

钢筋混凝土简支型矩形渡槽断裂强度及寿命的断裂力学分析初探

19
47-48.5°

欧阳实

(长沙大学 长沙 410003)

倪保璐 欧健

(湖南省水电设计院 长沙 410003)

TV313

TV672.3

摘要 用断裂力学的方法对钢筋混凝土简支型矩形渡槽的断裂强度及寿命进行了简化分析,同时给出了简支型矩形渡槽的断裂强度及寿命估算公式,并对裂纹扩展的原因及渡槽寿命问题进行初步分析。结果表明:采用摩擦系数较小的支座有助于延长渡槽的寿命;用增加钢筋的方式来延长渡槽寿命的做法在经济上是不合算的。

关键词 钢筋混凝土;矩形渡槽;裂纹;断裂初度;裂纹扩展速率 断裂力学。

钢筋混凝土简支型矩形渡槽是农村水利设施中使用最为广泛的渡槽。调查资料表明,这类渡槽发生开裂现象的很多。尽管在设计上采用了抗裂稳定计算,但仍不能有效控制裂纹的产生与发展。因此,裂纹扩展的原因及寿命问题显得尤为突出。对带有裂纹的工程结构进行强度计算及寿命估算,近几年来得到广泛重视。一般情况下,断裂力学的研究对象是均质材料,而钢筋混凝土结构是非均质材料,因而使得有关断裂力学的研究工作遇到了一定的困难。本文的研究方法是:先对结构进行素混凝土断裂力学计算,然后将所得公式推广到钢筋混凝土结构中去,从而得到简支型矩形渡槽的断裂破坏判据及寿命估算公式。

1 素混凝土矩形渡槽底板的断裂力学公式

资料表明,钢筋混凝土简支型矩形渡槽的裂缝大多集中分布在底板中部,而在底板众多的裂缝中,底板跨中处的裂缝发展最快,缝隙最宽。因此,本文就以底板跨中裂缝作为整个渡槽断裂力学的计算对象。

对于图1所示的简支型矩形渡槽,底板宽度为 b ,厚度为 t 。当荷载确定,作用在底板上的应力也随之确定。在此,用 σ 表示底板跨中处横截面上的平均拉应力(即跨中处截面坐标为 y_c 处的应力值)。假想在底板跨中处取一底板微元段 dx ,微元段底板中点存在着一初始长度为 $2a$ 的穿透裂纹,微元段两端作用着均匀拉应力 σ ,情况如图1(c)所示,其虚线表示底板沿轴向布置的钢筋。

为了研究问题方便,先不考虑底板中钢筋的作用,即将微元段 dx 视为素混凝土底板。因而将渡槽底板跨中处的断裂力学问题转换为一个长度为 dx ,宽度为 b ,中间具有一穿透裂纹,两端承受均匀拉力的有限宽板条的断裂力学问题。

根据断裂力学理论:对于脆性材料,当裂纹的应力强度因子 K_I 达到该种材料的断裂初度 K_{Ic} 时,裂纹就会出现失稳扩展,其判据为

$$K_I = K_{Ic} \quad (1)$$

其中 K_{Ic} 由素混凝土材料断裂实验测得。

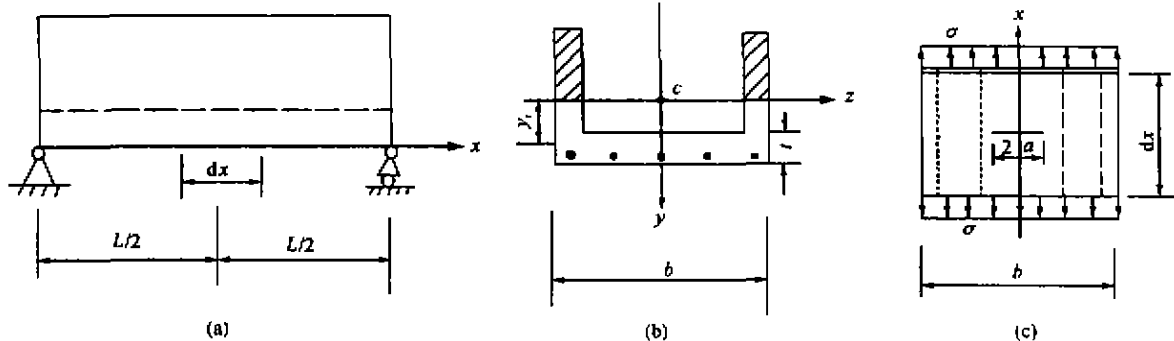


图1 简支型矩形渡槽

对于图 1(c)所示的有限宽板条的应力强度因子 K_I , 有关断裂力学文献早已解得:

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

其中, $\alpha = \sqrt{\frac{b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{b}}$ 称为裂纹的几何形状因子。

当水槽内的水位作周期性变化时, 尽管其工作应力强度因子 K_I 远小于 K_{Ic} , 但由于材料的疲劳现象也会导致裂纹的扩展(这种现象在断裂力学中称为疲劳裂纹扩展)。材料疲劳裂纹的扩展规律一般用 Paris 公式描述:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m \quad (3)$$

式中: $\frac{da}{dN}$ 为疲劳裂纹扩展速率, mm/周; $\Delta K_I = K_{I_{\max}} - K_{I_{\min}}$, 为应力强度因子幅度; C, m 是由材料确定的有关常数。

2 钢筋混凝土矩形渡槽的断裂力学计算公式

对于图 1(c)所示的钢筋混凝土底板, 由于钢筋在其拉伸过程中的线性变化范围远大于混凝土, 因此可以认为钢筋在混凝土裂纹的发展过程中只承受拉力作用, 而钢筋混凝土底板的有关断裂力学公式仍可用式(1)和式(3), 只是作用在混凝土上的拉应力重新分配而已。

$$\sigma_1 = \frac{1}{1 + (\frac{E_2}{E_1} - 1) \frac{A_2}{bt}} \sigma = C_d \sigma \quad (4)$$

式中: σ_1 为加有钢筋时作用在底板横截面混凝土上的实际工作应力; σ 为没有钢筋时作用在底板横截面上的计算应力; E_1 为素混凝土拉伸弹性模量; E_2 为钢筋拉伸弹性模量; bt 为底板横截面积; A_2 为底板钢筋横截面积之和; C_d 为底板钢筋混凝土系数。

将式(4)代入式(1)和式(2), 便得渡槽断裂强度因子的临界值, 其中:

$$\text{临界计算应力} \quad \sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\alpha C_d \sqrt{\pi a}} \quad (5)$$

$$\text{临界裂纹长度} \quad 2a_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\alpha C_d \sigma} \right)^2 \quad (6)$$

对于裂纹的扩展速率, 由式(3)和式(4)可得:

$$\frac{da}{dN} = C \alpha^m (\pi a)^{\frac{m}{2}} C_d^m (\Delta \sigma)^m \quad (7)$$

式中: $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 为渡槽水位变化时作用在底板跨中处横截面上的计算应力差。

对式(7)积分, 可得裂纹扩展到临界长度时所需循环次数 N_c :

$$\text{当 } m \neq 2 \text{ 时, } N_c = \frac{a_c^{1-\frac{m}{2}} - a^{1-\frac{m}{2}}}{C_1 (1 - \frac{m}{2}) (\Delta \sigma)^m} \quad (8a)$$

$$\text{当 } m = 2 \text{ 时, } N_c = \frac{1}{C_1 (\Delta \sigma)^2} \ln \frac{a_c}{a} \quad (8b)$$

式中: $C_1 = C_d C \alpha^m \pi^{\frac{m}{2}}$; a_c 由式(6)确定。

通过式(8)便可估算出渡槽在水位作周期性变化工况下的使用寿命。

3 讨论

3.1 关于渡槽的初始裂纹长度 $2a$

在渡槽的浇筑过程中, 混凝土内产生的气泡或含夹杂物的缝隙都视为初始裂纹。另外混凝土中石子与水泥砂浆的交界面也可视为初始裂纹。因此, 对于没有出现宏观裂纹的渡槽, 可以石子的最大直径作为初始裂纹的长度进行计算。

3.2 影响渡槽寿命的因素

从式(8)可以看出, 渡槽的寿命与渡槽计算应力差 $(\Delta \sigma)^m$ 和钢筋混凝土系数 C_d 成反比。因此 $\Delta \sigma$ 是影响渡槽寿命的重要因素。为了延长渡槽的使用寿命, 要尽可能降低水位变化的幅度, 最好以恒水位水槽供水。另外温度的变化也可产生 $\Delta \sigma_T$ 。一般早期农村渡槽两端支座通常采用钢垫板, 这种支座的滑动效果极差, 尤其在锈蚀严重的情况下, 在水平方向上基本上可视为完全约束, 因此当昼夜温度变化时, 便在渡槽底板上产生了一个因温度变化引起的 $\Delta \sigma_T$, 据计算, 这个 $\Delta \sigma_T$ 还可能大于因水位变化产生的 $\Delta \sigma$ 。所以, 如果能够采用摩擦系数较小的支座(如橡皮支座和滚轴支座), 则对延长渡槽的寿命是大有帮助的。

另外, 通过减小渡槽的 C_d 值也可增加渡槽的寿命, 但效果并不明显。由于

$$C_d = 1 / \left[1 + \left(\frac{E_2}{E_1} - 1 \right) \frac{A_2}{bt} \right]$$

与钢筋混凝土面积比 $A_2/(bt)$ 成反比, 当渡槽的钢筋混凝土材料确定后, 两者的弹模比 E_2/E_1 也就确定了。现取弹模比 $E_2/E_1 = 10$ 作估算, 试取两种不同的面积比值:

$$(A_2/(bt))_1 = 1\%, \quad (A_2/(bt))_2 = 2\%,$$

则 $C_{d1} = 0.9174, C_{d2} = 0.8474$

代入式(8)得:

$$\frac{N_{c2} - N_{c1}}{N_{c2}} = 1 - \frac{C_{d2}}{C_{d1}} = 7.6\% \quad (9)$$

式(9)说明, 如果含钢筋为 2% 的渡槽寿命为 100a 的话, 那么含钢筋为 1% 的渡槽为 92.4 a, 两者相差不大。因此, 用增加钢筋的方式来延长渡槽寿命的做法在经济上是不合算的。

(下转第 50 页)

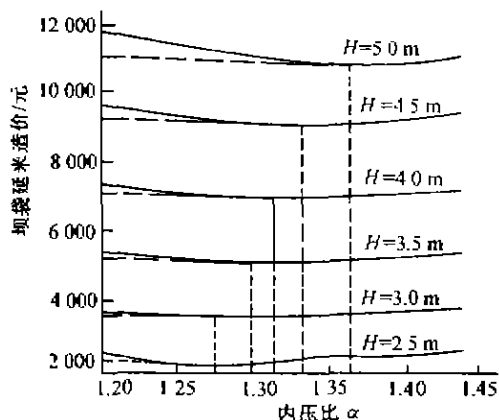


图1 内压比与坝袋造价关系曲线

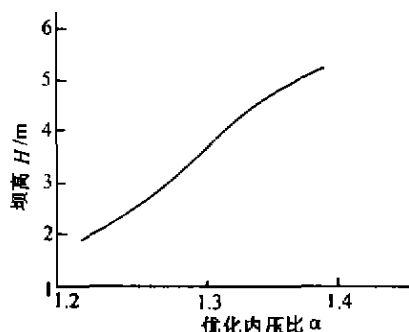


图2 坝高 H 与优化内压比 α 的关系曲线

4.1 弹性伸长率的确定

根据沈阳橡胶四厂测定结果,弹性伸长率一般在5%以上,本次设计取3%。

4.2 坝袋设计周长计算公式的修正

一般坝袋设计周长计算公式为

$$L = L_0 + 2\Delta L = S_1 + S_2 + 2\Delta L \quad (1)$$

考虑利用其弹性变形量时,坝袋设计周长计算公式为

$$L = (L_0 + 2\Delta L)/(1 + I) = (S_1 + S_2 + 2\Delta L)/(1 + I) \quad (2)$$

式中: L 为设计周长; L_0 为有效周长; S_1 为上游曲线长; S_2 为下游曲线长; I 为弹性伸长率。

从式(2)看出,加入弹性变形量后设计坝袋周长缩短的数值比式(1)减少 $1/(1 + I)$ 。

5 工程实例

临沂市小埠东橡胶坝采用了上述设计研究成果,在坝高3.5m时,查 $H \sim \alpha_{\text{优}}$ 关系曲线,得出最优设计内压比为1.3。橡胶坝全长1136m,加入弹性变形量设计坝袋周长,每米坝长减少坝袋 0.36 m^2 ,共节省坝袋 409 m^2 ,节约坝袋直接费19.6万元。经充水试验和工程实际运行表明,效果良好,达到相应的技术要求。

6 结 语

随着橡胶坝新技术的不断发展,充水式的橡胶坝已广泛用于水利建筑。为节省坝袋材料,在一定时期材料价格相对稳定的状况下,本文建立的不同坝高与最优设计内压比关系曲线可供设计中快速查用。在常规坝高情况下,坝高较小时(一般4.0m坝高以下)强度选择基本不受材料限制,内压比选择幅度大,为节省材料,可以选取较大值。而高坝的强度选择受材料限制较大,宜选较小值,查用上述曲线时应结合坝袋骨架新材料应用及坝袋的安全系数慎重选用。

(收稿日期:1999-06-09 编辑:张志琴)

(上接第48页)

4 结 语

用断裂力学方法研究钢筋混凝土结构的强度及裂纹扩展相当困难。目前这方面的研究成果也不多见。我们尽管在这方面做了些工作^[3,4],但也只是针对某个具体的工程结构而言的,在整体上如何采用一种统一的方式来解决,目前仍存在着很大的困难。

采用断裂力学的方法研究钢筋混凝土渡槽裂缝扩展及寿命估算,有助于提高渠系建筑物安全等级评估的准确性,对今后设计渡槽也有一定的参考价值。

参考文献

- 1 高庆.工程断裂力学.重庆:重庆大学出版社,1985
- 2 范天佑.断裂力学基础.南京:江苏科学出版社,1975

- 3 倪保璐,欧阳实.影响压力水管断裂强度及寿命的重要因素.中国农村水利水电,1998(5):19~20
- 4 欧健.韶山灌区渡槽裂缝研究.水利水电技术,1993(10):11~16
- 5 欧健,丁自强.U型壳槽塑性系数分析.水利水电技术,1993(6):18~20
- 6 SL/T 191-96 水工混凝土结构设计规范.
- 7 王铁梦.建筑物的裂缝控制.上海:上海科技出版社,1987

(收稿日期:1999-04-05 编辑:张志琴)

