

文章编号:1005-0523(2019)02-0001-07

徐变作用下混凝土结构力学行为的 ANSYS 分析

陈梦成, 杨超, 方苇, 谢力

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对混凝土结构徐变效应的问题,采用按龄期调整的等效模量方法结合 ANSYS 有限元商用软件包,将“单元生死”技术引入混凝土结构节段施工过程的徐变分析中,解决了节段施工过程中数据传输问题,并基于 ANSYS 参数化设计语言 APDL,编制了命令流,将徐变效应分析问题转化为伪弹性分析问题,计算简单。以经典三节段施工连续梁桥为例,采用现行规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中的徐变系数计算公式,分析了节段连续梁桥徐变以及徐变对连续梁桥内力和变形的变化,并与现有计算结果进行了比较,证实了本文方法的可行性和有效性。

关键词:混凝土结构;徐变;内力和变形;ANSYS

中图分类号:TU13;TU17

文献标志码:A

在大跨径连续梁桥、连续刚构桥、拱桥和斜拉桥的建设施工过程中,广泛采用了阶段现浇的悬臂施工方法。主要是因为该办法施工便捷、成本较低,与桥下交通或者河道状况相互影响较小。悬臂施工法往往在施工过程中会发生一次或多次体系变换,仅考虑结构的弹性内力和变形,显然是不合理的。事实上,在施工过程中,当结构体系发生转变,即由静定体系变成了超静定体系,那么按照原静定体系规律继续发展的徐变变形因结构体系转变而受到了约束;因此,在结构体系内出现了徐变次内力。对悬臂施工桥梁而言,由结构体系转换产生的徐变次内力会引起支座处负弯矩增大,易导致顶板混凝土出现裂缝;还会引起跨中挠度增大,改变桥梁原有设计线型,进而改变原有结构受力形式。在施工过程中如不计入徐变影响,则内力与变形计算结果与实际测试结果有较大偏差,不能作为施工控制的依据。混凝土桥梁施工过程中的徐变分析是桥梁设计施工控制关键问题。

早在 1916 年,McMillan 就开始意识到混凝土徐变问题。随后,人们对混凝土结构徐变问题的认识与研究得到了长足的进步,如:经典方法迪有辛格尔法(老化理论)、流动率法(弹性老化理论)和叠加法(弹性徐变理论)等^[1-3];现代方法有 Trost 松弛系数法、Trost-Bazant 按龄期调整的等效模量法(age-adjusted effective modulus method, AEMM 法)^[4]。我国对混凝土结构徐变的认识、研究与应用比较晚,较早的工作可以追溯到金成棣和周履的研究^[5-6],随着我国土木工程事业的发展,在徐变研究及其应用方面取得了丰硕的成果^[7-16]。

基于 ANSYS 二次开发接口平台,依据出台的新规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[17](后文简称《规范》)中规定的徐变系数计算公式,使用 MATLAB 语言结合施工信息,编制计算徐变系数程序,计算结果转化为相应的 APDL 命令流,实现施工过程中 ANSYS 徐变仿真。最后对经典算例三跨连续梁节段施工过程徐变进行仿真计算,验证本程序的可行性。

收稿日期:2018-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51878275)

作者简介:陈梦成(1962—),男,教授,博士,博士生导师,主要研究方向为工程结构材料耐久性,组合结构。

1 混凝土徐变求解有限元计算原理

1.1 徐变系数

依据《规范》附录 C,混凝土的徐变系数可按下列公式计算

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (1)$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (2)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \quad (4)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \quad (5)$$

$$\beta(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_{RH} + (t - t_0)/t_1} \right] \quad (6)$$

$$\beta_{RH} = 150 \left[1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (7)$$

式中: t_0 为加载时的混凝土龄期, d; t 为计算考虑时刻的混凝土龄期, d; $\phi(t, t_0)$ 为加载龄期为 t_0 , 计算考虑龄期为 t 时的混凝土徐变系数; ϕ_0 为名义徐变系数; β_c 为加载后徐变随时间发展的系数; f_{cm} 为强度等级 C25~C50 混凝土在 28 d 龄期时的平均圆柱体抗压强度, MPa, $f_{cm} = 0.8 f_{cu,k} + 8$ MPa; $f_{cu,k}$ 为龄期为 28 d, 具有 95% 保证率的混凝土立方体抗压强度标准值, MPa; ϕ_{RH} 为与年平均相对湿度相关的系数; RH 为环境年平均相对湿度, %; t_1 为 1 d; RH_0 为 100%; $h_0 = 100$ mm; $f_{cm0} = 10$ MPa。

1.2 徐变本构方程

当混凝土应力小于其强度的 50% 时, 混凝土产生的徐变与应力成正比。根据叠加原理, 若考虑在时刻 τ_0 开始施加初始应力 $\sigma(\tau_0)$, 随后又在不同的时刻 τ_i ($\tau_i > \tau_0, i = 1, 2, \dots, n$) 分阶段施加应力增量 $\Delta\sigma(\tau_i)$, 那么在其以后任意时刻 t 的总应变可以表达为

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0(\tau_0)}{E(\tau_0)} [1 + \varphi(t, \tau_0)] + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma(\tau_i)}{E(\tau_i)} [1 + \varphi(t, \tau_0)] + \varepsilon_{sh}(t, \tau_0) \quad (8)$$

式中: $\varepsilon(t, \tau_0)$ 为 τ_0 到 t 时刻产生的混凝土总应变; $\sigma_0(\tau_0)$ 为 τ_0 时刻加载产生的混凝土应力; $\Delta\sigma(\tau_i)$ 为 τ_i 时刻产生的应力增量; $E(\tau_i)$ 为 τ_i 时刻的混凝土弹性模量; $\varphi(t, \tau_0)$ 为时间 τ_i 到到 t 时刻的徐变系数。

1.3 有限元逐步计算法

1.3.1 计算方法

为了模拟实际混凝土桥梁节段施工过程, 考虑到各节段之间收缩徐变值之间的差异, 将整个施工过程分成若干阶段, 每个阶段又分成若干时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。阶段节点和时间间隔节点宜考虑为施工阶段的起始点、临时拆装支座点、结构体系转换点和加载卸载点。在每个时间间隔 Δt_i 内, 求出当前已形成的结构在该时间间隔内产生的全部节点位移增量和节点力增量。依据 Trost-Bazant 龄期调整等效模量法, 由徐变产生的应变增量有

$$\Delta\varepsilon_s(t_i, t_{i-1}) = \frac{\Delta\sigma_s(t_i, t_{i-1})}{E(t_{i-1})} [1 + x(t_i, t_{i-1})] \varphi(t_i, t_{i-1}) + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta\sigma(t_j)}{E(t_j)} \varphi(t_i, t_j) - \varphi(t_{i-1}, t_j) - \Delta\varepsilon_{sh}(t_i, t_{i-1}) \quad (9)$$

式中: $\Delta\varepsilon_s(t_i, t_{i-1})$ 为时间间隔 Δt_i 内收缩徐变产生的应变增量; $\Delta\sigma_s(t_i, t_{i-1})$ 为时间间隔 Δt_i 内收缩徐变产生的应力增量; $\Delta\sigma(t_j)$ 为 t_j 时刻加载产生的应力增量; $\varphi(t_i, t_{i-1})$ 为时间间隔 Δt_i 内的徐变系数; $x(t_i, t_{i-1})$ 为时间间隔 Δt_i 内的老化系数; $\Delta\varepsilon_{sh}(t_i, t_{i-1})$ 为时间间隔 Δt_i 内收缩产生的应变增量。

式(2)可进一步改写成如下形式

$$\Delta\sigma_s(t_i, t_{i-1}) = E_\varphi(t_i, t_{i-1}) [\Delta\varepsilon_s(t_i, t_{i-1}) - \overline{\varepsilon}_{sh}(t_{i-1})] \quad (10)$$

式中:

$$\bar{\varepsilon}(t_{i-1}) = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta\sigma(t_j)}{E(t_j)} [\varphi(t_i, t_j) - \varphi(t_{i-1}, t_j)] + \Delta\varepsilon_{sh}(t_i, t_{i-1})$$

$$E_{\varphi}(t_i, t_{i-1}) = \frac{E(t_{i-1})}{[1+x(t_i, t_{i-1})\varphi(t_i, t_{i-1})]}$$

由式(10)可以得出内力的表达式为

$$\Delta N_s(t_i, t_{i-1}) = E_{\varphi}(t_i, t_{i-1}) A_c [\Delta\varepsilon_s(t_i, t_{i-1}) - \bar{\varepsilon}(t_{i-1})] \quad (11)$$

$$\Delta M_s(t_i, t_{i-1}) = E_{\varphi}(t_i, t_{i-1}) I_c [\Delta\phi_s(t_i, t_{i-1}) - \bar{\phi}(t_{i-1})] \quad (12)$$

式中:下标 s 表示收缩徐变引起的增量。

$$\bar{\phi}(t_{i-1}) = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta M(t_j)}{I_c E(t_j)} [\varphi(t_i, t_j) - \varphi(t_{i-1}, t_j)]$$

其中 $\Delta M(t_j)$ 表示 t_j 时刻加载引起的截面弯矩增量。

从式(11)和(12)可以看出,收缩徐变引起的截面内力增量与收缩徐变引起的变形成线性关系;因此,在时间间隔 $\Delta t_i(t_i - t_{i-1}, i=1, 2, \dots, n)$ 内求解混凝土结构的徐变问题可以转化为求解混凝土结构的弹性问题,这里仅需要按龄期调整的等效模量 $E_{\varphi}(t_i, t_{i-1})$ 替代混凝土结构的弹性模量即可。

采用有限元逐步计算的时候,将每个阶段已建成的结构分割成若干单元,每个单元具有相同的徐变特性。为计算方便,假定在计算过程中不考虑收缩的作用。在第 i 个时间间隔 (t_i, t_{i-1}) 内对结构中任一梁单元 ab 的节点 a 和 b 进行锁定(固定),参见图 1,则徐变变形在锁定节点处引起的位移(轴向应变)和转角(曲率)增量为 0,由此,根据结构力学以及式(11)和(12),并注意到弹性模量 $E(t_{i-1})/E(t_j)=1$,梁单元 ab 的节点 a 和 b 处因徐变变形产生的节点锁定力 $\Delta N_{ab,s}, \Delta M_{ab,s}, \Delta Q_{ab,s}$ 可由单元内初始弹性荷载获得,即

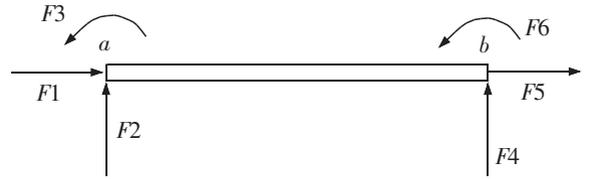


图 1 节点荷载正方向

Fig.1 Positive direction of node loading

$$\Delta N_{ab,s}(t_i, t_{i-1}) = - \sum_{j=1}^{i-1} \eta_{ij} \Delta N_{ab}(t_j, t_{j-1}) \quad (13)$$

$$\Delta M_{ab,s}(t_i, t_{i-1}) = - \sum_{j=1}^{i-1} \eta_{ij} \Delta M_{ab}(t_j, t_{j-1}) \quad (14)$$

$$\Delta Q_{ab,s}(t_i, t_{i-1}) = - \sum_{j=1}^{i-1} \eta_{ij} \Delta Q_{ab}(t_j, t_{j-1}) \quad (15)$$

式中没有下标 s 的变量为单元内初始荷载产生的节点弹性力增量。

$$\eta_{ij} = \frac{\varphi(i, j) - \varphi(i-1, j)}{[1+x(i, i-1)\varphi(i, i-1)]}$$

作用在梁单元 ab 上的力必须保持平衡,因此梁单元 ab 的节点 b 处因徐变变形产生的节点锁定力有

$$\Delta N_{ba,s}(t_i, t_{i-1}) = -\Delta N_{ab,s}(t_i, t_{i-1}) \quad (16)$$

$$\Delta M_{ba,s}(t_i, t_{i-1}) = -\Delta M_{ab,s}(t_i, t_{i-1}) \quad (17)$$

$$\Delta Q_{ba,s}(t_i, t_{i-1}) = -\Delta Q_{ab,s}(t_i, t_{i-1}) \quad (18)$$

至此,由式(13)–(18)即可获得梁单元 ab 上的节点锁定力。

1.3.2 逐步计算的步骤和方法

- 1) 结构单元和时间间隔划分,上节已经阐述,这里不再重复;
- 2) 在合拢之前的静定阶段,徐变只产生变形增量,不产生徐变次内力,这时老化系数取

$$x(t_i, t_{i-1}) = \frac{1}{1 - e^{-\varphi(i, i-1)}} - \frac{1}{\varphi(i, i-1)};$$

3) 体系转换之后,第*i*个时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 的计算步骤:

- ① 确定各单元节点的初始节点力,包含上一个时间间隔 Δt_{i-1} 终了时(t_{i-1} 时刻)的节点力和当前时间间隔 Δt_i 开始时(t_{i-1} 时刻)新增荷载在各单元节点产生的等效节点荷载增量;
- ② 确定各单元节点的初始节点位移;
- ③ 在第*i*个时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 开始时,亦即 t_{i-1} 时刻,锁定已建成结构各单元节点,根据结构力学和式(13)–(18),计算各单元节点锁定力 $\{\Delta F_s\}^e$;
- ④ 在第*i*个时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 终了时,亦即 t_i 时刻,解除所有节点的锁定力,即: $\{\Delta F\}^e = -\{\Delta F_s\}^e$;
- ⑤ 用按龄期调整的单元等效模量替换单元弹性模量,构建局部坐标下因徐变产生的单元刚度矩阵,即

$$[K_\varphi]^e = \frac{1}{1 + x(i, i-1) \cdot \varphi(i, i-1)} \cdot [K]^e \quad (19)$$

式中: $[K]^e$ 为单元弹性刚度矩阵;

⑥ 建立局部坐标系下各徐变单元平衡方程

$$[K_\varphi]^e \{\Delta U\}^e = \{\Delta F\}^e \quad (20)$$

⑦ 通过坐标变换,建立整体坐标下各徐变单元刚度和各单元节点等效节点荷载,并进行组装,形成整体坐标下混凝土徐变结构平衡方程,即

$$[K_\varphi] \{\Delta U\} = \{\Delta F\} \quad (21)$$

- ⑧ 求解式(21),得到整体坐标下第*i*个时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 内因徐变产生的所有单元节点位移增量 $\{\Delta U\}$;
- ⑨ 将整体坐标下的所有节点位移增量 $\{\Delta U\}$ 转换成局部坐标下因徐变产生的各单元节点位移增量 $\{\Delta U'\}^e$;
- ⑩ 将局部坐标下的单元节点位移增量 $\{\Delta U'\}^e$ 回代到单元平衡方程(20),可获得局部坐标下单元节点辅助力 $\{\Delta F'\}^e$ 。在第*i*个时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 内单元*ab*节点力的实际增量为

$$\{\Delta F\}^e = \{\Delta F_s\}^e + \{\Delta F'\}^e \quad (22)$$

至此,按照上述步骤可以求出因徐变产生的所有各单元节点在第*i*个时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 内实际的位移增量 $\{\Delta U\}$ 和节点力增量 $\{\Delta F\}^e$,将以上实际增量累加到第*i*个时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 开始时(t_{i-1} 时刻)的节点位移和节点力,即得到第*i*个时间间隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 终了时(t_i 时刻)的节点位移和节点力,再进入下一个时间间隔的计算。据此,从施工开始到任一时间结束,可计算得到混凝土结构任一时间间隔所有单元的节点位移和节点力。

2 算例分析

金成棣教授在1981年采用有限单元法对三跨连续梁经典算例进行徐变计算^[5],该算例可看做验证徐变内力计算方法的“试金石”,此后国内陆续有学者用该经典算例验证其徐变计算方法^[12-15],但是近几年相关文献非常少。随着有限元方法与计算机技术的快速发展^[15]以及新规范^[17]的出台,有必要采用本文方法对此经典算例再次进行复算。

算例概述:三跨连续梁在支架上分3次现浇,计算结构简图如图2所示,各段一次浇筑后经养护7d落架,前后段落架时间间隔14d。梁计算跨度3×30m,自重 $q=10$ t/m,构件理论厚度 $h=400$ mm, $RH=70\%$, $f_{cm}=20.1$ MPa。

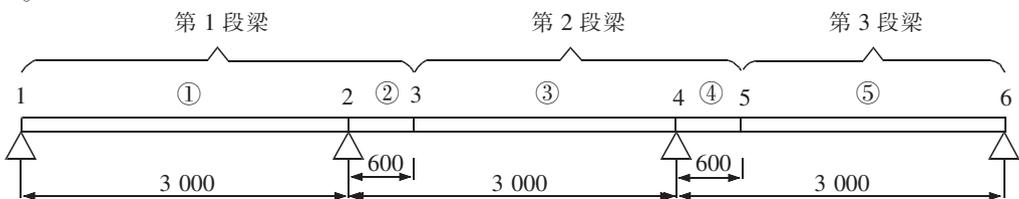


图2 计算结构简图

Fig.2 Diagram of computational structure

2.1 分析计算过程

在 ANSYS 程序中采用 APDL 命令方式创建 1.mac 宏文件,在宏文件环境中选用 2D 弹性单元 beam3 建立三跨连续梁模型,模型中共 46 个节点,45 个单元,每个单元长度 2 m。在支座 1 处约束 x 与 z 方向上的位移,支座 2,4 和 5 约束 y 方向上位移,并在自重作用下求解模型,采用“单元生死”功能,分别激活和钝化所需计算梁段单元,得到并储存不同梁段自重作用下各单元节点的弹性弯矩和剪力值。对分段浇筑梁段,由于其龄期与持荷加载时间不同,使用 MATLAB 语言结合施工信息,编制计算徐变系数程序,计算结果转化为相应的 APDL 命令流。采用 ANSYS 程序中“单元生死”功能,建立分阶段施工连续梁有限元模型,得到弹性理论解。

2.2 计算结果与参数分析

1) 系数分析。本文在 ANSYS 程序中分别选用金文系数^[9]与我国《规范》(JTG3362-2018)附录 C 徐变计算办法分别计算该算例的内力与挠度情况。金文中查表得到的徐变系数与新规范计算得到徐变系数在表 1 中列出,其中 i 表示徐变计算考虑时刻的混凝土龄期, $d;j$ 表示加载时的混凝土龄期, d 。比较结果发现:按规范计算得到的徐变系数均与金文给出的徐变系数相差较大;系数 $1/(1+x(i,i-1)\varphi(i,i-1))$ 值比金文给出的较大,该差值比徐变系数的差值小一个数量级;因此该系数对徐变计算的影响相对徐变系数对徐变计算的影响较小;系数 $\eta(i,j)$ 比金文给出的较小,且不同的梁段差值不同。考虑老化系数公式内系数 $1/(1+x(i,i-1)\varphi(i,i-1))$ 值对徐变内力的影响相对于徐变系数较小。

表 1 徐变系数分析
Tab.1 Creep coefficient analysis

徐变系数	$\varphi(i,j)$			$\frac{1}{1+x(i,i-1)\varphi(i,i-1)}$			$\eta(i,j)=\frac{\varphi(i,j)-\varphi(i-1,j)}{1+x(i,i-1)\varphi(i,i-1)}$		
	规范	金文	差值	规范	金文	差值	规范	金文	差值
$\varphi(\infty,35)$	1.894 2	2.200 0	0.305 8	0.448 5	0.404 2	-0.044 3	0.849 6	0.889 2	0.039 7
$\varphi(35,21)$	0.716 5	0.322 0	0.394 5	0.448 5	0.404 2	-0.044 3	0.616 5	0.816 5	0.200 0
$\varphi(35,7)$	1.080 0	0.636 0	0.444 0	0.448 5	0.404 2	-0.044 3	0.671 1	0.810 0	0.138 9
$\varphi(\infty,21)$	2.089 2	2.340 0	0.250 8	0.419 4	0.386 2	-0.033 2	0.876 2	0.903 7	0.027 5
$\varphi(21,7)$	0.881 0	0.480 0	0.401 0	0.419 4	0.386 2	-0.033 2	0.710 0	0.834 2	0.124 2
$\varphi(\infty,7)$	2.570 0	2.640 0	0.070 0	0.359 3	0.351 8	-0.007 5	0.923 5	0.928 8	0.005 3

2) 内力分析。不同徐变系数计算得到的内力结果在表 2 列出,其中包括金文计算结果、按本文方法采用金文系数得到结果以及按本文方法采用新规范系数按不同混凝土标号计算得到的结果。对比金文计算结果发现,按本文计算方法得到的结果吻合较好。通过选取不同徐变计算办法,对结果进行分析,验证了徐变

表 2 计算结果对比分析
Tab.2 Comparative analysis of results

节点位置	金文最终 弯矩值	金文系数最 终弯矩值	采用新规范系数最终弯矩值		
			C30	C20	C15
节点 2	-8 330.1	-8 178.3	-7 737.4	-7 845.72	-7 906.6
节点 4	-8 986	-8 989.9	-8 938.5	-8 995.46	-9 026.2

系数是影响徐变内力计算的关键因数。金文对徐变系数的计算没有考虑混凝土强度的影响,但是新规范徐变系数计算公式中考虑混凝土强度,按新规范徐变系数计算公式,发现混凝土强度越小,计算得到的徐变内力越大。

3) 挠度分析。弹性情况与不同徐变系数计算得到的位移结果见图3,其中包括按本文方法采用金文系数得到挠度曲线以及按本文方法采用新规范系数按不同混凝土标号计算得到的挠度曲线。计算结果发现:考虑徐变效应下连续梁位移值均比弹性情况下位移值更大;采用金文系数计算得到挠度曲线与新规范 C20 更接近。比较新规范系数下不同混凝土标号位移情况,发现梁段位移值随混凝土标号增大而减小。

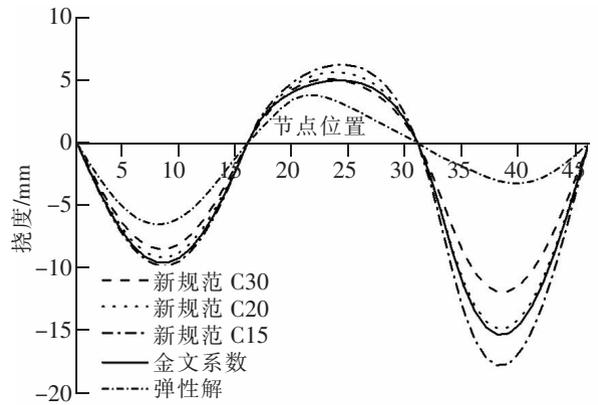


图3 不同徐变系数计算得到的挠度图
Fig.3 Diagram of deflection calculated by different creep coefficients

3 结论

通过以上理论分析与程序计算,得到以下结论:

- 1) 基于 ANSYS 平台,采用叠加法的逐步计算有限元方法对分段浇筑的三跨连续梁进行徐变次内力计算得到的结果准确可靠;
- 2) 通过对金文徐变系数与新规范徐变系数计算得到结果进行分析,验证了徐变系数是影响徐变内力计算的关键因素;
- 3) 考虑老化系数公式内系数 $1/(1+x(i,i-1)\varphi(i,i-1))$ 值对徐变内力的影响相对于徐变系数较小,但不容忽视;
- 4) 混凝土强度对徐变次内力计算较为敏感,表现为混凝土强度越小,徐变内力越大;
- 5) 徐变效应下连续梁位移值比弹性情况下大;梁段位移值随混凝土标号增大而减小。

参考文献:

- [1] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,1988:152-155.
- [2] 金问鲁. 预应力混凝土弹性-徐变状态统一计算理论[M]. 北京:中国铁道出版社,1990:78-82.
- [3] 周履,陈永春. 收缩、徐变[M]. 北京:中国铁道出版社,1994:216-218.
- [4] BAZANT B P. Creep and shrinkage in concrete structures[M]. Chichester:Wiley,1982:12-14.
- [5] 金成棣. 混凝土徐变对超静定结构变形及内力的影响——考虑分段加载龄期差异及延迟弹性影响[J]. 土木工程学报,1981(3):21-35.
- [6] 周履. 用有限单元法计算混凝土结构徐变影响的若干计算理论和方法介绍[J]. 桥梁建设,1987(3):47-75.
- [7] 高政国,黄达海,赵国藩. 混凝土结构徐变应力分析的全量方法[J]. 土木工程学报,2001,34(4):10-14.
- [8] 赵品,王新敏. 混凝土桥梁徐变计算的有限元分析[J]. 国防交通工程与技术,2008,6(6):36-38.
- [9] 文永奎,陈政清. 考虑预应力损失的混凝土梁徐变计算方法[J]. 中国铁道科学,2005,26(3):36-41.
- [10] 胡守旺,彭建新,张建仁,等. 钢管混凝土拱桥核心混凝土徐变效应可靠度分析[J]. 中国公路学报,2017,30(3):183-190.
- [11] 张治成. 大跨度钢管混凝土拱桥的徐变分析[J]. 工程力学,2007,24(5):151-160.

- [12] 陈太聪,苏成,韩大建. 桥梁节段施工过程中混凝土收缩徐变效应仿真计算[J]. 中国公路学报,2003,16(4):55-58.
- [13] 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.
- [14] 颜东煌,田仲初,李学文,等. 混凝土桥梁收缩徐变计算的有限元方法与应用[J]. 中国公路学报,2004,17(2):55-58.
- [15] 黄毅东. 基于 ANSYS 平台的混凝土收缩徐变分析[J]. 广东建材,2014(3):36-40.
- [16] 卢志芳. 考虑时变性和不确定性的混凝土桥梁收缩徐变及预应力损失计算方法[D]. 武汉:武汉理工大学,2011:56-57.
- [17] 中交公路规划设计院. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[M]. 北京:人民交通出版社,2018:118-120.

ANSYS Analysis of Mechanical Behavior of Concrete Structure under the Effect of Creep

Chen Mengcheng, Yang Chao, Fang Wei, Xie Li

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the problem of creeping effect of concrete structure, the age-adjusted effective modulus method is combined with the ANSYS finite element commercial software package to introduce the "unit life and death" technology into the creep analysis of the concrete structure segment construction process. The data transmission problem between the segment construction process, and based on the ANSYS parametric design language APDL, the command flow is compiled, and the creep effect analysis problem is transformed into pseudo-elastic analysis problem, and the calculation is simple. Taking the classic three-section continuous beam bridge as an example, the creeping coefficient calculation formula of the current code "Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridge and Culverts" is used to analyze the creep of the continuous beam bridge. The internal force is compared with the existing calculation results, which proves the feasibility and effectiveness of the proposed method. And the node displacement curve of each node is drawn.

Key words: concrete structure; creep; internal force and deformation; ANSYS