

混凝土结构温度应力计算必须考虑的因素

吴胜兴

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 非线性有限单元法是计算混凝土结构温度应力最为有效的方法,但其计算结果的合理性取决于计算程序能否全面合理地反映影响混凝土结构温度应力的诸因素。本文对影响混凝土结构温度应力的主要因素,即徐变与应力松弛、弹性模量、内外约束、裂缝、干缩变形进行了讨论。

关键词 温度应力 混凝土结构 徐变与应力松弛 弹性模量 约束 裂缝 干缩变形

目前,对混凝土结构温度应力的计算综合起来有以下几种方法:①认为混凝土开裂后,温度应力全部释放,无需计算;②按弹性体系计算温度应力;③对杆件体系结构,按弹性体系计算温度应力,但适当降低构件的刚度以考虑构件开裂等的影响;④对连续体结构,按弹性体系计算温度应力,然后再考虑应力松弛,将温度应力适当降低;⑤按非线性有限元方法并考虑影响温度应力的诸因素计算混凝土结构的温度应力。在这些方法中,方法①根本不进行温度作用设计,在某些情况下会造成温度裂缝的过度开展和结构变形的过度增加,从而影响结构的正常使用和耐久性;若出现贯穿性裂缝则会改变结构的受力模式,结构的承载能力有可能受到威胁。方法②过高地估计了温度效应,需配置较多的钢筋,有时大到难以置信的程度。显然,这与实际情况也不相符。另外,还可能由于应力异常,使得真正的拉应力区配筋不足,偏于不安全。方法③和④在实际工程中应用较多,但刚度降低的大小以及应力松弛系数的选取因人而异,相差很大。另外,方法③和④都是基于各种各样的假定,从而限制了这些方法的应用范围,对于不符合假定的复杂结构就无能为力了。方法⑤数学理论基础比较完善,方法本身也没有什么实质性的问题,是计

算混凝土结构温度应力最有效的方法,但其计算结果的合理与否,关键在于有限元程序能否全面合理地反映影响混凝土结构温度应力的诸因素。本文对影响混凝土结构温度应力的几个主要因素进行讨论。

1 徐变与应力松弛

过去,工程界曾对温度应力持怀疑态度,认为温度应力的理论计算值是虚的,实际温度应力并没有那么大。其主要原因之一就是没有考虑混凝土徐变引起的应力松弛。实际上温度应力由于徐变的影响可以降低30%~50%。目前,温度应力计算中采用最多的就是松弛系数法。虽然从理论上讲,松弛系数只能在徐变力学第二定律给定的条件(即均质弹性徐变体或符合比例条件的非均质弹性徐变体,体积力为0,部分边界给定位移,部分边界外力为0,作用着温度变化和强迫位移)时才能应用。不过算例表明,作为近似计算,对并不符合比例变形条件的结构也可采用松弛系数法近似计算。因而,如何合理地选取混凝土徐变度和应力松弛系数是工程界迫切要求解决的问题。

应力松弛系数虽可由松弛试验直接测得,但试验的技术难度极大,一般是由混凝土的徐变度推算得出的。徐变度按理应由混凝

土徐变试验测出,但试验的工作量也很大、费时较长。因此,只在重要工程中才进行。对于一般工程以及重要工程的初步设计,就有必要根据混凝土的一般资料(如水泥、骨料的品种,水灰比,灰浆率,掺合料等)来估算其徐变度和应力松弛系数。现行水工钢筋混凝土结构设计规范 SDJ 20-78 和重力坝设计规范把应力松弛系数取为定值 0.65 或 0.5,显得过分简略,不符合实际情况。

文献[1,2]对混凝土徐变度及应力松弛系数的估算方法进行了综合评述,在前人工作的基础上提出了估算水工大体积混凝土徐变度和应力松弛系数的数学模型,并根据国内外现有资料,采用模式搜索优化方法提出了标准状态下混凝土徐变度估算式,对非标准状态下的混凝土徐变还给出了偏离标准状态的修正值。然后,再采用弹性徐变理论推求出标准状态下的松弛系数估算公式及非标准状态下的修正系数,并编制成便于实用的应力松弛系数计算表格。算例表明,采用该法估算混凝土徐变度,与不同的研究者的试验结果相比,其误差和其它公式相比在总体上是最佳的。估算出的应力松弛系数与由徐变试验资料推求的相比,误差绝大部分都在 10% 以内,可以认为能满足工程设计的要求。目前,该法已被纳入新修订的《水工混凝土结构设计规范》。

2 弹性模量

若不考虑混凝土徐变所引起的应力松弛,则由于水化热的温升、温降而在结构中产生的温度应力将完全是由于弹性模量的变化所致。若不考虑弹性模量的变化,从理论上讲,温升、温降过程后,结构内的温度应力应全部消失。在浇筑初期,混凝土弹性模量较小,所产生的压应力也较小,而随着龄期的增长,在降温期间弹性模量已增加,相应地由温降所产生的拉应力也较大,抵消初期压应力后仍余留较大的拉应力,有可能使混凝土开裂。因此,在计算混凝土早期(施工期)温度

应力时必须考虑弹性模量随时间变化的影响。作为估算,可依据文献[3]给出的统计公式按下式计算各龄期 t 时的混凝土弹性模量 $E_c(t)$:

$$E_c(t) = 1.44[1 - \exp(-0.41t^{0.32})] \cdot E_{c(28)} \quad (1)$$

式中 $E_{c(28)}$ 为 28 d 时混凝土的弹性模量,由试验给出或根据混凝土强度等级由设计规范查出。该式也已纳入新修订的《水工混凝土结构设计规范》。

3 内、外约束

约束是混凝土结构温度应力计算中一个不可忽略的因素,概括起来可分为内约束和外约束两大类。构件由于内约束而产生的温度应力是由于非线性的不均匀变形引起的,所以只会产生非贯穿性裂缝(表面或内部)。构件由于外约束而产生的温度应力起因于结构与结构之间的约束,由于约束变形有各种形式,所以既可能产生贯穿性裂缝,也可能产生非贯穿性裂缝。

在采用有限单元法计算温度应力时,由于自动考虑变形协调,因而能比较合理地考虑内约束的作用。但由于采用数值计算,为了提高计算精度,在温度变化比较剧烈的地方网格应尽可能剖分细一点。但对于外约束,则取决于输入的约束参数,其合理与否对温度应力的计算结果影响较大。在大体积混凝土工程中常有这样的实例,结构物的平面尺寸、断面和施工时控制的混凝土内、外温差都是相似的,但在混凝土浇筑后,有的工程出现开裂,有的却没有,这就是由于约束条件的差异,两者温度应力并不相同造成的。

为了反映结构所承受的外约束的程度,定义结构的约束系数如下:约束系数为结构被约束掉的变形与无约束条件下的自由变形之比;或为结构内实际发生的弹性应力与全约束条件下相同部位弹性应力之比。很显然,在全自由条件下(例如软土地基上的结构),约束系数为 0;在全约束条件下(例如坚

硬岩石上或老混凝土基础上浇筑的新混凝土结构)、约束系数为 1;在弹性约束条件下,约束系数介于 0 与 1 之间。影响结构约束系数的主要因素之一是结构弹性模量与约束体弹性模量之比,美国垦务局考虑基岩的非刚性,采用“有效弹性模量”来代替混凝土的实际弹性模量,使非刚性基岩上结构的温度应力比刚性基岩上结构的温度应力有所降低,我国水利水电科学研究院通过试验,又对此进行了改进。影响基础约束系数的另一个因素是浇筑块的高长比 H/L , H/L 越小,约束系数越接近于 1。因此,采用有限单元法对各种类型的结构,例如基础上的浇筑块等,进行系统的研究,提出一套可供工程实用的约束系数取值图表是很有价值的。

上述采用有限元法来研究约束系数时均假定结构与约束体之间粘结可靠,保证变形协调,其约束应力主要是由于相互之间刚度不同而引起的,实际工程中很少有这样的情况,例如,在软土地基上,结构与约束体之间会发生相对滑移。为此,对于承受连续式外约束的结构,又提出了地基水平阻力系数法。

地基水平阻力系数法^[4]假定:当结构与地基沿水平面接触产生相对位移时,在水平接触面上由于摩擦和粘结阻力,必然引起剪应力。相对位移越大,剪应力也越大。作为近似,假定某点的剪应力 τ 与该点水平位移 u 成正比,其比例系数便是引起单位位移的剪应力:

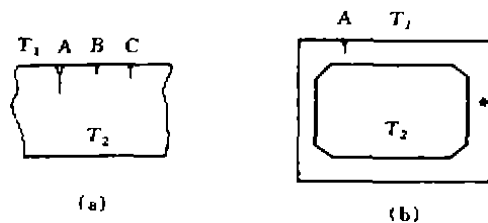
$$\tau = -C_x u$$

式中负号表示剪应力方向与水平位移相反。 C_x 是与地基性质、弹性模量、塑性、徐变等相关的系数,随弹性模量增大而增大,随徐变而减小,随变形速度增加而增加,随结构的几何尺寸增加而减小,随垂直压力增加而增加等,并且这些因素的影响是非线性的,很难严格定量确定。冶金工业部建筑研究总院王铁梦整理了各有关试验资料,特别是动力研究统计结果和在现场进行的试验以及通过大量工程裂缝实测估算的结果,推荐了 C_x 取值的

定量数据。例如对于软粘土,取 $0.01 \sim 0.03 \text{ N/mm}^3$,一般砂质粘土取 $0.03 \sim 0.06 \text{ N/mm}^3$,特别坚硬粘土取 $0.06 \sim 1.0 \text{ N/mm}^3$,风化岩、低标号素混凝土取 $0.6 \sim 0.10 \text{ N/mm}^3$,C10 以上配筋混凝土取 $1.0 \sim 1.5 \text{ N/mm}^3$ 。

4 裂 缝

温度应力会导致混凝土结构出现裂缝,而裂缝的出现又使得温度应力发生一定程度的松弛。长期以来,对于裂缝与温度应力问题存在着一种模糊概念,认为温度应力无关紧要,一旦产生温度裂缝,温度应力也就消失。这种观点看起来亦有一定道理,但从混凝土结构内外约束温度应力的实际状况来分析,这种观点是不正确的。现分析如下:如附图(a)所示的大体积混凝土结构,内部温度 T_2 高于表面温度 T_1 ,由于内约束而产生温度应力,导致 A 部位开裂。但对于混凝土内约束温度应力来说,并不会由于 A 截面开裂而释放,同样会在 B、C 等部位出现新的裂缝,致使构件发生破坏。对于附图(b)所示的框架结构,由于外约束而产生温度应力。A 部位出现微裂缝不会影响结构外约束温度应力的作用。若温度应力仍超过混凝土的抗拉强度, A 部位将继续开裂,直至裂缝开展足以达到使外约束作用减小,甚至完全消失,至此结构处于破坏阶段。否则由于存在足够的温度作用,而结构的外约束又未完全解除,温度应力依然存在,使得已开裂的断面在温度应力作用下,已经被部分削弱的结构外约束,继续因裂缝开展而被削弱下去直到结构发生破坏而终止。实际上,配筋混凝土构件



附图 内外约束温度应力引起的裂缝

由于钢筋的约束作用,温度应力不可能完全释放。因此,对于承受温度作用的钢筋混凝土结构,按外力荷载承载能力极限状态设计时,应适当地留有余地。

综上所述,内约束温度应力不会由于别处温度裂缝的开展而松弛;外约束温度应力会由于裂缝的开展而部分松弛,但只有裂缝开展很宽,结构处于破坏阶段时温度应力才会全部释放。在杆系结构中,为了考虑裂缝引起应力松弛,常常采用折算刚度法,例如在框架结构中常取0.5的系数,这当然太粗糙。作为一种尝试,文献[5]给出了框架结构刚度折减系数的计算用表格。在平面钢筋混凝土非线性有限元程序中采用合理的裂缝模型是能够比较正确地考虑裂缝引起温度应力的松弛的。

5 混凝土的干缩变形

置于未饱和空气中的混凝土因水分散失而引起体积缩小变形称为干燥收缩变形。严格地讲,干燥收缩应为混凝土在干燥条件下实测的变形扣除相同温度下密封试件的自生体积变形。但考虑到干燥收缩变形与自生体积收缩变形对工程的效应是相似的,为方便起见,将干燥收缩变形与自生体积变形一并考虑。

混凝土的干缩变形通常换算成相当于引起同样温度变形所需的温度差,再按温差计算混凝土的应力。由于干缩扩散速度比温度扩散速度要慢1000倍,例如,对大体积混凝土,干缩扩散深度达6cm需花一个月时间,在这时间内,温度却可传播6m深。因此,对大体积混凝土内部不存在干缩问题,但其表面干缩是一个不能忽视的问题。

目前,国内外用于估算混凝土干缩变形的的方法有很多种。这些估算公式大都是采用多系数表达式,即根据室内试验结果,考虑实际工程结构所处的环境温度、湿度、混凝土配合比、养护方法、构件截面尺寸及配筋率等因素,乘上相应的修正系数,从而得出混凝土的干缩值。

参考文献

- 1 吴胜兴,周氏.大体积混凝土徐变度及应力松弛系数估算方法综述.水利学报,1991(10):65~70
- 2 吴胜兴,周氏.混凝土应力松弛系数的优化确定.河海大学学报,1993,21(2):47~53
- 3 吴胜兴,周氏.大体积混凝土热力学指标取值综述.河海科技进展,1992,12(1):34~46
- 4 王铁梦.建筑物裂缝控制.上海:上海科学技术出版社,1981
- 5 邵建林.框架结构在温度作用下的非线性分析和设计:[硕士学位论文].南京:河海大学,1991

(收稿日期:1995-07-03)

·简讯·

发挥资源优势,搞好信息服务

——《水信息报》力架信息之桥

全国水利行业唯一的一份信息类报纸《水信息报》自1996年2月8日正式创刊以来,以其丰富的信息含量和明快的版面风格受到水利及相关行业领导、专家和广大基层工作人员的认同和好评。同时也得到了水利部有关司局及有关单位的大力支持和帮助。

《水信息报》坚持为行业服务、为市场服务的宗旨,积极宣传国内外与水有关的政策法规、先进的管理观念、经验和方法、科技发展动态、工程建设的最新进展,同时还为水行业提供国内外科技新成果、新技术、新产品、出版、招投标及实用技术等各类市场信息。

《水信息报》由水利部直属信息研究所主办,它将充分发挥信息所的资源优势,在不断提高报纸质量的同时,努力探索各种信息服务的有效作业方式,竭诚为水行业做好多层次、多方面的信息服务,争取成为沟通国内外、行业内外的信息之桥。

(《水信息报》编辑部 供稿)