

预应力混凝土连续梁桥考虑徐变时的 支座沉降次内力分析

蔺国军, 童景盛

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了研究在徐变作用下,超静定结构发生支座沉降时引起的次内力,以1座5跨预应力混凝土连续梁桥为例,采用换算弹性模量法对连续梁的次内力及最终内力进行计算,在此基础上进一步分析了次内力对连续梁内力分布的影响。计算结果表明:超静定连续梁发生支座沉降时,会在结构中产生显著的次内力,在徐变作用下,由支座沉降产生的弹性内力会随时间的变化而有所减小,徐变对由支座沉降产生的弹性内力具有卸载作用,结构上的最终内力大小约为弹性内力的45%。在满足连续梁安全性的前提下,可以适当改变截面尺寸以降低桥梁刚度,有利于节约造价,创造更大的经济效益。在实际工程中,可以采用在连续梁上施加加重或者平衡重的方式来调整结构上的内力分布,进一步降低徐变产生的次内力对桥梁结构的影响。

关键词: 连续梁; 支座沉降; 徐变效应; 次内力

中图分类号: U441; TU378.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)10-0163-03

0 引言

为了适应现代化桥梁建设需求,在满足安全性的前提下,进一步提高经济效益、加快施工进度成了桥梁工程建设者和设计者十分关心的问题。满堂支架施工耗材大,应用具有局限性,在施工过程中往往受到很大的制约。对于中大跨度梁桥,在建设过程中普遍采用先简支后连续法、悬臂浇筑法等施工方法,而这些方法在桥梁结构建造过程中存在体系转换问题。超静定预应力混凝土连续梁桥受到各种复杂内外因素的制约,在多余约束处会产生多余的附加约束力,在结构上引起次内力,导致桥梁结构的应力重分布。引起超静定结构次内力的外部因素有预应力钢筋引起的预加力、支座沉降和温度变化等;内部因素主要有混凝土的收缩徐变和配筋方式等。在分析国内已建成混凝土连续梁的过程中发现,部分梁桥在运营阶段存在箱梁开裂及下挠过大的现象,而导致这一现象的可能因素是对混凝土收缩徐变作用及其效应认识的不足^[1]。

国内学者对混凝土的徐变规律及特性进行了广泛而深入的研究^[1-8]。朱果^[2]对大跨度预应力混凝土连续箱梁桥在整个施工及运营过程中的收缩徐变效应进行了研究,分析了混凝土收缩徐变对连

续梁应力、挠度的影响,以及不同收缩徐变模型之间的差异。占玉林等^[3]在大变形理论的基础上建立非线性几何方程,阐述了对几何非线性结构进行徐变效应分析的原理和方法,并得到了按施工阶段进行几何非线性结构徐变分析的增量形式和分析步骤。刘沐宇等^[4]针对港珠澳大桥桥面板采用的高抗裂致密匀质混凝土进行研究,得到了混凝土收缩徐变的影响规律,其研究成果对港珠澳大桥超长时间收缩徐变长期性能设计具有直接的指导作用。对于在施工过程中存在体系转换的连续梁桥而言,徐变主要引起桥梁结构的次内力^[5]。孙永新等^[6]分析混凝土箱梁的徐变效应与剪力滞效应的相互影响,基于箱梁剪力滞效应计算的能量变分方法,推导了混凝土箱梁徐变受剪力滞效应影响的次内力和应力计算公式。刘景生^[7]针对体系转换和体系不转换结构中有争议的后连续端部浇筑顺序和后连续预应力张拉顺序问题进行了分析,提出了后连续端部浇筑和预应力筋张拉的“隔跨”原则。范立础等^[8]应用初应变法和能量原理来分析桥梁结构的徐变次内力,导出位移法的单元刚度矩阵及荷载列阵,并论述了结构在各种施工情况下的徐变效应。鲍卫刚等^[9]通过有效模量法编制曲线桥梁徐变效应分析的有限元程序,计算结果表明混凝土的徐变能在一定程度上改善曲线桥梁结构的扭转受力。由地基土壤物力学特性的复杂性引起的地基沉降,也是影响桥梁安全性与耐久性的重要因素^[10]。

收稿日期: 2020-05-03

作者简介: 蔺国军(1989—),男,学士,高级工程师,主要从事桥梁结构设计与研究。

本文针对预应力混凝土连续梁因基础沉降引起的次内力进行计算,同时考虑徐变对次内力的影响。通过分析,进一步阐明了徐变及支座沉降对超静定梁桥的影响规律。

1 连续梁支座沉降的弹性内力

混凝土是一种黏滞弹性体,徐变是混凝土的一种与时间有关的变形性质。为了计算预应力混凝土连续梁桥考虑徐变时的支座沉降次内力,首先分析桥梁结构在支座沉降作用下的弹性内力。

图1为1座5跨预应力混凝土连续梁桥的计算简图,支座从左至右分别编号A、B、C、D、E、F。假设梁体为等截面梁,沿跨度方向截面形式一致,且连续梁每一跨的计算跨度近似相等,均为 l 。在计算过程中,以C支座下沉 Δ 为例,其他各支座的内力可按相同方法求出。

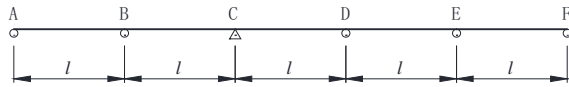


图1 连续梁简图

运用力法求解5跨连续梁弹性内力时,首先选定计算所需的基本结构,在确定基本结构以后,可以得到各多余未知力分别为1时的单位弯矩($M_i, i=1, 2, 3$)图,如图2所示。

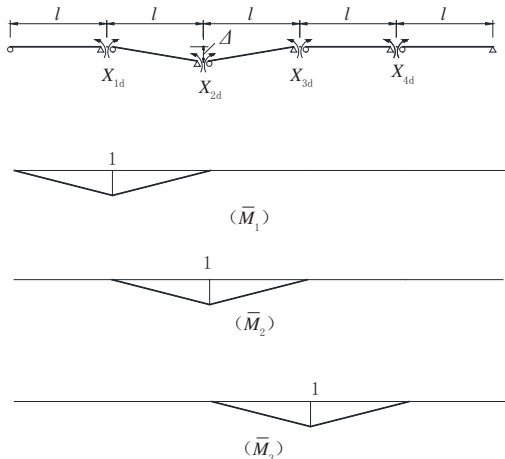


图2 基本结构及单位弯矩图

在求得柔度系数以及各多余未知力方向的位移后,根据结构力学法的基本原理,可建立各支座处的位移变形协调方程:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_{1d} + \delta_{12}X_{2d} + \delta_{13}X_{3d} + \delta_{14}X_{4d} = -\frac{\Delta}{l} \\ \delta_{21}X_{1d} + \delta_{22}X_{2d} + \delta_{23}X_{3d} + \delta_{24}X_{4d} = -\frac{2\Delta}{l} \\ \delta_{31}X_{1d} + \delta_{32}X_{2d} + \delta_{33}X_{3d} + \delta_{34}X_{4d} = -\frac{\Delta}{l} \\ \delta_{41}X_{1d} + \delta_{42}X_{2d} + \delta_{43}X_{3d} + \delta_{44}X_{4d} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X_{1d}, X_{2d}, X_{3d}, X_{4d}$ 分别为作用在结构上的弹性内力; δ_{ij} 为 $X_j=1$ 引起的第 i 个多余约束处沿多余未知力方向的变位,即柔度系数,各柔度系数为:

$$\delta_{11} = \delta_{22} = \delta_{33} = \delta_{44} = \frac{2l}{3EI}; \delta_{12} = \delta_{23} = \delta_{34} = \frac{l}{6EI}; \delta_{13} = \delta_{14} = \delta_{24} = 0,$$

其中的 E, I 分别为梁的材料弹性模量和截面惯性矩。

求解力法方程组式(1),就可以得到C支座发生 Δ 沉降后的弹性内力图。类似的,其余各支座发生任意沉降后的弹性内力图可用相同方法求出。

2 连续梁支座沉降的徐变次内力

在分析预应力混凝土连续梁在徐变作用下的结构次内力及结构变形时,由于各种客观复杂条件的制约,对其进行手工计算是十分困难的。因此,在计算因支座沉降引起的徐变次内力时,常使用如下假设:

(1)不考虑桥梁结构内部普通钢筋及预应力钢筋的影响,即将桥梁结构按素混凝土的材质进行分析。在预应力混凝土含筋量较小的情况下,这种假定是合理的。

(2)假定沉降变化规律与混凝土徐变变化规律相似。

(3)基于徐变线性理论,分析结构徐变变形与次内力。

(4)假定混凝土的弹性模量在整个徐变过程中为常量,而弹性模量随时间变化的性质在徐变系数中予以考虑。

在徐变变形的影响下,预应力混凝土超静定结构由于多余未知力的约束会在结构上产生徐变次内力。采用换算模量法可以直接计算结构在应力变化条件下的变形。在此基础上,可以建立变形协调方程:

$$\begin{cases} \delta_{11t}(X_{1t} + X_{1d}) + \delta_{12t}(X_{2t} + X_{2d}) + \\ \delta_{13t}(X_{3t} + X_{3d}) + \delta_{14t}(X_{4t} + X_{4d}) = -\frac{\Delta}{l} \\ \delta_{21t}(X_{1t} + X_{1d}) + \delta_{22t}(X_{2t} + X_{2d}) + \\ \delta_{23t}(X_{3t} + X_{3d}) + \delta_{24t}(X_{4t} + X_{4d}) = \frac{2\Delta}{l} \\ \delta_{31t}(X_{1t} + X_{1d}) + \delta_{32t}(X_{2t} + X_{2d}) + \\ \delta_{33t}(X_{3t} + X_{3d}) + \delta_{34t}(X_{4t} + X_{4d}) = -\frac{\Delta}{l} \\ \delta_{41t}(X_{1t} + X_{1d}) + \delta_{42t}(X_{2t} + X_{2d}) + \\ \delta_{43t}(X_{3t} + X_{3d}) + \delta_{44t}(X_{4t} + X_{4d}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X_{1t}, X_{2t}, X_{3t}, X_{4t}$ 分别为作用在结构上的徐变次内力; $\delta_{ij\varphi}$ 为 $X_j=1$ 引起的第 i 个多余约束处沿多

余未知力方向的总变位,即柔度系数,在计算过程中采用换算弹性模量 $E_{\varphi}(t, t_0)$ 进行计算。根据现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018),换算弹性模量 $E_{\varphi}(t, t_0)$ 按下式计算:

$$E_{\varphi}(t, t_0) = \frac{E}{1 + \chi(t, t_0) \cdot \varphi(t, t_0)} \quad (3)$$

$$\chi(t, t_0) = \frac{1}{1 - e^{-\varphi(t, t_0)}} - \frac{1}{\varphi(t, t_0)} \quad (4)$$

求解式(2),可以得到各内支座处的徐变次弯矩。

3 对比分析

以湟水河大桥5跨预应力混凝土连续梁桥为工程背景进行计算。图3为计算所得的支座C下沉时的弹性弯矩图及徐变次弯矩图。由图3可知:在混凝土徐变作用下,超静定连续梁中会产生显著的徐变次内力。

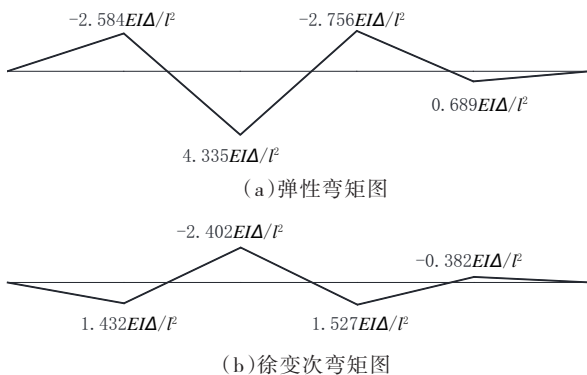


图3 支座C下沉时的各项弯矩图(单位:N·m)

图4为C支座发生沉降时,在混凝土徐变作用下计算所得的连续梁上的沉降弯矩。从图4可以看出,在考虑徐变作用后,结构因支座沉降引起的弯矩绝对值与弹性弯矩和徐变次弯矩相比都有所减小。当超静定预应力混凝土连续梁桥发生支座沉降时,混凝土徐变对结构的内力重分布具有有利影响。

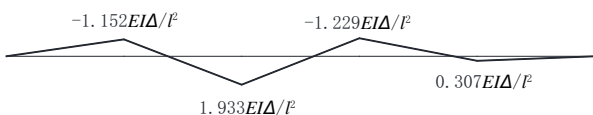


图4 考虑徐变作用后支座C下沉时的实际弯矩图(单位:N·m)

表1列出了支点截面处最终内力与弹性内力的比值。由表1可知,结构上的实际弯矩约为弹性弯矩的45%。

在计算考虑徐变作用后由支座沉降引起的结构弯矩时可以发现,梁的实际弯矩与梁的抗弯刚度成正比,而与梁跨度的平方成反比。在满足连续

表1 弹性内力与最终内力的比较

截面位置	弹性内力 / (N·m)	最终内力 / (N·m)	相对百分比 / %
B	-2.584EIΔ/l²	-1.152EIΔ/l²	44.58
C	4.335EIΔ/l²	1.933EIΔ/l²	44.59
D	-2.756EIΔ/l²	-1.229EIΔ/l²	44.59
E	0.689EIΔ/l²	0.307EIΔ/l²	44.56

梁安全性的前提下,可以适当地改变截面尺寸,降低桥梁刚度,有利于节约造价,创造更大的经济效益。同时,在进行孔径布置时,适当增加梁的跨度,也可以降低桥梁结构由于支座沉降而引起的结构内力,使设计更加合理。

由于支座沉降而在混凝土连续梁中产生的弹性内力会在徐变作用的影响下随时间发展而逐渐松弛。内力松弛的程度与墩台基础沉降的速率成正比。如果支座不是缓慢沉降,而是瞬时完成沉降,那结构上的弹性内力随时间的增长会显著减小,最终值为原值的10%~20%。因此在实际工程中,可以采用在连续梁上施加压重或者平衡重的方式来调整结构上的内力分布,进一步降低徐变产生的次内力对桥梁结构的影响。

4 结语

(1)在混凝土徐变作用下,超静定连续梁发生支座沉降时,在结构中会产生显著的次内力。

(2)在徐变作用下,由支座沉降产生的弹性内力会随时间的变化而有所减小,徐变对由支座沉降产生的弹性内力具有卸载作用,最终内力大小约为弹性内力的45%。

(3)超静定连续梁因基础沉降引起次内力,梁的实际弯矩与梁的抗弯刚度成正比,而与梁跨度的平方成反比。在满足连续梁安全性的前提下,可以适当地改变截面尺寸以降低桥梁刚度,有利于节约造价,创造更大的经济效益。

(4)在实际工程中,可以采用在连续梁上施加压重或者平衡重的方式来调整结构上的内力分布,进一步降低徐变产生的次内力对桥梁结构的影响。

参考文献:

[1] 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(1):70-81.
 [2] 朱果.大跨度预应力混凝土连续箱梁桥收缩徐变效应分析[D].重庆:重庆大学,2012.
 [3] 占玉林,向天宇,赵人达.几何非线性结构的徐变效应分析[J].工程力学,2006(7):45-48.

表3 单桩承载力计算表

土层	土层分类	厚度 /m	抗剪参数		SPT 法 N 值	有效应力法 $R_{s,k}$ /kN	SPT 法 $R_{s,k}$ /kN
			$\varphi/(^\circ)$	c_u /kPa			
侧	硬砂质黏土	2.5	19.6	17	14	121	253
	中密黏质砂土	2.0	38.0	29	21	223	237
	高硬砂质黏土	2.5	17.9	64	29	242	563
向	密实黏质砂土	1.5	39.4	24	44	277	373
	高硬砂质黏土	2.5	28.5	29	38	141	738
土	密实黏质砂土	5.0	32.3	111	52	1 061	1 321
	密实砾砂	0.5	39.6	44	45	162	127
层	高密黏质砂土	3.5	38.2	41	60	1 202	1 186
持力层	高密黏质砂土	3.5	38.2	41	60	6 034	2 748
单桩设计承载力						4 734	3 775

对土工试验参数较为敏感,采用此方法计算得到的极限承载力变异性较大。因此在工程设计中,应重视土工试验参数结果的准确性,而 SPT 法计算得到的极限承载力值较为稳定,同时与试桩结果也较为符合,在工程设计中建议结合 SPT 计算法,对有效应力法计算结果进行修正。

英标对桩基沉降计算应用的方法未做严格限制,基本是引用各经典理论的计算方法。工程中常用的弹性理论法对单桩和群桩的计算具有比较完善的理论基础,但对工程中土体分层复杂的情况,应结合其他方法来计算桩基沉降。

参考文献:

- [1] 陶凯,李涛涛.中英打入桩单桩承载力计算方法对比研究[J].工程建设与设计,2015(6):56-59.
- [2] BS 8004: 2015, Code of practice for foundations[S].
- [3] 张瑞棋,诸葛爱军,黎双郡.桩基承载力计算方法的中英规范对比分析与应用[J].港工技术,2019,56(1):97-100.
- [4] POULOS HG, DAVIS E H. Pile foundations analysis and design [M].New York: John Wiley and Sons, 1990.
- [5] KIRAN K V, MADHIRA M. Analysis of settlement at different depths of granular pile [C]//Indian Geotechnical Conference IGC2016, Indian: IGC,2016: 15-17.
- [6] 秋仁东.竖向荷载下桩身压缩和桩基沉降变形研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2011.

(上接第 165 页)

- [4] 刘沐宇,李倩,黄岳斌,等.港珠澳大桥钢-混组合连续梁桥超长时间收缩徐变效应[J].中国公路学报,2016,29(12):60-69.
- [5] 朱培京.对混凝土徐变内力问题的探讨[J].公路,1997(3):13-16.
- [6] 孙永新,蔺鹏臻.考虑剪力滞效应的先简支后连续箱梁徐变效应分析[J].应用数学和力学,2015,36(8):855-864.
- [7] 刘景生.设计荷载作用下先简支后连续小箱梁桥的内力分析[D].重庆:西南交通大学,2008.
- [8] 范立础,杜国华,鲍卫刚.桥梁结构徐变次内力分析[J].同济大学学报(自然科学版),1991(1):23-32.
- [9] 鲍卫刚,杜国华,范立础.曲线桥梁结构徐变次内力分析[J].中国公路学报,1995(2):53-60.
- [10] 吴强.有支座沉降的连续梁的计算[J].科技信息,2011(20):340-341.