

混凝土结构温度裂缝的特点及其配筋控制

吴胜兴 任旭华

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 混凝土结构温度作用产生的裂缝与荷载作用产生的裂缝有显著的不同:①与材料的韧性有关;②具有时间性;③裂缝处钢筋的应力较小;④分浅层、深层和贯穿性三种裂缝;⑤温度作用时应力和应变不再符合简单的胡克定律。掌握其特点对采取合理的温度裂缝控制措施有其重要意义。对于允许开裂但需限制裂缝开展宽度的混凝土结构,较为准确地计算混凝土裂缝开展宽度是温度裂缝控制的必要条件。温度配筋的目的就是增加裂缝条数,减小裂缝开展宽度。文章还讨论了温度裂缝的控制标准和裂缝宽度的计算理论。

关键词 混凝土结构 温度裂缝 裂缝宽度计算 裂缝控制 配筋控制

1 温度裂缝的特点

对于混凝土结构,由温度作用产生的裂缝与由荷载作用产生的裂缝相比,有如下几个显著的特点^[1,2]:

a. 温度裂缝与材料的韧性有很大关系。温度裂缝的起因是结构因温度变化而产生变形,当变形受约束时则引起应力,当应力超过一定值后则产生裂缝。裂缝出现后,变形得到满足或部分满足,应力就发生松弛。某些材料虽强度不高,但有良好的韧性,也可适应变形的要求,抗裂性较高。因此,如何提高混凝土承受变形的能力,即提高其极限拉应变,是混凝土温度裂缝控制的主要措施之一。

b. 温度裂缝具有时间性。混凝土结构温度作用,从温度的变化,变形的产生,到约束应力的形成,裂缝的出现和扩展等都不是在同一瞬时发生的,它有一个“时间过程”,是一个多次产生和发展的过程。如果温度变化是全部在同一瞬时出现,且当时的瞬时应力最大并接近于弹性应力,那么以后逐渐松弛的现象对工程并无实用价值。因为最高应力已经出现,混凝土已开裂。但如能使温度变

形在一段时间内缓慢出现,则每一时段温差引起的约束应力逐渐松弛,从而最终迭加起来的松弛应力以及温度变化过程中任何时刻的应力都达不到一次出现时的瞬时最大应力,而是比一次出现的弹性应力小得多,混凝土就可能不会开裂。这就有着很大的实用价值。要做到这一点,就应尽量延长温度作用的时间。例如,采取表面保温等措施,这就是利用时间控制裂缝的基本思想,其效果已为许多工程所证实。

c. 温度裂缝处钢筋的应力较小。按现行设计规范验算机械荷载作用下的裂缝时,当裂缝超过 1 mm 以上时,钢筋应力早已达到屈服极限。而实测结果表明,有的温度裂缝即使达到 7 mm,钢筋应力也只有 300 MPa 左右。在尚未出现裂缝的地方,钢筋应力一般只有 20~30 MPa,温度裂缝出现后,尽管裂缝宽度达到 1 mm 左右,钢筋应力也只有 100~200 MPa。其原因有二:①以轴心受拉构件为例;对于承受机械荷载的构件,混凝土开裂后,原先由混凝土承担的力全部转移给钢筋承担,因而钢筋应力突增,甚至屈服、拉断;对于承受均匀温降的轴拉构件,混凝土开裂后,

由于温度变形得到了满足,因而温度应力全部释放(无筋构件)或部分释放(配筋构件)。当混凝土因开裂而回缩,钢筋阻止混凝土回缩,钢筋应力有所增加,但较机械荷载作用下的应力突增要小。②对于早期的温度裂缝,此时混凝土强度比较低,钢筋与混凝土之间的粘结力容易遭受破坏,从而在裂缝处形成25~30cm的裂缝疏松带。在此范围内混凝土可以自由回缩,使裂缝宽度增加而钢筋应力增加较小。

因此,混凝土结构温度裂缝宽度的控制标准可比荷载裂缝宽度的控制标准有所放松。当然,对于挡水以及要求防腐的结构,其温度裂缝宽度应由防水、防腐要求控制。

d. 温度裂缝分为浅层裂缝、深层裂缝和贯穿性裂缝。区分这三种裂缝,对温控标准和温控措施有重要的意义。对于浅层裂缝及深层裂缝,温控标准主要是限制其内外温差,尽量降低温度变化的梯度,温控措施主要是采取保温蓄热法。对于贯穿性裂缝,温控标准主要是均匀温差,尽量降低其最高与最低温度之差。温控措施主要是采取降低水化热、设施工缝等。

e. 温度作用时应力和应变不再符合简单的胡克定律。荷载作用下应力与应变在弹性范围内是符合胡克定律的,即应力与应变成正比。而温度作用下的应力与应变就不再符合简单的胡克定律关系。一般来说,应变小而应力大,应变大而应力小,但平面变形规律仍然适用。温度应力与平面变形后所保留的温度应变和温度自由应变差成正比。因此为了减小温度应力,应尽量使结构能满足温度变形的要求,工程中常用的一些构造措施,诸如在结构与地基之间设置滑动垫层等,其原理就在于此。

2 温度裂缝的控制标准

温度裂缝的控制标准^[3~5]按建筑物对裂缝的要求不同而分为两大类:一是不允许出现裂缝,必须严格抗裂;另一类是允许开裂,

但需对裂缝的开展宽度加以限制,即“限裂”。

裂缝控制的标准不同,相应地裂缝控制的方法也不一样。例如,对于不允许出现裂缝的结构,应设法从根本上消除温度应力(例如降低水化热温升,采取合适的施工措施等)或提高混凝土的抗裂能力,而不能依靠增配钢筋来解决问题。这是因为,既然不允许开裂,则所配钢筋的作用充其量不过相当于在截面中增加了钢筋的折算面积,其影响很有限。对于允许出现裂缝但需限制其宽度的结构,则适当配置温度钢筋是可以达到预期的目的的。但此时必须明确,配筋的目的是限裂而非抗裂。这类结构在实际工程中占绝大多数。

由于抗裂的控制标准非常严格,因此,提此要求应非常慎重。例如,有些结构之所以必须抗裂,其主要原因是为了防止高压水进入混凝土内部引起危害性后果。对此,若考虑设置专门的防水钢衬而将结构按允许开裂的标准设计,可能更为经济合理。混凝土结构中由于各种原因而存在大量的微裂缝。混凝土微裂缝是肉眼不可见的,肉眼可见裂缝一般以0.05 mm为界(实际最佳视力可见0.02 mm),大于等于0.05 mm的裂缝称为“宏观裂缝”。一般宽度小于0.05 mm的裂缝对使用(防水、防腐、承重)都无危险性,故是否可以假定具有小于0.05 mm裂缝的结构为无裂缝结构,从而将温度裂缝的控制标准定为有无大于0.05 mm的裂缝两种情况,这对结构抗裂设计的经济性有重大影响,很值得研究。混凝土重力坝设计时,不希望上游面出现拉应力,更不允许出现裂缝。然而,实际工程中都或多或少地出现了一些裂缝,其对结构的危害性也并不是想象的那么可怕。若适当降低拉应力控制标准,而在上游坝面增配一些温度构造钢筋,不仅可以限制可能出现的裂缝的宽度,防止贯穿性裂缝的出现,而且对提高混凝土结构温度控制设计的安全度,其效果可能更为显著。因为按传统方法进行设计,在遭受意外温度作用时,无法确切地知

道它的可靠度和安全度,也无法控制结构的破坏形态,这也就是结构控制理论中变被动设计为主动设计之原则。

3 裂缝宽度的计算理论

对于允许出现裂缝的结构,温度裂缝的控制最终归结于裂缝宽度的控制。因此,温度裂缝宽度的计算方法就显得特别重要。混凝土结构在荷载作用下裂缝宽度的计算理论大致可分为下面五种^[6,7]:①粘结滑移理论。该理论认为裂缝的开展宽度是由于钢筋和相邻混凝土不再保持变形协调,出现相对滑移而形成的,从而意味着混凝土表面的裂缝宽度与钢筋处的裂缝宽度是一样的,这与实际不符,尤其在混凝土保护层很大的情况下;②无滑移理论。该理论认为裂缝宽度主要是钢筋外围混凝土的弹性回缩,其决定因素是保护层厚度。它假定钢筋与混凝土之间有充分的粘结,不发生相对滑移,其缺点也是显而易见的;③综合理论。上述两种理论各执一端,把问题都极端化了。因此,很自然地且合乎逻辑地将两种理论综合起来,形成了综合理论;④数理统计方法。由于裂缝宽度的影响因素较多,裂缝机理也十分复杂,基于上述三种理论的各种各样半经验半理论公式除了与它所依据的试验有良好的符合性以外,也都不能符合所有他人的试验结果。另外,近数十年已积累了相当多的研究裂缝问题的试验资料,从而使得有可能利用这些已有的试验资料,分析影响裂缝宽度的各种因素,找出主要的因素,舍去次要的因素,用数理统计方法给出简单适用而有一定可靠性的裂缝宽度计算公式,这就是数理统计方法。⑤断裂力学方法。该法假定钢筋受力伸长,通过与混凝土的粘结作用,使周围混凝土“劈开”。“劈开”的裂缝宽度与裂缝深度、裂缝间距、混凝土的断裂韧性及弹性模量有一定的关系,裂缝宽度是钢筋伸长及钢筋与混凝土共同变形能力的函数。用断裂力学解决裂缝问题,仅仅处于开始阶段,还需要进行大量的试验和

分析研究工作。

鉴于混凝土结构温度裂缝缺乏大量的温度裂缝试验研究资料,而且各种类型结构温度裂缝的规律不尽相同,因此,无法采用数理统计方法来建立裂缝宽度的计算模型。断裂力学方法属于刚刚起步,也不宜采用。而大体积混凝土结构钢筋的保护层比较厚,混凝土的弹性回缩对裂缝宽度的影响较大,而且温度裂缝一般都出现在早期,此时混凝土还未充分结硬,钢筋与混凝土之间的粘结力还比较弱,在温度变化作用下一般都会产生粘结滑移现象,大量的工程实例也证明了这一点。因此,在计算混凝土结构温度裂缝宽度时采用粘结滑移理论与无滑移理论相结合的综合理论比较合适。再者,在采用有限单元法来研究温度裂缝时,程序也可非常方便地考虑混凝土的弹性回缩和钢筋与混凝土之间的粘结滑移。

在钢筋混凝土有限单元法中,裂缝模型一般分为分离裂缝模式和分布裂缝模式两类。前者的优点在于能直接计算裂缝的开展宽度,并易于模拟裂缝面之间力的传递,缺点是在裂缝产生后,结构的拓扑在不断变化,节点的重新编号破坏了结构刚度矩阵中比较窄的带宽,从而使计算过程很繁复,计算工作量也因此增加很多。该法主要适用于研究钢筋混凝土结构局部区域的性能。后者的优点在于开裂后不需重新确定有限元图式,能自动连续计算,裂缝也能自动形成,而且裂缝方向也是完全自由的,不受单元形状和相邻单元边界的限制。但过去一直认为此模式无法得出裂缝的开展宽度和具体位置,主要适用裂缝位置及开展宽度不太重要,而重点在于研究结构的应力应变分布及破坏荷载等情况。根据裂缝模型的不同,裂缝宽度的计算方法分为两种:一种是在分离裂缝模型中,由联结裂缝两边的联结单元直接计算,其精度较高。另一种是在分布裂缝模型中,忽略开裂单元混凝土拉应变的影响,而认为裂缝宽度就是裂缝单元相邻两节点的位移差,这当然有一

定误差,但只要裂缝分布位置正确,其误差随单元尺寸的减小而降低。另外,精确一点可以由沿着垂直于裂缝方向钢筋单元的应变积分来计算裂缝宽度,但首先必须假定裂缝的间距,这在非杆件体系的结构中就会造成很大困难。文献[8]详细研究了以往非线性有限元程序的具体执行过程,找出了分布裂缝模型未能得出裂缝的开展宽度和具体位置的主要原因,并通过深入的研究,提出了能较确切模拟钢筋混凝土裂缝出现和开展物理模型的最大拉应力单元开裂准则,改进了非线性分析的迭代流程,使应用分布裂缝模型时能合理地计算裂缝位置及开展宽度和深度,较为成功地解决了大体积混凝土结构中裂缝宽度计算这一难题,特别可用于温度裂缝的计算,为合理确定温度裂缝控制所需构造钢筋的数量开辟了一条途径。

4 温度配筋的作用

配置温度钢筋的合理性,是钢筋混凝土基本理论研究中一个引人注目并长期争论的问题。采用劲性钢筋进行集中配筋,增加了混凝土的不均匀性,增大了结构中的初始裂缝,对混凝土的抗裂不利,这点是肯定的。问题的焦点在于,在混凝土中配置分散的钢筋是否能提高其极限拉应变,从而有助于混凝土抗裂性能。目前存在两种观点:一种认为配筋对混凝土的极限应变没有影响,另一种认为配筋可以提高混凝土的极限拉应变。但双方共同的观点是,钢筋能起到控制裂缝扩展,减小裂缝宽度的作用。

几十年来,对分散配筋的影响进行了许多试验,却有迥然不同的结论。其根本区别在于如何确定出现裂缝的瞬间问题,即是由湿斑、超声波测出的微裂缝的出现为标准,还是以裂缝宽度开展至 $0.05 \sim 0.02 \text{ mm}$ 的可见裂缝为标准。笔者认为,从工程实用的观点来看,后一种标准可能更为合适。

混凝土材料结构是非匀质的,承受拉力作用时,截面中各质点受力是不均匀的,有大

量不规则的应力集中点,在这些点处首先达到抗拉强度,引起局部塑性变形,如无钢筋继续受力,便在应力集中处首先出现裂缝。若此处适当配筋,钢筋将约束混凝土的塑性变形,从而分担混凝土的拉应力,推迟混凝土裂缝的出现,亦即提高了混凝土的极限拉应变。大量工程实践也证明,适当配置温度钢筋是能够提高混凝土的极限拉应变的。

也有人认为,混凝土内配置钢筋不但不能抵抗收缩应力,反而增加了自约束应力。从直观上看,混凝土收缩,钢筋不收缩,因而必然产生收缩应力。但在含钢率较低的情况下,其数值是很微小的,一般可以忽略。当配筋率高达 $5\% \sim 10\%$ 时,其收缩应力才较为可观,必须考虑。

从另一方面看,适当配置构造钢筋对混凝土的极限拉应变是有益的。即使是大体积结构,虽然从总截面来看配筋率较低,但配置在面层区域,对防止常见的浅层裂缝也是有效的。总之,合理配筋虽然增加一定程度的收缩应力,但是提高极限拉应变和约束裂缝的开展的优点明显大于缺点。

对于允许开裂的结构,配筋的作用是显然的。在承受温度作用的混凝土结构中,温度应力超过混凝土的抗拉强度而开裂,裂缝两侧混凝土将回缩,从而使得温度裂缝一开展就很宽。若配置了温度钢筋,则由于钢筋和混凝土之间的粘结作用,使得混凝土不能自由回缩,从而减小了裂缝的开展宽度和深度,起到分散裂缝的作用,且能有效地防止贯穿性裂缝的出现。据试验,当裂缝宽度超过自愈范围以后,裂缝漏水量与裂缝宽度成三次方比例增加。如果把裂缝分散,即想办法把具有一定宽度的裂缝分散成 m 条,则总的漏水量与 m 的平方成反比。因此,通过合理的配置钢筋,可以达到分散裂缝,大大减少渗漏的目的。但是,对各类不同结构,究竟配多少温度钢筋合适,尚需作进一步的研究。附表列出了国内外有关规范及手册中有关温度配筋最小配筋率的资料,可供参考。

(下转第 29 页)

望值的稳定性如何。但从变异系数上就可以看出:A,B 两段的变异系数分别为 0.58 和 0.72, 相对较大, 说明这两个区段的经济效益风险较大, 主要原因是 A,B 两段为南方水源较丰富的地区, 是调水的源头和前段, 重新进行水量平衡对其影响较大, 在决策时应该在政策上考虑补偿。而 C,D,E 三段属北方缺水地区, 其变异系数较小 (< 0.3), 说明了调水工程对该地区的重要性, 其经济效益是稳定的, 风险较小。

上述分析计算得出的结果与实际情况较为吻合, 说明本文分析方法是正确可行的。

参考文献

- 1 潘民华, 余文学. 调水工程经济效益分析方法探讨. 河海大学学报, 1992, 20(水利经济专辑): 74 ~ 80
- 2 卢石泉, 周惠珍. 投资项目评估. 大连: 东北财经大学出版社, 1993

(收稿日期: 1995 - 10 - 24)

(上接第 13 页)

附表 国内外温度配筋一览表

名 称	适用范围	最小值	建议值	最大值	说 明
美国 ACI318 钢筋混凝土结构规范(1983 年版)	一般梁板柱结构	0.14%			使用 40 级, 50 级钢筋的板 $\geq 0.2\%$, 使用 60 级钢筋的板 $\geq 0.18\%$, 间距不得大于 457 mm, 不超过板厚 5 倍。
美国陆军工程师团手册	水电站厂房		无约束 0.2% 有约束 0.4%	0.4%	若受力钢筋超过 0.4% 时不再加温度钢筋
美国垦务局	太古力第三电厂	内部构件 0.2% 外部构件 0.3% 上部构件 0.4% 暴露的板 0.5%			
新西兰 NZ3101 混凝土结构实用规范(1982 年版)	一般梁板柱结构	0.14%			钢筋间距不大于 300 mm
铁道部第四勘测设计研究院	空心桥墩壁厚 0.5 ~ 0.7 m		内表面构造, 外表面 0.12%		内表面构造 $\phi 8 - \phi 12 @ 150 \sim 200$ mm
钢筋混凝土高层结构设计及施工规定 (JZ102 - 79)	剪力墙	0.12%	0.1% ~ 0.25%		根据截面剪力大小取用不同配筋量
建筑结构 1981 年 No. 2 大型民用建筑温度和收缩变形	民用建筑		0.2% ~ 0.3%	0.3%	若受力钢筋超过 0.3% 时不再加温度钢筋
水电站厂房设计规范	厂房上部结构	0.12%		0.4% ~ 0.5%	若受力钢筋超过 0.4% ~ 0.5% 时不再加温度钢筋
混凝土结构设计规范	剪力墙		0.2%		双面双向

参考文献

- 1 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析. 北京: 人民交通出版社, 1991
- 2 潘家铮主编. 水工建筑物的温度控制. 北京: 水利电力出版社, 1990
- 3 王铁梦. 建筑物裂缝控制. 上海: 上海科学技术出版社, 1981
- 4 赵国藩等. 钢筋混凝土结构的裂缝控制. 北京: 海

- 洋出版社, 1991
- 5 朱伯芳等. 水工混凝土结构的温度应力与温度控制. 北京: 水利电力出版社, 1976
- 6 周氏等. 现代钢筋混凝土基本理论. 上海: 上海交通大学出版社, 1986
- 7 Bazant Z P 等. 钢筋混凝土有限元分析. 周氏等译. 南京: 河海大学出版社, 1982
- 8 吴胜兴. 混凝土结构温度应力与温度裂缝控制研究: [学位论文]. 南京: 河海大学, 1994

(收稿日期: 1995 - 07 - 07)