

板桩墙支护边坡稳定性及受力变形的影响分析

罗皓祖

(广东省冶金建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 511325)

摘要: 为探究桩基设计参数对板桩墙支护边坡稳定性的影响,以广州市白云区同宝路某边坡工程为例,通过数值模拟对板桩墙支护边坡的失稳破坏过程进行分析,研究桩长、桩间距对边坡稳定性及桩基受力与变形的影响。结果表明,不同桩长下板桩墙支护边坡的失稳破坏模式主要包括坡体绕坡脚处某一点发生转动破坏、达到板桩墙承载极限后桩基出现塑性变形导致坡体整体倾覆或板桩墙出现折断破坏;桩身剪力沿深度向下先增大后减小再增大,呈 Z 形变化;桩身弯矩沿深度向下先增大后减小,呈 S 形变化,桩身最大弯矩随着桩长的增加而增大,但增幅逐渐减小;随着桩长的增加,边坡抗滑稳定性系数 K_s 和抗倾覆稳定性系数 K_o 均增大;随着桩间距的增大,桩身剪力和弯矩均增大且桩基上部剪力和弯矩的变化幅度较大, K_s 和 K_o 均减小,桩间距由 2 m 增至 6 m 时 K_s 和 K_o 分别减小 23.3%、22.2%。

关键词: 公路;边坡;板桩墙;抗滑稳定性;抗倾覆稳定性;剪力;弯矩;失稳破坏

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)06-0087-04

桩板式挡土墙以其结构稳定、占地小、整体造型美观、立体感强等特点被广泛应用于边坡防护工程^[1-2]。板桩墙支护结构主要通过基桩和桩间墙体抵抗滑坡土体平衡墙后土压力来维持边坡的稳定,且具有一定防渗水功能,但由板桩墙失稳破坏带来的工程问题也较普遍^[3-4]。相较于单一采用抗滑桩支护边坡,板桩墙两桩之间挡土墙板的存在使其受力性状更加复杂多变。

板桩墙支护主要分为无支撑和有支撑两种结构形式,边坡防护工程一般采用无支撑结构,仅靠嵌入持力层的桩基提供锚固力及桩间墙板来稳定坡体。针对边坡防护工程中板桩墙支护设计及稳定性问题,张成武等根据土拱静力平衡条件及桩一板后土拱处于极限平衡状态,通过莫尔-库仑强度理论确定土拱竖向应力,推导了考虑滑坡推力作用的桩间挡土板土压力计算公式^[2];周夏采用桩板式路基处理软土地基,提高了结构的安全性和稳定性^[5]。刘林等依托杭平申线航道改造工程,通过对 U 形预应力混凝土板桩土压力及钢筋应力的监测,分析认为板桩顶面受压区大于底面,并呈现非对称性^[6];何奔等探讨了板桩墙应用于高填方边坡支护的设计原则和结构计算方法^[7];喻邦江等考虑到斜坡路段板桩墙支挡结构嵌固段有效深度对工程安全性和经济性有较大影响,提出采用极限平衡的近似计算方法确

定挡墙有效嵌固深度^[8];张宗堂提出一种由双排钢筋混凝土灌注桩、桩顶冠梁刚性连接、前排桩预留连接钢筋与布置的钢筋网连成整体浇筑挡土板组成的新型刚架桩板式挡土墙^[9];董捷等采用拟化简仓法与卸荷拱法对柔性板桩板墙加固斜坡填方地基展开试验研究,发现挡土板上土压力多呈抛物线分布^[10];Viswanadham B. 等开展板桩墙离心模型试验,发现当加速度由 5g 增至 75g 时,过大的应力和应变会导致板桩墙失稳破坏^[11];刘宗振等通过有限元模拟,分析了板桩墙变形、剪应力和桩周围土压力的分布规律^[12]。本文以广州市白云区同宝路某边坡工程为例,通过数值模拟对板桩墙支护边坡的稳定性及受力变形失稳破坏过程进行分析,研究桩长、桩间距对边坡稳定性及桩基受力与变形的影响。

1 工程概况

同宝路位于广州市白云区白云山东侧、华南快速干线(同和立交至沙太立交)南侧,西(起点)接广州大道北,东(终点)接沙太北路。其中 K0+586.7—703.0 段左侧为广辉小学,K0+586.4—620.0 段地面高出路面设计标高 1.4~1.8 m,且该段电力管沟开挖约 1.5 m,考虑到开挖处距离建筑物较近,可能影响建筑结构的安全,对该段边坡进行板桩墙支挡防护。图 1 为边坡数值计算模型。

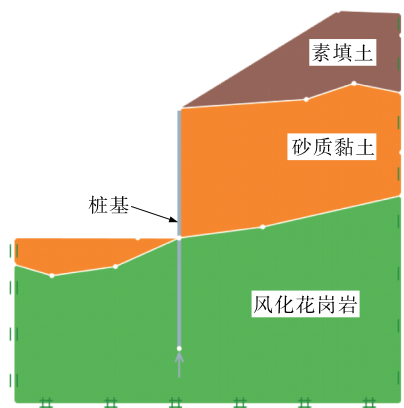


图1 同宝路板桩墙支护防护计算模型

场地内主要覆盖3种地层,分别为人工填土层、第四系冲残积砂质黏性土层、燕山期花岗岩地层,基坑开挖深度范围内各土层参数见表1。

表1 岩土层分布及材料参数

地层名称	层厚/ m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	泊松 比
素填土	5.1	17.0	10	10	0.23
砂质黏土	8.3	19.1	14	20	0.25
全风化花岗岩	3.1	20.0	26	25	0.27
强风化花岗岩	18.0	22.0	28	30	0.30

2 板桩墙稳定性分析

先计算基底的法向力和切向力,然后验算挡土墙的抗滑稳定性和抗倾覆稳定性。对于由桩基和墙板组成的支护结构,桩基关键设计参数的影响可以作用在前墙面抗力的形式考虑或以倾斜墙底的形式考虑。

根据 JTG/T D30—2015《公路路基设计规范》^[13],挡土墙的抗滑动稳定性应满足式(1)的要求,抗滑稳定性系数 K 。按式(2)计算;挡土墙的抗倾覆稳定性应满足式(3)的要求,抗倾覆稳定性系数 K_0 。为抗倾覆力矩与倾覆力矩的比值,按式(4)计算。

$$[1.1G + \gamma_{Q1}(E_y + E_x \tan \alpha_0)]\mu - \gamma_{Q1}E_x + \gamma_{Q2}E_p + (1.1G + \gamma_{Q2}E_y - \gamma_{Q2}E_p\mu)\tan \alpha_0 > 0 \quad (1)$$

$$K_c = \frac{[N + (E_x - 0.3E_p)\tan \alpha_0]\mu + 0.3E_p}{E_x - N \tan \alpha_0} \geq 1.3 \quad (2)$$

式中: G 为挡土墙每延米自质量(kN/m); γ_{Q1} 、 γ_{Q2} 分别为主动土和被动土压力分项系数; E_x 、 E_y 分别为

主动土压力的水平向分量和竖向分量; α_0 为基底倾斜角; μ 为基底与地基岩土体的摩擦系数; E_p 为墙前被动土压力的水平向分量; N 为作用于基底上合力的竖向分力。

$$0.8GZ_G + \gamma_{Q1}(E_yZ_x - E_xZ_y) + \gamma_{Q2}E_pZ_p > 0 \quad (3)$$

$$K_0 = \frac{GZ_G + E_yZ_x + 0.3E_pZ_p}{E_xZ_y} \geq 1.5 \quad (4)$$

式中: Z_G 为自身重力以外荷载的竖向力合力重心到墙趾的距离; Z_x 、 Z_y 分别为墙后主动土压力的水平向分量和竖向分量到墙趾的距离; Z_p 为墙前被动土压力的水平向分量到墙趾的距离。

3 板桩墙支护效果影响因素分析

实际工程中,在满足板桩墙支护稳定性的前提下对板桩墙关键参数进行优化,有利于减少资源浪费,降低工程造价。采用强度折减法对墙后土体强度参数(黏聚力和内摩擦角)进行折减,直到坡体失稳破坏。计算采用修正 Mohr-Coulomb 塑性本构模型,该模型对岩土体非线性变形模拟较准确。

3.1 桩长对边坡稳定性的影响

对于采用板桩墙加固的边坡,桩基设置长度是影响边坡稳定性的关键参数之一,可通过增大桩基嵌固深度,增加阻滑能力提高边坡的稳定性。以桩间距 2.0 m、桩径 1.2 m 为例,设置桩长 L 为 11 m、12 m、13 m、14 m、15 m,分别求解不同桩长下桩基剪力和弯矩及边坡稳定性系数,分析桩长对边坡稳定性的影响,结果见图 2、图 3、表 2。

由图 2 可以看出不同桩长下板桩墙支护边坡的失稳破坏模式主要包括两种:一是当桩基嵌固深度较小时,在墙后土压力及外荷载作用下,桩基绕坡脚处

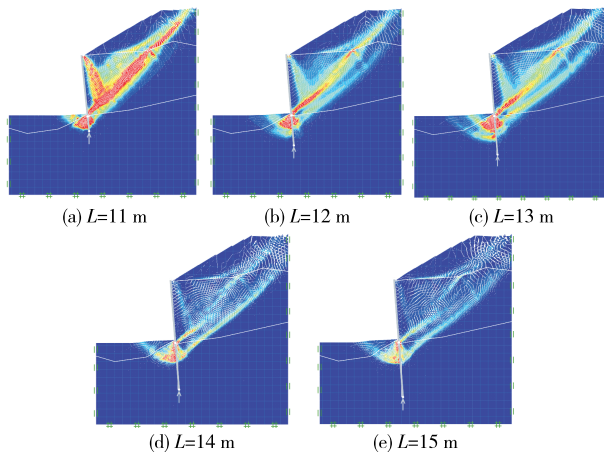


图2 不同桩长下边坡的破坏模式

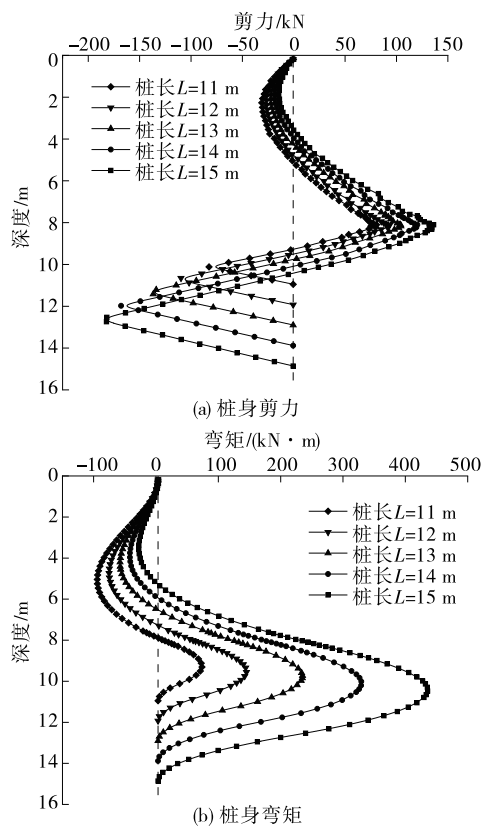


图 3 桩长变化对桩基内力的影响

表 2 不同桩长下边坡的稳定性系数

桩长 L/m	抗滑稳定性系数 K_c	抗倾覆稳定性系数 K_o
11	1.13	1.32
12	1.20	1.38
13	1.26	1.45
14	1.33	1.53
15	1.35	1.57

某一点发生转动,边坡整体出现转动破坏[见图 2(a)];二是当边坡墙后土压力或外荷载超过板桩墙自身承载力限时,板桩墙出现塑性变形,坡体整体倾覆或在桩基最大弯矩处出现折断破坏[见图 2(e)]。

由图 3 可知:1) 桩身剪力沿深度向下先增大后减小再增大,呈 Z 字形变化,剪力两个位置出现零点,对应弯矩的两个极大值点。随着桩长嵌固段的减小,边坡变形逐渐增大,桩后主动土压力急剧增大,导致桩基嵌固段承受被动土压力,出现扰动破坏。2) 桩身弯矩沿深度向下先增大后减小,呈 S 形变化。桩长为 11 m 时,桩身最大负弯矩大于正弯矩,表明桩基嵌固深度较短时,桩身上部承受较大外荷载,不能调用深度土体抵抗变形,极易出现绕桩底的转动破坏;桩长增至 15 m 时,桩身反弯点逐渐上

升,由约 8 m 处变为 5 m 处,桩身最大正弯矩分别为 72 kN·m、145 kN·m、236 kN·m、333 kN·m、441 kN·m,较前一工况分别增加 101.4%、62.8%、41.1%、32.4%,桩身最大弯矩随着桩长的增加而增大,但增长幅度逐渐减小。

由表 2 可知:随着桩长的增加,边坡抗滑稳定性系数 K_c 和抗倾覆稳定性系数 K_o 均增大。桩长较小时边坡稳定性不满足规范要求($K_c \geq 1.3, K_o \geq 1.5$);桩长达到 14 m 时, $K_c = 1.33, K_o = 1.53$,满足规范要求;桩长为 15 m 时, $K_c = 1.35, K_o = 1.57$,相较于桩长为 14 m 时,增大幅度均小于 5%,结合桩身最大正弯矩可知盲目增大桩长来提高边坡稳定性系数的方法并不可取。

3.2 桩间距对边坡稳定性的影响

合理设置桩间距对提高边坡稳定性至关重要。根据 TB 10025—2019《铁路路基支挡结构设计规范》,板桩墙的桩间净距一般为 2~4 m。保持桩长为 14 m、桩径为 1.2 m,设置桩间距 H 为 2 m、3 m、4 m、5 m 和 6 m,分别求解不同桩间距下桩基剪力和弯矩及边坡稳定性系数,分析桩间距对边坡稳定性的影响,结果见图 4、表 3。

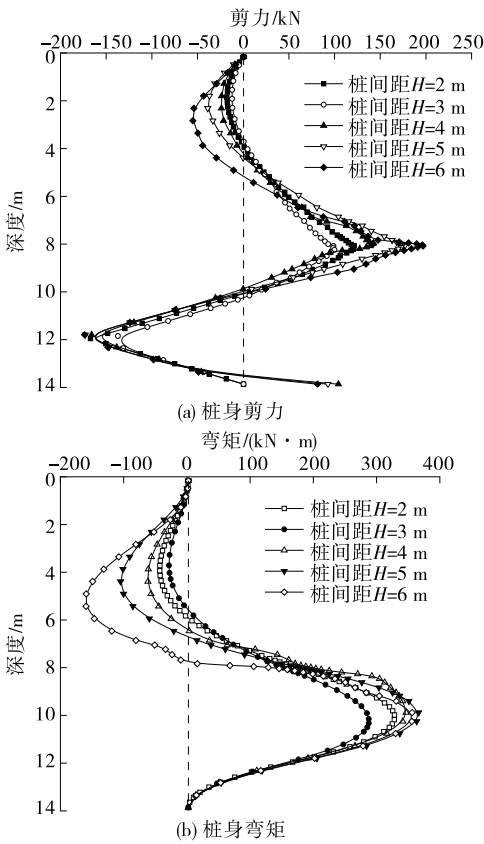


图 4 桩间距变化对桩基内力的影响

表3 不同桩间距下边坡稳定性系数

桩间距 H/m	抗滑稳定性系数 K_c	抗倾覆稳定性系数 K_o
2	1.33	1.53
3	1.28	1.49
4	1.23	1.43
5	1.11	1.31
6	1.02	1.19

由图4可知:1)随着桩间距的增大,桩身剪力逐渐增大,且存在3个极大值点,分别位于沿桩身向下2 m、8 m、12 m处。桩间距为2 m时,剪力极大值分别为-19 kN、123 kN、-170 kN;桩间距增至6 m时,剪力极大值分别为-57 kN、200 kN、-177 kN,与桩间距为2 m时相比,对应剪力变化幅度分别为200.0%、62.6%、4.1%。2)随着桩间距的增大,桩身弯矩沿深度向下先增大后减小,桩身弯矩存在两处极值点,分别位于沿桩身向下5 m、10 m处。桩间距为2 m时,弯矩极大值分别为-46 kN·m、332 kN·m;桩间距增至6 m时,弯矩极大值分别为-165 kN·m、361 kN·m,与桩间距为2 m时相比,对应弯矩变化幅度分别为258.7%、8.7%。由此可见,随着桩间距的增大,桩身剪力和弯矩均增大,且桩基上部剪力和弯矩的变化幅度较大,原因是增大桩间距会导致边坡土体沿两桩中间移动,进而增大桩基上部结构受力。

由表3可知:随着桩间距的增大,边坡抗滑稳定性系数 K_c 和抗倾覆稳定性系数 K_o 均减小,桩间距较小时边坡稳定性能满足规范要求。桩间距为2 m时, $K_c=1.33$, $K_o=1.53$, 满足规范要求;桩间距为6 m时, $K_c=1.02$, $K_o=1.19$, 相较于桩间距为2 m时,分别减小23.3%、22.2%。可见,增大桩间距会减小边坡稳定性系数,边坡偏于危险,对桩间距合理取值有利于提高边坡的稳定性。

4 结论

(1)不同桩长下板桩墙支护边坡的失稳破坏模式主要包括坡体绕坡脚处某一点发生转动破坏、达到板桩墙承载极限后桩基出现塑性变形导致坡体整体倾覆或板桩墙出现折断破坏。

(2)剪力沿深度向下先增大后减小再增大,呈Z字形变化;桩身弯矩沿深度向下先增大后减小,呈

S形变化,桩身最大弯矩随桩长增加而增大,但增大幅度逐渐减小;随着桩长的增加,边坡抗滑稳定性系数 K_c 和抗倾覆稳定性系数 K_o 均增大。

(3)随着桩间距的增大,桩身剪力和弯矩均增大,且桩基上部剪力和弯矩的变化幅度较大;随着桩间距的增大,边坡抗滑稳定性系数 K_c 和抗倾覆稳定性系数 K_o 均减小,桩间距由2 m增大至6 m时, K_c 、 K_o 分别减小23.3%、22.2%。

参考文献:

- [1] 豆红强,孙永鑫,王浩,等.桩板式挡土墙桩—板土压力传递特性的试验研究[J].工程科学与技术,2019,51(3):77—84.
- [2] 张成武,豆红强,黄真萍,等.桩板式挡土墙桩间挡土板土压力计算方法研究[J].自然灾害学报,2018,27(5):46—53.
- [3] 曹雷.桩板式挡土墙在高边坡防护中的应用[J].交通世界,2021(36):66—67.
- [4] 徐乾,杨超,郭鸿,等.损伤状态下某桩板式挡土墙稳定性预警[J].中国安全科学学报,2020,30(2):47—53.
- [5] 周夏.桩板式路基应用分析[J].公路与汽运,2021(5):78—81.
- [6] 刘林,陈永辉,陈龙.U形预应力混凝土板桩现场试验研究[J].低温建筑技术,2014,36(12):106—108.
- [7] 何奔,李双宝,鲁宏.桩板式挡土墙在高回填边坡支护工程的应用[J].工程技术研究,2019,4(17):174—175.
- [8] 喻邦江,鄢霞.桩板式挡土墙斜坡路段有效嵌固段深度的确定方法[J].交通科技,2017(5):56—58.
- [9] 张宗堂.刚架桩板式挡土墙受力分析及应用研究[J].铁道标准设计,2017,61(10):66—69.
- [10] 董捷,张永兴,黄治云.柔性板桩板墙加固斜坡填方地基的土压力分配问题研究[J].岩土力学,2010,31(8):2489—2495+2506.
- [11] VISWANADHAM B, MADABHUSHI S, BABU K, et al. Modelling the failure of a cantilever sheet pile wall[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 3(2): 215—231.
- [12] 刘宗振,王岩.基于PLAXIS3D的板桩墙基坑支护数值模拟[J].当代化工,2014,43(8):1580—1583.
- [13] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG/T D30—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

收稿日期:2022-06-27