

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.020

山区路基局部加筋作用对半挖半填边坡稳定性的影响

张 飞^{1,2}, 钱子晗^{1,2}, 贾世林^{1,2}, 苏 贤^{1,2}

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 2.河海大学土木与交通学院)

摘要:针对山区半挖半填路基边坡受降雨和裂缝影响极易发生失稳滑动破坏的问题,利用土工合成材料加筋土技术对边坡进行局部加固,并基于极限分析上限定理建立了考虑孔隙水压力作用下半挖半填边坡的局部加筋稳定性计算公式,通过参数分析揭示了局部加筋作用对边坡稳定性及弱化系数对破坏模式的影响规律。结果表明:半挖半填边坡稳定所需加筋力随着填方坡度、孔隙水压力的增大而增大,而随着加筋深度、原始坡度的增大而减小;局部加筋深度增大会显著提升边坡稳定性,但需要额外考虑可能发生的平动破坏,当孔隙水压力较大时则需考虑转动破坏。

关键词:半挖半填边坡;加筋土;孔隙水压力;极限分析;上限定理

Influence of local reinforcement of mountainous roadbed on stability of cut-fill slopes

Zhang Fei^{1,2}, Qian Zihan^{1,2}, Jia Shilin^{1,2}, Su Xian^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University)

Abstract: To address the problem that cut-fill roadbed slopes in mountainous areas are prone to instability and sliding failure under the influence of rainfall and cracks, local reinforcement of the slopes was carried out using geosynthetic reinforced soil technology. Based on the upper bound theorem of limit analysis, a calculation formula for the stability of locally reinforced cut-fill slopes considering pore water pressure was established. Through parameter analysis, the influence laws of local reinforcement on slope stability and that of weakening coefficient on failure modes were revealed. The results show that the required reinforcement force for the stability of cut-fill slopes increases with the increase of the fill slope and pore water pressure, while it decreases with the increase of reinforcement depth and the original slope. Increasing the local reinforcement depth significantly improves slope stability, but the possibility of translational failure surface needs to be considered. When the pore water pressure is high, rotational failure should be considered.

Key words: cut-fill slope; reinforced soil; pore water pressure; limit analysis; upper bound theorem

半挖半填边坡通常用于山区公路路基建设^[1-3],由于挖方时的土体扰动^[4]和填方后的压实不足,可能会导致填土区出现由地面沉降引起的坡顶裂缝^[5-7],且山区地下水、强降雨会引起坡体内部孔隙水压力升高,极易触发滑坡灾害^[8-11]。为此,美国国家森林局运用土工合成材料加筋土技术对路基边坡进行局部加固,以有效缓解沉降^[5],减少裂缝并增强边坡的稳定性^[12-13]。

目前加筋土边坡的研究主要针对整体加筋的稳定性,研究方法有极限平衡^[14-16]、极限分析^[17-19]和数值模拟^[20-22]。对于局部加筋边坡问题,王宗建等^[23]和姚云^[24]分别开展了室内路堤模型静载试验和动载试验,发现局部加筋能够降低路堤内部土压力,抑制路堤沉降,且与全断面加筋路堤相比,具有较高的性价比。针对山区半挖半填路基,Wu 等^[13]的全尺寸模型试验研究结果表明,顶部局部加筋可以有效抑制裂缝发展,提高边坡稳定性。Cuelho 等^[25]开展了离心机试验,得到与 Wu 等^[13]相似的结果,指出局部加筋提高了边坡整体稳定性,使其最危险破坏模式可能由整体破坏转变为局部破坏。Perkins 等^[3]基于有限差分法分析了不同加筋间距和加筋深度对稳定性的影响,结果表明加筋间距越小越利于边坡稳定。但现有局部加筋的稳定性研究仍不够完善,难以直接指导实际工程设计,同时关于孔隙水压力影响的研究仅在整体加筋边坡稳定性分析领域中开展。Yang 等^[26]研究了土工合成材料加筋边坡在孔隙水压力下的失效机制,Pang 等^[27]基于极限分析的上限定理,对三维加筋边坡在孔隙水压力作用下的稳定性进行了分析,都发现孔隙水压力对边坡稳定性有显著的不利影响。Chen 等^[19]使用黏性土作为回填土体,研究了由于排水不良而产生的潜在孔隙水压

力对边坡稳定的影响。本文基于极限分析上限定理开展考虑孔隙水压力作用下半挖半填边坡的局部加筋稳定性分析,推导用于评价边坡稳定性的极限分析上限解表达式,从而揭示局部加筋作用对边坡稳定性及弱化系数对破坏模式的影响规律。

1 半挖半填边坡的局部加筋稳定性极限分析

图 1 给出了一个半挖半填边坡局部加筋的断面图。路基边坡的填方坡度为 β ,边坡的原始坡度为 α ,加筋区的加固深度(加筋深度)为 h_r 。由于挖方时的土体扰动和填方后的压实不足,填土强度通常低于天然土体^[12],因此本文假设边坡失稳仅发生于填方区内,滑动面与原始边坡相切于 T 点。假设填土为均质土,满足相关联流动法则,根据土体塑性理论,滑动土体的速度矢量 $\boldsymbol{v}$ 与对数螺旋面切线间的夹角为土体的内摩擦角 φ 。因此,滑动面的极坐标方程表示为:

$$r(\theta) = r_0 \exp[(\theta - \theta_0) \tan \varphi] \tag{1}$$

式中: r 为对数螺旋线上任意一点到转动中心 O 的距离; θ 为 r 与水平轴线的夹角; θ_0 、 r_0 为滑入点 A 的极坐标。对数螺旋线 AC 可以由滑动面的滑入点和滑出点对应的极坐标角度 θ_0 和 θ_h 这两个参数完全确定。

因为假设旋转块体为刚性,所以能量耗散仅沿着剪切带进行。能量耗散率由两部分组成,即滑动面的能量耗散率 D_c 和筋材中的能量耗散率 D_t 。此外,若考虑孔压作用,则外部功率由滑动土体的重力(G)功率 W_c 和孔隙水压力(u)功率 W_u 组成。能量平衡方程为:

$$W_c + W_u = D_c + D_t \tag{2}$$

若直接计算土体区域 ABC 的重力功率 W_c 非常复杂,可先分别求出 OAC 、 OAB 和 OBC 的土体重力功率 W_1 、 W_2 、 W_3 ,再进行综合运算:

$$W_c = W_1 - W_2 - W_3 \tag{3}$$

先考虑对数螺旋线区域土体 OAC 的其中一个微元体,将该微元体的重力功率沿着整个面积积分:

$$W_1 = \gamma \omega r_0^3 f_1 \tag{4}$$

其中 $f_1 = \{ \exp[3(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi] (3 \tan \varphi \cos \theta_h + \sin \theta_h) - 3 \tan \varphi \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \} / 3(1 + 9 \tan^2 \varphi)$ 式中: γ 为土体容重; ω 为角速度。

三角形区域 OAB 、 OBC 这两部分土体的重力功率可分别表示为:

$$W_2 = \gamma \omega r_0^3 f_2 \tag{5}$$

$$W_3 = \gamma \omega r_0^3 f_3 \tag{6}$$

其中 $f_2 = \frac{L \sin \theta_0}{6 r_0} \left(2 \cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} \right)$

$$f_3 = \frac{1}{6} \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi] \left\{ \cos \theta_0 + \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi] \cos \theta_h - \frac{L}{r_0} \right\} \left[\sin(\theta_h - \theta_0) - \frac{L}{r_0} \sin \theta_h \right]$$

AB 的长度定义为 L ,有:

$$L = r_0 \left\{ \frac{\sin(\beta + \theta_0)}{\sin \beta} - \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi] \frac{\sin(\beta + \theta_h)}{\sin \beta} \right\} \tag{7}$$

由此,土体区域 ABC 重力功率 W_c 可表示为:

$$W_c = \gamma \omega r_0^3 f_c \tag{8}$$

式中: f_c 为边坡几何函数, $f_c = f_1 - f_2 - f_3$ 。

在图 1 所示的转动破坏模式中,剪胀只发生在破坏面上,那么在平面应变问题中, W_u 可表示为:

$$W_u = r_u \gamma r_0^2 \omega \tan \varphi \int_{\theta_0}^{\theta_h} h \exp[2(\theta - \theta_0) \tan \varphi] d\theta \tag{9}$$

式中: h 为待测孔压点到土体表面的垂直距离; r_u 为孔隙水压力系数。

滑动面的能量耗散率 D_c 只发生在 AC 线上,从滑动面最上方的点所对应的极坐标角度到滑动面滑出点

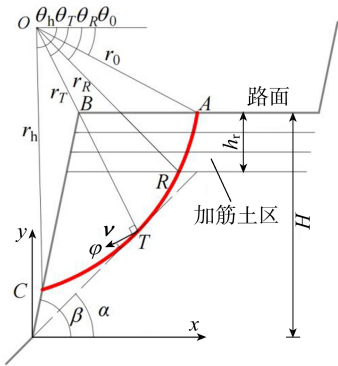


图 1 边坡稳定性的破坏模式
Fig. 1 Failure mode of slope stability

所对应的极坐标角度进行积分:

$$D_c = \frac{c\omega r_0^2}{2\tan\varphi} \{ \exp[2(\theta_h - \theta_0)\tan\varphi] - 1 \}$$

(10)

式中: c 为填土黏聚力。

本文假设筋材等间距布置,根据 Michalowski^[28]给出的不同筋材分布下加筋力功率计算方法,等间距布置下加筋力均匀分布,则加筋力产生的能量耗散率为:

$$D_t = \frac{1}{2}c_t\omega r_0^2 \{ \sin^2\theta_R \exp[2(\theta_R - \theta_0)\tan\varphi] - \sin^2\theta_0 \}$$

(11)

式中: c_t 为边坡中的平均抗拉强度,用来表示边坡中的筋材强度; θ_R 为滑动面与加筋区域下边界交线上所取特征点 R 的极坐标角度。

根据能量平衡函数,由式(2)可以直接得到边坡稳定所需的无量纲加筋力,定义为 $c_t/\gamma H$:

$$c_t/\gamma H = (W_G + W_u - D_c) / \frac{1}{2}\omega r_0^2\gamma H \{ \sin^2\theta_R \exp[2(\theta_R - \theta_0)\tan\varphi] - \sin^2\theta_0 \}$$

(12)

式中: H 为边坡高度。

为了得到最危险滑动面,本文采用粒子群优化算法^[29]对参数 θ_0 和 θ_h 进行优化,以得到稳定所需加筋力的最大值。在搜索最危险滑动面时,需始终限制滑动面在填方区内。

2 方法验证与对比分析

为了验证本文提出的半挖半填边坡局部加筋稳定性分析方法的正确性,与 Cuelho 等^[5]基于 FLAC 的计算结果进行对比。Cuelho 等^[5]给出了加筋土边坡安全系数等于 1.3 时单层筋材的加筋力大小,本文以此为输入参数计算不同筋材层数下的加筋土边坡安全系数,并与 Cuelho 等^[5]的结果进行对比。边坡相关参数为: $\beta=34^\circ$, $\alpha=26.8^\circ$, $\varphi=23.1^\circ$, $c/\gamma H=0.0157$,且筋材以加筋间距为 0.3m 等间距分布。表 1 给出的对比结果表明,本文基于上限定理计算得到的安全系数略小于 Cuelho 等^[5]的结果。

为了进一步验证本文方法的有效性,图 2 对比了不同孔隙水压力下本文方法与 Chen 等^[19]计算得到的边坡稳定所需加筋力大小。为与 Chen 等^[19]的研究对象一致,需假设 $\alpha=0$ 且筋材沿高度方向铺满($h_r=H$)。图 2 的对比结果表明,本文方法计算得到的边坡稳定所需的无量纲加筋力与 Chen 等^[19]的基本一致,验证了考虑孔隙水压力时本文方法边坡稳定性分析的准确性。

Zornberg 等^[30]开展了一系列加筋土边坡的离心机试验以探究失稳机理,并与极限平衡法得到结果进行对比。Zornberg 等^[30]的离心机试验采用统一尺寸的加筋土边坡,坡度为 63.4° ,通过改变筋材层数和填土强度,使边坡在不同离心加速度下失效。对比离心机模型试验^[30]与本文方法计算得到的极限状态下的筋材无量纲加筋力,发现离心机模型试验^[30]得到的无量纲加筋力分别为 0.042 1、0.042 4、0.031 2、0.031 5,而本文方法计算得到的对应结果分别为 0.045 6、0.045 6、0.034 9、0.034 9,可见两者较为吻合,证明了本文方法的正确性。但需要注意的是,为了与离心机试验模型保持一致,应设置原始坡度 $\alpha=0^\circ$ 。

表 1 FLAC 和本文方法计算的安全系数比较

Table 1 Comparison of safety factors calculated by

FLAC and method proposed in this paper

模型参数			安全系数	
加筋深度/m	筋材层数	单层筋材加筋力/(kN/m)	本文方法	FLAC ^[5]
0.3	1	145.94	1.24	1.30
0.6	2	72.96	1.24	1.30
1.2	4	36.48	1.24	1.30
1.8	6	24.32	1.24	1.30

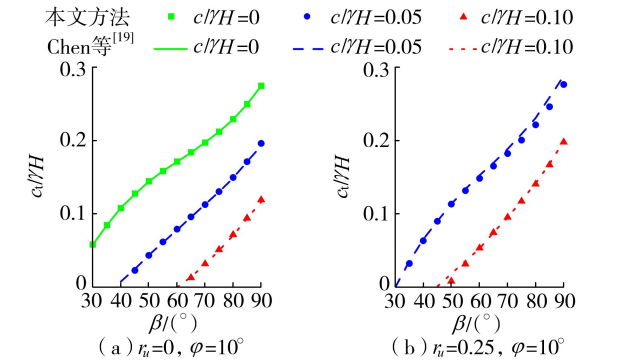


图 2 边坡稳定所需加筋力对比

Fig. 2 Comparison of required reinforcement

forces for slope stability

3 参数分析

以填土边坡为例($\beta = 45^\circ, r_u = 0.0, h_r/H = 0.3$),采用本文方法开展参数分析,重点研究填方坡度 β 、原始坡度 α 、无量纲黏聚力 $c/\gamma H$ 、内摩擦角 φ 、加筋深度 h_r 、孔隙水压力系数 r_u 对半挖半填边坡局部加筋稳定性的影响规律。

3.1 填方坡度

图 3 给出了不同无量纲黏聚力和原始坡度下,边坡稳定所需加筋力随填方坡度的变化规律,可以看出,随着填方坡度的增大,稳定所需的加筋力也增大。原始坡度越陡,稳定所需加筋力越小,这是由于增大原始坡度限制了滑动面位置,使潜在滑动体体积减小,从而减小了稳定所需加筋力。对于填方坡度缓、填土强度大的边坡,不需要进行加固即可维持稳定。

3.2 加筋深度

图 4 给出了不同无量纲黏聚力和不同原始坡度下,加筋深度对边坡稳定所需加筋力的影响。随着加筋深度的增大,加筋合力位置逐渐向下移动并远离转动中心(图 5),同时滑面转动中心也随着加筋深度的增大逐渐远离坡体,从而减小了边坡稳定所需的加筋力。图 4 表明边坡稳定所需加筋力随着加筋深度增大而快速减小,当 $h_r/H > 0.2$ 后基本趋于稳定。因此,对于局部加筋的半挖半填边坡,其顶部加筋深度应不小于 0.2 倍的坡高。若加筋深度不足,边坡稳定所需加筋力过大,且所铺设筋材层数有限,易导致筋材承受拉力超出极限抗拉强度,造成边坡失稳。

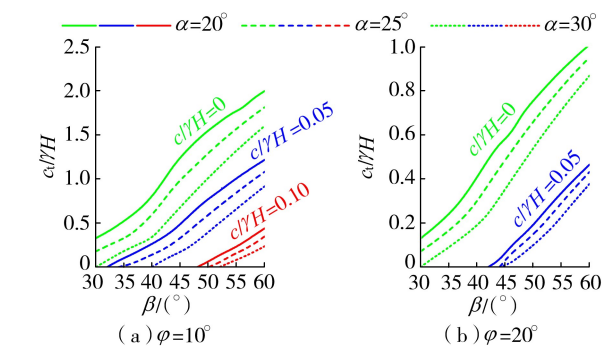


图 3 填方坡度对边坡稳定所需加筋力的影响
Fig. 3 Effect of fill slope on required reinforcement force for slope stability

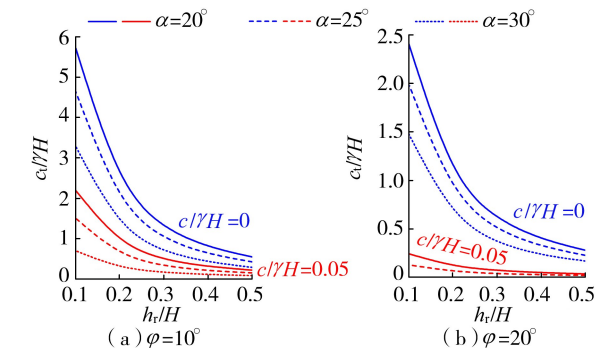


图 4 加筋深度对边坡稳定所需加筋力的影响
Fig. 4 Effect of reinforcement depth on required reinforcement force for slope stability

3.3 孔隙水压力

图 6 给出了在填方坡度 $\beta=45^\circ$ 时,不同孔隙水压力系数对边坡稳定所需加筋力的影响,可以看出,孔隙水压力对边坡稳定所需加筋力影响显著,随着孔隙水压力的增大,边坡稳定所需的加筋力也随之大致呈线性增加,这与 Chen 等^[19]得到的结论一致。这是因为孔隙水压力对边坡做正功,随着孔隙水压力的增大使得边

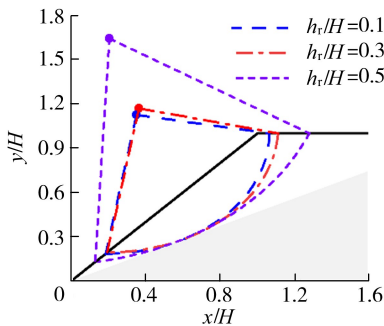


图 5 加筋深度对临界滑动面位置的影响
Fig. 5 Effect of reinforcement depth on position of critical sliding surface

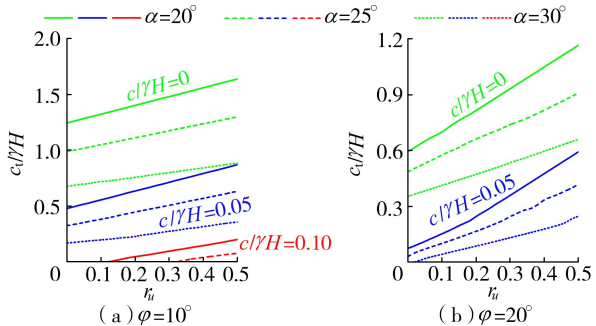


图 6 孔隙水压力系数对边坡稳定所需加筋力的影响
Fig. 6 Effect of pore water pressure coefficient on required reinforcement force for slope stability

坡稳定性降低,故需要更大的加筋力才能维持边坡的稳定性。对于回填土体强度高的半挖半填边坡,则在较小的加筋力作用下即可保持稳定性。

4 填土界面强度弱化对边坡稳定所需加筋力的影响

根据 JTG D30—2015《公路路基设计规范》,对于半挖半填路基边坡,当原始坡率陡于 1 : 2.5 时,必须验算路堤整体沿基底及基底软弱层滑动的稳定性。边坡发生平动破坏时,如图 7 所示,填土与天然土之间存在一软弱层,将软弱层的强度弱化系数定义为:

$$\zeta = c'/c = \tan \varphi'/\tan \varphi \tag{13}$$

式中: c' 为软弱面土体的黏聚力; φ' 为软弱面土体的内摩擦角。弱化系数越小,表明软弱层的土体强度越小。

平动破坏与转动破坏一样,外部功率由滑动土体重力功率 W_G 和孔隙水压力功率 W_u 组成,能量耗散率则由滑动面的能量耗散率 D_c 和筋材中的能量耗散率 D_l 组成。

由滑动土体重力做功的功率为:

$$W_G = [\gamma H^2 v (\cot \alpha - \cot \beta) \sin(\alpha - \varphi')]/2 \tag{14}$$

式中: v 为滑动土体的滑动速率。

在平动破坏中,剪胀只发生在滑动面上,那么在平面应变问题中, W_u 可表示为:

$$W_u = [r_u \gamma H^2 v (1 - \cot \beta \tan \alpha) \sin \varphi'] / 2 \sin \alpha \tag{15}$$

滑动面的能量耗散率可表示为:

$$D_c = c' H v \cos \varphi' / \sin \alpha \tag{16}$$

筋材中的能量耗散率为:

$$D_l = v c_l h_r \cos(\alpha - \varphi') \tag{17}$$

根据能量平衡函数,可以直接得到边坡稳定所需的加筋力为:

$$\frac{c_l}{\gamma H} = \frac{H}{h_r} \left[\frac{(\cot \alpha - \cot \beta) \tan(\alpha - \varphi')}{2} + r_u \frac{(1 - \cot \beta \tan \alpha) \sin \varphi'}{2 \sin \alpha \cos(\alpha - \varphi')} - \frac{c'}{\gamma H \sin \alpha \cos(\alpha - \varphi')} \right] \tag{18}$$

图 8 给出了不同破坏模式下,边坡稳定所需加筋力随强度弱化系数的变化规律,可以看出,随着强度弱化系数的减小,对于平动破坏模式边坡稳定所需加筋力的大小也随之增大,并超过转动破坏模式边坡稳定所需的加筋力。这主要是因为随着强度弱化系数的减小,软弱层的土体强度越小则边坡稳定所需的加筋力就越大。当平动破坏线与转动破坏线相交于一点时,该点为临界点,此时对于平动破坏和转动破坏而言,边坡稳定所需的加筋力相等。当强度弱化系数小于临界值时,边坡最危险的破坏模式为平动破坏,反之为转动破坏。临界强度弱化系数越大,则越需要关注软弱层对边坡稳定性的影响。

图 9 为临界强度弱化系数 ζ_{cr} 在不同变量下的变化规律($c/\gamma H = 0.05, \varphi = 10^\circ, r_u = 0, \beta = 45^\circ$)。填方坡度越陡临界强度弱化系数越小,同时增大原始坡度也会提高临界强度弱化系数(图 9(a)),因此对于填方坡度较缓、原始坡度较陡的边坡,需要着重关注软弱层对稳定性的影响。随着加筋深度的增大,临界强度弱化系数也随之增大(图 9(b))。临界强度弱化系数随着孔隙水压力的增大而大致呈现线性降低(图 9(c)),因此若排水措施不足导致孔隙水压力升高后,需重点校核转动破坏模式的稳定性。而临界强度弱化系数随黏聚力的增大而增大(图 9(d)),说明对于黏性土边坡需重点校核平动破坏模式的稳定性。在实际工程中,要合理考虑填方坡度、填土强度和加筋深度对边坡稳定性的影响,选取合适的参数值,降低发生平动破坏和转动破坏的可能性。

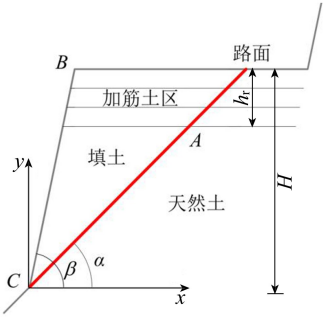


图 7 平动破坏示意图

Fig. 7 Schematic diagram of translational failure

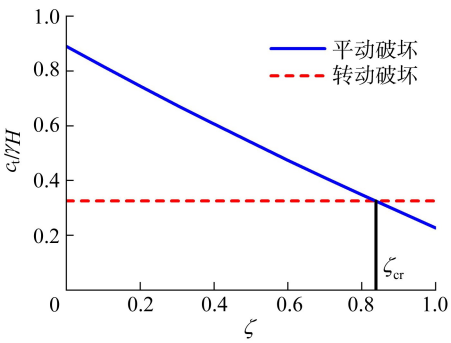


图 8 强度弱化系数与边坡稳定所需加筋力的关系

Fig. 8 Relationship between strength weakening coefficient and required reinforcement force for slope stability

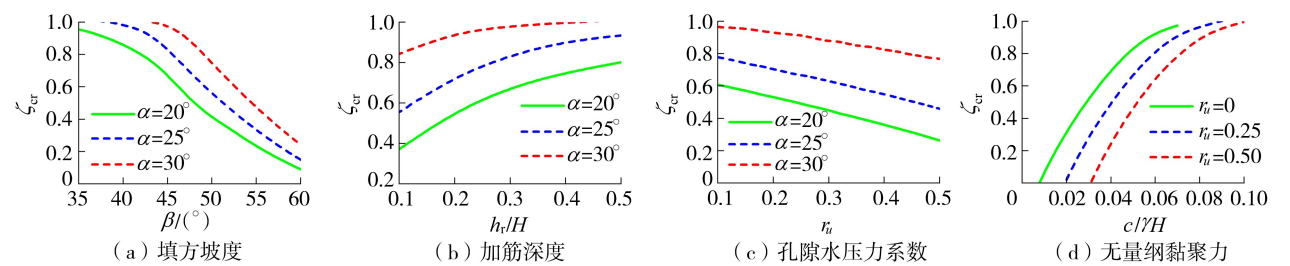


图 9 不同变量对临界强度弱化系数的影响

Fig. 9 Influence of different variables on critical strength weakening coefficient

5 结 论

- a. 对半挖半填边坡进行局部加筋能有效提高边坡稳定性。边坡为保持稳定不发生转动破坏所需加筋力的大小与填方坡度正相关,并随着加筋深度的增加而急剧下降,随后趋于稳定。对于填土强度低、填方坡度陡的边坡,加筋深度应不小于 0.2 倍坡高,以保持半挖半填边坡稳定性。
- b. 填土界面强度弱化系数对半挖半填边坡的稳定性也至关重要,当平动破坏和转动破坏边坡稳定所需加筋力相等时,所对应的强度弱化系数为临界强度弱化系数。临界强度弱化系数与填方坡度负相关,与填土强度和加筋深度正相关。对于填方坡度较缓、原始坡度较陡的黏性土边坡需重点校核平动破坏模式的稳定性。
- c. 孔隙水压力对半挖半填边坡的稳定性有显著影响,边坡稳定所需加筋力的大小随孔隙水压力的增大而增大,但临界强度弱化系数随之减小。当孔隙水压力过大时,需重点校核转动破坏模式的稳定性。

参考文献:

[1] Stückelberger A J,Heinimann R H,Burlet C E. Modeling spatial variability in the life-cycle costs of low-volume forest roads[J]. European Journal of Forest Research,2006,125(4):377-390.

[2] Zhu Yuming,Zhang Fei,Jia Shilin. Embodied energy and carbon emissions analysis of geosynthetic reinforced soil structures[J]. Journal of Cleaner Production,2022,370(10):133510.

[3] Perkins S,Cuelho E,Akin M,et al. Use of finite difference numerical technique to evaluate deep patch embankment repair with geosynthetics[J]. Transportation Research Record,2015,2473(1):217-223.

[4] 刘同芳,吴跃东,周云峰,等. 基于透明黏土的取土器贯入扰动变形试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):77-83. (Liu Tongfang,Wu Yuedong,Zhou Yunfeng,et al. Experimental study on disturbance deformation of soil sampler penetration based on transparent clay[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):77-83. (in Chinese))

[5] Cuelho E,Perkins S,Akin M. Deep patch repair,phase I :analysis and design[R]. Vancouver:Federal Highway Administration. Western Federal Lands Highway Division,2012.

[6] Keller G,Berry J. The long history of geosynthetics use on forest roads[J]. Transportation Research Record,2015,2473(1):242-249.

[7] 叶伟,马福恒,胡江,等. 压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):102-109. (Ye Wei,Ma Fuheng,Hu Jiang,et al. Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):102-109. (in Chinese))

[8] 饶平平,吴健,崔纪飞,等. 裂缝边坡三维极上限拓展分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(9):1612-1620. (Rao Pingping,Wu Jian,Cui Jifei,et al. Extended three-dimensional analysis of cracked slopes using upper-bound limit method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(9):1612-1620. (in Chinese))

[9] 刘锋,芮勇勤,张春. 坡顶张拉裂缝对边坡稳定性影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(9):949-954. (Liu Feng,Rui Yongqin,Zhang Chun. Influence of tension cracks of slope crest on the stability of slope by energy analysis method[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2016,35(9):949-954. (in Chinese))

[10] 何毅,余军炎,袁冉,等. 考虑坡顶倾角的土质裂隙边坡稳定性分析[J]. 中国公路学报,2021,34(5):45-54. (He Yi,Yu Junyan,Yuan Ran,et al. Stability analysis of the soil slope with cracks considering the upper slope inclination[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(5):45-54. (in Chinese))

[11] 王伟,丁聪,刘世藩,等. 基于移动最小二乘法的阶跃型滑坡预警曲面模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53

(1):95-102. (Wang Wei,Ding Cong,Liu Shifan,et al. Stepwise landslide warning surface model with moving least squares[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(1):95-102. (in Chinese))

[12] Collins M B. Design considerations for deep patch embankment repair with geosynthetics[J]. Transportation Research Record, 2015,2473(1):224-232.

[13] Wu H T J,Helwany B M S. Examining the effects of reinforcement in U. S. forest service deep-patch landslide repair technique: full-scale model tests[J]. Transportation Research Record,2001,1772(1):203-210.

[14] Ge Bin,Gao Yufeng,Zhang Fei. Effects of concave facing profile on the internal stability of geosynthetic-reinforced soil walls[J]. Acta Geotechnica,2023,18(11):5941-5957.

[15] 李强,朱大勇. 加筋土边坡临界滑动场[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(4):431-434. (Li Qiang,Zhu Dayong. Critical slip field of reinforced soil slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(4): 431-434. (in Chinese))

[16] Nouri H,Fakher A,Jones C. Evaluating the effects of the magnitude and amplification of pseudo-static acceleration on reinforced soil slopes and walls using the limit equilibrium Horizontal Slices Method[J]. Geotextiles and Geomembranes,2007,26(3):263-278.

[17] 张玮鹏,李冬冬,曾光辉,等. 非线性条件下加筋土边坡上限法的研究[J]. 长江科学院院报,2020,37(6):108-114. (Zhang Weipeng,Li Dongdong,Zeng Guanghui, et al. Upper bound method for reinforced soil slopes under nonlinear mohr-coulomb yield condition[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(6):108-114. (in Chinese))

[18] 于明祥,肖成志. 格栅加筋边坡稳定性的塑性极限分析[J]. 土工基础,2006,20(3):50-52. (Yu Mingxiang,Xiao Chengzhi. Limit analysis of plasticity for stability of slope reinforced by uniformly-distributed geogrid[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006,20(3):50-52. (in Chinese))

[19] Chen Yanbo,Gao Yufeng,Yang Shangchuan,et al. Required unfactored geosynthetic strength of three-dimensional reinforced soil structures comprised of cohesive backfills[J]. Geotextiles and Geomembranes,2018,46(6):860-868.

[20] 吴清星,刘玉蕊,侯维杰. 高填方加筋土边坡稳定性试验与数值模拟研究[J]. 水利水电快报,2023,44(4):97-102. (Wu Qingxing,Liu Yurui,Hou Weijie. Experimental and numerical simulation study on stability of high fill reinforced soil slope[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2023,44(4):97-102. (in Chinese))

[21] 喻泽红,邹银生,王贻荪. 土工合成材料加筋边坡稳定性分析中的模量因素[J]. 岩土工程学报,2004,26(6):787-791. (Yu Zehong,Zou Yinsheng,Wang Yisun. Influence of modulus of soil and reinforcement on stability analysis of slopes reinforced with geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(6):787-791. (in Chinese))

[22] 介玉新,秦晓艳,金鑫,等. 加筋高边坡的稳定分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(4):660-666. (Jie Yuxin,Qin Xiaoyan,Jin Xin,et al. Stability of high reinforced soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(4):660-666. (in Chinese))

[23] 王宗建,陈博,姚云,等. 局部加筋式路堤的载荷试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(8):106-113. (Wang Zongjian,Chen Bo,Yao Yun, et al. Loading test of locally reinforced embankment[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2021,40(8):106-113. (in Chinese))

[24] 姚云. 局部加筋路堤的抗震性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.

[25] Cuelho V E,Perkins W S,Collins M B. Validation of the deep patch embankment repair design method using a large-scale centrifuge[J]. Transportation Research Record,2018,2672(52):142-151.

[26] Yang Yinzun,Jin Dalong,Yuan Dajun,et al. Spatial distribution of excess pore water pressure and slurry infiltration zone in slurry shield tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2024,153:105965.

[27] Pang Huanping,Nie Xiupeng,Sun Zhibin,et al. Upper bound analysis of 3d-reinforced slope stability subjected to pore-water pressure[J]. International Journal of Geomechanics,2020,20(4):06020002.

[28] Michalowski R L. Stability of uniformly reinforced slopes[J]. Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering,1997,123(6):546-556.

[29] 徐卫亚,陈世壮,张贵科,等. 基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):52-59. (Xu Weiya,Chen Shizhuang,Zhang Guike, et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(5):52-59. (in Chinese))

[30] Zornberg J G,Sitar N,Mitchell J K. Limit equilibrium as basis for design of geosynthetic reinforced slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1998,124(8):684-698.