

设置卸荷板的扶壁式挡土墙土压力计算

梁 栋

(上海市政交通设计研究院有限公司,上海市 200030)

摘 要:在扶壁式挡土墙中设置卸荷板可有效地优化结构受力条件,减小直接作用于墙面板上的水平土压力,提高挡土高度,但该类构筑物的结构受力模式复杂,尤其是土压力的计算直接关系到结构计算的可靠度。分别利用朗金土压力和库伦土压力的静力平衡假定条件进行计算分析,指出了朗金公式在计算此类工况土压力时的缺陷,确定了库伦公式的适用性,给出了土压力的具体计算步骤,并提出了适用于库伦公式的卸荷板设计构造要求,为超高扶壁式挡土墙设计提供参考。

关键词:扶壁式挡土墙;卸荷板;土压力

中图分类号: TU476.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)06-0314-04

0 引 言

悬臂式挡土墙和扶壁式挡土墙均为轻型钢筋混凝土挡土结构,广泛运用于建筑边坡^[1]、道路路基^[2]、水利提防^[3],相较于重力式挡墙,具有结构尺寸小、圬工数量少、地基承载力要求较低的特点。由于结构形式不同,悬臂式挡土墙和扶壁式挡土墙存在以下差异。

悬臂式挡土墙由墙面板、墙趾板、墙踵板组成,断面呈“L”型,结构形式简单,属于静定结构,可采用二维结构力学进行计算设计,结果真实可靠,但材料性能利用率低,应力主要集中分布在墙面板与底板连接节点处,为提高材料性能利用率,在大部分工程实践中均采用变截面墙面板的结构设计思路,但综合考虑结构的简便原则和施工的便利性,截面沿墙高的变化一般为一次函数曲线,而弯矩随墙高的变化为二次函数曲线,因此悬臂式挡墙的挡土净高度较小,一般不大于5 m,部分工程设计人员^[4]在不改变结构平面应力-应变模型的基础上,采用预应力锚杆,通过增加弹性支座(锚节点),优化结构受力形式,且计算模型由平面静定结构转为平面二至三次超静定结构,计算难度并未明显提高,计算结果可靠性较高。

扶壁式挡土墙在悬臂式挡土墙的结构形式基础

上增加了扶肋,上部墙面板的弯矩由水平方向传给扶肋,再由扶肋向下传递至墙踵板,中部墙面板的弯矩同时向扶肋和墙踵板传递,下部墙面板的弯矩则仍直接传递给墙踵板,根据目前设计实践中运用较多的铁路系统扶壁式挡墙设计计算方法^[5],扶壁式挡土墙墙面板传递到底部的竖向弯矩约为悬臂式挡土墙的1/2。

扶壁式挡墙通过三维结构改善了结构内的应力分布,使得挡土结构高度相对于悬臂式挡墙提高了9~10 m^[5]。受主要传力构件扶肋的截面强度限制,当挡土高度大于12 m时,扶壁式挡墙的构件截面尺寸增长趋势加快,整体结构不再轻量化。分析其根本原因,在于填土侧压力随着挡土高度的增加而线性增大,扶肋作为悬挑构件承受的弯矩呈现抛物线型增长,因此,降低填土对于墙面板的水平作用力是结构优化设计的目标。工程师在设计实践中选择了在扶肋之间增加水平卸荷板^[1,6],降低中下部土体直接作用于墙面板的水平荷载,为超高挡土墙的设计提供了新的思路。

1 工程概况

五奎山滑雪场项目位于吉林省梅河口市,建设场地为一处花岗岩采石场矿坑。场地原为低山地貌,经开采后,山体北向坡面整体标高较低,坡率由天然状态的1:3.6降低为1:5.2,在原山顶处形成了高差30 m的悬崖。按照规划五奎山区域整体进行旅游开发建设,矿坑地带需根据原始地貌进行复原,兼作旅

收稿日期:2023-05-28

作者简介:梁栋(1992—),男,工学学士,工程师,从事岩土工程勘察、设计工作。

游集散基地建设用弃土场，于此同时在复原后的场地上规划设计了滑雪场，实现了矿坑“恢复再利用”的目标。

设计滑雪场坡向整体为南向北, 南侧最高处与现状山体交界点为出发平台, 北侧最低点为终止平台。出发平台平均高程与现状山顶标高接顺, 由于出发平台的功能要求, 需保证足够的等标高平台面积, 在边缘处与现状地面形成了约 16 m 的高差, 因此沿平台边缘设置挡土墙, 根据高差的不同, 分别采用了悬臂式和扶壁式挡土墙, 在高差极值点, 设置了带卸荷板的扶壁式挡土墙, 设计平、断面图见图 1。

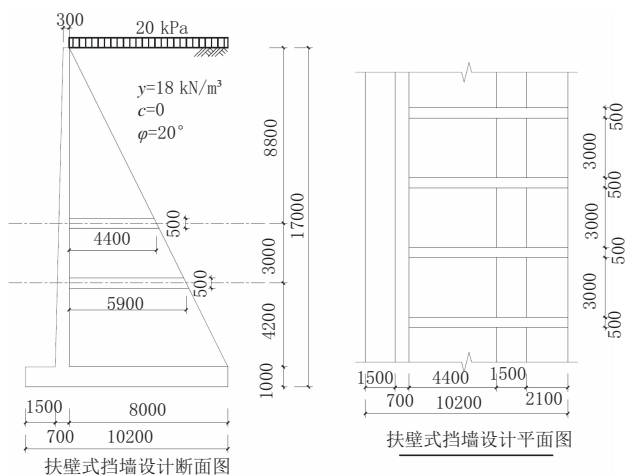


图 1 扶壁式挡墙设计图(单位:mm)

与土压力计算相关的参数如下：填土重度 $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ ，黏聚力 $c=0$ ，内摩擦角 $\varphi=20^\circ$ ，填土顶部超载 $q=20 \text{ kPa}$ ，不考虑地下水的作用。

2 土压力计算方法

支挡结构所受的水平土压力根据结构变形方式不同可分为静止土压力、主动土压力和被动土压力,其数值大小关系为主动土压力<静止土压力<被动土压力。目前应用于工程实践的土压力计算方法主要为库伦公式和朗金公式。

库伦公式和朗金公式均基于摩尔库伦强度理论,两者的区别在于:朗金公式根据土体单元的平衡受力条件来计算土压力,适用于墙背光滑竖直、填土表面水平的工况;库伦公式根据墙背(或假想墙背)与滑动面间的刚性楔形体处于极限静力平衡状态计算土压力,除朗金公式的适用工况外,还适用于墙背粗糙、墙背倾斜、填土表面倾斜的工况。计算主动土压力时,库伦公式结果较大,而计算被动土压力时,朗金公式结果较大,根据现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[7]的条文说明,采用

库伦公式计算主动土压力，采用朗金公式计算被动土压力。

3 按照朗金公式计算土压力

朗金公式的形式较为简单,计算公式如下:

$$E_a = (\gamma Z + q) \times K_a \quad (1)$$

式中: E_a 为计算深度处的主动土压力值; γ 为土的重度; Z 为计算深度; q 为土层顶部超载; K_a 为朗金主动土压力系数, 计算公式 $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ 。

计算结果 $K_a=0.49$, 不考虑卸荷板作用时, 墙面承受自上而下线性增大的水平土压力, 计算可得:

$$E_{s0} = (18 \times 0 + 20) \times 0.49 = 9.8 \text{ kPa}$$

$$E_{a,16} = (18 \times 16 + 20) \times 0.49 = 150.9 \text{ kPa}$$

考虑卸荷板作用时,第一卸荷板以上墙面板承受的水平土压力未发生变化,按照第一卸荷板到第二卸荷板和第二卸荷板到墙踵板之间的墙面板承受的水平土压力均自上层卸荷板底起算,同时按照静力平衡条件,墙面板减少的水平土压力由下层卸荷板(墙踵板)承担。卸荷板上所受的竖向土压力按照垂直投影范围内的土柱自重以及土柱上方的超载进行计算,计算结果见图 2。

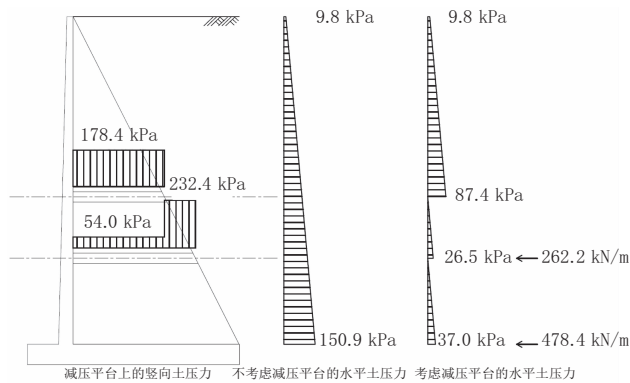


图 2 朗金公式计算的土压力分布图

不难看出,利用朗金公式计算土压力时,计算模型和计算过程简单直观,但深入分析即可发现计算假定存在错误,以第二卸荷板为例,计算所得作用在第二卸荷板上的竖向土压力合力为:

$$E_v = 54.0 \times 4.4 + 232.4 \times 1.5 = 586.2 \text{ kN/m}$$

由土体与平台间摩擦产生的最大抗力 f 为:

$$f = E_v \times \mu = E_v \times \tan(\varphi) = 213.4 \text{ kN/m} \quad (2)$$

公式计算时土体与结构间摩擦系数取土体与卸荷板间最大摩擦角 $\varphi=20^\circ$, 即土体内摩擦角。当土体与结构间的摩擦角大于土体内摩擦角时, 接触面以上的土体会先于接触面发生相对位移。

根据朗金公式假定, 第二卸荷板处承担的水平

土压力为 262.2 kN/m(见图 2),大于计算所得的最大摩擦抗力,这必然会导致土体内水平应力的重分布,因此并不能直接用朗金公式计算带有卸荷板的扶壁式挡土墙的土压力。

4 按照库伦公式计算土压力

假设以墙顶内缘至墙踵内缘连线作为假想墙背(即扶肋轮廓线),土体与墙背的摩擦角与土体内摩擦角相等为 20° ,利用理正岩土软件计算库伦土压力,见图 3(未出现第二破裂角)。

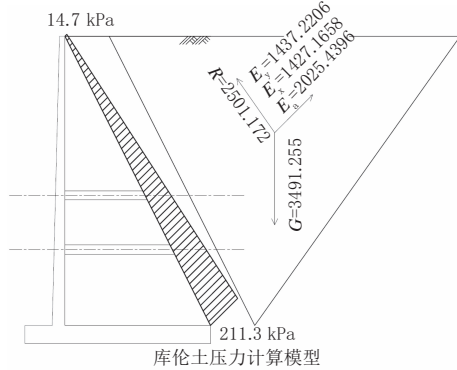


图3 库伦公式计算的挡土墙整体土压力分布图(单位:kN/m)

计算得出,刚性楔形体的自重 $G = 3\,491.255\text{ kN/m}$ 对假想墙背的土压力合力 $E_a = 2\,025.439\,6\text{ kN/m}$ (其中水平方向的分量系数为 0.70,竖直方向的分量系数为 0.71)。

取第一卸荷板和第二卸荷板间土体进行分析(见图 4),由楔形体传递的土压力 $E_a = 470.7\text{ kN/m}$,其中水平向分量 $E_{a,x} = 329.5\text{ kN/m}$,竖向分量 $E_{a,y} = 334.2\text{ kN/m}$,平台间土体自重 $G = 278.1\text{ kN/m}$ 。

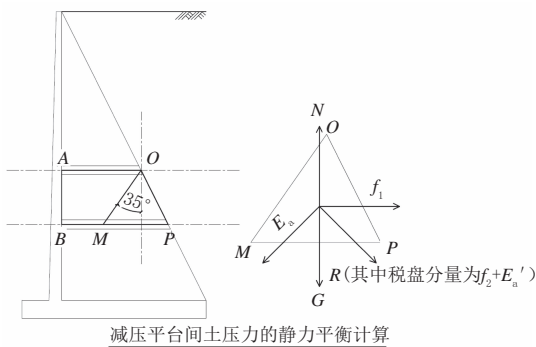


图4 卸荷板间的土压力静力平衡

为了简化静力分析,将平台间的土体分为两部分,靠近墙背的传力刚体 $\triangle MOP$ 和剩余土体 $AOMB$,其中 OM 与竖向的夹角为根据库伦公式确定的破裂角 $(45^\circ - \varphi/2)$ (见图 4)。

显然,全部的 $E_{a,y}$ 均由 MP 范围内的卸荷板承

担, $E_{a,x}$ 则由卸荷板提供的总水平抗力 f 和墙面板提供的水平抗力 E_a' 平衡。

由卸荷板传递的水平向土压力为:

$$f = f_1 + f_2(E_{a,y} + G) \times \mu = 222.9\text{ kN/m} \quad (3)$$

式中: f_1 为刚体受到的全部土压力在 y 向的分量 $E_{a,y}$ 与卸荷板结构间产生的摩擦力; f_2 为平台间土体自重 G 与卸荷板结构间产生的摩擦力。

由墙面板承担的水平向土压力为:

$$E_a' = E_{a,x} - f = 106.6\text{ kN/m}$$

不难看出,在库伦公式计算假定中,卸荷板之间的土体内为被动土压力状态,采用朗金公式计算被动土压力值为

$$E_p = \frac{1}{2} \times \gamma z \times \tan^2(45^\circ + \varphi/2) = 165.2\text{ kN/m} > 106.6\text{ kN/m} \quad (4)$$

式中: E_p 为计算深度处的被动土压力值; γ 为土的重度; Z 为计算深度; φ 为土层内摩擦角。

传递到墙面板的水平土压力未超过计算的被动土压力值,土体内土压力未发生应力重分布,因此可假定墙面板所受的水平土压力沿墙面板高度方向线性变化(见图 5)。

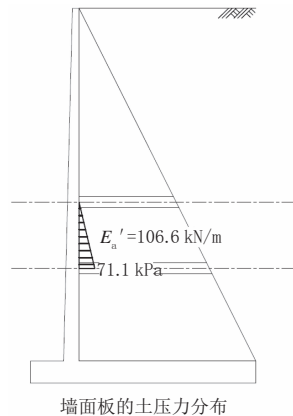


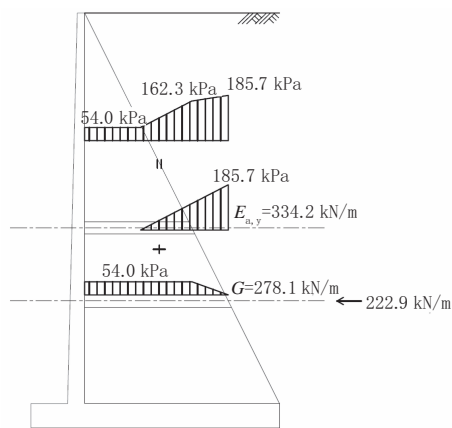
图5 第一卸荷板与第二卸荷板之间墙面板所受的土压力分布图(单位:kN/m)

卸荷板承受的竖向土压力分为卸荷板间土体自重和刚性楔形体传递的土压力竖向分量 $E_{a,y}$,其中 $E_{a,y}$ 在假定刚体 $\triangle MOP$ 在卸荷板的投影平面范围内(即 MP 段)线性分布,两者叠加后土压力分布见图 6。

同理可计算第二卸荷板与墙踵板间土土压力(见图 7)。

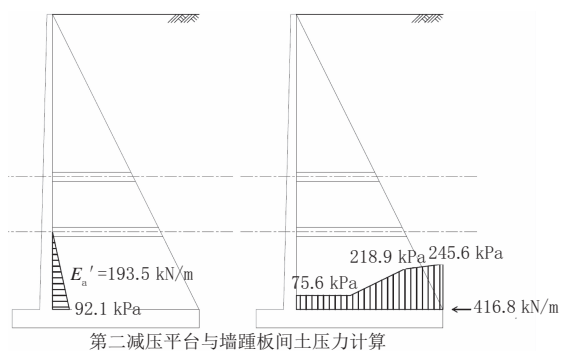
5 满足计算假定的扶肋构造设计要求

根据前文分析,计算带卸荷板的扶壁式挡土墙时,采用朗金公式时会引出一个错误假定,即无论卸荷板的横向长度如何设置,作用于墙面板和卸荷板



减压平台的土压力分布

图6 第二卸荷板所受的土压力



第二减压平台与墙踵板间土压力计算

图7 第二卸荷板与墙踵板之间的土压力

的水平土压力都是一个固定值；采用库伦公式计算土压力的假定条件符合静力极限平衡的原则，为了满足计算假定条件，在卸荷板的设置上应满足以下两点条件。

一是下层卸荷板的内缘不应落在假定传力刚体 $\triangle MOP$ （见图4）在卸荷板的投影平面范围（即MP段）内。在静力平衡分析中，假定传力刚体 $\triangle MOP$ 将假想墙背处传来的土压力竖向分量全部传递至下层卸荷板上，剩余的土压力继续向墙面板传递，而剩余土体AOMB（见图4）的静力平衡条件为水平方向上的墙背抗力、平台摩擦力和剩余水平土压力，竖直方向上的土体自重、平台支撑力和剩余竖向土压力分别平衡，墙背抗力的分布满足“不大于被动土压力”的线性分布特点。当下层卸荷板长度过短时，假定的刚体边界OM落在了墙面板上，墙面板M点下部直接承担由外部楔形体传递来的水平土压力，整个墙面板的水平土压力不再满足线性分布，无法按照公式计算土压力。

二是计算假定中卸荷板提供的水平抗力由竖

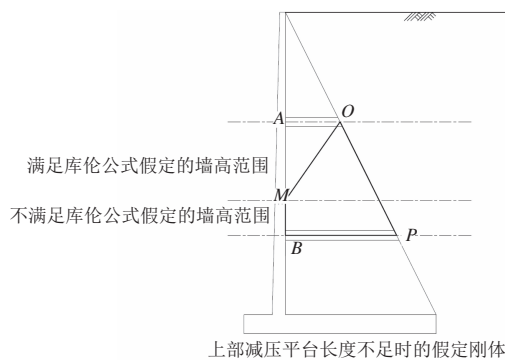


图8 卸荷板间距过大的传力刚体

向力乘摩擦系数获得，摩擦系数取土体内摩擦角计算，如卸荷板与土体间的摩擦系数小于该数值时，作用于墙面板的剩余水平土压力可能超过被动土压力值，而引起土体内应力重分布。

因此卸荷板表面应人工凿毛（凿毛后应满足平台顶部钢筋保护层厚度要求），或设置防滑凸榫，保证结构与土体间的摩擦系数不小于土体的内摩擦角。

6 结 语

采用卸荷板的扶壁式挡土墙的土压力计算，不应采用朗金公式的土体单元极限静力平衡假定，应采用库伦公式的刚性楔形体极限静力平衡假定，作用于墙面板的土压力不能直接求得，应通过以整个挡土墙扶肋内轮廓作为假定墙背，采用库伦公式计算所得的土压力传递至卸荷板间的土体后，抵消卸荷板与土体间的摩擦抗力，剩余部分的土压力线性分布于墙面板上（顶端数值为0），为了满足库伦公式的计算假定条件，卸荷板应满足一定的构造设计要求。

参考文献：

- [1] 朱向东. 超高挡土墙结构设计[J]. 建筑结构, 2010, 40(7): 109-111.
- [2] 董天兵. 公路挡土墙选型及设计实例分析[J]. 城市道桥与防洪, 2016(5): 57-59, 75.
- [3] 葛苗苗, 李宁, 朱才辉, 等. 扶壁式挡土墙水位骤降情况下稳定性及受力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1667-1675.
- [4] 罗江波, 黄汉盛. 悬臂式锚杆挡土墙在高填土边坡中的应用[J]. 工程勘察, 2011, 39(2): 34-36, 89.
- [5] 尉希成, 周美玲. 支挡结构设计手册(第三版)[M]. 中国建筑工业出版社, 2015.
- [6] 彭磊, 任长青. 乌一东. 设置卸荷板的扶壁式挡土墙的特殊应用[J]. 建筑结构, 2013, 43(增刊1): 935-937.
- [7] GB 50330—2013, 建筑边坡工程技术规范[S].