

堆石坝混凝土面板防裂机理研究

鲁 电

(中国水利水电第十二工程局施工科学研究所, 浙江 建德 311600)

摘要 分析混凝土面板在干缩和冷缩的联合作用下的裂缝成因,从裂缝控制理论、补偿收缩混凝土的面板防裂设计、面板防裂材料及面板的防裂施工等方面采取一系列技术措施来防止混凝土面板裂缝。经实际工程应用证明上述措施防裂效果显著。

关键词 混凝土面板 堆石坝 补偿收缩混凝土 裂缝控制 混凝土防裂剂

中图分类号 :TV641.4+3

文献标识码 :A

文章编号 :1006-764X(2001)04-0047-03

1 混凝土面板裂缝成因分析

引起面板开裂的原因很多,但主要是以下两方面的原因:①蓄水前后,由于坝体承受的荷载发生变化,引起坝体的沉降和位移,在面板内局部产生拉应力,当这种局部拉应力超过混凝土极限抗拉强度时,面板开裂。这种原因引起的面板裂缝称为结构性裂缝。结构性裂缝的预防主要由坝体结构设计及施工工艺来控制。②混凝土面板收缩变形引起开裂。面板混凝土由于自身和环境的变化等因素要产生收缩变形,当面板收缩变形受到内、外约束的限制得不到满足时,在面板内产生拉应力,这种拉应力一旦超过混凝土的极限抗拉强度就会产生裂缝。这种裂缝的产生不仅与收缩变形大小有关,而且与约束的强弱有关。这种类型面板裂缝主要由混凝土的收缩裂缝和温度裂缝两部分组成。

1.1 面板混凝土的收缩裂缝

在混凝土的拌和水中约有 20% 的水分是水泥水化所必需的,其余 80% 水分都要被蒸发,从而引起混凝土失水后体积缩小,这种收缩称为干缩^[1]。此外,水泥和水起水化作用逐渐硬化而形成水泥骨架时,不断紧缩导致体积缩小,这种收缩称为凝缩。所以面板混凝土的收缩是由凝缩和干缩两部分组成。混凝土的收缩是一种自然属性,其收缩值的大小不仅与水泥用量、骨料级配、水灰比大小等有关,而且与混凝土的养护条件有很大关系。在面板混凝土的收缩中干缩起主导作用,约占总收缩量的 80%~90%。

面板混凝土收缩引起的裂缝不仅与收缩值大小有关,而且还与面板内钢筋及面板与垫层之间的摩

阻力对收缩的限制能力有关。

此外,在面板浇筑施工期,当面板表面水分蒸发过快时,面板表面的干缩值大于内部的干缩值,因而面板内部各质点之间也会彼此形成约束(内约束),由于这种内约束的存在,很容易产生面板的表面干缩裂缝。

1.2 温差引起面板的收缩

当环境温度发生变化时,混凝土的热胀冷缩性质会造成面板的变形。当这种变形呈收缩状态(冷缩)时受到约束限制,变形得不到满足,面板就会产生裂缝。这类裂缝一般和外部约束条件以及温差大小等有关。对面板而言,引起裂缝的温差主要有两种。

a. 季节温差。主要指混凝土初凝时的温度与面板在使用运行期间由于季节变化而出现的年最低温度的差值。为了减少季节温差产生的面板收缩值,面板浇筑的季节一般选在秋、冬季。由于面板厚度一般较薄,故季节温差对面板而言是一种均匀温差,可使面板产生均匀收缩。因钢筋的线胀系数与混凝土大致相同,故面板内钢筋对季节温差引起面板收缩的限制几乎不起作用,主要是面板与垫层之间的摩擦约束限制面板的收缩变形而引起裂缝。由于斜向放置的面板存在自重压力,这种裂缝出现的位置与倾斜坡度有关,一般常出现在离面板底部 1/2 到 2/3 的长度区段内。

b. 昼夜温差。主要指面板在白天日照情况下最高温度与夜间最低温度的差值(骤降温差也属此类温差)。昼夜温差是一种不均匀温差,由于面板表面的温度比内部降得快,沿板厚方向形成温度梯度而产生内约束。这种内约束使面板表面出现拉应力,从而产生面板的表面裂缝。面板的表面裂缝可逐渐转变成贯穿

性裂缝.尤其是在面板混凝土早期强度较低时,更容易出现表面收缩裂缝.骤降温差引起的表面裂缝可出现在面板表面的任意位置上.此外,对于中、低坝,由于面板厚度一般较薄($< 60\text{ cm}$),散热条件较好,水泥水化热温升引起面板内外温差一般可不考虑.

2 混凝土面板防裂措施研究

2.1 补偿收缩混凝土研究

在面板防裂设计思想上,采用补偿收缩混凝土配合比设计.补偿收缩混凝土是利用混凝土在约束限制条件下,在混凝土中添加防裂剂,用人为的方法使混凝土体积膨胀产生的预压应力来补偿其收缩产生的拉应力,从而达到防裂的目的.此外防裂剂还有改善混凝土抗裂防渗性能作用.

设计方法 根据面板混凝土的各种收缩模型,按变形条件初步确定在约束限制条件下所需膨胀率,然后选用合适的混凝土外加剂,使面板混凝土达到预定膨胀率,以补偿其收缩变形,并进行满足力学性能、变形性能、施工性能及耐久性能的混凝土配合比试验,最后根据试验成果按应力条件进行面板抗裂校核.

2.2 面板防裂设计计算理论研究

面板的防裂设计至今还未有一套完整的计算理论.面板防裂设计要达到较为理想的效果,必须重视混凝土强度与膨胀量的协调发展.因此计算时根据面板的受力特点及裂缝形成的原因,参照大体积混凝土底板的温度应力计算公式并作了相应的调整,分别应用短期裂缝计算公式和长期裂缝计算公式对面板进行抗裂校核,结果比较符合实际情况.

2.3 面板防裂施工措施研究

面板混凝土的防裂设计和施工工艺形成面板防裂研究的一个完整体系.一个好的设计必须要有一个高质量的施工工艺相配套,两者缺一不可.为确保面板防裂效果,对面板施工质量提出如下的控制要求:

a. 按面板混凝土的配合比要求严格控制各种原材料的掺量,尤其是对水灰比和防裂剂掺量的控制提出具体要求.因为混凝土强度和膨胀量的协调发展是保证防裂剂安全使用的关键.防裂剂掺量过少会造成混凝土的膨胀量不足而起不到补偿收缩效果,过多则会造成膨胀量过大而引起面板的反向胀裂.

b. 为保证面板混凝土胀缩的均匀性,防止面板局部破坏,对混凝土的拌和时间应作适当的延长,一般比普通混凝土大约延长 $30 \sim 60\text{ s}$.此外还研制一套防裂剂均匀性快速检测方法,可确定现场拌和的均匀性程度.

c. 严格控制面板混凝土的施工坍落度.坍落度过小可能增加下滑阻力,造成滑道堵塞,影响施工速

度和质量.坍落度过大、下滑速度加快容易造成骨料分离,同样也影响面板质量,一般面板施工坍落度控制在 $3 \sim 5\text{ cm}$.

d. 认真做好面板混凝土早期的保温保湿养护工作.面板在早期干缩影响下容易产生裂缝,因此面板早期保湿养护十分重要.面板表面保温主要是防止在昼夜温差作用下面板产生表面裂缝.一般在混凝土终凝后即开始覆盖草袋洒水养护,养护时间应不少于 28 d ,在气候干燥时应适当延长养护时间.面板表面覆盖草袋洒水养护既可保温也可保湿,对防止干缩和温度骤降引起的表面裂缝十分有效.

e. 增加混凝土表面的二次抹面工艺.当面板混凝土初凝时增加二次抹面工艺对防止面板表面裂缝十分有利.

3 面板防裂设计方法研究

3.1 按变形条件选取补偿收缩混凝土的限制膨胀率

根据补偿收缩理论,面板混凝土在任一时间的限制膨胀率 e_i 必须满足下列关系^[2]:

$$|e_i - S_i| < S_{ki} \quad (1)$$

式中: e_i 为某一时间补偿收缩混凝土所需的限制膨胀率; S_i 为某一时间混凝土在限制条件下的收缩总和,包括干缩和冷缩; S_{ki} 为某一时间混凝土的极限拉伸值,按 28 d 龄期由试验获得,考虑到徐变的影响实际极限拉伸值 S_k 取 1.5 倍 S_{ki} .混凝土各龄期的干缩值按下式计算:

$$\varepsilon_{\text{干}}(t) = \varepsilon_0(1 - e^{-bt})M_1M_2 \dots M_{10} \quad (2)$$

式中: ε_0 为标准状态下混凝土的极限收缩值,一般取 3.24×10^{-4} ^[3]; b 为经验系数,取 0.01 ; t 为混凝土龄期,设计时取 28 d ; M_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 10$) 为各种修正系数.

混凝土温差收缩 $\varepsilon_{\text{冷}}(冷缩)$ 主要取决于季节温差 Δt . $\Delta t = \text{混凝土浇筑时月平均温度} - \text{库区月平均最低温度}$.所以 ε_t 按下式计算:

$$\varepsilon_t = \Delta t \cdot \alpha \quad (3)$$

式中: α 为混凝土线胀系数,取 $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$.

故

$$S_i = \varepsilon_{\text{干}}(t) + \varepsilon_t \quad (4)$$

防裂设计时限制膨胀率 e_k 按下式取值:

$$|e_k - S_i| < S_k \quad (5)$$

利用式(5)可以确定限制膨胀率 e_k 的一个变化范围,设计时只要最大的限制膨胀量 e_{max} 在此范围内就能满足防裂的必要条件.但是补偿收缩混凝土达到所需的限制膨胀率 e_k 并不等于说面板不会开裂,还必须观察它的膨胀变形曲线与各种不利条件下收缩曲线吻合程度,即用应力条件校核面板的变形过

程是否满足抗裂要求.

3.2 按应力条件校核面板是否开裂

此方法是将补偿收缩混凝土的各时段胀缩值(实测)换算成等量温差,然后和外界温度改变产生的温差相叠加,按混凝土温度应力计算公式计算温度应力^[4],以此校核面板内的拉应力是否超过混凝土各时段的极限抗拉强度.

由于补偿收缩混凝土早期(28 d内)的弹性模量、极限抗拉强度、应力松弛系数、胀缩变形量等均变化较大,所以在面板浇筑28d内应按短期裂缝控制公式分时段计算面板应力校核是否开裂.28d以后以上各值基本趋于稳定,故可按长期裂缝控制公式计算.

3.2.1 短期裂缝计算公式

短期裂缝计算公式主要用于28d内面板混凝土裂缝控制.计算公式为

$$\sigma_{1\max} = - \sum_{i=1}^n E_i(t) \alpha \Delta T_i(t) \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh \beta_i \cdot L/2}\right) S_i(t) \leq f(t) \quad (6)$$

式中: $\sigma_{1\max}$ 为各时段内面板最大应力(以拉为正); $E_i(t)$ 为各时段混凝土弹性模量,按式(7)计算; α 为混凝土线胀系数,取 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_i(t)$ 为各时段的计算温差,由两部分组成:一是由环境温度改变引起的温差 $T_n(t)$,二是由混凝土胀缩变形换算的等量温差 $T_y(t)$,按式(8)计算; β_i 为与弹性模量 $E_i(t)$ 有关的变量,按式(9)计算; L 为面板长度; $S_i(t)$ 为各时段混凝土应力松弛系数,按式(10)计算; $f(t)$ 为各时段混凝土极限抗拉强度(设计值).

$$E_i(t) = E_0(1 - e^{-0.09t}) \quad (7)$$

式中: E_0 为混凝土28d龄期的弹性模量; t 为混凝土的龄期, d.

$$T_y(t) = \epsilon_y(t) / \alpha \quad (8)$$

式中: $\epsilon_y(t)$ 为混凝土各时段的胀缩变形(实测).

$$\beta_i = \sqrt{C_x / (HE_i(t))} \quad (9)$$

式中: C_x 为阻力系数(单位变形引起的切应力, N/mm^3),包括面板与垫层之间的摩擦阻力及钢筋对变形的阻力; H 为面板厚度.

$$S_i(t) = 1 - \frac{A_1}{P_1}(1 - e^{-P_1t}) - \frac{A_2}{P_2}(1 - e^{-P_2t}) \quad (10)$$

式中: A_1, A_2, P_1, P_2 为试验系数; $A_1 = 0.023701 \text{ d}^{-1}$; $A_2 = 3.45167 \text{ d}^{-1}$; $P_1 = 0.067419 \text{ d}^{-1}$; $P_2 = 9.43797 \text{ d}^{-1}$.

3.2.2 长期裂缝计算公式

长期裂缝计算公式主要用于面板经过年运行周期后的裂缝控制.由于补偿收缩混凝土28d后胀缩值及弹性模量等参数基本趋于稳定,故计算公式为

$$\sigma_{\max} = \sigma_{1\max} - E\alpha\Delta T \left(1 - \frac{1}{\cosh \beta \cdot L/2}\right) S \leq f \quad (11)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为长期运行中面板最大应力(拉为正); E 为面板混凝土弹性模量,取28d龄期; α 为混凝土线胀系数; ΔT 为计算温差,主要考虑季节温差即面板施工期最高月平均温度与年最低月平均温度的差值; β 为常数, $\beta = \sqrt{(C_x / EH)}$, C_x 主要考虑面板与垫层的摩擦阻力; S 为混凝土应力松弛系数,按28d龄期考虑,即为 $t = 28 \text{ d}$ 时,式(10)的值; f 为混凝土28d龄期极限抗拉强度(设计值).

4 结 语

上述研究成果已在浙江宁波梅溪水库、浙江义乌八都水库、浙江温州珊溪水库等工程面板中应用,都取得了较为理想的效果.尤其是珊溪水库其坝高目前属国内第二,一期面板最大长度达143 m,整体连续滑模浇筑(目前属国内第一),一期面板浇筑完成后至下闸蓄水历时半年,经多次检查,在面积3.88万 m^2 一期面板内未发现任何裂缝^[5].经专家鉴定该项工程面板防裂技术达到国际先进水平.上述工程面板防裂经验主要有以下几个方面:

a. 施工中严格控制面板浇筑质量,特别是在面板的养护方面做了大量细致的工作,大大减少了面板表面的干缩,对防裂有利.

b. 在面板防裂施工中,使用了中国水利水电第十二工程局施工科学研究所研制生产的VF防裂剂.这种产品不仅能达到设计所需的限制膨胀率的要求,而且其膨胀时间和膨胀量人为可控,提高了补偿收缩效果.

c. 在面板的防裂设计中采用比较切合实际的计算公式,使理论计算和实际情况相接近,并且根据设计的假定条件预先确定施工中的有利和不利因素,制定施工控制要点,对实际施工起到了积极的指导作用.可见,只要努力完善面板防裂设计理论,更深入研究面板防裂机理,用理论研究指导工程实践,就一定能够在各种条件下达到面板的防裂要求.

参考文献:

[1] 叶琳昌, 沈义. 大体积混凝土施工[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1987.
[2] 吴中伟, 张鸿直. 膨胀混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
[3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1997.
[4] 赵志缙, 赵帆. 高层建筑基础工程施工[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1994.
[5] 吴垂涛. 优质高效建设珊溪水库工程[J]. 水力发电, 2000(10): 4~7. (收稿日期 2000-11-08 编辑 熊水斌)