

文章编号: 1002-0268 (2005) 07-0058-06

预应力混凝土桥梁徐变计算方法的研究

吕建鸣, 陈云海

(交通部公路科学研究所, 北京 100088)

摘要: 预应力混凝土桥梁结构施工过程中徐变计算是一个比较复杂的工程计算问题。本文介绍公路桥梁结构设计系统 GQJS 中按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62-2004 计算预应力混凝土桥梁结构施工过程中徐变的结构分析方法, 并给出一些对比分析算例。

关键词: 桥梁结构; 徐变; GQJS 软件; 计算方法

中图分类号: U441⁺. 5

文献标识码: A

Study of Analysis Method for PC Bridge Creep

LU Jian-ming, CHEN Yun-hai

(Research Institute of Highway, The Ministry of Communication, Beijing 100088, China)

Abstract: In this paper, construction course analysis method for PC bridge creep is introduced. The analysis method used in bridge structure design system software (Chinese name abbr GQJS) is from the Design Code for Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete and Culverts JTG D62-2004 which is the Industry Standard of PRC. Some antitheses analysis examples are presented in this paper.

Key words: Bridge structure; Creep; GQJS software; Calculation method

0 概述

混凝土徐变是它作为粘滞弹性体与时间相关的变形性质。混凝土徐变与应力的性质和大小, 加载时的混凝土龄期及荷载的持续时间有密切关系。混凝土徐变对结构的变形、结构的内力分布和截面的应力分布会产生影响。当混凝土在持续应力小于 $0.5f_{cu}$ (混凝土立方体强度) 时, 徐变应变与初始弹性应变成线性比例关系。因此, 一般结构徐变计算以徐变线性理论为基础。在使用荷载应力范围内引入徐变特性系数 ϕ (以下简称徐变系数), 建立徐变应变 ϵ_c 与弹性应变 ϵ_e 关系式:

$$\epsilon_c = \phi \cdot \epsilon_e \quad (1)$$

在长期荷载作用下, 加载初期徐变应变增长较快, 后期增长减慢, 结构徐变变形累计总值可达相同

应力状态下弹性变形的 1.5 ~ 3 倍。实际结构尤其是超静定结构, 结构体内各点应力状态不同, 而且预应力混凝土桥梁在预压力作用下混凝土徐变引起结构变形问题更为突出, 徐变变形受到结构体内钢筋或结构赘余约束的限制将改变结构体内各点应力状态并产生徐变二次力。徐变和预压力相互影响使问题变得更加复杂。本文结合公路桥梁结构设计系统 (以下简称 GQJS) 中按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62-2004 (以下简称 JTG D62) 改版工作, 介绍预应力混凝土桥梁结构施工过程中徐变计算的结构分析方法, 并给出一些分析算例, 供同行参考。

1 徐变系数

GQJS 6.5 版以前, 系统中采用了弹性徐变体理论^[3]。这种理论在研究混凝土徐变变形规律时, 既考

考虑了持久荷载的影响,又考虑了随混凝土龄期的增长而引起变形特性的变化,即老化的影响。按照弹性徐变理论,在龄期 t_0 加载至时间 t 时的徐变变形与弹性变形之比,即徐变特征 $\phi(t, t_0)$ 随时间变化规律按下式计算:

$$\phi(t, t_0) = [k + (1-k) \cdot e^{-\gamma \cdot t}] [1 - e^{-\gamma \cdot (t-t_0)}] \cdot \phi_k \quad (2)$$

式中, ϕ_k 为混凝土材料的徐变特征终极值,推荐值为 2.0; k 为混凝土材料的弹性继效系数,推荐值为 0.3; γ 为混凝土材料的徐变增长速度系数,推荐值为 0.021。

GQJS 7.0 改版时仔细比较(2)式与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTJ 023-85(以下简称 JTJ 023)附录四算法,发现(2)式随时间变化规律

与实际情况不符,当时间 t 值趋于无穷大时, $\phi(t, t_0)$ 值趋于 0.3,而不是 1.0。为了使徐变随时间发展的规律接近 JTJ 023 算法,将徐变特征 $\phi(t, t_0)$ 随时间变化规律由(2)式改为(3)式,并称其为老化理论修正算法,以区别与老化理论原始算法。

$$\phi(t, t_0) = [1 + k \cdot e^{-\gamma \cdot t}] [1 - e^{-\gamma \cdot (t-t_0)}] \cdot \phi_k \quad (3)$$

在同样的系数情况下,(2)式和(3)式随时间变化曲线见图1。图1中粗线是徐变随时间变化曲线,上下两条细线是 JTJ 023 徐变随时间变化曲线的上界($h=20$)和下界($h=60$)。很明显图1(a)中老化理论原始算法徐变随时间变化曲线 56d 时 $\phi(t, t_0)$ 达到最大值,360d 以后 $\phi(t, t_0)$ 值回落到 0.3 以后基本保持不变。图1(b)中老化理论修正算法徐变随时间变化曲线 360d 以后 $\phi(t, t_0)$ 值达到 1.0,以后基本保持不变。

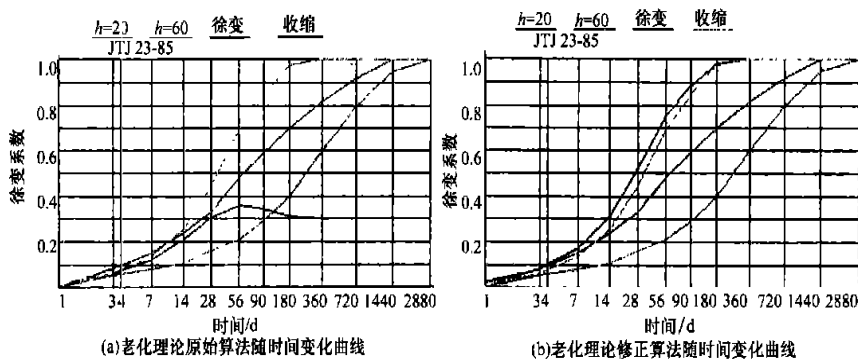


图1 老化理论算法随时间变化规律对比曲线

JTG D62 F.2.1 规定混凝土徐变系数计算方法如下:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (4)$$

式中, $\phi(t, t_0)$ 为加载龄期为 t_0 , 计算龄期为 t 时的混凝土徐变系数; t_0 为加载时的混凝土龄期, d; t 为计算时刻的混凝土龄期, d; $\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$ 为名义徐变系数, 其中: $\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}}$; $\beta(f_{cm}) =$

$$\frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}}; \beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}}; \beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3}$$

为加载后徐变随时间发展系数;

其中: $\beta_H = 150 \left[1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500$; f_{cm} 为强度等级 C20~C50 混凝土在 28d 龄期时的平均立方体抗压强度, MPa; RH 为环境年平均相对湿度, %; h 为构件理论厚度, mm, $h=2A/u$, A 为构件截面面积, u 为构件与大气接触的周边长度; 常数 $RH_0 = 100\%$; $h_0 = 100$ mm; $t_1 = 1$ d; $f_{cm0} = 10$ MPa。

从(4)式可以看出 JTG D62 徐变计算方法较以前有了很大改进, 考虑的因素更全面、更科学、更合理。在同样情况下(构件理论厚度 30cm, 环境相对湿度 55%, 加载龄期 3d) JTJ 023 和 JTG D62 徐变随时间变化曲线见图 2。图 2 中粗线是徐变随时间变化曲线, 两条细线与图 1 相同。从图 2 可以看出 JTG D62 徐变随时间变化曲线较 JTJ 023 要平缓, 可以考虑的时间历程也较长。

图 1 和图 2 反映出徐变系数计算方法逐步演变发展完善的过程。徐变老化理论算法虽然有一定缺陷, 但它在相当长的时期内广泛为国内外工程界所接受, 推动了预应力混凝土结构计算技术的发展和大量工程建设项目实际实施。

2 徐变引起结构变形和内力

混凝土徐变引起结构变形增加。对于素混凝土静定结构, 徐变不引起结构内力和应力的变化。对于钢筋混凝土和预应力混凝土结构, 即使是静定体系, 混凝土徐变都将改变结构内的应力状态。对于静定结构,

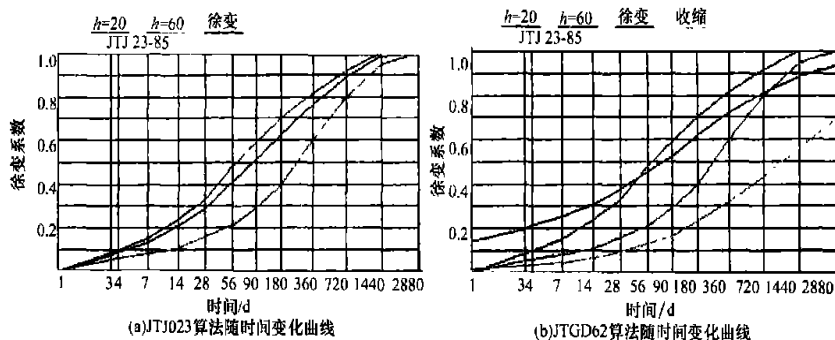


图2 公路桥规算法随时间变化规律对比曲线

外荷载不变时结构内力也不会改变,但钢筋对混凝土起着弹性约束作用,它阻碍徐变变形的自由发展,随着时间的推移,徐变会引起同一截面内钢筋和混凝土应力的重新分布并自相平衡,截面应力重分布将减少预应力钢筋的应力,即为预应力钢筋徐变损失。对于超静定结构,即使外荷载不变,徐变变形受到超静定赘余约束,结构内力将随着混凝土徐变的发展而变化,即徐变要引起结构内力重分布。对于工程上经常遇到的纵向分段和竖向分层浇注的混凝土桥梁结构,不同段和层混凝土浇注时间不同加载时间不同,混凝土徐变变形不同步,它们之间相互制约也会引起应力和内力重分布。

JTG D62 4.2.11和4.2.12虽然给出了一些徐变计算的公式,但这些公式是在特定简化条件下推导出来的,不具有普遍性。预应力混凝土桥梁施工过程结构体系(有效单元和支撑情况)不同,外荷载加载大小和时间先后次序不同,混凝土分段浇注时间和加载龄期不同,预应力钢筋张拉压浆时间不同,使结构内力应力状态随之千变万化,用简单的数学公式很难对各种复杂情况表述清楚,更难用解析法推导出来的计算公式对预应力钢筋混凝土结构徐变问题进行有效的分析计算。因此手工分析十分困难,几乎是不可能,目前只能用有限元方法进行电算。

GQJS软件较好地解决了各种预应力混凝土桥梁徐变计算问题。在进行徐变分析时运用数值积分的概念,将结构首次形成并加载到徐变稳定划分为有限个阶段,每个阶段可以安装不同的单元,施加不同的外荷载,每个单元可以指定不同的几何材料性质和不同的加载龄期,每个钢筋可以指定不同的张拉、压浆(钢筋截面换算开始时刻)阶段。假定每一个阶段计算徐变时至下一阶段开始时结构体内应力和应变为常量,根据徐变系数定义可计算各阶段所有单元弹性应变产生的徐变应变增量,将徐变应变增量转换为单元

荷载向量和结构总体荷载向量,即可按结构力学一般方法求解徐变在本阶段结构体系内引起的结构内力和截面应力重分布。

设 k 和 $k+1$ 阶段为施工中任意两个相邻阶段, k 阶段徐变应变增量 $\Delta\epsilon_{ck}$ 计算表达式为

$$\Delta\epsilon_{ck} = \epsilon_{ck+1} - \epsilon_{ck} = \phi(t_{k+1}, t_0) \cdot \epsilon_{ck} - \phi(t_k, t_0) \cdot \epsilon_{ck} = [\phi(t_{k+1}, t_0) - \phi(t_k, t_0)] \cdot \epsilon_{ck} \quad (5)$$

式中, $\phi(t_{k+1}, t_0)$, $\phi(t_k, t_0)$ 分别为 $k+1$ 阶段和 k 阶段开始时刻徐变系数; ϵ_{ck} 为 k 阶段计算徐变时的累计弹性应变,其中包括其前各单项影响因素如:自重、外荷载、支座沉降、体系转换、预应力、混凝土收缩及徐变所产生的累计应变; ϵ_{ck+1} , ϵ_{ck} 分别为弹性应变 ϵ_{ck} 保持不变时,由 ϵ_{ck} 产生的 $k+1$ 阶段和 k 阶段开始时刻的徐变。

混凝土徐变应变增量 $\Delta\epsilon_{ck}$ 可按结构力学求解初应变(如温度变化)的方法求得混凝土徐变应变增量 $\Delta\epsilon_{ck}$ 引起的 k 阶段结构位移增量以及超静定结构徐变内力增量。求解初应变,形成单元荷载向量和结构总体荷载向量、解方程以及计算单元内力的方法参见文献[5]、[6],本文不再一一赘述。

k 阶段各单元的混凝土徐变应变增量 $\Delta\epsilon_{ck}$ 确定后,由平面假定可计算出徐变引起钢筋应变增量 $\Delta\epsilon_{gck}$,按照JTG D62 6.2.7规定,徐变引起钢筋应力损失增量 $\Delta\sigma_{gck}$ 为

$$\Delta\sigma_{gck} = \frac{0.9 \cdot E_g \cdot \Delta\epsilon_{gck}}{1 + 15 \cdot \rho \cdot \rho_e} \quad (6)$$

式中, E_g 为钢筋弹性模量; ρ 为钢筋含筋率,即钢筋面积与截面总面积的比值; $\rho_e = 1 + \frac{e^2}{i^2}$ 为钢筋偏心修正系数,其中: e 为钢筋重心到截面重心的距离; i 为截面回转半径。

由各钢筋的应力损失 $\Delta\sigma_{gck}$ 可计算出其相对于全截面重心的轴力 ΔN_{gck} 和弯矩 ΔM_{gck} ,由此可根据截面

力系平衡和材料力学公式计算徐变引起钢筋混凝土截面应力重分布混凝土应力增量 $\Delta\sigma_{hk}$ 如下

$$\Delta\sigma_{hk} = \frac{\Delta N_{gk}}{A_{0k}} + \frac{Y_i \cdot \Delta N_{gk}}{I_{0k}} \quad (7)$$

式中, A_{0k} 为 k 阶段换算截面面积(各阶段张拉、压浆钢筋不同则 A_{0k} 值不同); I_{0k} 为 k 阶段换算截面惯性矩(各阶段张拉、压浆钢筋不同则 I_{0k} 值不同); Y_i 为计算应力点到换算截面重心轴距离。

JTG D62 未规定混凝土弹性模量随时间变化的曲线, 计算混凝土徐变应变时假定混凝土弹性模量在施工全过程中为常量。按照 JTG D62 4.2.9 规定, 计算混凝土徐变时可假定徐变与混凝土应力成线性比例关系, 即采用徐变线性理论假定。当阶段划分足够多, 且每个阶段结构变形足够微小时, 可以假定应变与应力的线性叠加原理在计算全过程中适用。GQJS 最终总的内力、位移、应力等计算结果是由各阶段各单项影响因素(包括: 自重、外荷载、支座沉降、体系转换、预应力、混凝土收缩及徐变)计算结果分别累计而成的, 即内力叠加、位移叠加和应力叠加。在预应力混凝土桥梁分段施工全过程计算中, 各计算阶段单元截面几何特征值不同(预应力钢筋压浆前扣除孔道, 压浆后按弹模比换算), 分别叠加后的内力、位移、应力与最终计算阶段截面几何特征值之间不存在简单的材料力学关系, 即按材料力学公式用叠加后的内力和成桥阶段截面几何特征值计算出的应力不等于叠加后的应力。

从图 1 和图 2 可以看出徐变系数随时间变化曲线本身是平滑的连续曲线, 但由于不同时段累计弹性应变不同, 徐变计算只能分阶段台阶式递推计算。因此理论上阶段划分越密, 每个阶段尤其是单元安装初期计算阶段时间间隔越小, 计算结果越精确。同样的结构施工过程阶段划分不同, 其徐变作用产生的结果也不同, 最终累计计算结果会有一定差异。实际工程计算时, 施工阶段数不可能无限多, 但每个阶段时间安排要尽量符合工程实际, 并尽可能多划分一些阶段, 使徐变计算结果更合理。

3 算例分析

3.1 素混凝土静定结构徐变变形分析

素混凝土静定结构为 20m 悬臂梁, 无钢筋。截面为 1m 高 $\times$ 0.4m 宽矩形(参见图 3)。单元划分为 8×2.5 m(参见图 4)。混凝土材料为 C50, 徐变终极值为 3.00, 收缩终极值为 0(不计), 加载龄期为 3d。按公桥规算法计算时, 构件理论厚度 28.571cm, 环境相对湿度 55%。按老化理论算法计算时, 弹性系数为 0.3, 徐变增长速度系数为 0.021。不计自重, 第一阶段在悬臂端分别沿轴向作用 4000kN 或沿竖向作用 4kN 的集中力。分 13 个阶段分别计算悬臂端轴向和竖向位移, 计算结果列于表 1。两种情况计算全过程结构内力和截面应力均不变。轴向加载模拟混凝土轴心受压构件长期荷载作用下的徐变变形。表 1 结果轴向压缩徐变变形规律

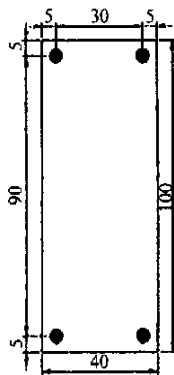


图 3 钢筋混凝土截面配筋图/cm

与图 1 和图 2 吻合, 总徐变位移 δ 与第 1 阶段初始弹性位移 δ_e (累计位移-徐变位移)比值 δ/δ_e 除老化理论原始算法外, 其余均接近给定的徐变终极值 3.00。老化理论原始算法 δ/δ_e 值为 1.03 是给定的徐变终极值 3.00 的 0.343 倍, 与图 1(a)徐变曲线基本吻合(按(2)式计算 56d 时徐变系数达到最大值 0.357)。竖向加载模拟混凝土纯弯构件长期荷载作用下的徐变变形, 表 1 结果悬臂端竖向徐变变形规律及 δ/δ_e 值与轴向压缩情况基本一致。由此验证了 GQJS 系统素混凝土轴心受压构件和纯弯构件徐变计算的正确性。

3.2 钢筋混凝土静定结构徐变变形分析

结构形式、截面尺寸、混凝土材料、荷载情况及阶段时间安排与 3.1 节完全一样, 不同在于矩形截面四个角各配置一根 $d=40$ mm 的 HRB400 螺纹钢筋, 如图 3 所示。按公桥规 JTG D62 算法计算由徐变引起各阶段支撑端截面应力及悬臂端位移的变化情况, 计算结果列于表 2。

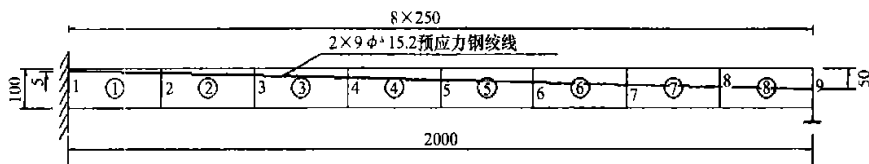


图 4 预应力混凝土超静定结构单元离散及钢束布置示意图/cm

表 1 素混凝土 20m 悬臂梁计算结果

阶段号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	δ_c/δ_e
时刻/d		1	5	9	13	18	23	28	56	90	180	360	720	1440	
轴向力作用	JTG D62 累计位移/mm	9.5	10.4	11	11.5	12.0	12.3	13.8	14.9	16.7	18.4	20	21.3	22.1	2.81
	算法 徐变位移/mm	3.7	0.9	0.6	0.6	0.4	0.4	1.5	1.1	1.8	1.8	1.6	1.2	0.8	
	JTG-023 累计位移/mm	6.2	7.1	7.9	8.6	9.1	9.6	11.9	13.7	15.6	18	20.2	21.8	22	2.79
	算法 徐变位移/mm	0.4	0.9	0.8	0.7	0.5	0.5	2.3	1.8	1.9	2.4	2.1	1.7	0.2	
	老化理论 累计位移/mm	7.6	9.1	10.5	12	13.4	14.5	18.8	21.1	22.9	23.2	23.2	23.2	23.2	3.00
	修正算法 徐变位移/mm	1.8	1.6	1.4	1.5	1.3	1.2	4.2	2.4	1.8	0.3	0	0	0	
	老化理论 累计位移/mm	7.1	8.1	8.9	9.8	10.4	10.9	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	1.03
	原始算法 徐变位移/mm	1.3	1	0.8	0.8	0.6	0.5	1	0	0	0	0	0	0	
竖向力作用	JTG D62 累计位移/mm	15.2	16.6	17.5	18.4	19.1	19.7	22	23.8	26.6	29.4	32	34	35.3	2.80
	算法 徐变位移/mm	5.9	1.4	0.9	0.9	0.7	0.6	2.3	1.8	2.8	2.8	2.5	2	1.3	
	JTG-023 累计位移/mm	9.9	11.4	12.6	13.7	14.5	15.4	19	21.9	25	28.8	32.2	34.8	35.1	2.77
	算法 徐变位移/mm	0.6	1.5	1.2	1.1	0.8	0.8	3.6	2.9	3.1	3.8	3.4	2.6	0.3	
	老化理论 累计位移/mm	12.1	14.6	16.8	19.2	21.4	23.2	29.9	33.7	36.5	37	37	37	37	2.98
	修正算法 徐变位移/mm	2.8	2.5	2.2	2.4	2.1	1.8	6.8	3.8	2.8	0.5	0	0	0	
	老化理论 累计位移/mm	11.3	12.9	14.3	15.6	16.6	17.3	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	1.03
	原始算法 徐变位移/mm	2	1.6	1.3	1.3	1	0.7	1.6	0	0	0	0	0	0	

注：①表中第 2 行时刻是指对应阶段开始的累计时间天数，②各阶段徐变计算时间为下一阶段与本阶段时间差，13 阶段徐变计算时间为计算完成时间（2880d）与 13 阶段时间差

表 2 钢筋混凝土 20m 悬臂梁计算结果

阶段号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13 [§]
时刻/d		1	5	9	13	18	23	28	56	90	180	360	720	1440	1440
轴向力作用	悬臂端 累计位移/mm	8.9	9.6	10.2	10.6	11.0	11.4	12.7	13.6	15.1	16.6	17.9	18.9	19.6	22.1
	徐变位移/mm	3.4	0.8	0.5	0.5	0.4	0.3	1.3	1.0	1.5	1.5	1.3	1.0	0.7	0.8
	支撑端 混凝土	9.13	9.04	8.99	8.94	8.91	8.87	8.75	8.65	8.50	8.35	8.21	8.11	8.04	10
	应力/MPa 钢筋	26.82	32.96	37.15	41.16	44.37	47.08	57.61	65.66	78.33	91.15	102.67	111.61	117.62	0
竖向力作用	悬臂端 累计位移/mm	12.9	13.9	14.7	15.4	15.9	16.3	18.0	19.3	21.2	23.1	24.6	25.8	26.6	35.3
	徐变位移/mm	4.8	1.1	0.7	0.7	0.5	0.5	1.7	1.3	1.9	1.8	1.6	1.2	0.8	1.3
	支撑端 上缘混凝土	-0.972	-0.955	-0.944	-0.933	-0.924	-0.916	-0.887	-0.865	-0.830	-0.794	-0.762	-0.737	-0.721	-1.2
	下缘混凝土	0.972	0.955	0.944	0.933	0.924	0.916	0.887	0.865	0.830	0.794	0.762	0.737	0.721	1.2
	上缘钢筋	-2.510	-3.085	-3.478	-3.853	-4.154	-4.408	-5.393	-6.147	-7.333	-8.534	-9.613	-10.450	-11.013	0
	下缘钢筋	2.512	3.087	3.480	3.855	4.156	4.410	5.395	6.149	7.335	8.536	9.614	10.452	11.014	0

注：①表中阶段号和时刻意义同表 1，②13[§]表示素混凝土悬臂梁 13 阶段计算结果。

表 1 与表 2 计算结果对比可以看出增加钢筋后，悬臂端位移明显减小，徐变位移随时间变化规律两者基本一致。总徐变位移 δ_c 与第 1 阶段初始弹性位移 δ_e 比值，即 δ_c/δ_e 值为 2.6，略小于素混凝土构件结构相应比值 2.8。素混凝土构件结构内力不变时截面应力不变，而钢筋混凝土构件，结构内力不变情况下，由于徐变变形引起截面应力重分布，导致截面混凝土和钢筋的应力随着时间的推移而不断变化。由此验证了 GQJS 系统计算钢筋混凝土构件徐变引起截面应力重分布的正确性。

3.3 预应力混凝土超静定结构徐变变形分析

截面尺寸、混凝土材料及阶段时间安排与 3.1 节完全一样。超静定结构一端为固结，另一端为可水平移动的竖向铰结支撑，如图 4 所示。梁体内配置两束 $f_{pk}=1860\text{MPa}$ 预应力钢绞线，每束钢绞线截面积为 $0.001\,26\text{m}^2$ ($9\phi^s 15.2$)。钢束在固结端距梁顶 0.05m，

在铰结端距梁顶 0.5m。钢束张拉控制应力为 1 395 MPa，弹性模量为 195 000MPa。钢束在铰结端张拉锚具变形为 6mm，孔道摩阻系数为 0.25，孔道偏差系数为 0.0015，松弛系数为 0.3，张拉系数 1.0。第 1 阶段张拉预应力钢束并压浆，施加每延米 10kN 的垂直分布荷载（不计自重），按公路桥规 JTG D62 算法计算各阶段固结端截面内力、应力及跨中位移由徐变引起的变化情况，计算结果列于表 3。

从表 3 可以看出增加竖向铰结支撑后，由于徐变弯曲变形被约束产生徐变二次力，使固结端弯矩逐渐减小。而徐变轴向变形未被约束，计算全过程固结端轴力不变。徐变位移、应力随时间变化规律合理。跨中总徐变位移 δ_c 与第 1 阶段初始弹性位移 δ_e 比值，即 δ_c/δ_e 值为 2.6，接近给定的徐变终极值 3.00。由此验证了 GQJS 系统计算预应力混凝土构件徐变引起结构内力重分布和截面应力重分布的正确性。

表 3 预应力混凝土超静定结构计算结果

阶段号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
时刻/d		1	5	9	13	18	23	28	56	90	180	360	720	1440
跨中位移/mm	累计	11. 2	12. 2	12. 9	13. 5	14. 0	14. 4	16. 0	17. 3	19. 2	21. 1	22. 8	24. 2	25. 1
	徐变	4. 2	1. 0	0. 7	0. 6	0. 5	0. 4	1. 6	1. 2	1. 9	1. 9	1. 7	1. 3	0. 9
固结端内力	轴力/kN	3170	3170	3170	3170	3170	3170	3170	3170	3170	3170	3170	3170	3170
	弯矩/kN·m	— 491	— 489	— 487	— 486	— 485	— 483	— 477	— 473	— 464	— 454	— 446	— 440	— 436
固结端应力/MPa	上缘混凝土	0. 817	0. 803	0. 794	0. 788	0. 784	0. 781	0. 792	0. 798	0. 828	0. 859	0. 884	0. 897	0. 902
	下缘混凝土	14. 84	14. 83	14. 82	14. 81	14. 81	14. 80	14. 74	14. 70	14. 62	14. 53	14. 45	14. 39	14. 36
	钢筋	1250	1247	1245	1244	1243	1242	1238	1235	1231	1226	1221	1217	1214

4 结语

本文概要总结了徐变计算理论和计算方法的发展情况, 通过徐变随时间变化曲线对比分析了几种徐变系数算法, 介绍 GQJS 软件中计算预应力混凝土桥梁结构施工过程徐变的结构分析方法, 并给出一些对比分析算例。计算结果分析表明: 用 GQJS 计算徐变, 对结构位移、内力、应力的影响与徐变作用规律比较符合, 徐变计算数值可信。

参考文献:

[1] JTJ 023-85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

[S] .
[2] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S] .
[3] 陆楸, 王春富, 冯国明. 公路桥梁设计电算 [M] . 北京: 人民交通出版社, 1983, 6
[4] 范立础, 徐光辉. 桥梁工程 [M] . 北京: 人民交通出版社, 2004, 3
[5] 王勖成, 绍敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M] . 北京: 清华大学出版社, 1997, 3.
[6] K J 巴特, E L 威尔逊. 有限元分析中的数值方法 [M] . 北京: 科学出版社, 1985, 5

(上接第 54 页)

重、水溶液的成分和含量、温度等多种因素的影响。

5 结论

- (1) 压实黄土在相同含水量的情况下, 土样导水系数、水分扩散系数随着压实度增大而减小。
- (2) 湿润锋湿度与速率的关系服从幂函数的规律。根据湿润锋的前进速度、湿润深度和平均含水量的关系, 可得出导水率和扩散率。
- (3) 路基含水量的分布是非稳定的, 并受到水分入渗的影响, 随水分迁移, 路基表层土中含水量减小, 下部土中含水量变大。
- (4) 试验成果可为有效控制路基压实度提供理论依据。

参考文献:

[1] 王铁行. 多年冻土地区路基计算原理及临界高度研究 [D] . 长安大学, 2001.
[2] 景宏君. 黄土路基积水入渗规律研究 [J] . 公路交通科技, 2004, 4.
[3] 雷志栋, 等. 土壤水动力学[M] . 北京: 清华大学出版社, 1988
[4] JTJ051-93, 公路土工试验规程 [S] .
[5] 邵明安. 根据土壤水分再分布过程确定土壤的导水参数 [J] . 中科院西北水保所期刊, 1985, 10.
[6] 刘祖典. 黄土力学与工程 [M] . 西安: 陕西科学技术出版社, 1997
[7] 刘巍然. 压实黄土路基中含水量的分布及水分迁移规律研究 [D] . 长安大学, 2004