

2004 新版公路桥规有关内容的计算机程序实现方法及应用

阴存欣

(北京市市政工程设计研究总院, 北京 100045)

摘 要:该文从刚颁布不久却已广为应用的新桥规的有关计算内容出发,从原理上给出了各种有关重点内容的计算方法,包括荷载效应组、汽车活载效应、非线性温度梯度、钢束二次力、收缩徐变损失及二次力、频率、振型与冲击系数,以及承载能力计算时的内力组合计算方法,钢束进入受压区的非线性求解过程等,并给出了新规范应用中的一些相关结论。

关键词:公路桥梁;非线性温度梯度;振型与冲击;二次力;承载能力;受压区钢束;计算方法

中图分类号:U442.51 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)03-0116-04

0 前言

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ D62-2004)及《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60-2004)(以下简称“新桥规”)已于2004年颁布并实施,和85规范相比,新桥规在计算和构造方面都有较大变化,尤其是在计算方面,不仅原有的内容作了较大改进,还增加了许多新内容。所以,许多桥梁设计计算软件都需要在计算内核上作很多工作来适应这种情况。本文从新桥规在正常使用阶段应力状态计算和承载能力计算上发生变化的主要内容来具体阐述它们在计算机程序中的实现方法及其应用。

1 荷载效应计算有关内容的程序实现方法及应用

1.1 荷载效应组合

若在系统地理解新桥规时具有一定的难度,只要抓住以下三条主线便可纲举目张:一是承载能力极限状态计算,即通常所说的正截面抗弯、斜截面抗剪、斜截面抗弯强度计算,该部分内容在各种结构规范中都是必不可少的,较旧桥规而言,新桥规在该部分变化不小;二是正常使用极限状态的应力(包括短期和长期效应的拉应力和主拉应力的抗裂验算)和变形计算,此处应力计算时活载不计冲击,短期效应组合时活载考虑频遇值系数,长期效应组合时活载考虑准永久值系数,长期效应只包括直接作用的荷载,其中短期效应和长期效应组合的正应力验算及短期效应组合下的主应力验算已列入强制性条文;三是短暂状况和持久状况的应力验算,包括混凝土的最大压应力和最大主压应力验算,以及钢束的应力状态验算,此处的活载效应含冲击系数,且采用标准值进行组合。

对于不允许开裂的预应力构件,可以将所有单项应力输出到临时文件,按规范规定的各种组合系数进行线性组合,在短期和长期组合中扣除冲击效应,在长期组合中不计间接荷载效应,并注意短期效应和长期效应中线性温度和非线性温度梯度的组合系数也不同。对于主应力的组合,则较为复杂,对于每一组合都考虑每一活载的6种状态,即 N_{max} 、 Q_{max} 、 M_{max} 、 N_{min} 、 Q_{min} 、 M_{min} 相应的 N 、 Q 、 M 状态,进行比选,若有 n 种活载则要考虑 6^n 种状态进行比选,先计算每一状态下的各自的剪应力和相应的正应力并进行组合计算各种状态下的主应力,从中选出最大和最小主应力,不能先计算出主应力再将主应力进行组合。

1.2 汽车活载效应

新桥规的活载中去除了85规范的挂车,履带车荷载,且将汽车荷载根据公路等级归类为公路Ⅰ级,公路Ⅱ级荷载。该汽车荷载模式在车辆荷载即横向布置间距上和超-20、城A相同,但车道荷载采用了集中载加分布载的形式,采用该模式对活载效应的计算带来了一定的简化。由于城市桥梁荷载在荷载模式上和新桥规的活载具有相似性,笔者认为完全可以在采用统一的荷载形式和不同的数值或荷载等级的基础上做到进一步的统一,以简化桥梁的设计。

在程序中根据 N 、 Q 、 M 及反力的影响线对集中载和均布载进行最不利布载后将两种效应叠加即可。在计算影响线加载时有一个应注意的问题,计算最大弯矩对应的剪力时,由于在弯矩影响线最不利点对应的剪力影响线存在突变台阶,计算Ⅰ端的 M_{max} 或 M_{min} 对应的 Q 时要取影响线突变点左边的值,而计算Ⅱ端的 M_{max} 或 M_{min} 对应的 Q 时要取影响线突变点右边的值,否则计算出的活载集中力最大弯矩对应的剪力在Ⅱ端结果会不正确。

1.3 非线性温度梯度效应

由于平截面假定条件的采用,非线性温度梯度下的自由变形将受到纵向纤维之间的约束而强行恢复到平截面状态,在静定体系下将产生温度自应力,在超静定体系下还有不同于线性温度下的超静定温度应力。该自应力与结构约束条件无关,只与截面形状有关。在简支梁等静定体结构或超静定结构的梁端,在非线性温度梯度下也会在梁的截面上产生非线性分布的自应力。

根据终止应变和初始自由应变的几何关系可得应变变化,根据物理关系可得式(1)所示的应力分布,由于应力以压应力为正,应变以拉应变为正,所以式(1)中含负号。根据截面上 N 、 M 的平衡方程可解出梁底的轴向应变 ϵ_o 和截面变形曲率 ϕ ,如式(2)和式(3)所示,进而可求得超静定固端力,最后将超静定效应和自应力叠加。在程序中 ϵ_o 和 ϕ 的计算采用数值积分求解。若用手算求解,凡是截面变宽点或温度二者之一有不同的函数解析表达的区段就得划分为一个独立的积分区间,沿整个截面高度进行分段积分。

$$\delta_s(y) = -E \Delta \epsilon(y) = -E(\epsilon_o + \phi \cdot y - \alpha t(y)) \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\alpha}{I} \int_0^h t(y) b(y) (y - y_c) dy \quad (2)$$

$$\epsilon_o = \frac{\alpha}{A} \int_0^h t(y) b(y) dy - \phi \cdot y_c \quad (3)$$

通过计算表明,就自应力而言,降温时截面上缘会出现较大的拉应力,该项应力会给设计增加较多配筋。图1为一个1.8m高的单跨单室的混凝土常规匝道箱梁,在采用C50混凝土,采用新桥规规定的梁顶-7℃降温梯度模式的条件下,求得的温度自应力呈明显的非线性分布,梁上下翼缘同拉,中间受

收稿日期:2006-03-07

作者简介:阴存欣(1972-),男,福建宁化人,工学博士,高级工程师,主要从事桥梁结构的设计、研究及设计计算软件的开发工作。

压。跨中上缘的降温自应力为 1.455MPa(见图 2),采用相同轮廓的支点处上缘的降温自应力已达 -1.657MPa(见图 3)。当和支点负弯矩的效应叠加后将使支点上翼缘变得很不利。

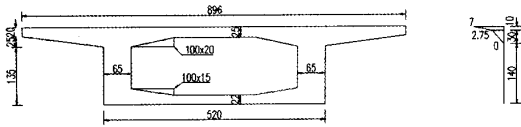


图1 箱梁跨中断面及降温梯度

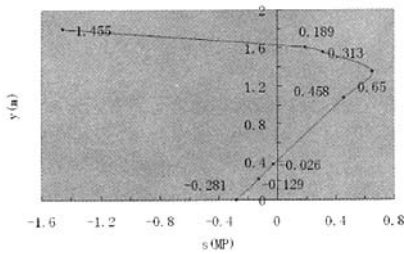


图2 跨中截面降温自应力

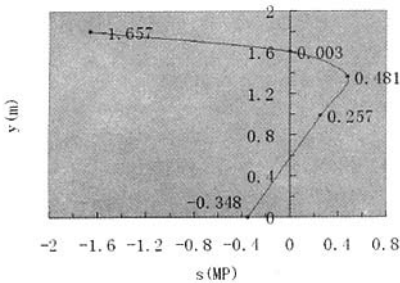


图3 支点截面降温自应力

1.4 钢束的二次力效应

新桥规承载能力计算时,所有的二次力(包括钢束二次力,收缩徐变二次力)都要作为荷载效应参与计算,而老规范不计算该项效应。

有两种计算钢束二次力的方法,一种是将含全部约束条件的预应力引起的超静定约束反力作为外力反加到基本结构体系上求解得出的效应即为钢束二次力效应;另一种方法是用总的预应力效应减去钢束的一次力效应。由于钢束一次力计算比较简单,建议采用第2种方法。各种软件计算时一般都采用了张拉钢束当前阶段将钢束单项效应一分为二直接输出钢束一次力和二次力的方法,作为一种近似的计算,它少了后期收缩徐变损失引起的钢束二次力,及在发生后体系转换时钢束的一次二次力也会继续发生转换,但由收缩徐变损失引起的钢束二次力部分占总的二次力的比例很小,对于没有体系转换的常规结构仍然可以满足工程计算的精度要求。

在承载能力计算时,老规范不考虑该项效应,而新规范考虑钢束二次力。由于钢束的预应力效应和自重效应在结构中占了很大的比例,所以计及该项后会给强度计算带来一定的差异。

1.5 收缩徐变效应

收缩徐变对结构的影响包括收缩徐变预应力损失和收缩徐变重分布的二次力两个方面。但其核心是相同的,即收缩徐变变形的计算。新桥规中对于收缩和徐变计算采用了全新的

不同的发展变化曲线,且该效应有 10%的折减。

由于该项内容的计算较复杂,往往是各个程序的计算结果差异的集中体现。对有体系转换的结构来说,影响很大。在此把计算收缩徐变的有关过程描述如下。

收缩徐变二次力的计算可采用如下的步骤:将施工阶段分为 N 个时间大区,在计算机内存已不是问题的现在,一般可以将每个施工阶段分为一个时间大区;计算每个大区的累计位移增量;将计算大区之前各个大区的位移乘以当前计算大区的徐变发展系数后相加得到徐变位移;将徐变位移乘以单元刚度矩阵;求节点固端力和力向量;解当前约束条件下的状态,并将解和固端力叠加。以上过程和求解超静定结构在变化温度荷载下的效应类似。求解当前计算大区 NST 收缩徐变自由位移的方法可以用公式表示为:

$$\Delta u_o = \sum_{i=1}^{nst} \Delta \varphi_{nst} \times e u_i \quad (4)$$

$$\Delta \varphi_{nst} = \varphi(\tau, t_2) - \varphi(\tau, t_1) \quad (5)$$

其中 $\Delta \varphi_{nst}$ 为 NST 大区的徐变系数增量。 $e u_i$ 为第 i 个时间大区的所有位移增量。 τ 为混凝土受力龄期, t_1, t_2 为时间大区首尾点的时间数值。

收缩徐变预应力损失的计算过程和收缩徐变二次力的计算过程具有一定的相似性,只是后者先计算徐变变形,前者则先计算初应力,即计算当前计算大区前各个大区的初应力增量在本大区产生的徐变效应,及计算本计算大区的收缩效应,可以归结为如下的步骤:将施工阶段分为 N 个时间大区;计算当前大区的应力增量及产生的收缩徐变效应;计算当前计算大区的初应力或初内力,为下一个计算大区用;读取当前计算大区前各个大区的初应力,并计算它们在当前计算大区的收缩徐变效应并累计。其中的初应力为考虑了计算阶段自重,预应力等所有发生荷载的效应引起的钢束中心处的混凝土应力。并且要注意徐变在后继阶段会产生连锁效应而收缩则只要将各个阶段的效应累计一次。

在以上的计算中,时间轴的确定非常关键。有 4 个时间参数需要明确, τ, t_1, t_2, t_3 为收缩初始龄期。 τ 为混凝土受力龄期, t_1, t_2 为时间大区首尾点的时间数值。对于简支变连续等有体系转换的结构,对于时间参数很敏感。若发生体系转换时混凝土龄期较长,体系转换时混凝土的徐变已完成较多,则可用于使内力发生重分布的徐变潜力较小,最后徐变发生完成后的内力将更趋近于转换前的体系模式;相反,若发生体系转换时混凝土龄期较短,体系转换时发生的徐变较少,则可用于使内力发生重分布的徐变潜力较大,最后徐变发生完成后的内力将更趋近于转换后的体系模式。

新旧规范的收缩徐变计算结果的差别大小是广大设计人员所关心的问题。由于收缩终极值和徐变发展系数终极值是收缩徐变大小的主要影响因素,所以只要从两种规范给出的收缩徐变终极值的差异大小便可大体知道采用新旧两版规范计算收缩徐变的差别大小。

1.6 自振频率、振型,与冲击系数

新桥规正文中规定用结构的基频来计算活载的冲击,应该说合理的。附录里规定在计算条件满足时宜优先采用有限元方法计算基频的方法来计算冲击,在计算条件不具备时可采用附录中的简化算法。

求结构自振频率和振型的力学问题归结到数学上,即是求动力方程组 $(K - \omega^2 M) \phi = 0$ 的广义特征值和特征向量的问题。在刚度矩阵基础上再组集质量矩阵,再用子空间迭代法或淘汰矩阵加逆迭代法解动力方程的广义特征向量和特征

值,若采用迭代法和淘汰矩阵相结合的方法,一定要严格控制收敛精度,否则会发生振型解的顺序错乱的情况。

图4~图5是某处一座竣工的 $2 \times 27\text{m}$ 连续梁的自振特性计算结果。该桥采用图1中相同的断面为跨中断面,外轮廓相同的实心断面为支点断面,主梁和中墩之间采用固定铰结的盆式支座,柱高 7.2m ,采用 $1.6 \times 0.8\text{m}$ 方柱。边支点采用纵向活动支座,主梁采用C50混凝土,墩柱采用C30混凝土。在对结果的分析中通过自振频率和相应振动形状与冲击系数的关系可以看出,计算模型中除了主梁外还有墩柱等下部结构,且柱的抗弯刚度较小,使第一阶振型表现为柱的水平振动,第二阶振型为主梁的垂向振动,若按第一阶基频 1.567Hz 作为依据算出的冲击系数为 1.064 ,明显偏小,而用主梁垂向振动相应的频率 5.48Hz ,算出的冲击系数为 1.285 。建议在类似的工况中改用更高阶的主梁的垂向振动振型相应的频率作为计算冲击的依据。

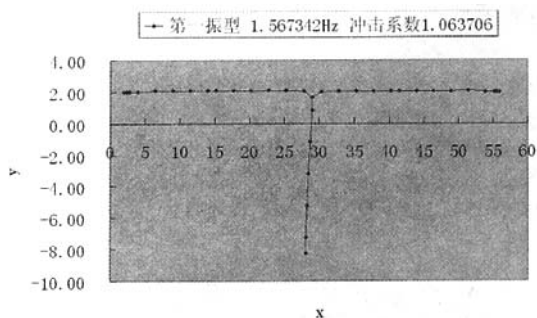


图4 第一振型——柱的水平振动

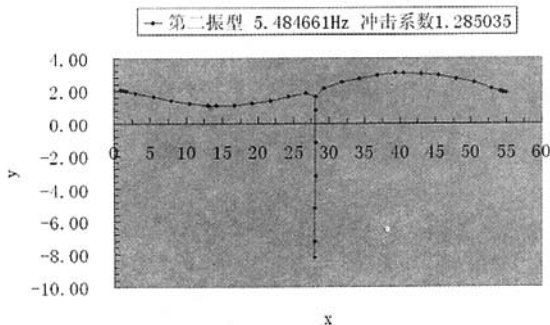


图5 第二振型——主梁垂向振动

2 承载能力极限状态有关内容的程序实现方法及应用

新桥规的承载能力极限状态计算内容变化也较大,主要表现在:荷载组合发生了很大变化。引进了结构重要性系数,材料分项系数,规定汽车以外的可变荷载效应超过汽车时要成为第一可变荷载参与组合,活载类别总数不同组合系数也不同;考虑了变高度梁弯矩对抗剪强度的影响;荷载效应中需考虑钢束的二次预应力,考虑收缩徐变的二次力。钢束进入受压区时的强度计算也有一些变化。

下面就承载能力的荷载组合及考虑受压区钢束进行强度计算的两个主要的难点问题来进行阐述。

2.1 按新规范规定进行承载能力状态的内力组合计算

设计时若只取截面绝对值最大的内力一侧进行配筋计算将显得不安全,尤其是四点附近,正负弯矩的绝对值可能很接近,应采用正负不利弯矩均进行强度计算的上下缘包络设

计。由于规范中的荷载类别较多,在有利和不利时又有不同的组合系数,为了求得上下缘的不利内力采用了如下思路:首先不论有多少种组合,对于上缘或下缘自重效应只有不利和有利两种情况,然后以此大分类为基础,与自重效应同号(异号)的单项效应分别向自重靠齐(分离),可以列出自重不利和自重有利前提下的两个队列,最后两个队列的内力分别归类分配到上缘或下缘进行配筋设计。比如跨中截面自重对下缘不利,对上缘则是有利的。若组合出的最大、最小内力同号,则只要取绝对值更大的值对一侧进行强度计算,否则上、下缘均要进行计算。程序中可以根据存储各阶段单项内力的临时文件进行自动组合,其中的最不利强迫位移和最不利温度也是根据与自重效应的符号关系来判断的。程序中应考虑可能发生的各种组合,便可以满足规范规定的各种工况,这些组合若用手算,其工作量之大是可想而知的。

2.2 钢束进入受压区时的承载能力计算在程序中的实现

在对截面的上下缘均进行正截面抗弯承载能力计算时,若上下翼缘都进行强度计算,在某些断面处钢束进入受压区是不可避免的。而钢束进入受压区的抗弯强度计算无论手算还是电算都是一个难点,以致有时还发生忽略受压区钢束影响的错误做法。另外,许多程序对于强度计算都采用校核承载力的方法,而不能直接解出普通钢筋的配筋量。正确的做法应该考虑受压区钢束的影响,沿用规范承载力承载力即破坏状态下的平衡公式和正常使用时的应力状态公式,求解承载能力状态下受压区预应力钢束的应力,按非线性迭代方法程序自动按规范规定求解受压区高度和配筋量。求解破坏状态下受压区预应力钢束的应力是求解钢束进入受压区时的正截面抗弯承载能力的核心所在,计算公式如式(6)~(9)所示,参数意义和规范一致。

$$\begin{aligned} f_{pd} - \sigma_{p0}' &= \sigma_{pe}' + E_p (0.002 - \sigma_{pe}' / E_p) \\ &= -(\sigma_{con}' - \sigma_l) + f_{pd}' - \alpha_{EP} \sigma_{pc} \\ &= f_{pd}' - \sigma_{p0}' \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_0} \pm \frac{N_p \times e_{p0}}{I_0} y_0 \quad (7)$$

$$N_p = \sigma_{pe} A_p + \sigma_{pe}' A_p' - \sigma_{l6} A_s - \sigma_{l6}' A_s' \quad (8)$$

$$e_{p0}' = \frac{\sigma_{pe} A_p y_p - \sigma_{pe}' A_p' y_p' - \sigma_{l6} A_s y_s + \sigma_{l6}' A_s' y_s'}{\sigma_{pe} A_p + \sigma_{pe}' A_p'} \quad (9)$$

若 $f_{pd} - \sigma_{p0}'$ 的值为正号表示压应力,负号为拉应力。当永存应力较小时,破坏状态下受压区预应力钢束可能仍受压。

$\sigma_{pe}' + E_p (0.002 - \sigma_{pe}' / E_p)$ 的物理意义为受压区预应力钢束的永存应力,加上从建立永存应力的状态到发生强度破坏状态受压区混凝土压坏时的钢束应力增量,其中的 σ_{pe} 为建立永存应力状态时的受压区钢束中心点处混凝土的有效预压力。由于此时要求解受压区的高度与 $A_p A_p'$ 的划分界限有关,而 $A_p A_p'$ 又与待求的受压区高度 x 有关。使得该问题的求解是一个非线性的问题,必须经过迭代来完成。首先假设全部钢束在受拉区,求解 x ,根据此 x 判断是否有钢束进入受压区,若有,则按此 x 重新划分 $A_p A_p'$,继续求解直至解出的结果收敛。

受压区钢束距离形心较近且永存应力较低时,按规范求得的破坏时的受压区钢束的应力为压应力,按新分的 $A_p A_p'$ 重新求解的受压区高度 x 很小,一方面由于 A_p' 的存在使 A_p 变小了,另一方面 A_p' 的作用和 A_p 相反,在新的 x 下所有迭代前进入受压区的钢束在迭代后又都进入了受拉区,回到了原始状态,即 x 的迭代是不收敛的无穷振荡型的死循环。此

时可以直接按不满足条件 $x \geq 2a'$ (此时受压区钢束的应变达不到 ϵ_{sy} 对应的极限应变 0.002) 的对压区钢束中心取矩的公式求极限弯矩。

从规范中还可注意到,规范规定在求解 σ_{pc} 时用的是后张法公式中相应的力,但截面特性用的是换算截面及中性轴,原因在于消压过程混凝土和钢束已经开始共同变形。同时需要指出的是,为适于有体系转换时的承载能力计算,应采用直接读取多阶段计算结果文件来进行强度计算的方法,而且徐变有关的时间参数要确保输入正确。

3. 总结

以上是在运用新桥规进行计算时必然会遇到的一些重

点难点问题,笔者根据新桥规的理解,并结合有关结构计算理论进行总体构思及详细的算法设计,用计算机语言对桥梁结构计算软件的核心按新规范的要求进行了编制,并已成功应用到了当前的设计工程之中。

参考文献:

- [1] JTG D62-2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] JTG D60-2004,公路桥涵设计通用规范.北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 路堑,王春富,冯国明.公路桥梁设计电算(下)[M].北京:人民交通出版社,1983.

