

文章编号: 1008-2786-(2015)6-726-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000088

阶梯型均质边坡的开挖效应

刘小丽^{1,2} 王婉¹ 英姿¹ 张旭¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要: 关于开挖对阶梯型边坡稳定性及其潜在滑动面位置的影响, 目前还缺乏系统研究。以二阶阶梯型均质挖方边坡为研究对象, 利用基于有限元应力状态的边坡稳定性分析方法, 分别对不考虑开挖效应和考虑开挖效应两种条件下阶梯型边坡的稳定性及其潜在滑动面特征进行了对比, 同时对开挖强扰动区的分布特征进行分析。研究表明: 1. 与不考虑开挖效应时计算的边坡安全系数相比, 考虑开挖效应后计算得到的边坡安全系数偏小; 2. 开挖对阶梯型边坡的整体安全系数及其潜在滑动面位置的影响较小; 3. 在阶梯型均质挖方边坡的设计中, 其平台宽度宜大于其上下级坡高平均值的 0.5 倍, 上下级边坡的坡高比宜控制在 1~2 范围, 且下级边坡的坡率小于上级边坡坡率时更有利于边坡的整体稳定。

关键词: 阶梯型边坡; 开挖; 边坡稳定; 优化设计

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

由于工程建设的需要, 经常利用开挖的方式改变原有地形而形成人工边坡。当挖方形成的边坡高度较大时, 常将边坡设计成阶梯型, 即每隔一定高度设一平台, 以满足稳定性要求。

关于阶梯型边坡, 有些文献侧重于对其稳定性简化计算方法的研究^[1-3], 有些文献则对边坡的平台宽度设计与平台宽度对边坡动力响应特性的影响进行了探讨^[4-5], 还有的文献对多阶边坡最危险滑移面的确定方法进行了分析^[6-7]。以上的研究都是基于阶梯型边坡的最终几何模型直接进行分析, 而没有考虑边坡形成过程的影响, 对于挖方形成的阶梯型边坡而言, 亦即没有考虑开挖过程对边坡稳定性和潜在滑移面的影响。李良杰等^[8]利用离散元程序研究了多级软岩边坡的开挖高度和坡率对边坡稳定性的影响, 虽然在计算分析中考虑了开挖过程, 但并没有对开挖效应进行专门分析。

对于阶梯型挖方边坡, 开挖对边坡安全系数和潜在滑动面特征的影响如何, 在边坡的稳定性分析中是否需要考虑开挖效应, 目前还缺乏对相关问题

的系统分析。基于此, 以二阶阶梯型土质挖方边坡为研究对象, 通过对考虑开挖效应和不考虑开挖效应条件下的边坡稳定性及其潜在滑动面特征的对比分析, 同时综合对边坡开挖强扰动区特征的分析, 对阶梯型均质边坡开挖效应的影响进行探讨, 并在此基础上提出阶梯型均质挖方边坡的稳定性计算方法和优化设计建议。

1 计算模型及方案

1.1 计算模型

GeoStudio 是一套功能强大的岩土工程和岩土环境模拟计算软件, 其中的 SLOPE/W 和 SIGMA/W 分别是边坡稳定性分析软件和岩土体应力变形场分析软件, 可利用 SIGMA/W 和 SLOPE/W 的耦合功能, 基于有限元计算得到的边坡应力场来计算安全系数, 这种方法称为基于有限元应力的边坡稳定性计算方法^[9]。

在本文的计算中, 首先利用 SIGMA/W 建立有

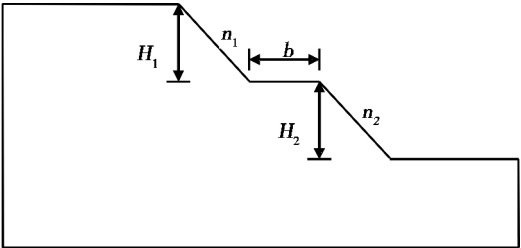
收稿日期(Received date): 2014-02-08; 修回日期(Accepted): 2014-04-08。

作者简介(Biography): 刘小丽(1974-), 女, 副教授。主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。[Liu Xiaoli (1974-), female, associate professor. Mainly engaged in the teaching and research of geotechnical engineering.] E-mail: LXL4791@163.com

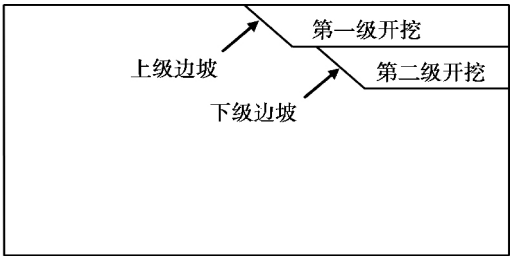
限元模型计算边坡的应力场,然后基于该应力场通过 SLOPE/W 搜索其最危险滑动面并计算相应的安全系数。此处考虑开挖效应与不考虑开挖效应的边坡安全系数计算均是基于上述方法实现的,以便于其对比结果能直接体现出边坡开挖的影响。

当不考虑开挖效应时,直接建立阶梯型边坡的几何模型[图 1(a)]并计算其应力场,然后基于该应力场进行安全系数的计算。当考虑开挖效应时,建立的几何模型如图 1(b)所示,各几何参数与不考虑开挖效应时相同,只是增加了边坡形成以前未开挖的几何部分,具体计算过程为:首先计算未开挖时的边坡应力场;然后模拟第一级开挖,即将形成上级边坡需要移除的岩土体挖掉,计算相应的边坡应力场;之后进行第二级开挖模拟,挖掉形成下级边坡需要移除的岩土体,计算最终的边坡应力场,并基于该边坡形成后的最终应力场,计算安全系数。在 SIGMA/W 中,开挖是通过将相应区域岩土体的材料进行移除来实现的。

图 1(a)所示为二阶阶梯型挖方边坡的几何模型,考虑开挖效应时的几何模型如图 1(b)。几何模型高 32 m,宽 88 m,二阶阶梯型边坡整体高 H 为 16 m,上级边坡坡高 H_1 ,坡率 n_1 ,下级边坡坡高 H_2 ,坡率 n_2 ,两级边坡之间的平台宽度为 b 。



(a) 二阶阶梯型边坡几何模型示意图



(b) 考虑开挖时的二阶阶梯型边坡几何模型

图 1 二阶阶梯型边坡几何模型

Fig. 1 Geometry model of the two-stepped slope

土体黏聚力 15 kPa,内摩擦角 20° ,重度 18 kN/ m^3 ,弹性模量 10 MPa,泊松比 0.34。在有限元计算

边坡应力场的模型中,土体视为理想弹塑性 Mohr – Coulomb 模型,左右边界水平位移约束,底部边界位移全约束。

1.2 计算方案

保持二阶阶梯型边坡的总坡高 16 m 不变,计算分析上下级边坡坡高、坡率及平台宽度变化条件下,不考虑开挖效应和考虑开挖效应时边坡的稳定性,计算方案如表 1 所示。

表 1 计算方案
Table 1 Computation schemes

方案序号	坡高			坡率		平台宽度 /m
	H_1	H_2	H	n_1	n_2	
1	8	8	16	1	1	2
2	8	8	16	1	1	3
3	8	8	16	1	1	4
4	8	8	16	1	1	5
5	8	8	16	1	1	6
6	4	12	16	1	1	4
7	6	10	16	1	1	4
8	10	6	16	1	1	4
9	11	5	16	1	1	4
10	12	4	16	1	1	4
11	8	8	16	0.80	1	4
12	8	8	16	0.67	1	4
13	8	8	16	1	0.80	4
14	8	8	16	1	0.67	4

2 阶梯型边坡开挖效应分析

2.1 开挖对阶梯型边坡安全系数的影响

不考虑开挖效应和考虑开挖效应两种条件下,二阶阶梯型边坡的安全系数计算结果如表 2 所示。下面分别从平台宽度、上下级边坡坡高比,以及上下级边坡坡率的影响等方面进行分析。

图 2 是二阶阶梯型边坡安全系数随平台宽度的变化曲线,结合表 2 中方案 1 ~ 5 的计算数据可知,与不考虑开挖效应时计算的边坡安全系数相比,考虑开挖效应后计算所得的安全系数偏小。随着平台宽度的增加,考虑开挖效应与不考虑开挖效应两种情况下所得二阶边坡的整体安全系数均逐渐增大,且二者的差距逐渐减小,表明平台宽度的增加不仅有利于边坡的整体稳定,而且降低了开挖对边坡整体稳定性产生的影响。当平台宽度由 2 m 增加到 6

表 2 安全系数计算结果

Table 2 Computation results of factor of safety

方案序号	上级边坡安全系数 F_1			下级边坡安全系数 F_2			边坡整体安全系数 F		
	不考虑开挖	考虑开挖	相差 / %	不考虑开挖	考虑开挖	相差 / %	不考虑开挖	考虑开挖	相差 / %
1	1.412	1.266	-10.34	1.484	1.196	-19.41	1.087	1.036	-4.69
2	1.450	1.283	-11.52	1.429	1.216	-14.91	1.121	1.066	-4.91
3	1.473	1.324	-10.12	1.415	1.219	-13.85	1.155	1.116	-3.38
4	1.479	1.344	-9.13	1.418	1.251	-11.78	1.194	1.162	-2.68
5	1.471	1.344	-8.63	1.456	1.269	-12.84	1.235	1.222	-1.05
6	2.385	1.565	-34.38	1.157	1.051	-9.16	1.127	1.059	-6.03
7	1.772	1.462	-17.49	1.298	1.137	-12.40	1.152	1.102	-4.34
8	1.290	1.186	-8.06	1.618	1.405	-13.16	1.155	1.122	-2.86
9	1.223	1.131	-7.52	1.701	1.361	-19.99	1.152	1.125	-2.34
10	1.167	1.101	-5.66	1.641	1.362	-17.00	1.144	1.108	-3.15
11	1.575	1.447	-8.13	1.457	1.273	-12.63	1.204	1.166	-3.16
12	1.694	1.605	-5.25	1.510	1.276	-15.50	1.254	1.217	-2.95
13	1.479	1.352	-8.59	1.530	1.361	-11.05	1.213	1.193	-1.65
14	1.479	1.376	-6.96	1.644	1.496	-9.00	1.269	1.263	-0.47

m 时,考虑开挖与不考虑开挖两种条件下的边坡整体安全系数相差均 < 5% ,说明平台宽度变化条件下,开挖对边坡整体安全系数的影响相对较小。对于上级边坡和下级边坡的安全系数而言,开挖的影响较为明显,当平台宽度由 2 m 依次增大到 6 m 时,虽然考虑开挖与不考虑开挖两种条件下安全系数的差值有所降低,但二者相差均 > 5% ,表明平台宽度的增加虽然能在一定程度上降低开挖对上下级边坡稳定性的影响,但开挖的影响依然较大。

图 3 是上下级边坡的坡高比不同时二阶阶梯型边坡安全系数变化曲线,结合表 2 中方案 6 ~ 10 的相应数据分析可知,考虑开挖和不考虑开挖时的边坡整体安全系数相差基本都在 5% 以下,表明开

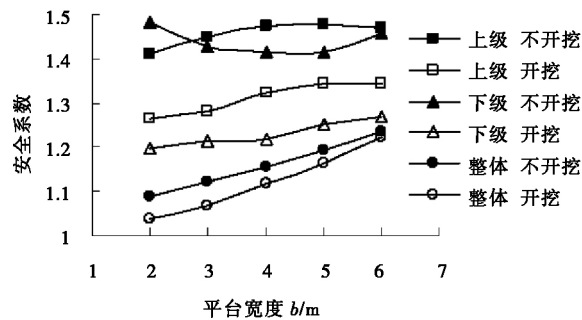


图 2 平台宽度的影响

Fig. 2 Influence of the width of platform

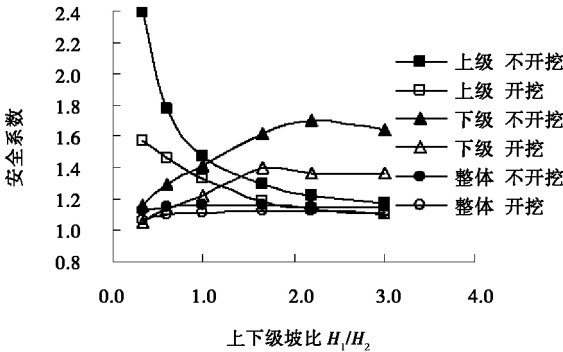


图 3 上下级边坡坡高比的影响

Fig. 3 Influence of height ratio of upper slope to lower slope

挖对边坡整体安全系数的影响不大;当上下级边坡坡高比 < 1 或 > 2.2 时,边坡整体安全系数相对较小。开挖对上下级边坡安全系数的影响均较为明显,只是当上下级边坡的坡高比 < 1 时,开挖对上级边坡安全系数的影响更显著,而当上下级边坡坡高比 ≥ 1 时,开挖对下级边坡安全系数的影响更明显。如当上下级边坡坡高比为 0.6 时,上级边坡中考虑开挖效应与不考虑开挖效应的安全系数相差 17.49% ,而下级边坡中该差值为 12.40% ;当上下级边坡坡高比为 1.67 时,上级边坡中考虑开挖效应与不考虑开挖效应的安全系数相差 8.06% ,而下级边坡中该差值为 13.16% 。

图4是阶梯型边坡中上下级边坡的坡率变化时边坡安全系数的曲线图。结合表2中方案11~14的计算数据可知,随着坡率的降低,边坡的安全系数基本呈增大趋势;不考虑开挖与考虑开挖两种情况下的边坡整体安全系数相差较小,表明开挖对边坡整体安全系数的影响不大。在本文分析的几种坡率条件下,对于上下级边坡而言,考虑开挖效应与不考虑开挖效应两种条件下的安全系数相比,其差值均超过5%,表明开挖对上级边坡和下级边坡的安全系数影响均较为明显。

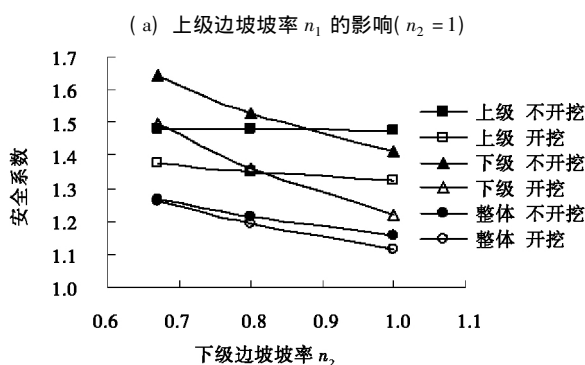
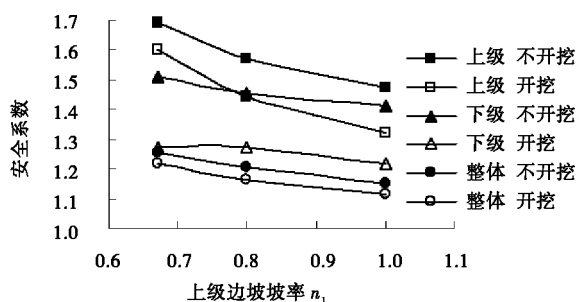


图4 边坡坡率的影响

Fig. 4 Influence of slope ratio

2.2 开挖对阶梯型边坡潜在滑动面位置的影响

图5是计算方案3中二阶阶梯型边坡的潜在滑动面位置图示,与不考虑开挖效应时的潜在滑动面位置相比,考虑开挖效应后上级边坡及整体边坡的潜在滑动面深度相对变浅,滑体体积减小,尤其对于上级边坡的潜在滑动面,开挖效应最显著,开挖使得上级边坡潜在滑动面在中上部明显变浅;对于下级边坡的潜在滑动面位置,受开挖的影响较小,滑动面仅在其剪出口位置略有变化。其余计算方案中潜在滑动面位置的变化规律与上述相似。

2.3 阶梯型边坡的开挖强扰动区分析

2.3.1 开挖扰动区范围的确定

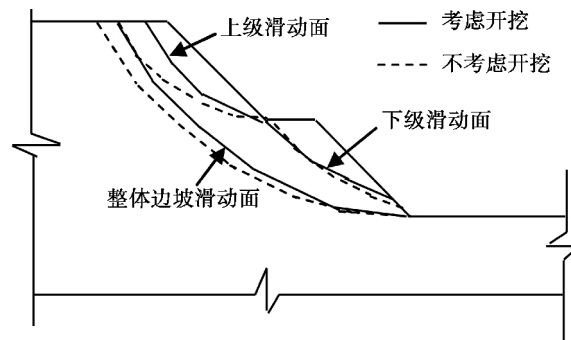


图5 方案3中潜在滑动面位置图示

Fig. 5 Sketch of the potential slip surface of scheme 3

参考相关文献^[10],在本文分析中,利用距坡顶不同深度处水平参考线上各点的竖向应力变化曲线对开挖扰动区进行分析。图6为坡体内距坡顶不同深度处水平参考线的位置示意图。做出每条参考线上各点的竖向应力与距坡面水平距离的关系曲线,根据这些关系曲线确定开挖扰动区的范围。

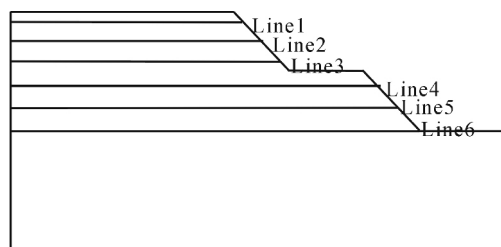


图6 水平参考线位置示意图

Fig. 6 Horizontal referenced line

图7(a)为计算方案3中距坡顶10 m深度处参考线上竖向应力变化曲线,可以看出该曲线可以分为3个区段,其中远离坡面的CD段,其竖向应力为180 kPa,与原始坡体的竖向应力相同,是开挖未受扰动的区域;BC段和AB段由于开挖作用致其竖向应力发生了改变,属于开挖扰动区域。AB段的竖向应力变化相对剧烈,变化幅度较大,称为开挖强扰动区;BC段竖向应力的变化相对较平缓,变化幅度较小,称为开挖弱扰动区。开挖强扰动区对边坡的稳定性影响较大,在本文中重点对阶梯型边坡的开挖强扰动区特征进行分析。

图7(b)为方案3中距坡顶不同深度处各参考线的竖向应力变化曲线,根据上述方法可确定出距坡顶不同深度处边坡开挖强扰动区距相应坡面的水平距离。

2.3.2 开挖强扰动区特征

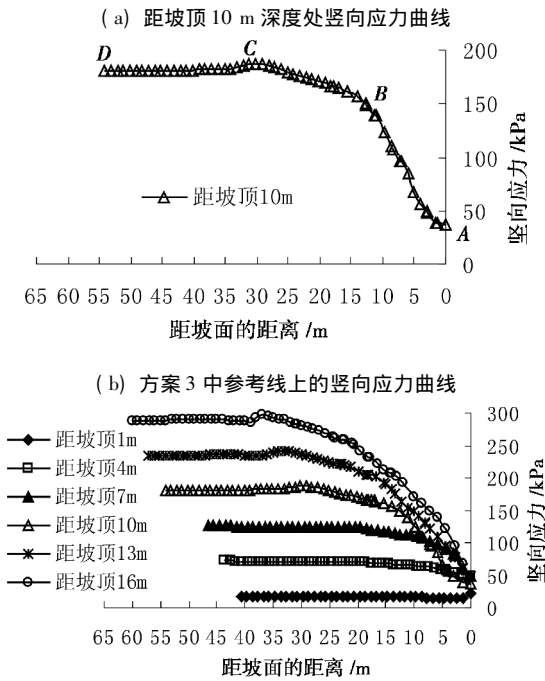


图 7 参考线上竖向应力分布曲线

Fig. 7 Diagram of vertical stress distribution along the horizontal referenced line

选取典型计算方案,对其开挖强扰动区进行分析,结果见表 3。表中数字“1 / 3.7”表示距坡顶深度 1 m 处开挖强扰动区距坡面的水平距离为 3.7 m,其余意义相同。

表 3 中方案 3 与方案 6 ~ 10 是坡体总高度不变,上下级边坡坡高不同的情况。对相应的开挖强扰动区数据进行分析可知,相对于上下级边坡坡高比为 1(方案 3)时的计算结果,上下级坡高比 < 1 时(对应方案 6 和方案 7),在整个坡体的中上部,亦即下级边坡坡顶附近区域的开挖强扰动区范围明显增

大,这对下级边坡以及整体边坡的稳定性都是不利的,此时下级边坡的潜在滑体对整个边坡的稳定性影响较大。相对于上下级边坡坡高比为 1 的情况,当上下级边坡的坡高比 > 1 时(对应方案 8 ~ 10),在整个坡体的中下部亦即平台上下附近区域的开挖强扰动区范围明显减小,表明边坡的整体滑移面相对变浅,整个边坡有从下级边坡坡面上剪出的趋势,此时上级边坡的潜在滑体对整个边坡的稳定性影响较大。

对比表 3 中方案 3、方案 12 和方案 13 对应的开挖强扰动区数据,可知上、下级边坡坡率的变化,均会对上级边坡的开挖强扰动区范围产生影响,且下级边坡坡率的变化对上级边坡开挖强扰动区范围的影响更为显著。如方案 13 中,当下级边坡坡率降低为 0.8 时,上级边坡中的开挖强扰动区范围相对于方案 3 有较明显的减小,下级边坡坡率降低时对边坡的整体稳定性更有利。

表 4 是上下级边坡坡高均为 8 m、坡率均为 1,而平台宽度不同时开挖强扰动区的分析结果,此时平台位于距离坡顶 8 m 的位置。分析表 4 中数据可知,相对于平台宽度为 2 m 时的开挖强扰动区范围,当平台宽度为 5 m 时,在平台位置的开挖强扰动区距坡面的距离减小了 3.7 m,在平台上部 3 m 高度处,开挖强扰动区距坡面的距离减小了 3.6 m,即当平台宽度由 2 m 增大到 5 m 时,平台至其上部约 3 m 高度范围内的坡体,其开挖强扰动区范围有较明显的减小,这对于边坡的整体稳定性是有利的;当平台宽度 > 5 m 后进一步增加时,坡体开挖强扰动区的范围基本保持不变。

表 3 开挖强扰动区分析结果

Table 3 Results of the highly disturbed zone due to excavation /m

方案序号	参考线距坡顶的深度 / 开挖强扰动区范围
3 $H_1 = 8$ $H_2 = 8$; $n_1 = 1$ $n_2 = 1$	1 / 3.7 4 / 6.5 7 / 7.2 10 / 12.5 13 / 15.2 16 / 15.4
6 $H_1 = 4$ $H_2 = 12$; $n_1 = 1$ $n_2 = 1$	1 / 3.0 3 / 6.0 4 / 6.8 6 / 12.0 12 / 12.2 16 / 12.7
7 $H_1 = 6$ $H_2 = 10$; $n_1 = 1$ $n_2 = 1$	1 / 4.0 4 / 6.6 5 / 8.0 8 / 12.0 12 / 12.8 15 / 13.9
8 $H_1 = 10$ $H_2 = 6$; $n_1 = 1$ $n_2 = 1$	1 / 3.6 5 / 5.6 9 / 7.0 12 / 12.2 14 / 13.4 16 / 15.4
9 $H_1 = 11$ $H_2 = 5$; $n_1 = 1$ $n_2 = 1$	1 / 3.9 5 / 6.7 10 / 7.5 13 / 13.5 14 / 14.0 16 / 16.3
10 $H_1 = 12$ $H_2 = 4$; $n_1 = 1$ $n_2 = 1$	1 / 4.7 6 / 8.3 11 / 8.4 13 / 12.4 14 / 13.6 16 / 16.2
12 $H_1 = 8$ $H_2 = 8$; $n_1 = 0.67$ $n_2 = 1$	1 / 3.3 4 / 5.4 7 / 7.4 10 / 12.2 13 / 14.5 16 / 15.1
13 $H_1 = 8$ $H_2 = 8$; $n_1 = 1$ $n_2 = 0.8$	1 / 3.7 4 / 5.3 7 / 5.8 10 / 11.7 13 / 15.1 16 / 15.9

表4 平台宽度不同时强扰动区距坡面距离
Table 4 Distance of highly disturbed zone from slope surface
for various platform width /m

参考线距坡顶深度	平台宽度				
	2	3	4	5	6
1	4.0	4.1	3.7	4.0	4.0
4	8.4	6.8	6.5	5.5	5.5
5	8.0	8.0	6.9	4.4	4.4
6	8.6	8.6	7.2	4.4	4.4
7	10.3	10.0	7.2	7.0	7.0
8	10.2	10.2	7.2	6.5	5.8
10	12.0	13.0	12.5	12.9	12.0
13	14.3	14.9	15.2	15.2	15.0
16	14.3	15.0	15.4	15.3	15.4

3 讨论

3.1 阶梯型挖方边坡的稳定性计算

从前述二阶阶梯型边坡的开挖对边坡安全系数及其潜在滑动面影响的分析中可知,对于二阶阶梯型边坡,开挖对边坡的整体安全系数及其潜在滑动面位置均没有显著影响。分析安全系数的计算结果可知,整体边坡的安全系数或者小于上下级边坡的安全系数,或者与上下级边坡的安全系数近似相等;同时对边坡潜在滑动面位置的分析可知,整体边坡的潜在滑动面基本都在上下级边坡的滑动面之下,即上下级边坡的潜在滑体均包含于整体边坡的潜在滑体范围之内。

综合上述特征可知,对于阶梯型挖方边坡,可不用考虑其开挖效应而直接对其进行边坡整体稳定性分析,例如可利用传统的极限平衡法直接进行相应几何形状下边坡整体稳定性计算,只要保证整体边坡的安全系数满足设计要求,且按照整体边坡的潜在滑动面范围进行加固治理,则该阶梯型边坡的安全性即可得到保证。

3.2 阶梯型挖方边坡的优化设计

对于上下级边坡坡高均为8 m的二阶阶梯型挖方边坡,当平台宽度逐渐增加至>4 m(即>0.5倍的上下级坡高平均值)时,边坡开挖强扰动区范围已经基本保持不变,故建议阶梯型挖方边坡的平台宽度宜大于其上下级边坡坡高平均值的0.5倍。

从上下级边坡坡高比的变化对边坡整体安全系数的影响,以及对边坡开挖强扰动区的影响分析中

可知,当上下级边坡的坡高比在1~2范围时,对边坡的整体稳定性较为有利,因此建议阶梯型挖方边坡的上下级边坡坡高比不宜<1,也不宜>2。

在本文分析的阶梯型土质边坡的坡率范围内,上级边坡的坡率为 n_1 ,下级边坡的坡率为 n_2 ,且上下级边坡坡率中的最大值为 $n = \max(n_1, n_2)$,若 n 为某一固定的数值时,则相对于 $n_1 = n_2 = n$ 和 $n = n_2 > n_1$ 的情况,当 $n_2 < n_1 = n$ 时,上级边坡的开挖强扰动区范围会相对减小,且其边坡的整体安全系数最大。因此,从阶梯型边坡中上下级边坡坡率设计的角度分析,对不同的阶梯型边坡,若它们的上下级边坡坡率中的最大值 n 均相同,则对于下级边坡坡率小于上级边坡坡率的阶梯型边坡而言,其整体稳定性最好,即当下级边坡的坡率小于上级边坡的坡率时,更有利于阶梯型边坡的整体稳定。

4 结论

以二阶阶梯形均质边坡为研究对象,分析了开挖对阶梯型边坡安全系数、潜在滑动面以及开挖强扰动区范围的影响,主要得到了以下结论。

1. 对于阶梯型边坡,考虑开挖效应会使边坡的计算安全系数有所降低,但开挖对边坡整体安全系数及其潜在滑动面位置的影响较小,可直接利用传统的极限平衡法进行边坡整体稳定性分析,并根据整体边坡的潜在滑动面位置进行加固即可保证边坡的安全。

2. 阶梯型挖方边坡的平台宽度宜大于其上下级边坡坡高平均值的0.5倍。

3. 阶梯型挖方边坡的上下级边坡坡高比宜控制在1~2范围。

4. 从阶梯型边坡的坡率角度分析,对于不同的阶梯型挖方边坡,若它们上下级边坡坡率中的最大值相同,则相对于上下级边坡坡率相等和上级边坡坡率小于下级边坡坡率的情况,下级边坡坡率小于上级边坡坡率时更有利于边坡的整体稳定。

参考文献(References)

- [1] Shi Weimin, Ye Xiaoming, Zheng Yingren. Stability analysis on step-shaped slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 698-701 [时卫民, 叶晓明, 郑颖人. 阶梯形边坡的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 698-701]
- [2] Sun Dongliang, Hou Kepeng, Yang Chunli. Research on simplified

- stability calculation of stepped slope[J]. Mining Research and Development, 2005, 25(4): 18–19, 54 [孙栋梁, 侯克鹏, 杨春丽. 阶梯形边坡简化计算的研究[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(4): 18–19, 54]
- [3] Wang Junjie, Chen Jinlu. Stability analysis of ladder-type homogeneous soil slope[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(001): 73–75, 72 [王俊杰, 陈锦璐. 阶梯型均质土坡的稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(001): 73–75, 72]
- [4] Zhou Yinghua, Zhou Depei. Elementary study on design of spacious bench in homogeneous slope by step excavation[J]. Mountain Research, 2007, 25(3): 381–384 [周应华, 周德培. 均质边坡分级开挖宽平台设计初探[J]. 山地学报, 2007, 25(3): 381–384]
- [5] Yan Zhixin, Guo Bin, He Xiang, et al. Study of effect of platform width on dynamic response and failure mechanism of stepped slope under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Suppl. 2): 352–358 [言志信, 郭斌, 贺香, 等. 多级边坡平台宽度对边坡地震动力响应及破坏机制的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(增2): 352–358]
- [6] Li Zhong, Zhu Yanpeng. Search model of slip surface and stability analysis of multi-step slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Suppl. 1): 2841–2847 [李忠, 朱彦鹏. 多阶边坡滑移面搜索模型及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2841–2847]
- [7] Li Liang, Chu Xuesong, Li Ran, et al. Improved strategy of locating critical slip surface for multi-stage and multi-layer slopes[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(5): 59–62 [李亮, 褚雪松, 李冉, 等. 确定多级多层边坡临界滑动面的改进策略[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 59–62]
- [8] Li Liangjie, Liu Xuhong, Huang Shengwen, et al. Influence of excavation height and slope ratio to soft rock slope stability[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 9(3): 36–42, 50 [李良杰, 刘旭红, 黄生文, 等. 软岩边坡开挖高度和坡率对边坡稳定性的影响[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2012, 9(3): 36–42, 50]
- [9] GEO – SLOPE International Ltd. Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version [M]. Canada: GEO – SLOPE International Ltd, 2008: 69–76
- [10] Xiao Shiguo, Zhou Depei. Determination and numerical analysis method of relaxation region for cutting slope[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(3): 318–322 [肖世国, 周德培. 开挖边坡松弛区的确定与数值分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(3): 318–322]

Influence of Excavation on Homogeneous Stepped Slope

LIU Xiaoli^{1,2}, WANG Wan¹, YING Zi¹, ZHANG Xu¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

Abstract: It has not been thoroughly investigated on influence of excavation to stepped slope stability and the corresponding slip surface. Taking a two-stepped slope as an example, by the finite element stress-based method of slope stability, the stepped slope stability and location of the potential slip surface were analyzed with excavation and without excavation respectively. At the same time, the highly disturbed zone due to excavation was analyzed. The results have shown that compared with the factor of safety without excavation, the factor of safety of the stepped slope with excavation tends to smaller; there is little influence of excavation on factor of safety of the whole stepped slope and the corresponding location of the potential slip surface. For design of the stepped slope, it is better for the width of platform to be greater than half of the average height of the upper and lower slopes; the height ratio of the upper slope to the lower slope should be in the range of 1~2; it is more favorable to the slope stability that the slope ratio of the lower slope is smaller than that of the upper slope.

Key words: stepped slope; excavation; slope stability; optimization design