

文章编号:1000-582X(2002)03-0101-04

碾压堆石体成拱机理分析

阎宗岭, 邱贤德, 余永强

(重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘要:碾压堆石体作为一种重要筑坝材料,其成拱效应始终是碾压堆石坝安全问题的焦点之一。碾压堆石体随堆积形式和施工工艺的差异而具有不同的工程特性,其破坏服从 Coulomb - Mohr 破坏准则。针对碾压堆石体的特殊施工工艺对涪陵城区移民迁建防护工程的碾压堆石体成拱机理进行了理论研究,并用 FLAC 有限差分程序对成拱机理进行了数值分析,结果表明碾压堆石体在一段时间的沉降之后的确可形成压力拱,压力拱正上方的土压力值小于两侧土压力,并承担部分上覆土层的自重及外加荷载。

关键词:碾压堆石体,成拱机理,数值分析

中图分类号:TU641

文献标识码:A

涪陵城区移民迁建防护工程石谷溪排洪渠采用箱型拱涵结构,断面为双孔拱涵,涵洞周围用碾压堆石体填筑,其自重对排洪渠的安全性有很大影响。排洪渠是涪陵防护工程的重要组成部分,将主要承受上部碾压堆石体的自重以及上部建筑物的荷载,对工程和涪陵城区的安全都将起至关重要的作用。在设计中,考虑到碾压堆石体的成拱效应^[1,2],认为施加在排洪渠上的荷载要小于上部碾压堆石体的自重及外加荷载之和。因此需要对碾压堆石体的成拱效应进行研究,以验证设计中的相关参数,并对设计参数的变更提供理论依据。

1 碾压堆石体的成拱机理

1.1 土压力拱的形成

把排洪渠简化为在半无限区域的碾压堆石体中开挖的一条用钢筋混凝土衬砌的隧洞,碾压堆石体处于塑性极限平衡状态且服从摩尔 - 库伦破坏准则。根据 Atkison 和 Potts(1977)的研究结果^[3],在无粘性土中开挖的圆形巷道周围一定区域内的主应力为径向应力和切向应力,在此区域之外的主应力为水平应力和垂直应力。为便于分析,将钢筋混凝土隧洞进一步简化视为圆形隧洞,如图 1 所示。取排洪渠周围区域中任一点来分析,在只受重力作用时,可得到如下极限平衡方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_x}{\partial z} + \frac{\partial \tau}{\partial x} + \gamma = 0 \end{cases} \quad (1)$$

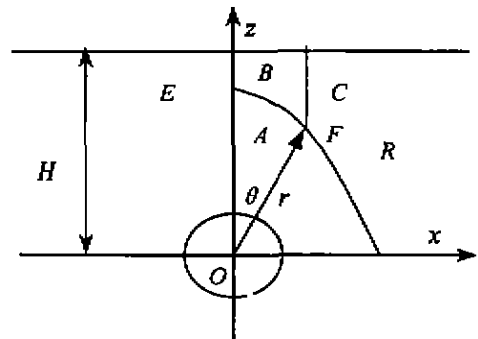


图 1 压力拱示意图

式中, γ —碾压堆石体的密度。

为计算方便,采用极坐标并将应力 σ_x 、 σ_z 、 τ 分别作级数展开,忽略高阶无穷小项后,可得

$$\begin{cases} \sigma_x = \gamma \left[\alpha H + r f(\theta) + \frac{r^2}{H} F(\theta) \right] \\ \sigma_z = \gamma \left[\beta H + r g(\theta) + \frac{r^2}{H} G(\theta) \right] \\ \tau = \gamma \left[\epsilon H + r h(\theta) + \frac{r^2}{H} H(\theta) \right] \end{cases} \quad (2)$$

• 收稿日期:2001-12-28

基金项目:重庆市科委应用基础研究资助项目,(渝科发计字[2001]74号-29)

作者简介:阎宗岭(1976-),男,河南新密人,博士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。

式中 H —隧洞距地表深度; α, β, ϵ —系数; F, G, H, f, g, h —关于 θ 的连续函数, 表示堆石体中水平、铅垂应力和剪应力。

由(2)所确定应力的区域称为区域 A , 即土压力比按上覆土层自重计算要小的区域, 其主应力为 $\sigma_x, \sigma_\theta, \tau_\theta$, 区域 A 以外的区域称为区域 R , 其主应力为 σ_x, σ_z, τ , 区域 R 中的应力可表示为

$$\begin{cases} \sigma_x = K_0 \gamma (H-Z) \\ \sigma_z = \gamma (H-Z) \\ \tau = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_0 ——土压力系数, 一般情况下等于碾压堆石体静止状态下的土压力系数 K_0 , 且为 Z 的函数^[4]

$$K_0 = K_0 \left(1 - \frac{a}{1 - \eta + b} \right) \quad (4)$$

式中, a, b ——系数; η —— Z/H 。

区域 A 和区域 R 在边界处的应力必连续且相等, 当以 $(\lambda H, \theta)$ 来表示极坐标时, 则

$$\begin{cases} \alpha + \lambda f(\theta) + \lambda^2 F(\theta) = K_0 (1 - \lambda \cos \theta) \\ \beta + \lambda g(\theta) + \lambda^2 G(\theta) = 1 - \lambda \cos \theta \\ \epsilon + \lambda h(\theta) + \lambda^2 H(\theta) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

用 μ 来表示堆石体与排洪渠表面间的摩擦系数^[5], 联合式(5), 则

$$\epsilon + \eta h(0) + \eta^2 H(0) = \mu [\alpha + \eta f(0) + \eta^2 F(0)] \quad (6)$$

一般情况下, $0 \leq \eta \leq 1$, 如果对任一 θ 值, 函数 f, g, h, F, G, H 都已知时, 很容易求出其在 $\theta + \Delta\theta$ 时的值。如果在 $\theta = 0$ 时, 函数 f, g, h, F, G, H 已知, 则对任一 $\theta + \Delta\theta$ 时的值都可以求出。

式中, λ 用来定义区域 R 和区域 A 之间的边界, 可由下式确定

$$(1 - \beta)\xi^2 = 6Z_0\xi - 2\epsilon\xi\eta + 12[M(\lambda_0) - M(\eta)] - 6\eta \times [X(\lambda_0) - X(\eta)] + a(6\lambda_0^2 - 6\lambda_0\eta + \eta^2) + \lambda_0^2 f(0)(4\lambda_0 - 3\eta) + \lambda_0^3 F(0)(3\lambda_0 - 2\eta) - K_0 \eta^2 (1 - \eta) \quad (7)$$

式中, λ_0 为 $\theta = 0$ 时 λ 的值; $\xi = \lambda \sin \theta$; $\eta = \lambda \cos \theta$

$$Z_0 = \lambda_0 \epsilon + 0.5 \lambda_0^2 h(0) + 1/3 \lambda_0^3 H(0)$$

$$X(\eta) = 0.5 K_0 (1 - \eta)^2 - a(1 - \eta) + ab \times \lg[(1 - \eta + b)/b]$$

$$M(\eta) = K_0 - a(1 + b)(1 - \eta) + (1 + a)/2 \times (1 - \eta)^2 - 1/3 \times (1 - \eta)^3 + ab(1 + b) \lg[(1 - \eta + b)/b]$$

当 $\alpha, \beta, f(0)$ 和 λ_0 已知时, $F(0)$ 可以从式(7)中求出, $\epsilon, h(0), H(0)$ 分别应为 $\mu\alpha, \mu f(0), \mu F(0)$ 。

从式(7)中可以导出任一 η 所对应的 ξ, λ, θ 的值。

当 $\eta = \lambda_0$ 时, $\theta = 0$, θ 从 0 到 π 连续变化, 相应可求出 η 的值。当 θ 大于某一临界值时, 从式(7)得不到合理的解, 此时说明所求解区域已超出区域 A 的范围, 用此方法就可以确定区域 A 和区域 R 之间的边界线。因此, 就证明了排洪渠上部的碾压堆石体在经过较长时间的自然沉降, 最终能形成类似于岩石中的压力拱, 并能承担一部分碾压堆石体的自重, 减小排洪渠箱形拱所承受的土压力。

1.2 土压力的求解

当区域 A 中任一点的应力 σ_x, σ_z, τ 都求出后, 主应力可以表示为

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{cases} = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \right)^2 + \tau^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

隧洞上部碾压堆石体的相对位移受到已屈服碾压堆石体和未屈服碾压堆石体之间剪切应力的约束, 未屈服的碾压堆石体位于两条大致对称的曲线之外, 如图 2 所示。

如果区域 A 中任一点的应力已知, 最大主应力与水平线之间的夹角 Ψ 为

$$\Psi = \frac{1}{2} \arctan \left(- \frac{2\tau}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) \quad (9)$$

最大主应力迹线的极半径在 $\theta = 0$ 时用 $r_0 \Delta\theta / \Delta\Psi$ 表示, 则对于不同的 r_0 , 存在一 $r_0 \Delta\theta / \Delta\Psi$ 与隧洞半径 R_0 相等, 即

$$R_0 = r_0 \frac{\Delta\theta}{\Delta\Psi} \quad (10)$$

在式(2)中, 当 $g(0)$ 和 r_0 取最小值且 $\beta = 0$ 时, 隧洞衬砌所承受的荷载不一定达到最小值, 此时 $\alpha = 0$ 。当 $\lambda = 0$ 时, 由式(5)知, $F(0) = -f(0)$, 联合式(9)、(10), 得

$$r_0 = \frac{2R_0}{f(0) - 1} \quad (11)$$

上式表明随 $f(0)$ 的增大 r_0 将减小, $f(0)$ 最大值

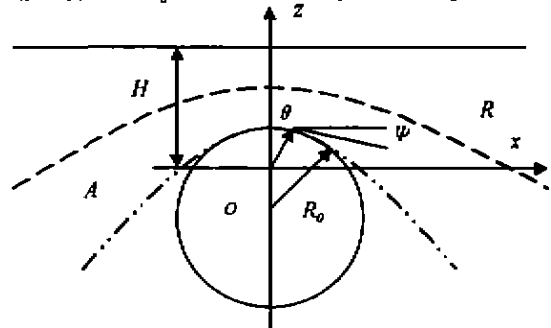


图 2 应力轴线与排洪渠走向关系

为 $g(0)/K_0, r_0$ 的最小值为当 $f(0) = 1/K_0$ 时,由式(11)确定,最后代入式(2)中,可得到

$$\sigma_z = \gamma \frac{Cr_0}{C + r_0} = \gamma R_0 \frac{2K_0 C}{2K_0 R_0 + C(1 - K_0)} \quad (12)$$

一般情况下,上覆土层的厚度远远大于隧洞的半径,式(12)可简化为

$$\sigma_z = \gamma R_0 \frac{2K_0}{1 - K_0} = \gamma \frac{2R_0}{K_p - 1} \quad (13)$$

式中 K_p —被动土压力系数。

2 碾压堆石体土压力的数值分析

对于碾压堆石体这种特殊的工程材料,用通常的有限单元法不能充分考虑其变形大的特点,因此采用FLAC有限差分法来模拟计算涪陵防护工程填筑碾压堆石坝的应力应变。

2.1 计算区域的选取与网格的划分

对石谷溪排洪渠,选定的区域为矩形区域,从排洪渠中心向两侧各为25 m,从排洪渠的基底至碾压堆石体填筑面28 m高,采用4结点四边形单元,模型两侧和底部为位移约束,网格划分如图3所示。

采用Coulomb - Mohr破坏准则,考虑碾压堆石体堆石体颗粒的浑圆度、颗粒大小、结构的均匀程度和颗粒的压实密度等因素,取石谷溪排洪渠碾压堆石体的内摩擦角为 43.5° ,内聚力为0.0436 MPa,确定碾压堆石体的平均湿密度为 $2.37 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。^[6]

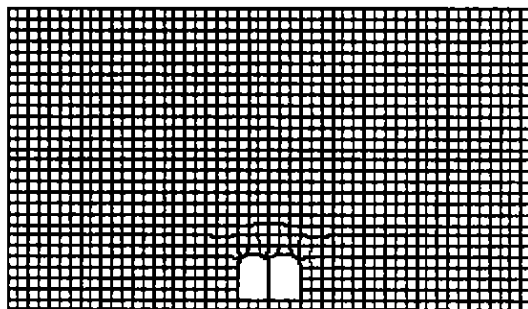


图3 数值计算网格的划分

2.2 数值计算结果分析

排洪渠上部未修建构筑物时,排洪渠周围的碾压堆石体只承受由自重压力,碾压堆石体的沉降逐步达到稳定。此时,碾压堆石体的最大铅垂应力为0.95 MPa,最大水平应力为0.3 MPa,最大沉降值为0.20m。

图4中排洪渠正上方的铅垂应力要比两侧区域的铅垂应力小;图5中排洪渠正上方的沉降量要小于两侧区域;图7中排洪渠上覆碾压堆石体的主应力在靠

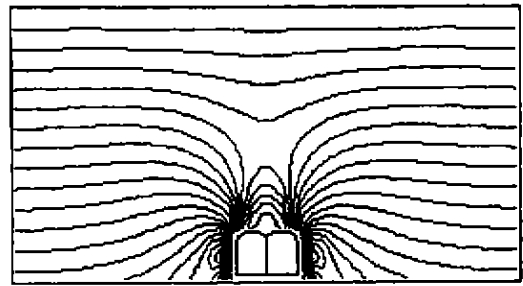


图4 铅垂应力等值线图

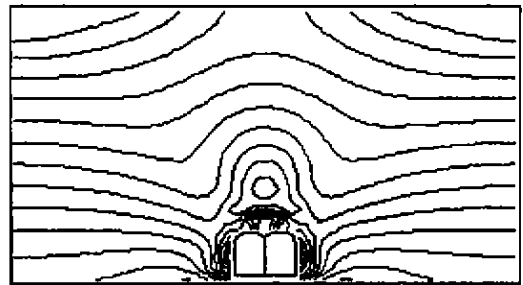


图5 水平应力等值线图

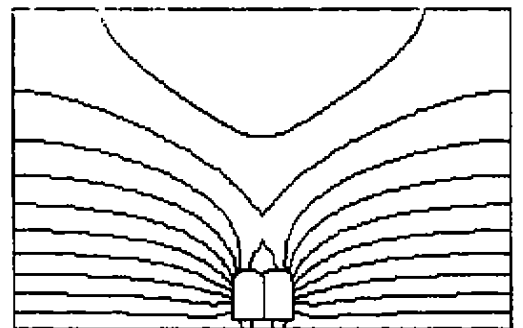


图6 无建筑物时沉降等值线图

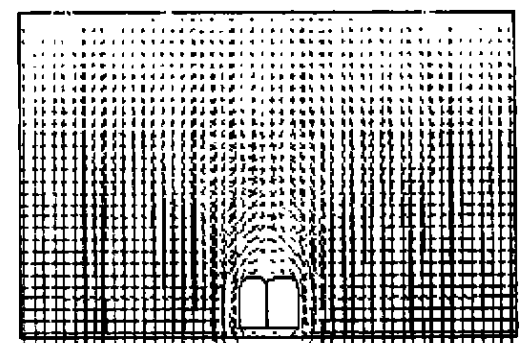


图7 主应力方向图

近排洪渠周边处的主应力矢量方向发生了不同程度的偏转。这共同表明碾压堆石体内在一定程度上已形成土压力拱。另外,图4中排洪渠正上方的外向垂铅应

力要小于两侧的铅垂应力,也说明土压力拱承担了部分上覆碾压堆石体自重。

3 结论

对碾压堆石体的成拱机理进行理论分析,结果表明:碾压堆石体在自重影响下,经一段时间的沉降后可形成土压力拱,并承担部分上覆土层的自重及荷载。成拱效应对以堆石体为主的构筑物的设计和施工具有实际指导意义。

参考文献:

[1] 杨柯,顾淦臣.土石坝心墙成拱作用的一个综合评价[J].

岩土工程学报,1999,21(2):240-241.

[2] KOUTHABELOUIS N C, GRIFFITHS D V. Numerical modelling of the trapdoor problem[J]. *Geotechnique*, 1989, 39(1): 77-89.

[3] AKISON J H, POTTS D M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil[J]. *Geotechnique*, 1997, 27(2): 203-215.

[4] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. *J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs*, G3: 1985, 25(4), 302-318.

[5] BRANSBY PI, SMITH I A A. Side friction in model retaining-wall experiments[J]. *J. Geotech. Engng Div. Am. Soc. Civ. Engrs* 1975, 101, G7: 615-632.

[6] 阎宗岭.碾压堆石体物理力学特性及其稳定性研究[D].重庆:重庆大学建筑工程学院,2000.

Analysis of Arching Mechanism in Compacted Rockfill

YAN Zong-ling, QIU Xian-de, YU Yong-qing

(College of Resource and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: As the main material in constructing dams, arching mechanism in compacted rockfill is always the focus of safety problem in compacted rockfill dams. Compacted rockfill has different engineering characteristics according to stack forms and constructing techniques, and the failure of compacted rockfill conforms to Coulomb-Mohr criterion. Compacted rockfill is the main material in protecting embankment for the migration movement in Fuling city zone. The arching action is theoretically studied and numerically modelled especially for constructing techniques. It is found out that the arching action begins and numerically of settlement and burdens part of load and deadweight of upper soil. Earth pressure applied to the arch is smaller than the weight of overburden.

Key words: compacted rockfill; arching mechanism; numerical modeling

(责任编辑 钟学恒)

·简讯·

《重庆大学学报》(英文版)已创刊

盼望已久的《重庆大学学报》(英文版),经过多次申报,现经国家新闻出版总署批准,已于2002年创刊,将正式出版,向国内外公开发行人。

《重庆大学学报》(英文版)的创办与正式出版,对于我校开展国际学术交流,提高我校在国际上的知名度,加强国际合作有重要意义。

欢迎全校师生踊跃投稿,积极支持该刊的出版与发行。