

· 地基与基础 ·



顺层岩质岸坡板桩支护结构土压力计算*

刘明维^{1,2}, 王 姣¹, 李忠芳¹, 代汝林¹

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 采用有限元软件PLAXIS对顺层岩质岸坡上板桩墙的墙后土压力进行分析计算, 探讨了不同结构面倾角时板桩墙自身的位移以及墙后土压力的变化趋势, 得到了板桩墙墙后土压力的大小和土压力分布形式。结果表明: 顺层岩质岸坡上板桩墙的墙后土压力合力值随着结构面倾角的增加呈先减小再增大的趋势, 同时墙后土压力的大小不是随入土深度的增加而简单地呈线性增大, 而是出现不规则的增大或减小, 墙后土压力最大值基本都出现在墙体临空界面处或者墙体的底部, 在进行板桩墙稳定性分析中应全面考虑墙底部及板桩墙临空界面处最大土压力。研究成果可为完善《建筑边坡工程技术规范》提供参考。

关键词: 顺层岩质岸坡; 墙后土压力; 板桩墙; 有限元法; 结构面

中图分类号: TU 457

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0166-05

Soil pressure calculation of sheet-pile walls on rock-bedded slope

LIU Ming-wei^{1,2}, WANG Jiao¹, LI Zhong-fang¹, DAI Ru-lin¹

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University,

Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: This paper analyzes calculates the soil pressure of the sheet-pile wall on the rock-bedded slope with PLAXIS, discusses the variation trend of the soil pressure and horizontal displacement with different inclination angles, and obtains the value and distribution of the sheet-pile wall on the rock-bedded slope. The research results show that the total lateral soil pressure of the sheet-pile wall first increases and then decreases with the increment of the inclination angles, the soil pressure does not present the simple linear increase distribution, but an irregular distribution, the maximum soil pressure presented on the freeing surface or the bottom of the sheet-pile wall. The results may serve as a reference for the perfection of the *Technical Code for Building Slope Engineering*.

Key words: rock-bedded slope; soil pressure behind wall; sheet-pile wall; finite element method; structural plane

板桩墙是由质量不大的板桩打入土中构成, 经常作为基坑开挖中的坑壁围护或者码头岸坡支护结构。板桩墙是一种柔性结构, 其墙后岩土压力的分布和大小十分复杂, 目前并没有一个较为完善的、科学的计算体系, 现有计算方法主要是

采用《建筑边坡工程技术规范》^[1]所推荐的侧向岩土压力公式, 根据板桩墙可能发生的变形情况计算墙后土压力值。但是对于内部含有多条相互平行裂隙、节理的顺层岩质岸坡^[2]板桩墙, 使用理论公式往往得不到到真实的墙后土压力大小和分

收稿日期: 2011-12-21

*基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAB09B00); 重庆市科技攻关计划项目(cstc2011ggA30002)

作者简介: 刘明维(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事港工结构及基础方面的教学研究。

布形式, 从而对结构的稳定性计算造成影响。

与传统的理论公式法相比, 有限元数值法^[3-4]能模拟复杂地质情况下复杂结构的应力应变状态^[5], 李荣庆等利用PLAXIS对一般板桩结构前墙入土深度和抗弯刚度对板状性能的影响进行分析^[6], 在获得板状墙的内力、变形的同时, 初步分析了一般岸坡上墙后土压力值与其分布形式。本文采用有限元软件PLAXIS, 对复杂顺层岩质岸坡上板桩支护结构土压力计算方法进行分析, 研究成果可为《建筑边坡工程技术规范》的修订提供参考, 也为完善顺层岩质岸坡上支挡结构的稳定性计算提供参考。

1 顺层岩质岸坡板桩支护结构有限元计算

1.1 计算模型

为了探讨顺层岩质岸坡上板桩结构的土压力分布与大小, 选取的顺层岩质岸坡算例高35 m, 坡体水平投影长100 m, 岩层自上而下分别为岩层1、岩层2及硬性结构面, 相邻结构面之间厚度为5 m。工程建设需要对岸坡进行开挖, 并采用板桩墙进行坡体支护, 其剖面见图1。

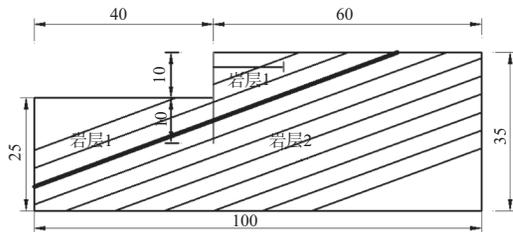


图1 顺层岩质岸坡支挡结构

结构面倾角对顺层岩质岸坡板桩墙后土压力大小及分布形式影响十分明显。计算中依次选取结构面倾角为15°, 20°, 25°, 30°, 35°。岩土层物理力学参数以及板桩墙结构参数见表1和2。

表1 计算参数

材 料	天然密度/ (t · m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
岩层1	2.40	1.70	0.3	1 000	32
岩层2	2.48	2.20	0.3	1 200	38
结构面	1.70	0.01	0.3	130	35

表2板桩墙结构参数

弹性模量 E/GPa	轴向刚度EA/ (GN · m ⁻¹)	泊松比	抗弯刚度EI/ (GN · m ² · m ⁻¹)
32.5	13	0.15	0.173

本文采用PLAXIS有限元软件进行计算, 该软件提供了丰富的本构模型, 可以模拟土或者岩石的非线性、时间相关和各向异性以及与结构的共同作用等。可以通过简单的输入生成复杂的有限元模型, 并且可以提供详尽的计算结果用于输出, 是解决当前较为复杂的岩土工程问题的专业计算分析软件。

计算主要采用无厚度界面单元模拟不连续的硬性结构面^[7], 并且对界面赋予结构面的土体参数。板桩前端入土深度为10 m, 顶面作用20 kN/m的均布荷载, 为了简化计算, 暂不考虑板桩墙后锚碇板的作用, 即锚固力F为0, 将板桩墙简化为悬臂式板桩结构。有限元计算模型见图2, 采用弹塑性本构模型, Mohr-Coulomb准则。

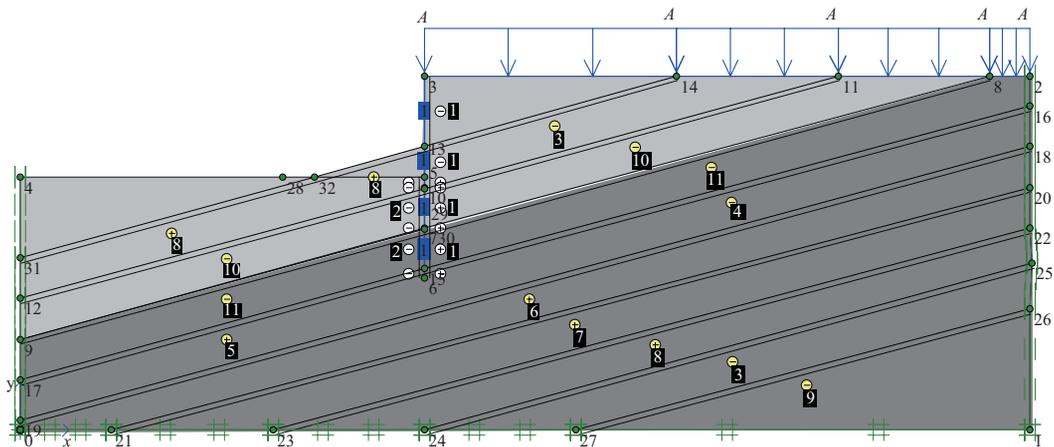


图2 有限元计算模型

1.2 计算结果分析

数值模型的初始应力场按自重加载，即选用重力加载，为了更真实地模拟岸坡与结构之间的相互作用，计算分4步进行分步施工模拟。第1步，仅仅考虑岩体边坡初始应力加载；第2步，消去自重加载产生的位移，模拟边坡开挖；第3步，模拟板桩墙修建；第4步，在墙顶面作用均布荷载。边界条件为：底部进行2个方向的约束，侧面约束水平方向位移。由此分别计算出不同结构面倾角时所对应板桩墙的墙后土压力值、板桩墙水平位移、弯矩、最大值，见表3。

表3 不同结构面倾角的有限元计算结果

结构面倾角/(°)	墙后土压力值/(kN·m ²)	板桩墙水平位移最大值/mm	板桩墙最大弯矩/(kN·m·m ⁻¹)
15	2 267	5.62	16.79
20	2 241	4.14	10.50
25	2 522	9.94	19.94
30	2 565	9.80	21.36
35	2 573	9.42 </td <td>20.60</td>	20.60

由表3及图3、4可知，板桩墙墙后土压力值的大小随着结构面倾角的增加并不是呈简单的线性增大关系，而是呈先减小再增大的趋势，在结构面倾角15°~25°之间压力值最小，并且此时对应的板桩墙的最大水平位移、最大弯矩、最大剪力以及最大轴力处于较小值，这一结果有助于分析影响岸坡稳定性的最不利结构面倾角。

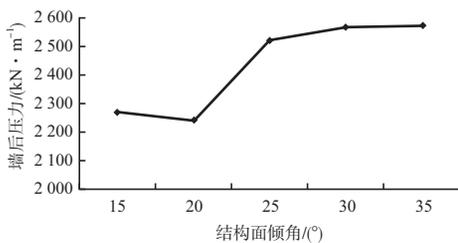


图3 墙后土压力有限元计算值变化曲线

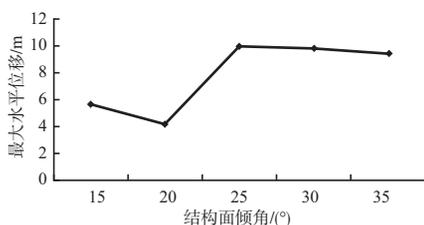


图4 板桩墙最大水平位移变化曲线

由图5可知，与一般的土层岸坡不同，顺层岩质岸坡上板桩墙的水平位移出现了较为特殊的分布形式^[8-9]，水平位移沿着桩的深度先减小到板桩前端临空界面处达到最小值，之后随着入土深度的增加而缓慢增加，最终趋于平稳值。随着结构面倾角的变化，墙体最大位移位于5.6~9.8 mm，初步推断墙后土压力的大小处于主动土压力和静止土压力之间。

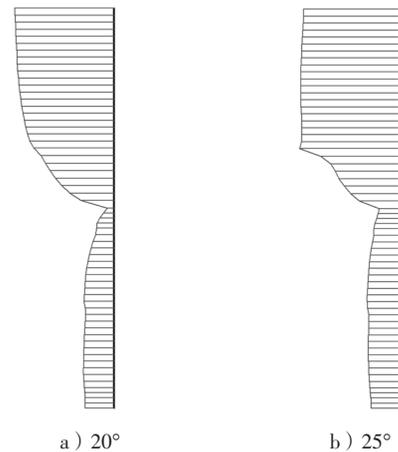


图5 不同结构面倾角时板桩墙水平位移

2 板桩支护结构土压力计算比较

2.1 土压力分布形式

1) 《建筑边坡工程技术规范》方法计算结果。

为了比较有限元法与传统极限分析法分析土压力的分布形式和大小，以较为保守的方式选用《建筑边坡工程技术规范》中的静止侧向岩土压力公式进行计算，即

$$e_{0ik} = \left(\sum_{j=1}^i \rho_j g h_j + q \right) K_{0i} \quad (1)$$

式中： e_{0ik} 为计算点处的静止土压力标准值(kN/m²)； ρ_i 为计算点以上第*i*层土的密度(t/m³)； h_j 为计算点以上第*i*层土的厚度(m)； q 为地面均布荷载(kN/m²)； K_{0i} 为计算点处的静止土压力系数。

墙后土压力分布强度计算结果见图6，土压力合力为2 308 kN/m，作用点大致在墙高的1/3处，且土压力分布为较为规则的三角形。而且墙后土压力的大小基本随着墙的入土深度不断增加而逐渐增加，并在墙的最下端达到最大值。

2) 有限元计算结果。

采用有限元软件PLAXIS计算得到的顺层岩质

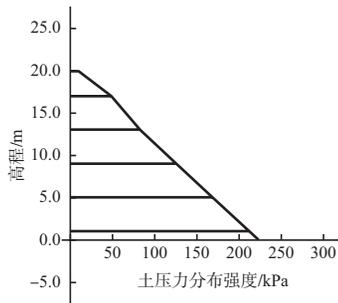


图6 墙后土压力规范计算结果

岸坡板桩墙的墙后土压力大小以及分布形式如图7所示, 其分布形式与《建筑边坡工程技术规范》得到的分布形式有较大差异。

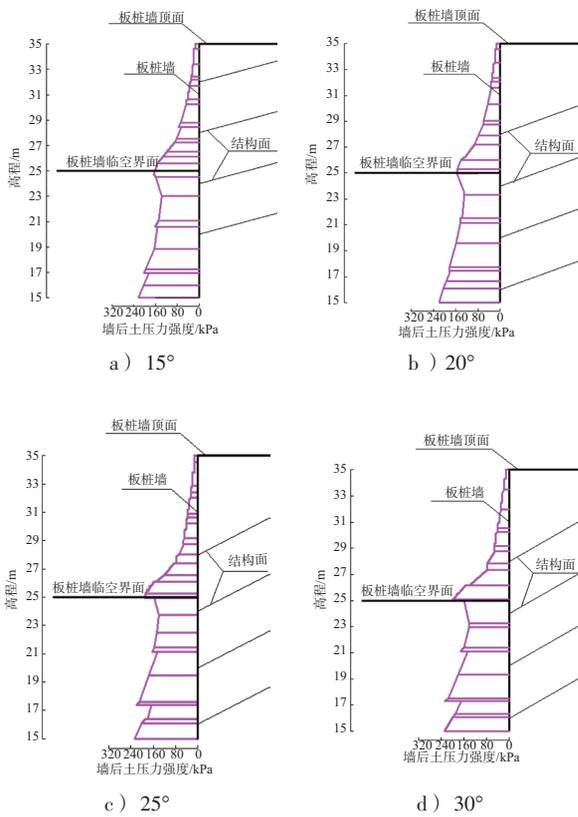
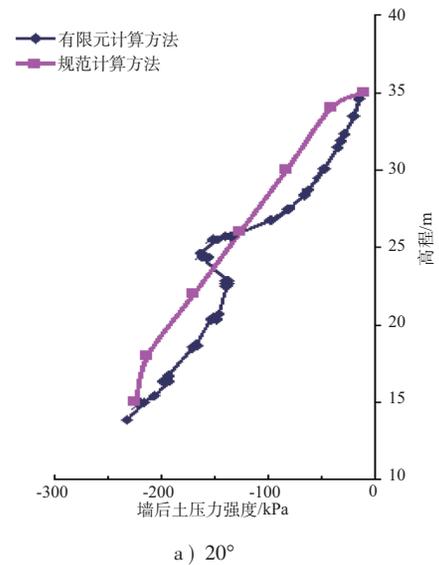


图7 不同结构面倾角墙后土压力分布

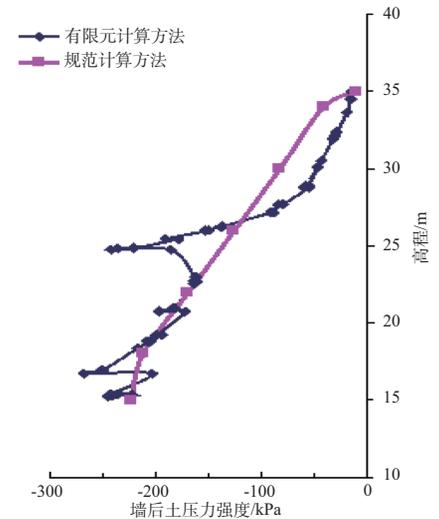
有限元计算结果表明, 墙后土压力最大值基本都出现在墙体临空界面处或者墙体的底部。其原因主要是墙体临空界面处往下受板桩墙前底部岩体嵌固影响, 而且土压力以每层结构面所在处为突变面, 压力值突然减小, 并以此值作为下一断面的起始压力值。显然, 不同结构面间的层厚会导致土压力值突变的位置不同。

由图8可知, 与《建筑边坡工程技术规范》岩石侧压力所得分布形式相比, 由于结构面的存

在, 有限元法获得的墙后土压力强度分布出现不规则的增大或减小, 并且随着结构面倾角的增加, 这种不规则的表现更加明显, 尤其在板桩墙临空界面处, 土压力值远远大于理论的计算值, 因此进行板桩墙稳定性分析时, 仅仅按照规范考虑墙底部最大土压力对于墙体的影响是不够, 还要考虑板桩墙临空界面处出现的较大土压力强度。



a) 20°



b) 35°

图8 不同结构面倾角墙后土压力强度分布对比

2.2 土压力计算值

采用PLAXIS和规范方法计算的土压力合力值见表4。由表4可知, 在本文选取的算例中有限元PLAXIS与规范计算结果较为接近。

表4 墙后土压力合力值计算结果误差分析

结构面倾角/ $^{\circ}$	土压力/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$		误差/%
	PLAXIS计算	规范计算	
15	2 267	2 308	-1.7
20	2 241	2 308	-3.0
25	2 522	2 308	8.5
30	2 565	2 308	10.0
35	2 573	2 308	10.3

当结构面倾角小于 20° 时,规范计算结果略大于有限元结果,两者之间误差仅为2.98%,此时可以直接采用规范计算的作用墙后土压力;当结构面倾角不断增大时,有限元结果大于规范计算结果,之间的误差达到10%,此时应该采用有限元结果作为墙后土压力取值,或者对规范结果乘以相应的安全储备系数。因此对高度较大、结构面性质复杂的重要工程,建议采用有限元方法进行计算。

3 结论

1) 应用PLAXIS软件对顺层岩质岸坡上板桩墙支挡结构进行分析,不仅得到板桩墙自身的位移、弯矩,还可以得到墙后的土压力大小以及分布形式。板桩墙墙后土压力值的大小随着结构面倾角的增加并不是呈简单的线性增大关系,而是呈先减小再增大的趋势,在结构面倾角 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 时压力值最小,这一结果有助于分析影响岸坡稳定性的最不利结构面倾角。

2) 对比分析《建筑边坡工程技术规范》静止侧向岩土压力公式与有限元计算结果,由于结构面的存在,顺层岩质岸坡板桩墙后土压力的大小不是随入土深度的增加而简单地呈线性增大,而是出现不规则的增大或减小,并且随着结构面倾角的增加,这种不规则的表现更加明显。墙后土压力最大值基本都出现在墙体临空界面处或者墙

体的底部。因此进行板桩墙稳定性分析时,仅仅按照规范考虑墙底部最大土压力对于墙体的影响是不够的,还要考虑板桩墙临空界面处出现的较大土压力。

3) 分析PLAXIS和规范方法计算的土压力等效值计算结果,当结构面倾角较小时,两者误差较小,随着结构面倾角增大,其误差达到10%,此时应该采用有限元结果作为墙后土压力取值,或者对规范结果乘以相应的安全储备系数。因此对高度较大,结构面性质复杂的重要工程,建议采用有限元方法进行计算。本文研究成果可为完善《建筑边坡工程技术规范》提供参考。

参考文献:

- [1] GB 50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S].
- [2] 蒋青青,胡毅夫.层状岩质边坡遍布节理模型的三维稳定性分析[J].岩土学报,2009,30(3):740-716.
- [3] 郑颖人,赵尚毅,邓卫东.岩质边坡破坏机制有限元数值模拟分析[J].岩土力学与工程学报,2003,22(12):1 943-1 952.
- [4] 刘文平,赵燕明,郑颖人.岩质边开挖应力与变形的有限元模拟[J].后勤工程学院学报,2004(2):45-48.
- [5] 桂劲松,孟庆,李振国.基于PLAXIS的板桩结构非线性有限元分析[J].水运工程,2011(6):11-15.
- [6] 李荣庆,贡金鑫,杨国平.板桩结构非线性分析土[J].水运工程,2010(2):110-115.
- [7] 刘明维,郑颖人.岩质边坡结构面岩质岸坡结构面实用分类方法研究[J].地下空间与工程学报,2007(10):29-35,54.
- [8] 李云鹏,杨治林,王芝银.顺层边坡岩体结构稳定性位移理论[J].岩土力学与工程学报,2000,19(6):747-750.
- [9] 林鹏,郑明新,熊孝波.基于模型试验的板桩墙支护变形机理分析[J].华东交通大学学报,2008,25(3):12-16.

(本文编辑 武亚庆)