

水—荷耦合下加筋土坡筋材抗拔上限分析

肖刘路^{1,2}, 邹逸文^{1,2}, 李龙^{1,2}, 唐永涛³

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031;

3. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:为研究水—荷耦合作用下均匀加筋土坡的筋材抗拔稳定性,基于极限分析法上限定理,以临界高度为指标,采用遍历法搜索求解最小值,验证计算方法的正确性,并进行影响因素分析。结果表明:对于高水位,通过降低水位可显著增强抗拔稳定性;对于坡顶超载工况和低水位土坡,通过增加土体内摩擦角来增强抗拔稳定性更为合理。

关键词: 均匀加筋土坡; 水—荷耦合; 筋材抗拔稳定性; 极限分析法上限定理

1 引言

基于塑性力学极限分析法的上限定理,通过构建土体的机动速度场,用于边坡稳定性分析,该方法的可靠性已得到了印证^[1-6]。Richard Bathurst^[7]通过试验得出:在坡顶荷载作用下,均匀加筋边坡极限承载力为未加筋土坡的1.6~2倍;赵炼恒^[8]通过将强度折减技术与上限定理结合,利用安全系数指标对地下水位变化影响下的均质边坡进行了稳定性分析。需要指出的是,已有的研究大都针对加筋边坡筋材拉断破坏。对于抗拔稳定性,文献^[9-11]基于极限分析法,给出了加筋土坡筋材拔出失稳模式的理论模型,进行了求解与分析。

尽管相关研究已取得长足进展,但鲜有研究考虑加筋土坡在坡顶荷载和地下水耦合影响下,加筋土坡抗拔稳定性变化的基本规律。作为探索,该文拟在水—荷耦合下,构建筋材在拔出失稳时的破坏机制,推导拔出失稳的土坡临界高度表达式,给出相应条件下的解,总结各种因素对加筋土坡筋材抗拔稳定性的影响,给出合理的工程建议。

2 基本假定与相关参数

2.1 基本假定

为简化问题,做如下假设:① 只考虑二维情况;② 土体滑动面为对数螺旋线,对数螺旋线经过坡趾,坡顶

水平;③ 坡体内孔隙水压力为上覆岩土压力的分量;④ 土工织物等筋材水平且均匀厚度地铺设于边坡土体中,筋材不抗压、不抗弯、仅承受拉力,且不计筋材重力;⑤ 坡体土为砂土,破坏时服从线性莫尔库仑准则,并遵循相关流动法则。

2.2 相关参数

2.2.1 土坡基本参数

在二维情况下,滑动面宜用对数螺旋线加以表征^[1-3],如图1所示。图中 O 为对数螺旋线的旋转中心,其方程为:

$$r = r_0 e^{[(\theta - \theta_0) \tan \varphi]} \quad (1)$$

图1中各参数的物理意义为: r 为按 θ 定义的极径; θ_0 和 θ_h 分别为起始极角和终点极角,是描述螺旋线破坏机制的角度参数, θ_p 和 θ_q 为水位线角度参数,几何意义见图1; H 为坡高; L 为坡顶破坏长度; h 为水位线到坡顶的距离; β 为坡角; i 为筋材从上往下的排序数; θ_i 为 r_i 的极角; L_r 为每层筋材的长度; l_{ei} 为每层筋材的有效摩擦长度。满足下列几何关系:

$$\frac{H}{r_0} = \sin \theta_h \cdot e^{[(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi]} - \sin \theta_0 \quad (2)$$

$$\frac{L}{r_0} = \cos \theta_0 - \frac{H}{r_0} \cot \beta - \cos \theta_h \cdot e^{[(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi]} \quad (3)$$

$$\sin \theta_p e^{(\theta_p - \theta_0) \tan \varphi} = \sin \theta_0 + \frac{h}{H} \cdot \frac{H}{r_0} \quad (4)$$

$$\cos \theta_q e^{(\theta_q - \theta_0) \tan \varphi} = \cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} - \frac{h}{H} \cdot \frac{H}{r_0} \cot \beta \quad (5)$$

$$\frac{l_{ei}}{H} = \frac{L_r}{H} + (\cos \theta_h + \sin \theta_h \cot \beta) \frac{r_0}{H} e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi} -$$

情况:

(1) $m=0$

$$H = \left[2qf_b \tan\varphi \sum_{i=1}^n \frac{l_{ei}}{H} \left(\sin\theta_0 + \frac{z_i}{r_0} \right) - \frac{1}{\gamma} q f_0 / \left(\frac{H}{r_0} \right) \right] /$$
$$\left[(f_1 - f_2 - f_3 + r_u \cdot f_4) / \left(\frac{H}{r_0} \right)^2 - 2f_b \tan\varphi \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i}{H} (1 - r_u) + r_u \frac{h}{H} \right) \frac{l_{ei}}{H} \left(\sin\theta_0 + \frac{z_i}{r_0} \right) \right]$$

(21a)

(2) $0 < m < n$

$$H = \left[2qf_b \tan\varphi \sum_{i=1}^n \frac{l_{ei}}{H} \left(\sin\theta_0 + \frac{z_i}{r_0} \right) - \frac{1}{\gamma} q f_0 / \left(\frac{H}{r_0} \right) \right] /$$
$$\left\{ (f_1 - f_2 - f_3 + r_u \cdot f_4) / \left(\frac{H}{r_0} \right)^2 - 2f_b \tan\varphi \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i}{H} (1 - r_u) + r_u \frac{h}{H} \right) \frac{l_{ei}}{H} \left(\sin\theta_0 + \frac{z_i}{r_0} \right) + \sum_{i=m+1}^n \frac{z_i}{H} \cdot \frac{l_{ei}}{H} \left(\sin\theta_0 + \frac{z_i}{r_0} \right) \right] \right\}$$

(21b)

(3) $m=n$

$$H = \left[2qf_b \tan\varphi \sum_{i=1}^n \frac{l_{ei}}{H} \left(\sin\theta_0 + \frac{z_i}{r_0} \right) - \frac{1}{\gamma} q f_0 / \left(\frac{H}{r_0} \right) \right] /$$
$$\left[(f_1 - f_2 - f_3 + r_u \cdot f_4) / \left(\frac{H}{r_0} \right)^2 - 2f_b \tan\varphi \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{H} \cdot \frac{l_{ei}}{H} \left(\sin\theta_0 + \frac{z_i}{r_0} \right) \right]$$

(21c)

式(21)的约束条件为:

$$\begin{cases} H > 0 \text{ 且 } L > 0 \\ 0 \leq \theta_0 \leq \theta_p \leq \theta_q \leq \theta_h \leq \pi - \beta \\ W > 0 \text{ 且 } D > 0 \end{cases}$$

(22)

式中:等号不同时成立。

借助 Matlab,采用遍历搜索法,对临界高度 H 的两个控制参数 θ_0 和 θ_h 进行全局搜索求解边坡的最小临界高度 H_{\min} ,搜索步长为 0.5° 。此方法可以有效避免出现局部最小值的情况。

4 对比验证

假设坡体完全被地下水浸泡,无坡顶荷载工况,取计算参数 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$, $r_u=0$, $n=6$,按该文方法与文献[9, 11]的方法,计算所得结果如表 1 所示。

由表 1 可见:该文计算结果与文献[9, 11]相比,最大平均误差为 10.18%,较为吻合;同时注意到,该文所得最小临界高度小于文献[9, 11]计算值,表明该文计算方法更偏于安全。

表 1 最小临界高度对比

f_b	$\beta/^\circ$	$\varphi/^\circ$	L_r/H	H_{\min}/m			平均误差/%
				文献[9]	文献[11]	该文	
0.5	40	20	1.085	1.905	1.842	1.731	7.58
0.5	40	30	0.460	4.455	4.348	4.278	2.79
0.5	60	20	1.005	1.463	1.401	1.365	4.63
0.5	60	30	0.605	2.549	2.331	2.283	6.25
0.5	80	20	1.080	1.325	1.202	1.184	6.07
0.5	80	30	0.840	1.660	1.548	1.483	7.43
0.9	40	20	1.605	2.030	1.869	1.748	10.18
0.9	40	30	0.460	6.862	6.522	6.489	2.97
0.9	60	20	0.985	1.473	1.421	1.407	2.73
0.9	60	30	0.600	2.492	2.332	2.180	9.52
0.9	80	20	1.025	1.321	1.268	1.245	3.78
0.9	80	30	0.725	1.864	1.793	1.704	6.77

5 稳定性影响因素分析

在验证模型与计算程序正确性的基础上,对受坡顶荷载 $q=50\text{ kPa}$ (工况 1)和无坡顶荷载 $q=0\text{ kPa}$ (工况 2)两种工况,分析满水位($h/H=0$)、半水位($h/H=0.5$),以及无地下水($h/H=1$)3 种水位情况的抗拔稳定性。重点考察在水-荷耦合下,坡角、孔隙水压力系数、内摩擦角对最小临界高度的影响程度,并给出合理的工程建议。

5.1 坡角影响分析

取计算参数 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$, $\varphi=20^\circ$, $r_u=0.35$, $L_r/H=0.52$, $f_b=0.5$, $n=5$ 。最小临界高度随坡角的变化情况如图 2 所示。采用多项式拟合,对两种工况下 3 种水位情况的最小临界高度进行回归分析,见表 2。

由图 2 与表 2 可知:① 两种工况的边坡最小临界高度 H_{\min} 均随坡角的增加而非线性减小,并呈二次以及三次多项式关系。即坡角越大,坡体的抗拔稳定性

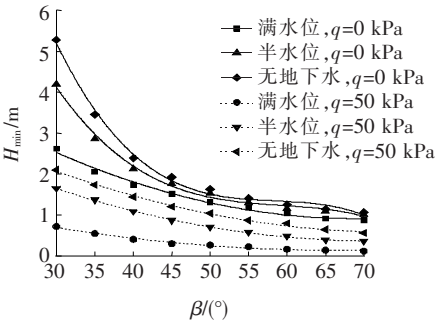


图 2 坡角对最小临界高度的影响

表 2 土坡最小临界高度随坡角的回归分析结果

工况	水位情况	回归方程	R^2
工况 1 ($q=50\text{ kPa}$)	满水位	$H_{\min}=1.98-0.06\beta+4.13\times10^{-4}\beta^2$	0.988
	半水位	$H_{\min}=4.20-0.10\beta+7.58\times10^{-4}\beta^2$	0.999
	无地下水	$H_{\min}=4.76-0.11\beta+7.53\times10^{-4}\beta^2$	0.997
工况 2 ($q=0\text{ kPa}$)	满水位	$H_{\min}=5.95-0.15\beta+1.05\times10^{-3}\beta^2$	0.990
	半水位	$H_{\min}=22.95-1.08\beta+0.02\beta^2-1.01\times10^{-4}\beta^3$	0.995
	无地下水	$H_{\min}=33.27-1.62\beta+0.03\beta^2-1.58\times10^{-4}\beta^3$	0.995

越差,且降幅渐小;② 相同坡角时,两种工况均呈现出最小临界高度 H_{\min} 随水位升高而减小的趋势,且无坡顶荷载较 50 kPa 坡顶荷载而言, H_{\min} 更大,尤其是在坡角较小时更加明显;③ 坡角较小时,随着坡内水位的升高,两种工况的最小临界高度 H_{\min} 下降幅度逐渐增大。例如坡角 $\beta=30^\circ$ 且无坡顶荷载时,从无地下水到半水位,最小临界高度 H_{\min} 下降 20.63%,水位从半水位到满水位, H_{\min} 下降 37.44%;坡角 $\beta=30^\circ$ 且坡顶荷载 $q=50\text{ kPa}$,从无地下水到半水位, H_{\min} 下降 21.33%,水位从半水位到满水位, H_{\min} 下降 56.48%。表明小坡角时高水位边坡的抗拔稳定性对水位高度较为敏感。故推论,对于高水位加筋缓坡,可通过减小坡顶荷载,或者降低水位来提高其抗拔稳定性。

5.2 孔隙水压力系数的影响分析

取计算参数 $\gamma=18\text{ kN/m}^3, \beta=45^\circ, \varphi=20^\circ, L_r/H=0.52, f_b=0.5, n=5$ 。最小临界高度随加筋强度变化情况如图 3 所示。采用多项式拟合,对两种工况 3 种水位情况的最小临界高度进行回归分析,结果见表 3。

由图 3 与表 3 可知:① 两种工况在有地下水的工况下,边坡最小临界高度 H_{\min} 随着孔隙水压力系数 r_u 的增加而非线性减小,且与 r_u 呈二次以及三次多项式关系;无地下水时, H_{\min} 不随孔隙水压力变化而变化;② 相同孔隙水压力系数时,两种工况的最小临界高度 H_{\min} 均随水位升高而减小;无坡顶荷载工况的最小临界高度更大,说明相同条件下坡顶荷载的作用降低了加筋土坡的抗拔稳定性;③ 以孔隙水压力系数 r_u 从 0.1 增至 0.4 为例,无坡顶荷载时,半水位和满

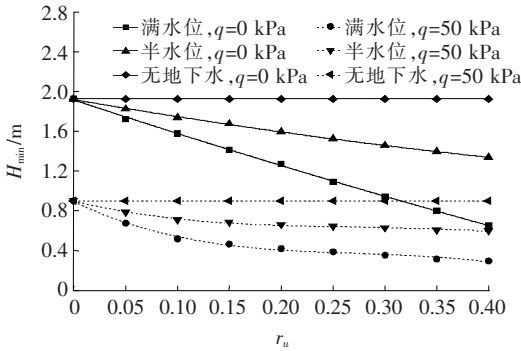


图 3 孔隙水压力系数对最小临界高度的影响

表 3 土坡最小临界高度随孔隙水压力系数的回归分析结果

工况	水位情况	回归方程	R^2
工况 1 ($q=50\text{ kPa}$)	满水位	$H_{\min}=0.89-5.02r_u+17.10r_u^2-20.89r_u^3$	0.995
	半水位	$H_{\min}=0.90-2.52r_u+8.61r_u^2-10.54r_u^3$	0.995
	无地下水	$H_{\min}=0.90$	1
工况 2 ($q=0\text{ kPa}$)	满水位	$H_{\min}=1.91-3.44r_u+0.70r_u^2$	0.999
	半水位	$H_{\min}=1.92-1.80r_u+0.88r_u^2$	0.999
	无地下水	$H_{\min}=1.93$	1

水位的最小临界高度 H_{\min} 分别下降 22.97% 和 58.72%;50 kPa 坡顶荷载作用时,半水位和满水位的最小临界高度 H_{\min} 分别下降 15.65% 和 42.82%。说明坡内水位越高,最小临界高度 H_{\min} 随孔隙水压力系数 r_u 增加而减小的幅度越大;④ 仍以孔隙水压力系数 r_u 从 0.1 增至 0.4 为例,半水位坡体在 50 kPa 坡顶荷载和无坡顶荷载作用下的 H_{\min} 降幅分别为 15.65% 和 22.97%;而满水位坡体在工况 1 和工况 2 的情况下, H_{\min} 降幅分别为 42.82% 和 58.72%。说明坡顶荷载越小, H_{\min} 降幅越大。综合表明:土坡水位越高越不利于抗拔稳定,尤其是无坡顶荷载作用的高水位边坡,其抗拔稳定性对于孔隙水压力系数较为敏感,此参数不易控制,因而工程上应当尽可能避免此工况。

5.3 内摩擦角影响分析

对于土体内摩擦角的影响,取计算参数 $\gamma=18\text{ kN/m}^3, \beta=45^\circ, r_u=0.35, L_r/H=0.52, f_b=0.5, n=5$ 。最小临界高度随加筋强度变化情况如图 4 所示。采用多项式拟合,对两种工况下 3 种水位情况的最小临界高度进行回归分析,结果见表 4。

由图 4、表 4 可知:① 两种工况下,除满水位工况最小临界高度 H_{\min} 近似地表现出随内摩擦角 φ 线性

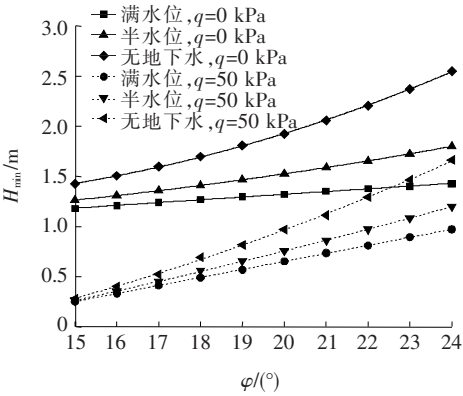


图4 内摩擦角对最小临界高度的影响

表4 土坡最小临界高度随土体内摩擦角的回归分析结果

工况	水位情况	回归方程	R ²
工况 1 (q=50 kPa)	满水位	$H_{\min} = -0.95 + 0.08\varphi$	1
	半水位	$H_{\min} = -0.85 - 0.05\varphi - 1.26 \times 10^{-3} \varphi^2$	1
	无地下水	$H_{\min} = -0.61 + 1.55 \times 10^{-3} \varphi + 3.86 \times 10^{-3} \varphi^2$	0.999
工况 2 (q=0 kPa)	满水位	$H_{\min} = 0.77 + 0.03\varphi$	0.999
	半水位	$H_{\min} = 1.01 - 0.01\varphi - 1.76 \times 10^{-3} \varphi^2$	1
	无地下水	$H_{\min} = 1.74 - 0.11\varphi + 6.02 \times 10^{-3} \varphi^2$	1

增加外,其余水位情况 H_{\min} 随内摩擦角 φ 非线性增加,并高度契合二次多项式关系。说明增加内摩擦角可有效增加抗拔稳定性;② 相同内摩擦角时,无坡顶荷载作用的最小临界高度更大,表明相同条件下,坡顶荷载作用降低了加筋边坡的抗拔稳定性。同时,若考虑内摩擦角从 15° 增加到 24° , H_{\min} 在无坡顶荷载和 50 kPa 荷载下的增幅:满水位情况下分别为 22.77% 和 2.87 倍;半水位情况下分别为 42.75% 和 3.59 倍;无地下水时分别为 79.18% 和 4.86 倍。说明有坡顶荷载作用时,土坡的抗拔稳定性对于内摩擦角更加敏感;③ 当内摩擦角较小时,以 $\varphi=15^\circ$ 为例,考虑坡内水位从满水位到半水位以及半水位到无地下水, H_{\min} 的增幅:工况 1 分别为 4.36% 和 8.35%,工况 2 分别为 6.88% 和 12.88%。说明无论坡顶是否受荷载作用,若内摩擦角较小,采用坡体内部排水的措施,对提高土坡抗拔稳定性的效果并不显著;④ 其他条件相同时,坡内地下水位越低,最小临界高度 H_{\min} 越大。且内摩擦角越大,水位降低导致的最小临界高度 H_{\min} 增幅越大。例如 $\varphi=24^\circ$ 时,对于工况 1,水位从满水位降到半水位, H_{\min} 增幅 23.74%,水位再降低至无地下水时,

H_{\min} 增幅 38.37%;对于工况 2,水位从满水位降到半水位, H_{\min} 增幅 26.33%,水位再降低至无地下水时, H_{\min} 增幅 41.69%。综合表明:低于半水位的加筋土坡,增加内摩擦角可较大幅度增加土坡的抗拔稳定性。

6 结论

- (1) 减小坡顶荷载,降低坡体内水位高度,减小坡角,增加土体内摩擦角,这些措施均可达到提高加筋土坡筋材抗拔稳定性的目的。
- (2) 边坡地下水位越高,对筋材抗拔稳定性越不利。当地下水位大于坡高一半高度时,筋材抗拔稳定性对地下水位高度灵敏性增强;当边坡地下水位较低时,抗拔稳定性对土体的内摩擦角更为敏感,而坡体内部水位高度对其稳定性的影响则明显降低。
- (3) 坡顶荷载的作用显著降低了加筋土坡抗拔稳定性。受坡顶荷载作用的加筋土坡抗拔稳定性受土体内摩擦角的影响更为灵敏;坡顶超载时,孔隙水压力系数和坡角对筋材抗拔稳定性的影响会明显减弱。

参考文献:

[1] 乔丽平,王钊. 加筋土坡临界高度的研究[J]. 岩土力学, 2006,27(1):132-136.

[2] 崔新壮,姚占勇,商庆森,等. 加筋土坡临界高度的极限分析[J]. 中国公路学报,2007,20(1):1-6.

[3] 赵炼恒,李亮,杨峰,等. 加筋土坡动态稳定性拟静力分析[J]. 岩石力学工程学报,2009,28(9):1 904-1 917.

[4] 唐高朋,赵炼恒,李亮,等. 基于 MATLAB 的边坡稳定性极限上限分析程序开发[J]. 岩土力学,2013,34(7):2 091-2 098.

[5] 侯超群,邓欣,孙志彬,等. 非线性准则下三维加筋边坡稳定性的上限分析[J]. 中国公路学报,2018,31(2):124-132.

[6] 聂秀鹏,逢焕平,孙志彬,等. 三维加筋边坡地震稳定性上限分析[J]. 岩土力学,2019,40(9):3 483-3 492.

[7] Richard Bathurst,陶连金. 加筋边坡在坡顶荷载作用下的极限承载能力[J]. 岩土工程学报,2004,26(2):194-197.

[8] 赵炼恒,罗强,李亮,等. 地下水位变化对边坡稳定性影响的上限分析[J]. 公路交通科技,2010,27(7):1-7.

[9] R. A. Jewell. Application of Revised Design Charts for Steep Reinforced Slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes,1991,10(3):203-233.

[10] R. L. Michalowski. Slope Stability Analysis: A Kinematic Approach[J]. Geotechnique,1995,45(2):283-293.

[11] R. L. Michalowski. Stability of Uniformly Reinforced Slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1997,123(6):546-556.