

深竖井底部廊道衬砌结构计算模型

曾凡杜

(中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要 针对采用现行筒仓设计规范进行竖井廊道结构设计存在计算模型不贴切的问题, 提出一种以太沙基理论为依据的结构计算方法, 即太沙基理论计算模型。以溪洛渡水电站混凝土生产系统骨料竖井为例, 进行 2 种方法的计算比较。结果表明, 该计算模型较贴切地反映了竖井底部实际受力状况, 计算结果更加合理。较筒仓规范理论计算方法可节省 50% 以上的工程投资。

关键词 深竖井廊道; 太沙基理论; 配筋计算; 溪洛渡水电站

中图分类号: TV314 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2011)S1-0069-03

采用地下竖井存储砂石骨料对骨料的自然降温等具有不可替代的优点。20 世纪 90 年代初, 二滩水电站在国内开创了使用地下竖井存储砂石骨料的先河。之后, 国内先后有小湾、溪洛渡、金安桥、官地、龙开口水电站等采用了地下竖井运输毛料或存储砂石骨料。竖井作为骨料运输通道时直径均较小, 一般为 10~20 m 左右, 但深度都比较大, 一般都在 100 m 以上。目前, 竖井结构计算所依据的规范有《钢筋混凝土筒仓设计规范》^[1]等, 但采用该规范存在计算模型不贴切的问题。笔者以溪洛渡水电站混凝土生产系统骨料竖井为例, 对竖井底部廊道衬砌结构提出太沙基理论计算模型, 并传统的筒仓规范理论计算方法进行比较。

1 工程概况

溪洛渡水电站竖井布置在大坝右坝肩下游高程 705.00 平台地面以下山体中, 竖井通过底部廊道与高程 610.00 平台形成立体骨料存储运输系统。其中粗骨料竖井共 4 个, 直径为 12 m, 深度约为 75 m; 细骨料竖井共 2 个, 直径为 10 m, 深度为 54 m。竖井按设计尺寸开挖后, 对底部廊道及竖井井壁采用钢筋混凝土结构衬砌。骨料竖井深度大, 最深达 76 m, 底部廊道承受荷载大, 因此探寻竖井底部廊道准确的衬砌计算模型是控制工程建设投资的关键。

2 技术背景

目前竖井底部廊道计算方法有: ①筒仓规范理

论计算方法; ②由《钢筋混凝土筒仓设计规范》计算出底板部位竖向荷载; ③岩石隧洞塌落拱计算方法; ④施工组织设计上考虑两侧骨料产生的摩阻力折减计算方法; ⑤岩石力学不能形成塌落拱计算方法; ⑥太沙基理论计算模型。

通过对以上 5 种计算方法计算结果的比较可知, 因为竖井开挖过程中对整个岩体进行了扰动, 故不能进行塌落拱理论分析(该方法计算廊道顶部荷载很小); 不能形成压力拱的计算方法与考虑廊道顶部全部荷载方法类似(该方法计算出廊道顶部荷载非常大); 考虑两侧骨料产生的摩阻力折减计算方法与筒仓规范理论计算方法的计算结果相近, 前者计算结果偏小; 太沙基理论计算模型计算结果比筒仓规范理论计算结果小。

根据以上分析, 现对粗骨料竖井底部廊道分别采用太沙基理论计算模型及筒仓规范理论计算方法进行受力配筋计算, 取沿廊道长度方向单宽受力计算。竖井计算高度为 70 m, 廊道净宽为 4.8 m, 钢筋混凝土衬砌, 初定衬砌厚度为: 侧墙 60 cm、廊道顶板 70 cm、底板 75 cm。竖井底部廊道结构见图 1。

3 太沙基理论计算模型

3.1 理论分析

太沙基理论: 假定岩石为散粒体, 并具有一定的黏聚力; 根据岩体一般总是有一定的裂隙和节理的特点, 且受洞室开挖施工的影响围岩不可能是一个非常完整的整体, 所以用这一理论来计算松动岩石

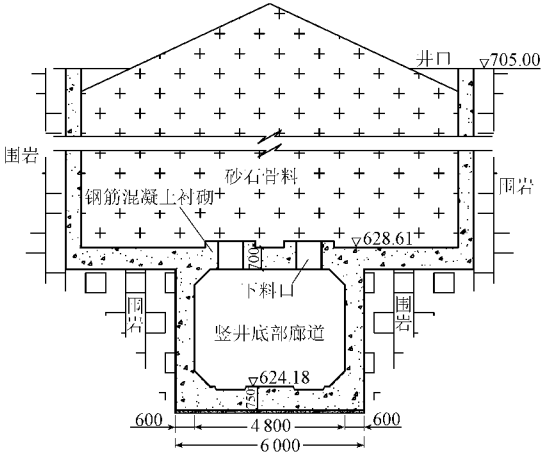


图1 竖井底部廊道结构(高程单位:m,其他单位:mm)
压力有时也可以得到较好的效果。

由于本工程竖井底部岩石较好,廊道侧面的岩石比较稳定,没有形成可能的破裂面^[2]。廊道顶部荷载可表示为

$$Q = \frac{B\rho g - C}{K_0 \tan \varphi} \quad (1)$$

式中: Q 为洞室顶面的垂直山岩压力,kN; B 为隧洞宽度的1/2; ρ 为岩石的密度,玄武岩取 1800 kg/m^3 ; C 为岩石黏聚力,本计算模型不考虑岩石黏聚力的作用; K_0 为岩石侧压力折减系数, $K_0 = \mu / (1 - \mu)$, μ 为泊松比,在试验室条件下 $\mu = 0.3$,因此 $K_0 = 0.43$; φ 为岩石内摩擦角,砂石粗骨料取 36° 。

3.2 廊道内力计算分析

根据以上理论分析,竖井底部廊道取横截面中心线围成的框架结构进行计算,各节点按固端连接考虑。顶板、底板按梁计算,长度为5.4 m,边墙按柱计算,高度为4.6 m。廊道顶板荷载为骨料,两侧边墙侧压力只考虑地下水压力(工程为Ⅲ类围岩,不考虑岩石侧向压力),侧压力折减系数为0.2;底板反力包括顶板荷载及自重、侧墙自重、底板自重。对计算模型附加荷载进行计算,竖井底部廊道受力计算模型见图2,其中 $Q_1 = 173\text{ kN}$, $Q_2 = 234\text{ kN}$, $P_1 = 137\text{ kN}$, $P_2 = 146\text{ kN}$ 。

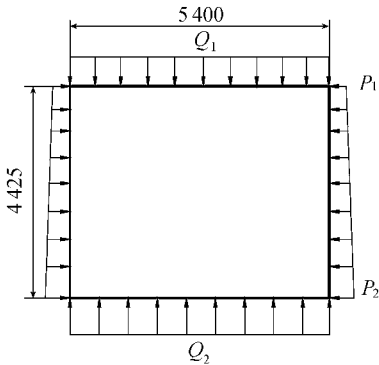
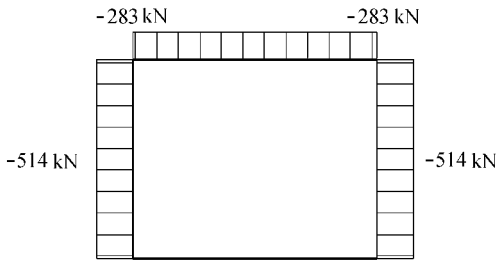
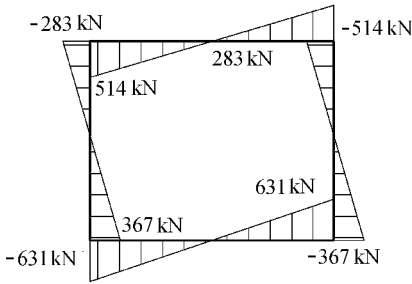


图2 竖井底部廊道受力计算模型(单位:mm)

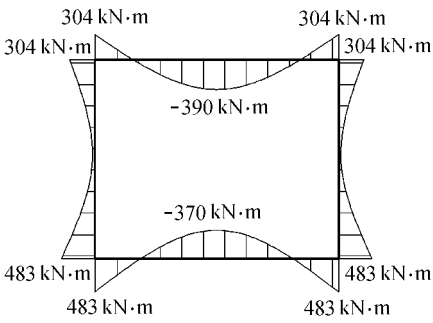
采用结构力学方法对廊道受力模型按超静定对称结构进行内力计算,顶板、侧墙、底板的轴力、剪力、弯矩计算成果见图3。



(a) 轴力



(b) 剪力



(c) 弯矩

图3 太沙基理论计算模型廊道结构内力计算

3.3 配筋计算

竖井底部廊道衬砌混凝土强度等级为C25,荷载分项系数为1.2,钢筋保护层厚度为5 cm,根据内力计算成果按初定衬砌厚度对顶板、侧墙、底板进行配筋计算。竖井底部廊道配筋计算成果见表1。

表1 太沙基理论计算模型竖井底部廊道配筋计算成果

位置	截面厚/cm	弯矩/(kN·m)	配筋面积/mm ²	选配钢筋/mm	实配钢筋面积/mm ²
顶板下层	70	390	2438	5 25	2454
顶板上层	70	304	1871	5 22	1901
侧墙	60	304	2218	5 25	2454
底板下层	75	483	2822	5 28/ 25	2766
底板上层	75	370	2116	5 25	2454

注:在该设计断面下,抗剪及抗压计算均满足要求,限于篇幅不再附上计算过程。

4 筒仓规范理论计算方法

4.1 理论分析

《钢筋混凝土筒仓设计规范》适用于储存散料且

平面形状为圆形或矩形的现浇钢筋混凝土筒仓,普遍用于地面粮食、水泥等储运工程。本工程竖井储存料为砂石骨料,属于散料范围,因此可用该理论计算底部廊道受力。

作用于仓底顶面处单位面积上的竖向压力 p_v 按式(2)计算:

$$p_v = \frac{C_v \rho' g R [1 - \exp(-\frac{f K h_n}{\rho})]}{f K} \quad (2)$$

式中: p_v 为仓底顶面处单位面积上的竖向压力, kPa; C_v 为深仓贮料竖向压力修正系数,根据规范取 1.4; ρ' 为贮料的密度,砂石骨料取 1600 kg/m^3 ; R 为筒仓水平净截面的水力半径,粗骨料竖井为 3 m; f 为贮料与仓壁的摩擦因数,取 0.6; K 为侧压力系数; h_n 为贮料计算高度,计算取 70 m。

4.2 廊道内力计算分析

根据筒仓规范计算出竖井底部廊道顶板竖向压力为 379 kPa。取廊道单宽进行结构计算,侧墙、底板受力叠加同太沙基理论计算模型,计算过程略。竖井底部廊道结构计算模型见图 2,其中 $Q_1 = 379 \text{ kN}$, $Q_2 = 484 \text{ kN}$, $P_1 = 137 \text{ kN}$, $P_2 = 146 \text{ kN}$ 。

采用结构力学方法对廊道受力模型按超静定对称结构进行内力计算,顶板、侧墙、底板的轴力、剪力、弯矩计算成果见图 4。

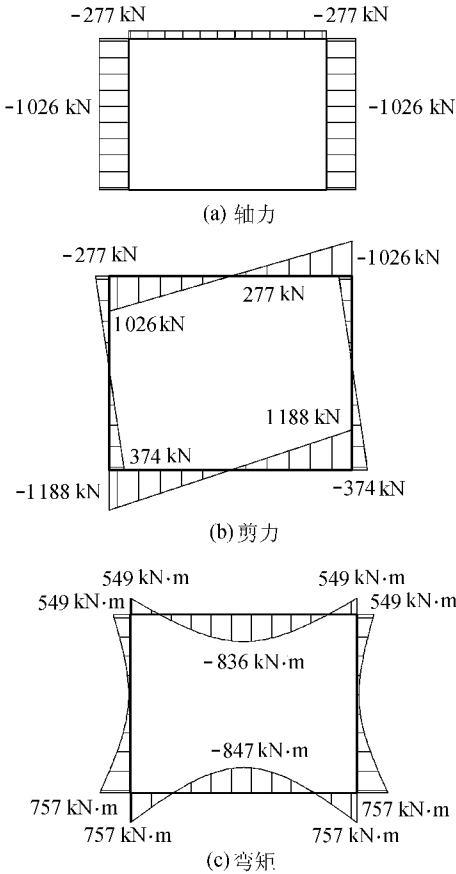


图 4 筒仓规范理论廊道结构内力计算

4.3 配筋计算

根据筒仓规范,荷载分项系数取 1.3,其余配筋计算参数同太沙基理论计算模型。配筋计算过程略,竖井底部廊道配筋成果见表 2。

表 2 筒仓规范理论竖井底部廊道配筋计算成果

位置	截面厚/ cm	弯矩/ (kN·m)	配筋面积/ mm ²	选配 钢筋/mm	实配钢筋 面积/mm ²
顶板下层	70	836	5803	6 36	6107
顶板上层	70	549	3000	5 28	3079
侧墙	60	549	3600	6 28	3695
底板下层	75	757	3998	5 32	4021
底板上层	75	847	7042	6 40	7540

注:在该设计断面下,抗剪及抗压计算均满足要求,限于篇幅不再附上计算过程。

5 结 语

通过对太沙基理论模型及筒仓规范理论 2 种方法在竖井底部廊道的实例计算分析可见,筒仓规范理论计算过程中没有充分考虑骨料的“起拱效应”,因此竖向荷载偏大,是一种偏安全的计算方法。而在实际工程中发现砂石骨料特别是细骨料的“起拱效应”非常明显,非常吻合太沙基理论的计算假定,采用太沙基理论计算模型比筒仓规范理论计算方法节省衬砌钢筋 50% 以上。

在小湾水电站孔雀沟人工砂石加工系统、溪洛渡水电站高线系统、龙开口水电站燕子崖人工砂石系统等工程竖井底部廊道实际设计施工中,均采用了太沙基理论计算模型进行结构设计,大幅度减少了原设计中的衬砌钢筋,节省了工程投资。通过对竖井现场运行检查及底部廊道的安全观测,底部廊道结构无不良状况出现,证明该理论可应用于实际工程中。该计算模型在今后类似的竖井衬砌工程中值得进一步推广。

参考文献:

[1] GB 50077—2003 钢筋混凝土筒仓设计规范[S].
[2] 徐志英.岩石力学[M].3版.北京:中国水利水电出版社,1993.

(收稿日期 2010-07-12 编辑 骆超)

