

DOI: 10.11779/CJGE2016S2037

矩形骨架防护路基边坡浅层稳定性及优化设计

连继峰^{1, 2}, 罗强^{*1, 2}, 蒋良淮^{1, 2}, 谢涛^{1, 2}, 于曰明^{1, 2}

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 为掌握骨架防护结构对路基边坡浅层土体稳定性, 基于无限长斜坡浅层顺坡平面失稳模式, 开展了矩形横、竖骨架与浅层滑动土体相互作用分析, 讨论了骨架框内土体的破坏模式及相应判别方法, 构建了以工程造价为目标函数的结构优化模型。分析表明: 边坡浅层土体存在沿骨架底部剪切滑动、横骨架挡土被动破坏的两种模式, 且模式转换阈值 l_{sp} 主要受土体强度、骨架和边坡几何参数影响; 边坡浅层稳定安全系数随骨架宽度和厚度的增大分别呈现线性和指数型增加的规律, 而随骨架横、竖净距增大均呈现幂函数型降低的规律; $l_v=l_{sp}$ 是在边坡浅层稳定性为约束条件下的矩形骨架最优竖向净距, 最优横向净距主要受施工费在总造价中所占权重的影响, 并随每延米施工费所占比率的增加而增大。

关键词: 矩形骨架; 边坡防护; 破坏模式; 浅层稳定性; 结构优化

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0228-06

作者简介: 连继峰(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事路基工程方面研究。E-mail: 453368452@qq.com。

Shallow stability of subgrade slopes protected by rectangular frame structures and structural optimization

LIAN Ji-feng^{1, 2}, LUO Qiang^{1, 2}, JIANG Liang-wei^{1, 2}, XIE Tao^{1, 2}, YU Yue-ming^{1, 2}

(1. Dept of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. MOE Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to understand the influences of frame protection structures on shallow stability of subgrade soil slopes, based on the infinite slope shallow translational slip, the mechanical effects induced by horizontal and vertical frame structures on shallow slope sliding was analyzed and investigated. The failure modes between frame structures and the determination method for their threshold are established. An optimization mode is proposed. It is indicated that there are two modes, shear sliding along the bottom of frame structures and passive earth pressure failure mode due to retaining effect of horizontal frame structures, and the threshold of modes, l_{sp} , is mainly affected by the soil property, shear strength index and the slope geometric parameters. The factor of safety for slope shallow stability increases linearly and exponentially with the increasing width and thickness of structures, respectively, and decreases with the increasing clear distances between structures. $l_v=l_{sp}$ is the optimal vertical distance under the constant factor of safety for the slopes. The optimal vertical clear distance may be determined reasonably by the ratios of the construction cost to the total cost, and increases with the increasing percentage of construction fee per meter.

Key words: rectangular frame structure; slope protection; failure mode; shallow stability; structural optimization

0 引言

骨架防护结构是用浆砌片石或混凝土等圬工材料经人工构筑而成的具有一定窗格式几何形状和尺寸的空间结构, 主要有矩形、菱形、人字形和拱形等护坡型式。目前路基土质边坡常用防护措施主要是植物防护、工程防护以及二者相结合的综合防护措施, 其中, 植物防护主要通过根系固土和枝叶遮挡等作用防止雨水对坡面的冲蚀破坏^[1], 而骨架结构防护目的则主要是防止因雨水下渗软化土体致使边坡发生浅层溜

坍^[2]。虽然骨架防护结构广泛用于公路、铁路路基土质边坡, 但大都是基于经验的构造设计^[3], 且防护效果也多是经现场观察作出的定性评价^[4]。

骨架防护下边坡浅层稳定性影响分析的前提是确立边坡浅层稳定分析方法。传统的边坡稳定分析方法

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB036204); 国家自然科学基金项目(51408491)

收稿日期: 2016-05-19

***通讯作者:** (E-mail: lqrock@swjtu.cn)

均是基于圆弧滑面假定的刚体极限平衡法^[5-6], 对于均质边坡整体深层稳定分析方面应用广泛, 但难以适用受雨水软化作用形成显著差异土层界面的土质边坡浅层稳定分析^[7]。文献[8]指出对于土粒间受吸着水作用、化学胶结作用, 或受毛细水作用较为明显的粉土、粉质粘土和黏土等细粒土填筑的路基土质边坡浅层土体, 常年经受反复干湿循环作用, 其干密度由深层向浅层减小, 雨水浸润后边坡浅层形成显著强度差异土层界面。文献[9]对降雨后路基土质边坡失稳现场调查显示, 滑动深度相对较浅 (0.5~1.5 m), 且滑动面基本平行于原坡面。目前国内外经典的边坡浅层稳定性方法, 是基于“顺坡平面”破坏模式假定的无限长斜坡浅层稳定分析方法^[10-13]。然而在骨架结构防护下, 对于骨架构件与路基土质边坡浅层土体之间相互力学关系及骨架结构设计优化等方面的研究较少。

为此, 基于无限长斜坡浅层“顺坡平面”破坏模式, 分析矩形骨架对边坡浅层土体加固机制并构建能综合反映边坡浅层稳定性及骨架结构强度等因素的结构优化设计模型。研究可为其它型式的骨架防护结构设计提供理论参考。

1 土质边坡浅层稳定分析方法

1.1 无限长斜坡浅层稳定分析方法

因对坡度为 α 的边坡浅层滑动时坡长 $L \gg z_w$, 可近似认为是无限长斜坡失稳^[11], 对雨水软化深度 z_w 处任意长度为 L_v 的土条进行隔离体受力分析, 如图1所示, 土条两侧受大小相等、方向相反的土压力 E_l 和 E_r , 故忽略不计, 因此, 土条自重 W 在滑面上产生的下滑分力为 $T = W \sin \alpha$, 由土的抗剪强度产生的抗滑力为 R , 由此, 采用总应力法可得无限斜坡稳定安全系数表达式^[10-12]:

$$f_s = \frac{R}{T} = \frac{c + \gamma z_w \cos^2 \alpha \tan \varphi}{\gamma z_w \cos \alpha \sin \alpha}, \quad (1)$$

式中, γ 为土体重度, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

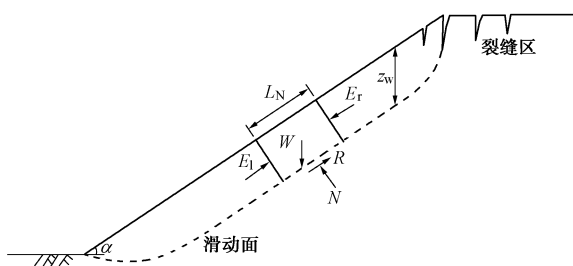


图1 边坡浅层主滑面顺坡向滑动

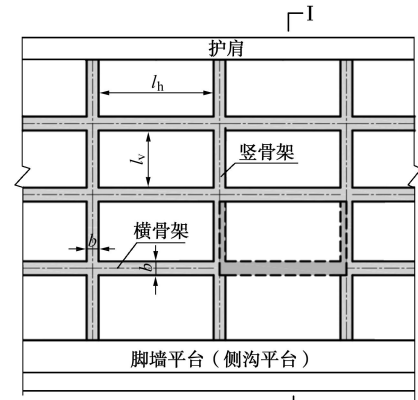
Fig. 1 Model of shallow translational slip

文献[8]指出该稳定分析方法仅以任意长度为 L_v 土条底部“顺坡平面”上产生的剪应力是否达到其抗

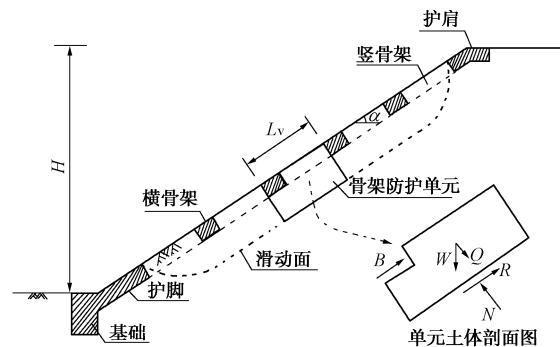
剪强度为判据, 因此称该破坏模式为单位土条“顺坡平面”失稳模式。因浅层失稳通常坡长 $L \gg z_w$, 故忽略滑体上下缘抗滑效应是可接受的^[11]。

1.2 骨架结构对边坡浅层土体的抗力作用

矩形骨架由等截面横、竖骨架组成, 厚度为 h 、宽度为 b , 横向和竖向净距分别为 l_h 、 l_v , 如图2(a)所示。边坡浅层土体假定为“顺坡平面”失稳模式, 取长度为 L_v 的骨架防护单元为分析对象, 如图2(b)所示。



(a) 矩形骨架防护工程平面图及防护单元



(b) I-I剖面及防护单元土体受力

图2 矩形骨架护坡平面及剖面图

Fig. 2 Plane and section of slope protected by rectangular frame

骨架对边坡浅层土体的力学作用主要在横骨架挡土抗力 E (kN/m), 和整个单元骨架自重引起垂直坡面分量对坡体将产生正压力 Q , 而其自重沿顺坡面向下分力由脚墙支撑, 对浅层土体无加固作用; 又因滑体顺坡向下滑动, 仅在顺坡向发生位移, 而垂直方向无相对滑动趋势, 故横骨架侧壁摩擦力约为零, 且骨架与土体接触摩擦作用力相对 E 较小, 为简化分析, 给予忽略。单元土体受力如图2(b)所示。

1.3 骨架框内失稳模式判别

当 h 确定且 $l_v < l_{sp}$ (阈值)时, 骨架框内土体将沿骨架底部的模式I型破坏, 即直接剪切滑动模式; $l_v > l_{sp}$ 时, 因横骨架挡土作用使得其上方土体将达到被动极限状态而发生模式II型破坏, 即挡土被动土压力破坏模式, 如图3所示。 E_I 、 E_{II} 分别为模式I、模

式Ⅱ下横骨架提供的抗力 E ，表达式为

$$E_1 l_h = (c + \gamma h \cos \alpha \tan \varphi) l_h l_v, \quad (2)$$

$$E_{II} l_h = E_p l_h, \quad (3)$$

式中, E_p 为库仑被动土压力, 即

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma (h \cos \alpha)^2 K_p, \quad (4)$$

式中, K_p 为库仑被动土压力系数。

由 $E_1 = E_{II}$ 可得模式 I 与模式 II 转化阈值 $l_v = l_{sp}$ 按式(5)计算, 此时两种模式骨架提供的挡土抗力相等。

$$l_{sp} = \frac{E_p}{c + \gamma h \cos \alpha \tan \varphi}. \quad (5)$$

由式(5)可见, l_{sp} 主要受土体强度、骨架和边坡几何参数影响。对于黏性土, 采用库仑被动土压力计算公式中 φ , 可按照抗剪强度相等原则折算成综合内摩擦角 ϕ , 即^[13]

$$\phi = \arctan \left(\tan \varphi + \frac{1.5c}{\gamma h \cos \alpha} \right). \quad (6)$$

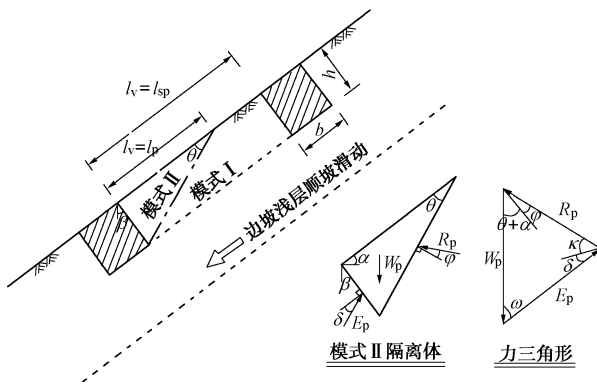


图3 骨架框内土体失稳模式及力三角形

Fig. 3 Failure modes between frames and force triangles

1.4 骨架防护单元土体浅层稳定分析

因库仑土压力理论是在假设墙后土体沿平面滑动的基础建立的, 土压力计算存在一定误差, 尤其是被动土压力 E_p 计算时有文献^[14]指出应慎重考虑, 另一方面横骨架上方土体要达到被动状态需要产生较大位移, 这是一般工程所不允许的, 相关规范^[15]建议对 E_p 进行折减, 因此, 对防护单元土体, 每延米的挡土抗力 p 为

$$p = \psi \frac{E l_h}{l_h + b}, \quad (7)$$

式中, ψ 为抗力折减系数, 一般取 0.3~0.5^[14]。对模式 I 与模式 II 下的 p 分别用 p_I 和 p_{II} 表示。

因此, 结合式(1)可得对于矩形骨架结构防护下边坡浅层稳定安全系数表达式:

$$F_s = \frac{R L_v L_h + V(\gamma_c - \gamma) \cos \alpha \tan \varphi + p(l_h + b)}{T L_v L_h - V \gamma \sin \alpha}, \quad (8)$$

式中, $V = l_h b h + (l_v + b) b h$ 为横骨架与竖骨架体积之和; γ_c 为混凝土重度。

2 骨架结构优化

由式(8)可知, 任意单因素 h 或 b 增大或 l_h , l_v 减小都有助于边坡浅层稳定性, 但与此同时单位铺设面积所需圬工量 v_A 也相应增加, 影响到材料费用, 而且单位铺设面积轴线长 l_A 在一定程度上反映施工难易程度, 进而影响工程造价。因此在保证边坡浅层稳定性及骨架结构强度的情况下, 寻求变量(l_h , l_v , h , b)在变化时使得单位铺设面积下矩形骨架防护工程总造价 M_A 最低是骨架结构优化设计的目标。

(1) 结构设计目标函数 M_A

$$M_A = M_v + M_l, \quad (9)$$

式中, $M_v = v_A C_v$, $M_l = l_A C_l$, 分别为材料费和施工费; C_v 为圬工材料单价; C_l 为每延米人机费, 令 $\xi_v = l_v / b$, $\xi_h = l_h / b$, 则 v_A 与 l_A 分别

$$v_A = \frac{V}{A} = \frac{(\xi_v + \xi_h + 1)h}{(\xi_v + 1)(\xi_h + 1)}, \quad (10)$$

$$l_A = \frac{(\xi_v + 1) + (\xi_h + 1)}{(\xi_v + 1)(\xi_h + 1)}. \quad (11)$$

(2) 骨架结构强度要求

对于骨架结构施工采用预制拼装或整体现浇, 可将骨架受力模式分别简化为受均布荷载 E 作用的简支梁或两端固定结构。因横骨架的最大弯拉正应力 σ_{\max} 不得超过其允许弯拉正应力 $[\sigma_1]$ ^[16], 即

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq [\sigma_1], \quad (12)$$

式中, W_z 为弯曲截面系数。

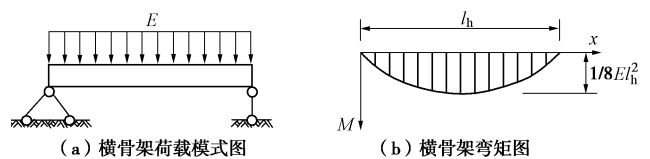


图4 横骨架荷载作用模式及弯矩图

Fig. 4 Transverse loading mode

若按简支梁结构(偏于安全, 如图4所示)进行校核横骨架跨中弯拉强度, 由式(12)得横骨架结构几何尺寸须满足

$$g(l_h, l_v, b, h) = \frac{3}{4} \frac{E l_h^2}{b^2 h} - [\sigma_1] \leq 0. \quad (13)$$

可见, 以材料费与施工费之和的综合费用最低为目标, 边坡浅层稳定性和骨架强度为约束条件, 构造该优化问题的数学模型为

$$\begin{cases} \min & M_A(l_h, l_v, b, h) \\ \text{s.t.} & F_s(l_h, l_v, b, h) = D \\ & g(l_h, l_v, b, h) \leq 0 \end{cases}, \quad (14)$$

式中, D 为边坡稳定安全系数 F_s 取的某一固定值, 相关规范^[17]取 1.25。

3 算例分析

3.1 骨架防护下边坡浅层稳定性分析

对宝中铁路压实黄土路基经降雨作用后浅层溜坍工点的边坡土体进行测试, 得出相关物性指标如表 1 所列^[19]。滑动深度 z_w 大都小于 1.5 m, 研究取 $z_w=1.5$ m; 坡比为 1 : 1.5。根据规范^[15] 取摩擦系数 $\mu=0.35$; 混凝土重度 $\gamma_c=25$ kN/m³; 综合内摩擦角 ϕ 按深度 $z_w=1.5$ m 内土体抗剪强度相等确定, 由式 (6) 得 $\phi=36^\circ$ 。

表 1 土的相关物性指标

Table 1 Physical indices of soils

| 颗粒相对密度 G_s | 含水量 $w/\%$ | 重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 塑性指数 $I_p/\%$ | 压实系数 K | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\circ)$ |
|--------------|------------|---|---------------|----------|--------------------|------------------------|
| 2.70 | 19(32) | 16.9(19.0) | 7.0 | 0.82 | 26.7(9.4) | 21.8(7.7) |

注: 括号内外数据分别代表天然和饱和状态。

通常厚度 h 和宽度 b 为 0.4 m 左右, 骨架净距在 2~3 m^[3], 因此, 在 $l_h=l_v=2.5$ m 恒定条件下, 考察在 h, b 等单因素对 F_s 的影响规律, 如图 5 (a) 所示。

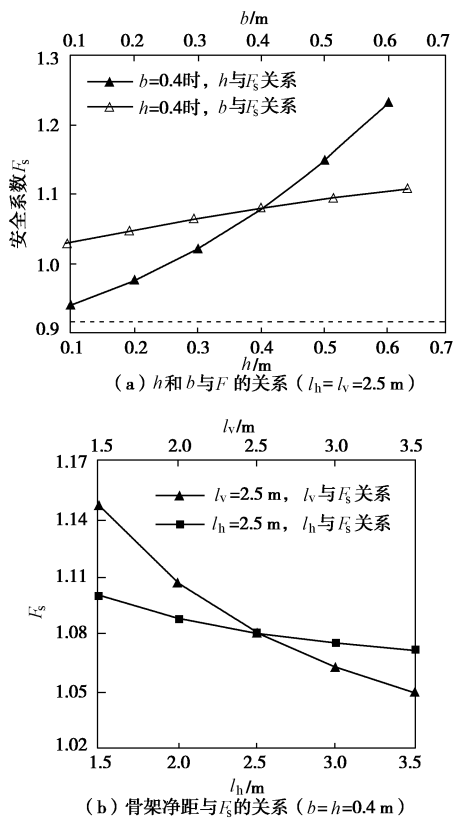


图 5 骨架几何参数与 F_s 的关系
Fig. 5 Relationship between geometric parameters and F_s

可见, 当 $h=0.4$ m 时, F_s 随 b 的增加呈现平缓线性增加的规律, 而当 $b=0.4$ m 时, F_s 随 h 的增加呈现指数型增加的趋势。在 $b=h=0.4$ m 恒定条件下, 骨架越密, 即随着净距 l_h 或 l_v 减小 F_s 均呈现幂函数型增加的规律, 如图 5 (b) 所示。可见, F_s 随 h 的增加或 l_h 的降低较无防护下提高程度较为明显。

3.2 骨架结构优化分析

(1) 确定最优竖向净距 l_v^*

安全系数 F_s 参照相应规范^[17]按 1.25 控制。由图 6 可知, 当 $l_v>l_{sp}$ 时, 处于模式 II 下, 因 l_v 增加后要保证 F_s 不变的条件下, 须大幅增加 b 以提高骨架压重, 此时 v_A 随 l_v 呈现图中所示的抛物线型增加的趋势; 当 $l_v\leq l_{sp}$ 时, l_v 减小, 因保持 F_s 恒定, 使得 b 也相应减小, 而比值 ζ_v 和 ζ_h 却分别减小和增加以至于 v_A 不变, 但 l_A 随 l_v 减小呈现增加的规律, 骨架竖向越密即 l_v 越小, l_A 越大, 则越费时费力, 越不易施工。可见, $l_v^*=l_{sp}$ 是边坡浅层稳定性为约束条件下, v_A 最小对应轴线长 (周长)最短的骨架竖向布置净距, 即为最优竖向净距。

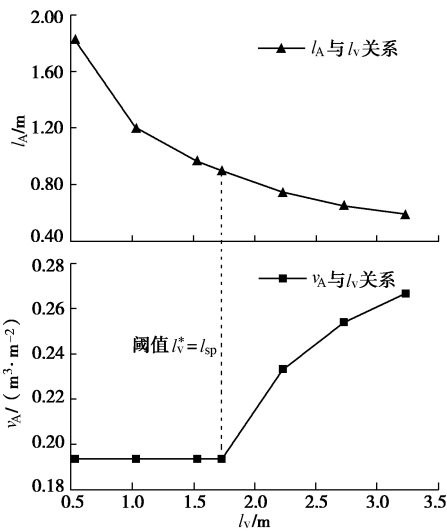


图 6 v_A 和 l_A 与 l_v 的关系 ($F_s=1.25$ m)
Fig. 6 Relationship among v_A or l_A and l_v ($F_s=1.25$ m)

(2) 确定骨架截面最优参数 b^* 和 h^*

表 2 中列出了对于 l_h 在 1~6 m 时, 考虑结构允许强度及边坡浅层土体安全系数的优化设计中计算结果, 图 7 中仅给出了 l_h 为 3 m 和 5 m 下优化设计中骨架几何参数变化规律。根据规范^[17]采用允许应力法, C25 标号混凝土, 允许弯拉应力 $[\sigma_1]=0.5$ MPa。由图 7 可知, 在 h 随 b 的减小逐渐增加的同时 v_A 却逐渐降低, 当 h 逐渐增加至 0.57 和 0.53 时, 相应横骨架结构允许弯拉应力达到其自身允许弯拉强度, 此时 v_A 达到极小值 v_{Amin} 分别为 0.15 和 0.17。

由表 2 可知, l_h 越小, 单位防护面积所需圬工量极小值 v_{Amin} 越少, 原因在于当骨架结构允许弯拉应力

不变, l_h 减小时, 即横骨架跨径减小, 使得跨中弯拉应力减小, 进而可进一步减小宽度 b^* 增加厚度 h^* 使得安全系数得到保证, 与此同时 v_{Amin} 却降低。

表 2 结构几何尺寸优化结果

| Table 2 Results of structural optimal design | | | | |
|--|------------------|---------|---------|-------------------------------|
| l_h/m | $l_v^*=l_{sp}/m$ | b^*/m | h^*/m | $v_{Amin}/(m^3 \cdot m^{-2})$ |
| 1.00 | 2.18 | 0.13 | 0.63 | 0.11 |
| 2.00 | 2.06 | 0.27 | 0.60 | 0.13 |
| 3.00 | 1.96 | 0.38 | 0.57 | 0.15 |
| 4.00 | 1.89 | 0.50 | 0.55 | 0.16 |
| 5.00 | 1.82 | 0.61 | 0.53 | 0.17 |
| 6.00 | 1.76 | 0.73 | 0.51 | 0.19 |

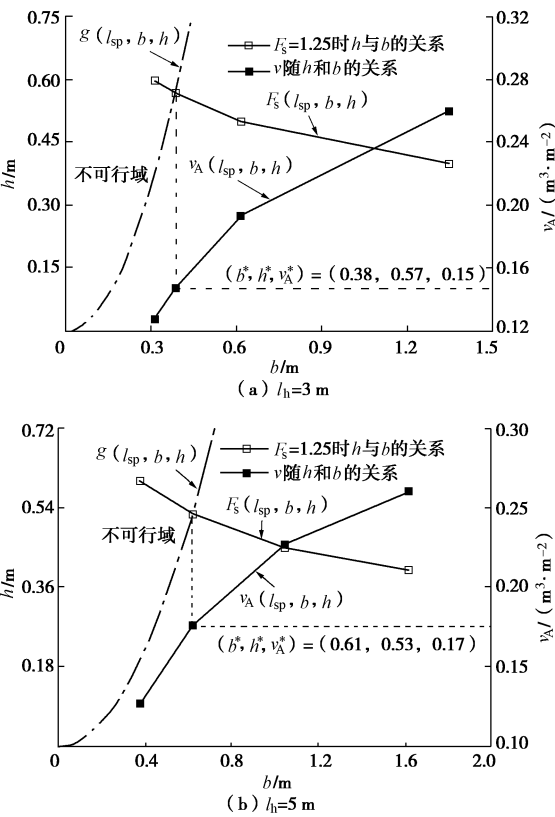


图 7 骨架结构优化

Fig. 7 Optimization of frame structures

(3) 确定最优横向净距 l_h^*

虽骨架横向布置越密, 材料用量越省, 但施工费时费力, 因此将表 2 中参数优化结果代入式 (11) 考察骨架防护单元的材料成本 M_v 、施工费 M_l 和总造价 M_A 与 l_h 的关系曲线如图 8 所示 (对于标号为 C25 混凝土, C_v 取 200 元/ m^3 ; 比率系数 $\eta = C_l/C_v$)。可见, M_A 最低值 $\min(M_A)$ 对应的驻点 l_h^* 随 η 增加逐渐增大, 即每延米施工费 C_l 越高, 骨架布置越疏越经济, 反之亦然。对于圬工材料, 施工构造要求, 截面尺寸不宜低于 0.3 m, 否则施工质量难以保证。 $\eta=10\%$ 时, 目标函数 M_A 存在驻值点, 最优设计参数 $(l_h^*, l_v^*, b^*, h^*)=$

(2.20, 2.00, 0.30, 0.55), 此时截面尺寸均大于 0.3 m; 当 $\eta=30\%$, 最优设计参数 l_h^* 在 5 m 边界处取得, M_A 存在极值点, 但无驻点, 原因在于比率系数 η 增大以至于 C_l 太高, 故在 l_h 小于 5 m 范围内, 施工费用已占据总造价的主导地位, 如图 8 (d) 所示。通常, 合理的最优解应是约束条件相互制约下目标函数的驻点, 因此, l_h^* 合理值可根据比率 η 建立的目标函数驻点确定。

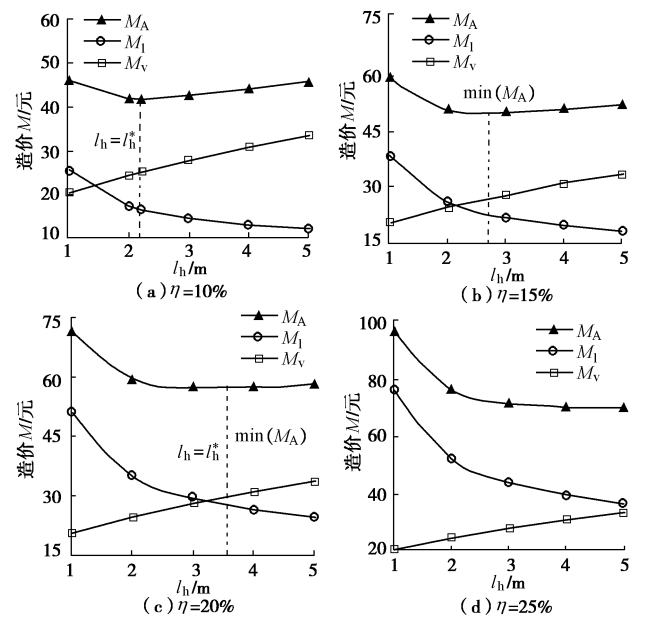


图 8 不同 η 下, l_h 与造价 M 关系

Fig. 8 Relationship between M and l_h under different values of η

4 结 论

通过对矩形骨架防护路基边坡浅层稳定性及结构优化研究, 得出以下 3 点结论。

(1) 边坡浅层土体存在沿骨架底部剪切滑动、横骨架挡土被动破坏的两种模式, 对应的以骨架竖向净距表达的模式转换阈值 l_{sp} 主要受土体强度、骨架和边坡几何参数影响。

(2) 矩形骨架防护下路基土质边坡浅层稳定安全系数 F_s 随骨架宽度和厚度的增加分别呈现线性和指数型增加的规律; F_s 随骨架净距减小均呈现幂函数型增大的规律。

(3) 以材料费与施工费之和的总造价最低为目标, 边坡浅层稳定性和骨架强度为约束条件的结构优化分析表明, 矩形骨架的最佳竖向净距为两种模式转换阈值 l_{sp} ; 合理横向净距主要受施工费在综合费中所占权重的影响, 并随比率系数 η 的增加而增大。

参考文献:

[1] 侍 倩. 植被对斜坡土体土力学参数影响的试验研究[J].

- 岩土力学, 2005, **26**(12): 2027 - 2030. (SHI Qian. Test research on influence of vegetation on mechanical parameters of soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(12): 2027 - 2030. (in Chinese))
- [2] 李妥德, 郑黎明, 韩会增, 等. 汛期土质边坡塌方灾害的预测和预防[J]. 中国铁道科学, 1993(14): 108 - 118. (LI Tuo-de, ZHENG Li-ming, HAN Hui-zeng, et al. Prediction and prevention of disastrous slump of slope in flood season[J]. China Railway Science, 1993(14): 108 - 118. (in Chinese))
- [3] 中铁第二勘察设计院集团有限公司. 铁路路基边坡防护(一般地区)[R]. 北京: 铁道部经济规划研究院, 2014. (China Railway Eryuan Engineer Group Co. Ltd. Slope protection of railway subgrade (usual region)[R]. Beijing: China Railway Economic and Planning Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [4] 程 淦. 拼装式骨架护坡在青藏铁路路基边坡防护中的应用[J]. 路基工程, 2003(6): 61 - 63. (CHENG Song. Assembled skeleton slope protection in Qinghai-Tibet Railway subgrade slope protection applications[J]. Subgrade Engineering, 2003(6): 61 - 63. (in Chinese))
- [5] FELLENIUS W. Calculation of the stability of earth slope. transactions congress on large dams[C]// Washington D.C, 1936: 445 - 462.
- [6] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Géotechnique, 1955, **5**: 7 - 17.
- [7] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2001, **22**(4): 447 - 450. (CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Analysis of slope stability of unsaturated soil due to permeation of rainwater[J]. Soil and Mechanics, 2001, **22**(4): 447 - 450. (in Chinese))
- [8] 连继峰, 罗 强, 蒋良淮, 等. 雨水软化下路基土质边坡浅层稳定分析[J]. 铁道学报, 2016, (待刊). (LIAN Ji-feng, LUO Qiang, JIANG Liang-wei, et al. Stability analysis of shallow soil slope under the effect of wetting and softening by rainfall[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, (accepted). (in Chinese))
- [9] 钟 涛, 孙远明, 彭良平, 等. 成渝线边坡溜坍的概略预报研究[J]. 路基工程, 1994(1): 10 - 14. (ZHONG Tao, SUN Yuan-ping, PENG Liang-Ping, et al. Study on prediction of slope slip collapse in Cheng-Yu line[J]. Subgrade Engineering, 1994(1): 10 - 14. (in Chinese))
- [10] DAY R W. Design and repair for surficial slope failures[M]// Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1996: 83 - 87.
- [11] TAYLOR D W. Fundamental of soil mechanics[M]. New York, John Wiley and Sons, 1948.
- [12] 柯尊敬, 常运煌. 膨胀土路堤边坡的稳定坡度[J]. 路基工程, 1988(2): 3 - 12. (KE Zun-jing, CHANG Yun-huang. Stable slope degree of expensive soil subgrade[J]. Subgrade Engineering, 1988(2): 3 - 12. (in Chinese))
- [13] 梁 波. 回填土综合内摩擦角 ψ_0 方法的可靠性研究[J]. 兰州铁道学院学报, 1996, **15**(2): 6 - 12. (LIANG Bo. Reliability research on method of multiple angle of internal friction ψ_0 of simple braced structure in backfill[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 1996, **15**(2): 6 - 12. (in Chinese))
- [14] 王成华. 土力学原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002. (WANG Cheng-hua. Principle of soil mechanics[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. (in Chinese))
- [15] TB10025—2006 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 2006. (TB10025—2006 Code for design on retaining structures of railway subgrade[S]. 2006. (in Chinese))
- [16] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (SUN Xun-fang, FANG Xiao-shu, GUAN Lai-tai. Materials mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))
- [17] TB10001—2005 铁路路基设计规范[S]. 2005. (TB10001—2005 Code for design on subgrade of railway[S]. 2005. (in Chinese))
- [18] 杨有海, 夏 琼. 降雨对黄土路堤边坡浅层稳定性影响的研究[J]. 兰州交通大学学报(自然科学版), 2004, **23**(3): 98 - 101. (YANG You-hai, XIA Qiong. Study on rainfall infiltration effect on loess embankment slope shallow stability[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University(Nature Sciences), 2004, **23**(3): 98 - 101. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)