逐渐增长至收缩差终极值。

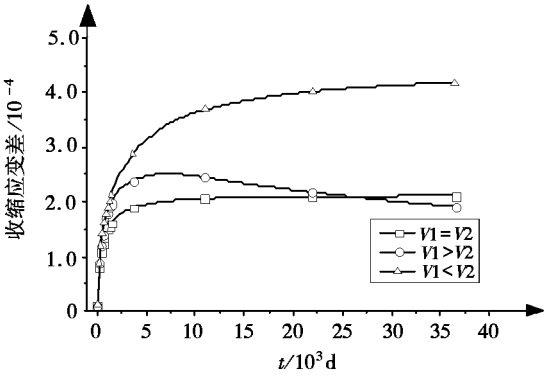


图 3 混凝土龄期差收缩效应图

Fig.3 Shrinkage effect diagram of concrete age difference

2.1 有限元模型建立

采用 Midas/civil,以 30 m 预应力混凝土先简支后结构连续 T 梁桥为依据,建立桥梁空间有限元模型。采用 Midas 用户自定义收缩函数功能,实现 GL2000 收缩预测模型在结构分析中的应用,有限元模型及主梁编号如图 4、图 5 所示。



图 4 先简支后结构连续 T 梁有限元模型
Fig.4 The finite element model of simple supported-continuous T beam

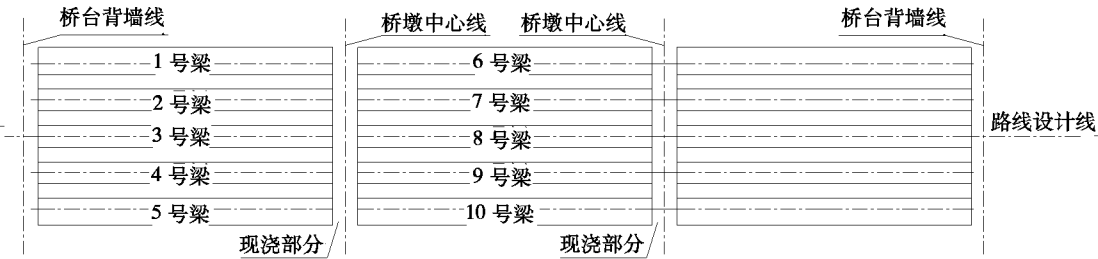


图 5 T 梁主梁编号

Fig.5 Number of T beam main beam

2.2 龄期差 Δt_0 对各主梁受力影响

混凝土收缩应变的发展是时间的函数,随着时间的推移, T 梁浇筑龄期产生的收缩差异逐渐增长,由于 T 梁各主梁间变形不协调,结构内部产生结构次效应。根据计算可知,T 梁梁内不均匀收缩轴力分布如图 6、图 7 所示,不同主梁收缩差轴力随时间变化如图 8、图 9 所示。

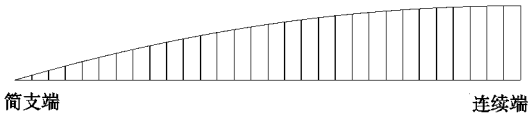


图 6 边跨主梁不均匀收缩轴力分布
Fig.6 Inhomogeneous shrinkage axial force distribution of main girder of side span

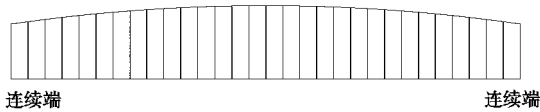


图 7 中跨主梁不均匀收缩轴力分布
Fig.7 Inhomogeneous shrinkage axial force distribution of main girder of midspan

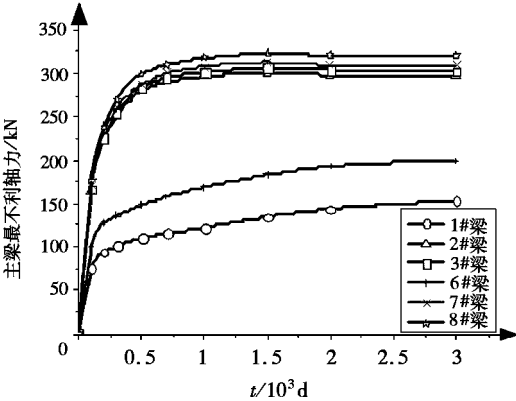


图 8 不同主梁收缩差轴力随时间变化曲线
(预制龄期差 10 d)
Fig.8 Axial force variation curve of different girder with time
(The precast age difference 10 d)

取 T 梁平均装配时间 30 d,考虑单片主梁预制龄期差 10 d、20 d、30 d 对结构的影响。对于早期产生病害 T 梁需进行返工换梁的 T 梁,考虑制作龄期差 365 d、730 d、1 095 d 对结构的影响,计算结果如表 1 所示。

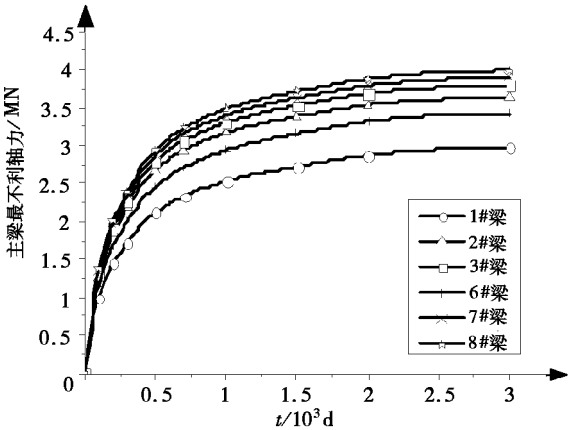


图 9 不同主梁收缩差轴力随时间变化曲线
(换梁时间 365 d)
Fig.9 Axial force variation
curve of different girder with time
(The beam changing time 365d)

由图 8、图 9、表 1 分析可知,随着龄期差的增加,T 梁由于不均匀收缩产生的轴力逐渐增加。当龄期差为 30 d 时,8#梁轴力最大,梁内轴力达到 771.2 kN,应力达到 0.93 MPa,已达预应力效应的 22%,故在设计过程中应将同跨 T 梁龄期差控制在 10~20 d 内;换梁处理的 T 梁亦随换梁时间的增加而增加,如果换除已成桥 1 095 d T 梁,新装 T 梁在梁内将产生 7.5 MPa 拉应力,不可忽略其效应,应对换梁处理 T 梁进行重新设计。

2.3 装配时间 Δt_1 对各主梁受力影响

预应力混凝土 T 梁桥在各主梁装配前处于简支状态,单片 T 梁收缩不会因变形受到其他 T 梁约束而产生次内力。根据式(6)分析可知,各主梁间终极收缩应变差为 $\varepsilon_s((\Delta t_1 + \Delta t_0), t_s)_1 -$

表 1 不同主梁最不利收缩差轴力(拉力)

Table 1 The most unfavorable non-uniform shrinkage axial force of different girders(Tensile force) kN

梁号	不同龄期差轴力			不同龄期换梁处理轴力		
	10 d	20 d	30 d	365 d	730 d	1 095 d
1#	154.5	330.5	490.8	2 975.0	4 074.8	4 752.2
2#	296.5	510.2	703.0	3 636.1	4 911.7	5 676.5
3#	303.2	527.2	728.8	3 791.6	5 122.8	5 879.6
6#	198.5	404.4	588.3	3 415.3	4 645.4	5 381.7
7#	309.4	541.4	750.1	3 897.6	5 238.0	6 077.9
8#	320.1	557.5	771.2	3 990.4	5 386.8	6 219.6

$\varepsilon_s((\Delta t_1, t_s)_2)$,除 T 梁预制龄期 Δt_0 外,T 梁桥完成桥梁整体化装配时间 Δt_1 同样对结构终极应变差存在影响。取单片 T 梁龄期差 10 d、20 d、30 d,

考虑 T 梁完成整体化装配时间 10 d、30 d、60 d、90 d 对结构的影响,计算结果如表 2 所示。

表 2 各主梁最不利收缩差轴力(拉力)

Table 2 The most unfavorable non-uniform shrinkage axial force of different girders(Tensile force) kN

梁号	龄期差 10 d 轴力		龄期差 20 d 轴力			龄期差 30 d 轴力
	装配时差 10 d	装配时差 10 d	装配时差 30 d	装配时差 60 d	装配时差 90 d	装配时差 10 d
1#	284.4	540.4	330.5	239.6	195.0	753.1
2#	490.0	799.2	510.2	367.2	294.1	1 056.9
3#	504.8	830.4	527.2	380.7	304.2	1 099.3
6#	356.2	655.4	404.4	295.5	240.7	902.3
7#	518.1	852.4	541.4	388.5	311.0	1 129.1
8#	532.0	875.5	557.5	401.5	321.1	1 159.0

由表 2 分析计算可知,随着装配时间的增加,由于 T 梁间不均匀收缩产生的轴向拉力逐渐减弱。当龄期差为 10 d,装配时间为第二片梁浇筑后 10 d 时,8#梁梁体产生轴向拉力最大,截面拉应力为 0.64 MPa;当龄期差为 20 d,装配时间为 10 d 时,截面拉应力达到 1.05 MPa,而当装配时

间为 30 d 时,截面拉应力仅为 0.67 MPa。当龄期差为 30 d,装配时间为 10 d 时,轴向拉力为 1 159 kN,截面拉应力可达到 1.4 MPa,已明显影响 T 梁受力性能。

故在实际施工过程中,应控制同跨 T 梁的龄期差对 T 梁的受力影响。龄期差异越小,对结构

影响越小,龄期差异应控制在 10 ~ 20 d 内,当龄期差达到 20 d 时,则应延长装配时间 20 ~ 30 d。

3 结论

通过理论推导及有限元模拟计算,分析了 T 梁由于各主梁间龄期差异而产生的不均匀收缩效应。具体结论如下:

(1) T 梁浇筑龄期产生的收缩差异逐渐增长,由于 T 梁各主梁间变形不协调,结构内部产生结构次效应。为降低成桥时该效应的影响,在设计

过程中应将同跨 T 梁龄期差控制在 10 ~ 20 d 内。

(2) 换梁处理的 T 梁不均匀收缩效应随换梁时间的增加而增加,由于不均匀收缩效应在新换 T 梁中产生轴向拉力显著,应对换梁处理 T 梁进行重新设计。

(3) 在一定时间内,延长 T 梁桥各主梁装配时间,可相对降低由于龄期差产生的不均匀收缩效应。对于同跨龄期差较大的各片 T 梁,应适当增加装配成桥的时间。

参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁工程:上册[M]. 3 版. 北京:人民交通出版社,2017.
- [2] 吕元佳. 预应力混凝土 T 梁简支变连续负弯矩区段改进构造试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
- [3] 郭元凯,付佳飞. 简支转连续梁桥单(双)支座脱空受力分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2017,30(3):64-68.
- [4] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 3 版. 北京:人民交通出版社,2014.
- [5] 盛兴旺,周相华. 先简支后连续梁桥结构的疲劳性能与抗裂性能[J]. 中南大学学报(自然科学版),2005,36(3):511-516.
- [6] 黄胜前. 大跨度预应力混凝土箱梁桥开裂的形变机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [7] 汪剑,方志. 大跨预应力混凝土箱梁桥收缩徐变效应测试与分析[J]. 土木工程学报,2008,41(1):70-81.
- [8] 张国辉,李大茂,谢峻,潘宝林. 预应力混凝土 T 梁桥腹板竖向裂缝成因分析与处治[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(1):12-14.
- [9] GARDNER N J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete[J]. ACI Materials Journal, 2001,99(2):159-167.

Analysis of Non-uniform Shrinkage Effect Between Main Beams of Continuous T-Beams with Simply Supported Structures

ZHANG Wenyuan, WANG Zhaofeng, WANG Long
(CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China)

Abstract: In the process of T-beam prefabrication, storage, erection and installation, and later beam replacement, the age difference between the main girders is prone to occur and secondary internal forces occur in the girders of the prestressed concrete continuous T-beam with simply supported structures. In order to calculate the non-uniform shrinkage effect caused by age difference among the main girders of T-girder bridge, the effect is analyzed through reasonable selection of shrinkage prediction model, theoretical derivation and finite element calculation. The results show that the non-uniform shrinkage effect between the main beams has a great influence on the structure. The effect value can reach 22% or more of the pre-stress effect in the beam. It should be controlled in the process of structural design and construction to reduce the adverse effect of the effect on the structure.

Keywords: bridge engineering; T-beam; non-uniform shrinkage; secondary internal forces

(责任编辑:张英健)