

基于宽窄平台相结合的黄土高边坡优化设计

南宁 李鹏 苏生瑞 董福 马驰

引用本文:

南宁, 李鹏, 苏生瑞, 等. 基于宽窄平台相结合的黄土高边坡优化设计[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 155–164.

NAN Ning, LI Peng, SU Shengrui, et al. Optimization design of high loess slope based on combination of wide and narrow platform: A case study of an industrial square in Zichang City[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(6): 155–164.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.10.0566>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玛尔挡改线公路高边坡稳定性分析及生态治理

Stability analysis and ecological management of the Maerdang highway slope

煤田地质与勘探. 2017, 45(4): 94–96,101 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.04.016>

基于集对云模型的边坡稳定性评价

Slope stability evaluation based on set pair cloud model

煤田地质与勘探. 2019, 47(1): 162–167 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.01.025>

青岛崂山路拓宽工程边坡加固稳定性研究

Stability analysis of slope reinforcement of the broadening project of Laoshan road in Qingdao

煤田地质与勘探. 2017, 45(2): 101–104,111 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.02.018>

高填方对红黏土地基力学性质影响及坡体稳定性

Study on slope stability and the effect of highfill on the mechanical properties of red clay foundation

煤田地质与勘探. 2019, 47(4): 131–137 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.020>

露天煤矿冻结岩土边坡介质特征与稳定性分析

Medium characteristics and stability of frozen rock (soil) slope in open-pit coal mine

煤田地质与勘探. 2018, 46(3): 104–112 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.03.018>

格宾网加筋煤矸石界面剪切特性及路堤边坡稳定性研究

Interfacial shear behavior of gabion reinforced coal gangue and stability of embankment slope

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 186–192, 199 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.022>



移动阅读

南宁,李鹏,苏生瑞,等. 基于宽窄平台相结合的黄土高边坡优化设计——以陕西省子长市某工业广场高边坡为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 155–164. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.10.0566

NAN Ning, LI Peng, SU Shengrui, et al. Optimization design of high loess slope based on combination of wide and narrow platform: A case study of an industrial square in Zichang City[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 155–164. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.10.0566

基于宽窄平台相结合的黄土高边坡优化设计

——以陕西省子长市某工业广场高边坡为例

南 宁¹, 李 鹏¹, 苏生瑞¹, 董 福¹, 马 驰²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
2. 中煤西安设计工程有限责任公司岩土所, 陕西 西安 710054)

摘要: 山区或丘陵地带建设煤矿工业广场时将面临高边坡问题, 不合理的高边坡设计严重浪费土地资源, 造成环境破坏和投资增加, 也为基础设施带来巨大安全隐患。基于此, 以陕西省子长市某煤矿工业广场高边坡为例, 借助现场调查、理论分析和数值模拟等手段, 综合考虑边坡抗冲刷性和整体稳定性, 探讨不同数量、位置和宽度的宽平台对高边坡的应力、应变场和稳定性系数的影响规律, 结合模型的开挖量, 选取满足稳定性要求且开挖量最少的最优坡形。结果显示: 陕北地区粉黄土高边坡最优单坡坡率为 1:0.75, 坡高 5~6 m; 宽平台能改变潜在滑移面位置, 当宽平台位于坡脚或坡顶时, 潜在滑移面分布以宽平台位置为界, 分布于宽平台以上或以下边坡; 当宽平台连续分布且宽度较大时, 高边坡可视为 2 个独立边坡来分析计算; 高边坡最优坡形为: 30 m 高边坡单坡高 5 m、坡率 1:0.75, 窄平台宽度 3 m, 布置 2 个宽平台、位置③⑤、宽度 10 m; 50 m 高边坡单坡高 5 m、坡率 1:0.75, 窄平台宽度 3 m, 布置 4 个宽平台、位置③⑤⑧⑨、宽度 14 m。宽窄平台优化组合方式可为陕北地区粉黄土高边坡设计和防护工作提供理论依据和实际指导。

关 键 词: 高边坡; 粉黄土; 宽窄平台; 优化设计; 抗冲刷; 稳定性

中图分类号: TD22; P642.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)06-0155-10

Optimization design of high loess slope based on combination of wide and narrow platform: A case study of an industrial square in Zichang City

NAN Ning¹, LI Peng¹, SU Shengrui¹, DONG Fu¹, MA Chi²

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. Geotechnical Institute of China Coal Xi'an Design and Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The construction of a coal mine industrial square in a mountainous area or hilly area will face the problem of high slopes. The unreasonable high slope design causes serious waste of land resources, environmental damage and an increase in investment, and also brings huge potential safety risks to the infrastructure. Based on this, with a high slope in a coal mine industrial square in Zichang City of Shaanxi Province as an example, the field investigation, theoretical analysis and numerical simulation were used to investigate the influence of different numbers, positions and widths of wide platforms on the stress, strain field and stability coefficient of high slopes in view of the erosion resistance and the overall stability of the slope. Combined with the excavation amount of the model, the optimal slope shape that meet the stability requirements and had the least excavation amount was obtained. The results show that the optimal single slope ratio of high slopes of powdered loess in northern Shaanxi is 1:0.75, and the slope height is 5-6 m. The wide platform

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2022-01-14

基金项目: 中国中煤能源集团有限公司科技创新项目(JT-BAKJ-2018-002); 中央高校基本科研业务费资助项目(300102261402); 甘肃省自然资源厅 2020 年度中央财政自然灾害防治体系建设补助资金计划项目(甘资财发〔2020〕16 号)

第一作者: 南宁, 1997 年生, 男, 陕西子长人, 硕士研究生, 从事地质灾害防治研究. E-mail: 983314524@qq.com

通信作者: 苏生瑞, 1963 年生, 男, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事地质灾害防治等研究. E-mail: shengruisu@163.com

could change the position of the potential slip surface. When the wide platform is located at the toe or top of the slope, the distribution of potential slip surfaces is bounded by the position of the wide platform, and is distributed on the slope above or below the wide platform. When the wide platform of great width is continuously distributed, the high slope can be regarded as two independent slopes for analysis and calculation. The optimal slope shape of the high slope is featured by a 30 m high slope with a single slope height of 5 m and a slope ratio of 1 : 0.75, a narrow platform of 3 m wide, and two wide platforms with a width of 10 m at location ③⑤; a 50 m high slope with a single slope height of 5 m and a slope ratio of 1 : 0.75, a narrow platform of 3 m wide, and four wide platforms with a width of 14 m at location ③⑤⑧⑨. The optimal combination of wide and narrow platforms provides a theoretical basis and practical guidance for the design and protection of high slopes of powdered loess in northern Shaanxi.

Keywords: high slope; powdered loess; wide and narrow platform; optimization design; slope erosion resistance; stability

近年来,持续加剧的人类工程活动和有限的土地资源之间的矛盾越来越突出,特别是山区和丘陵沟壑区,人们试图通过改变地形地貌来满足工程建设的需求,产生了大量的人工边坡。由于理论水平和施工技术的提高,高度大于20 m甚至超过百米的高边坡广泛分布于公路、铁路和矿山基础设施等建设中,导致高边坡问题日益突出^[1]。此外,陕北属于典型的黄土高原,黄土以粉黄土和沙黄土为主,其中粉黄土的力学特性和边坡的变形破坏模式都不同于常规黏性土边坡。众多研究结果显示^[2-4],黄土边坡变形破坏类型包括滑坡、坡面冲刷、崩塌、滑塌等,调查结果显示,坡面冲刷和滑坡是陕北粉黄土边坡最主要的边坡变形破坏模式。常见的陕北高边坡设计采用“等距阶状坡”和“宽窄平台坡”的坡形,大量工程实践表明,“宽窄平台坡”的防治效果更好,但其坡面冲刷和整体稳定性问题仍然显著,存在巨大安全隐患。同时,不合理的设计会导致开挖工程量增大,浪费土地资源。目前,边坡优化设计已经取得了较多成果,巨能攀等^[5]依托皖南山区汤屯高速公路,提出一套操作性强的公路高边坡优化设计研究方法;许宇明^[6]利用FLAC^{3D}对某边坡进行稳定性分析,提出适合边坡的最优设计方案;叶万军^[7]对黄土高边坡进行可靠性分析,建立了黄土高边坡的优化模型;辛立光等^[8]提出了基于概率充分因子的高效土质边坡可靠度优化设计方法;张宏伟等^[9]提出了运用基于刚度的拓扑优化方法对边坡进行优化设计;叶万军等^[10]通过坡面冲刷试验建立了基于坡面稳定的黄土路堑高边坡优化设计模型。胡斌^[11]、宋志飞^[12]等通过优化边坡角进行了边坡优化设计。

但现有研究中,对“宽窄平台坡”的优化设计研究仍较缺乏,当前陕北地区“宽窄平台坡”主要是基于工程经验和工程类比等方法,没有系统的设计理论和依据。因此,笔者以陕西子长市2处煤矿工业广场高边坡为例,系统地进行宽窄平台相结合的高边坡优化设计研究,以期为陕北粉黄土高边坡的设计提供一定的理论依据和实际指导。

1 研究区概况与边坡调查

研究区位于陕西省子长市,属典型的半干旱大陆季风性气候,春冬气候干燥、降水量少,昼夜温差较大;秋夏干旱雨涝交替出现。降雨随季节变化明显,主要集中在7—9月份,多以集中暴雨或持续性降雨的形式出现。区内梁峁纵横,黄土广泛分布,其土质疏松、多孔、无层理、垂直裂隙发育,湿陷性较强,在暴雨及持续性降雨的影响下,易发生坡面冲刷,甚至引发滑坡等地质灾害^[13]。

研究区内人类工程活动强烈。受丘陵和河谷等地貌及地势限制,工程建设形成大量人工开挖高边坡,不同边坡的破坏模式、平台形式及防护措施等不同,调查结果见表1。

所有高边坡均进行分级削坡,多数采用“等距阶状坡”,仅志丹旅游专线高边坡采用“宽窄平台坡”(表1中4号)。“宽窄平台坡”在稳定性方面有很大优势,该边坡未发生规模较大的变形破坏,为重要工程建设提供了借鉴。然而,无论是“等距阶状坡”还是“宽窄平台坡”,在没有坡面防护工程的条件下,均存在较严重的坡面冲刷现象。另外,若“宽窄平台坡”设置的宽平台宽度过大,会使削方量巨大,增加不必要的治理费用。因此,有必要对影响高边坡坡面冲刷和稳定性的因素进行优化。

2 边坡概况

本文研究了位于子长市城西南15 km位置处的2个边坡,一处边坡坡高约50 m,十级削坡,每级坡高约5 m,坡率约1:0.6,每级坡间有宽约3 m的平台,未设置截排水(表1中2号);另一处坡高约30 m,三级削坡,自下而上坡高分别约为7、13、10 m,坡率约1:0.5,平台宽约2.5 m,未设置截排水(表1中1号)。

高边坡主要由第四系上更新统黄土构成,其物理力学指标由室内土工试验测定,基本物理力学指标见表2,粒径累计级配曲线如图1所示。其中,黏粒、粉粒、沙粒的质量分数分别为8.02%、81.55%、10.43%,

表1 高边坡野外调查情况
Table 1 Field survey of high slopes

序号	调查边坡	边坡概况	平台形式	破坏模式	防护措施	防护效果	边坡照片
1	禾草沟煤矿 自建高边坡	总坡高30 m; 三级放坡; 平均坡率1:0.5	等距阶状坡	坡面冲刷+ 滑塌	分级削坡	较差	
2	禾草沟煤 矿高边坡	总坡高50 m; 十级放坡; 平均坡率1:0.6	等距阶状坡	坡面冲刷+ 滑塌+剥落	分级削坡	较差	
3	车村煤矿 高边坡	总坡高45 m; 十级放坡; 平均坡率1:0.8	等距阶状坡	局部坡面 冲刷+滑塌	分级削坡+截排水+ 护脚+绿化	良好	
4	志丹旅游专 线高边坡	总坡高108 m; 十八级放坡; 平均坡率1:0.6	宽窄平台坡	坡面冲刷	分级削坡	良好	

表2 研究区土体基本物理性质
Table 2 Basic physical properties of the soils in the study area

土体	含水率 $\omega/\%$	饱和含水率 $\omega_{sat}/\%$	相对密度	容重 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	塑性指数 $I_p/\%$	液性指数 $I_l/\%$	渗透系数 $K/(cm\cdot s^{-1})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$
粉黄土	9.8	32.6	2.69	14.8	8.8	-1.10	4.58×10^{-5}	35	0.3	20.20	24.48

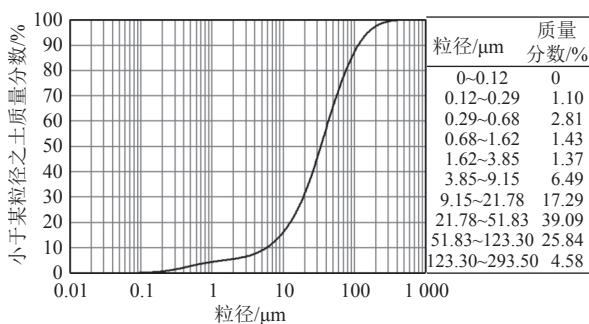


图1 粉黄土粒径累计级配曲线

Fig.1 Accumulated cascade curve of the particle size of the powdered loess

可见,研究区黄土主要颗粒组成为粉粒。

由于黄土特殊的物理力学特性,在冻融、降雨等作用下,高边坡发育多处变形破坏现象。50 m 高边坡主要的破坏类型为坡面冲刷,近乎遍布整个坡面。坡面冲刷形成的小冲沟顺水流方向延伸,边坡中部和上部冲刷深度较浅,水平间距1~3 m,下部冲刷深度较大,水平间距0.2~1.0 m;平台局部冲刷严重,但均顺地势低洼处发育,下切深度较坡面更大,更利于地表水汇集和下渗,促使边坡失稳(图2)。30 m 高边坡在西侧中



图2 粉黄土高边坡坡面冲刷现象(镜向 224°)

Fig.2 Erosion of the high loess slope (mirror direction 224°)

下部坡面处存在明显冲刷现象,并存在一处滑塌。坡面冲刷会影响边坡的稳定性,引发边坡失稳破坏,因此,有必要开展边坡坡面抗冲刷的研究。

3 基于抗冲刷的单级坡优化设计

黄土边坡坡面冲刷影响因素较多^[14],除降雨自然因素外,坡高、坡长、坡率等边坡形态特征也是主要因素。为了研究边坡形态对抗冲刷的影响,以最不利的降雨条件为基础,采用极限平衡法,改变单级坡的坡长,获取最优的抗冲刷单级坡坡率。

3.1 坡面水流入渗分析

坡面土体的入渗选用 Green-Ampt 模型, 其对参数要求较低, 模型物理意义清晰, 计算结果精确^[15-16]。模型表述为:

$$i = k_{s1} \left[1 + (h_0 + h_f) \frac{1}{z_f} \right] \quad (1)$$

式中: i 为入渗率, cm/min ; k_{s1} 为饱和导水率, cm/min ; h_0 为土壤表面积水深度, cm ; h_f 为湿润锋面吸力, cm ; z_f 为概化的湿润锋深度, cm 。当入渗时间比较短时, 式(1)可简化为:

$$i = k_{s1} \left(\frac{h_f}{z_f} \right) \quad (2)$$

参数 k_{s1} 由室内渗透试验获取, 取 $4.58 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, h_f 和 z_f 参考相近土性的现场实验结果^[17-18], 其中 z_f 取 118.3 cm , h_f 取 150.0 cm 。

3.2 坡面土体受力分析

土体单元在坡面上受水流冲刷产生拖曳力 F_D 、上举力 F_L 、渗透力 F_S 等^[19-20]。

根据力的平衡条件, 平行于坡面方向有:

$$F_D + G \sin \theta = \mu (F_S + G \cos \theta - F_L) \quad (3)$$

其中:

$$F_D = 1.9 \pi \rho C_D D^2 \mu^{1/9} [(p - i)L]^{2/9} \sin^{-1/9} \theta \cos^{1/3} \theta d^{2/3} \quad (4)$$

$$F_L = 1.9 \pi \rho C_L D^2 \mu^{1/9} [(p - i)L]^{2/9} \sin^{-1/9} \theta \cos^{1/3} \theta d^{2/3} \quad (5)$$

$$G = (\gamma_s - \gamma_w) \pi D^3 / 6 \quad (6)$$

$$F_S = \gamma_s J_s \pi D^3 / 6 \quad (7)$$

式中: G 为土颗粒重力; ρ 为土颗粒密度; p 为单宽降雨强度; γ_s 、 γ_w 分别为土颗粒饱和容重、水容重; D 为近似圆球土颗粒的直径; d 为沙莫夫公式颗粒直径, 取值同 D ; C_D 、 C_L 分别为阻力系数、上举力系数; θ 为坡度; L 为坡长; μ 为坡面粗糙度; J_s 为土壤中水力梯度。

3.3 参数选取

模型所需土体物理力学参数通过研究区土样室内试验获取; 单宽降雨强度为研究区年降雨量统计所得; 坡面入渗率由入渗分析计算可得。最终受力分析计算参数取值见表 3。

3.4 单级边坡冲刷分析

将下滑力与抗滑力的差值作为衡量坡面土体的抗冲刷平衡状态, 当差值为 0 时, 坡面土体处于极限状态。

$$F_D + G \sin \theta - \mu (F_S + G \cos \theta - F_L) = 0 \quad (8)$$

选择不同坡长计算, 可得相应临界坡度, 计算结果见表 4。分析可知, 随着坡长的增加, 临界坡率值逐渐减小。根据现场调查结果, 研究区边坡单坡高度以 5 m 为主, 结合表 4 中的计算结果, 选取 1:0.75 为该

表 3 坡率设计参数取值

Table 3 Design parameters of the slope ratio

参数	粉黄土取值
单宽降雨强度 p /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	9.3×10^{-7}
坡面入渗率 i /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	3.492×10^{-3}
坡面粗糙度 μ	0.05
土颗粒粒径 D /mm	0.07
土颗粒的饱和容重 γ_s /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	26.9
水密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1
水容重 γ_w /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	10

表 4 粉黄土坡率临界取值

Table 4 Critical values of the slope ratio of the powdered loess

坡长/m	临界坡率	坡高/m
4.5	1:0.63	3.81
5.0	1:0.66	4.17
5.5	1:0.69	4.53
6.0	1:0.72	4.87
6.5	1:0.75	5.20
7.0	1:0.78	5.52
7.5	1:0.80	5.86
8.0	1:0.84	6.13
8.5	1:0.87	6.41
9.0	1:0.90	6.69
9.5	1:0.93	6.96
10.0	1:0.96	7.21
10.5	1:0.99	7.46
11.0	1:1.03	7.66
11.5	1:1.06	7.89
12.0	1:1.10	8.07
12.5	1:1.13	8.28

单坡高度的最优抗冲刷坡率。

4 基于整体稳定的边坡优化设计

单坡坡形是决定边坡抗冲刷的决定性因素, 合理的边坡形态能够大幅降低冲刷破坏。但在实际工程中, 高边坡整体稳定性是边坡设计又一个重要指标。对于煤矿工业高边坡, 坡率法是常见的边坡设计方案, 但由于施工周期、投资和环保等众多因素的限制, 寻求一种既安全又经济的削坡优化方案就显得尤其重要。常见坡率法中将平台设置为一个定值, 一般 3~5 m, 但要求单坡的坡高和坡率小, 抗冲刷性能差且工程量大, 对环境破坏严重。近年来, “宽窄平台坡”的削坡方案越来越得到认可, 但仅以实践经验为设计依据, 优化设计理论欠缺。因此, 本文考虑边坡的抗冲刷性能, 以边坡整体稳定为前提, 借助 MIDAS 软件, 对边坡宽平台

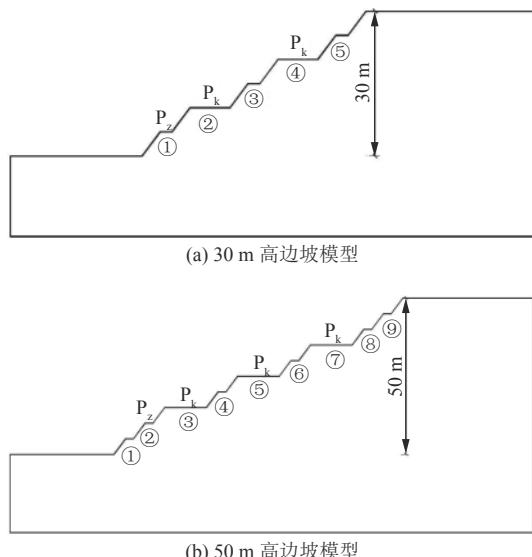
度、位置、数量进行研究。根据 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》,煤炭工业高边坡属于三级边坡,规定安全系数需大于 1.25,因此,在数值模拟分析中以安全系数取 1.25 作为稳定性评价指标。

4.1 基本假设

在建立模型时假设:平面应变状态;岩土体为均匀的弹性各向同性材料;岩土体服从摩尔-库仑破坏准则。

4.2 几何模型

本次研究的高边坡总坡高为 30、50 m,依据现场调研和工程经验,设置模型单坡坡高为 5 m,窄平台 P_z 宽度为 3 m;依据前述基于抗冲刷的单坡坡率研究,设置模型单坡坡率为 1:0.75。宽平台 P_k 宽度取 6~16 m,间隔 2 m;宽平台数量设置 1~4 个;宽平台位置自由组合,从坡脚处依次编号。模型建立如图 3 所示。



①—⑨为平台编号,同时表示平台位置; P_k 为宽平台; P_z 为窄平台
图 3 2 个高边坡平台设计

Fig.3 Platform locations of the two high slopes

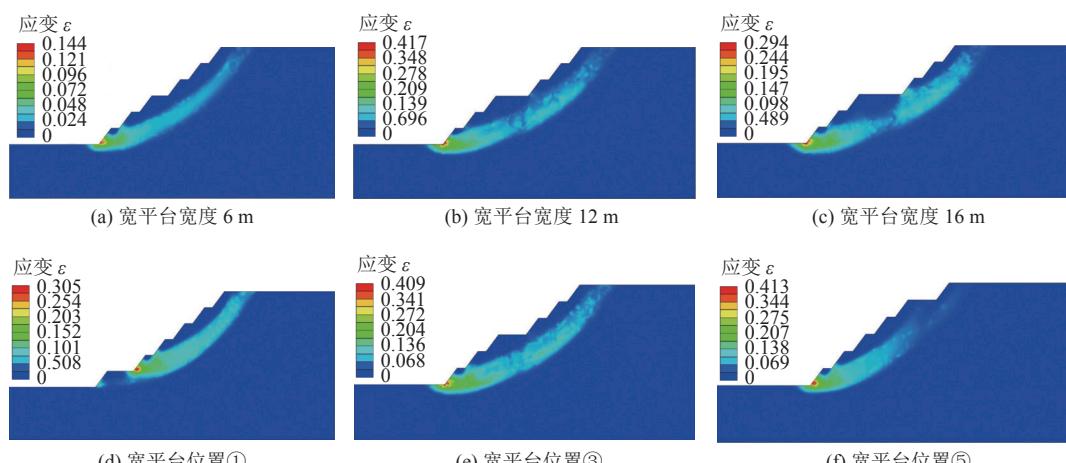


图 4 30 m 高边坡单个宽平台时塑性应变区
Fig.4 Plastic strain area of a single-wide platform of the 30 m high slope

4.3 材料参数与边界条件

模拟参数选取见表 2。

计算时采用强度折减法,分析控制中的收敛条件设置为位移标准 0.001 m。边界条件为下部边界为水平和竖直方向的约束,左右边界为水平约束。采用四边形单元划分网格。计算中对具体模型进行了概化,将每层岩土体视为各向同性材料。分析考虑模型的影响范围,模型延伸尺寸为 X 轴向从坡顶和坡脚向左右两侧延伸 50 m, Y 轴向从坡脚向下延伸 20 m, 坡脚以上至坡顶为实际坡高。

5 模拟结果与分析

5.1 应力应变

5.1.1 30 m 高边坡不同设置工况

1) 1 个宽平台

以宽平台位置③为例,当宽平台宽度分别为 6、12、16 m 时(图 4a—图 4c),随平台宽度的增加,最大有效塑性应变先增加后减小,虽然应变集中区均位于边坡坡脚,但边坡内有效塑性应变区分布逐渐不连续,表明边坡的整体稳定性有所提高。

以宽平台宽度 10 m 为例,将宽平台设置在位置①、③、⑤处(图 4d—图 4f)。当宽平台位置位于①时,有效塑性应变最大值位于宽平台以上的边坡坡脚;当宽平台位于位置⑤时,有效塑性应变集中只在宽平台下方边坡内分布;当宽平台位于位置③时,有效塑性应变区在整个边坡内分布。上述现象表明,当宽平台宽度足够大且位于靠近坡脚和坡顶处时,以宽平台为界,可以将边坡分为 2 个独立的边坡来分析计算。

2) 2 个宽平台

以宽平台位置②④为例,当宽平台宽度分别为 6、12、16 m 时(图 5a—图 5c),随平台宽度的增加,最大有效塑性应变的变化与单宽平台相似,下侧宽平台较

上侧宽平台应变更大,在上边坡的坡角处逐渐出现应变集中现象,边坡整体稳定性提高并在宽度大于 10 m 后基本满足要求。

以宽平台宽度 10 m 为例,将宽平台设置在位置

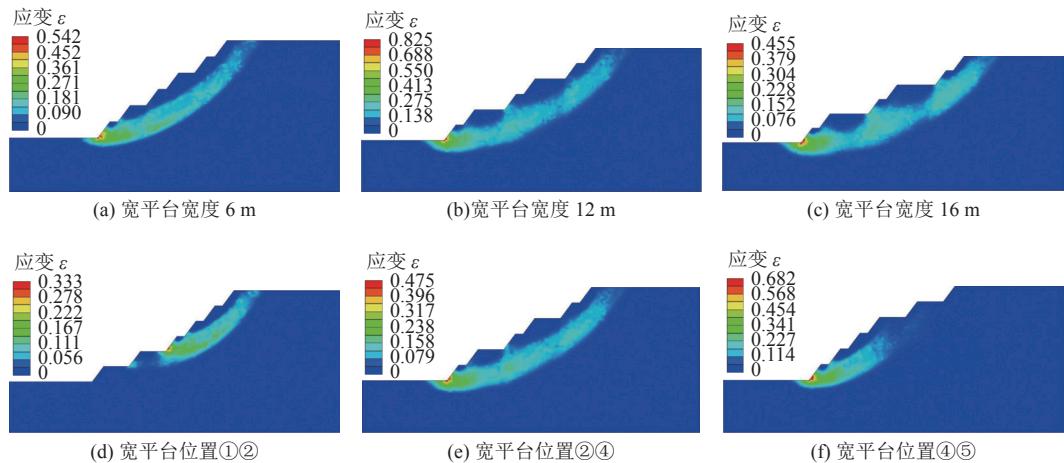


图 5 30 m 高边坡 2 个宽平台时塑性应变区分布
Fig.5 Plastic strain area of double-wide platforms of the 30 m high slope

3) 3 个宽平台

以宽平台位置②③④为例,当宽平台宽度分别为

6、12 m 时(图 6a、图 6b),有效塑性应变区变化与单宽平台相似;当宽平台宽度为 16 m 时(图 6c),有效塑性应变区有着明显的间断,当宽度继续增大时,可将高边

①②、②④、④⑤处(图 5d—图 5f),有效塑性应变区、最大应力应变与稳定性的变化与单宽平台相似,应变区已被宽平台明显分割。

坡视为 2 个独立边坡来分析计算。边坡整体稳定性在达到 10 m 后均满足要求。

以宽平台宽度 10 m 为例,将宽平台设置在位置①②③、②③④、③④⑤处(图 6d—图 6f),有效塑性应变区、最大应力应变与稳定性的变化与双宽平台相似。

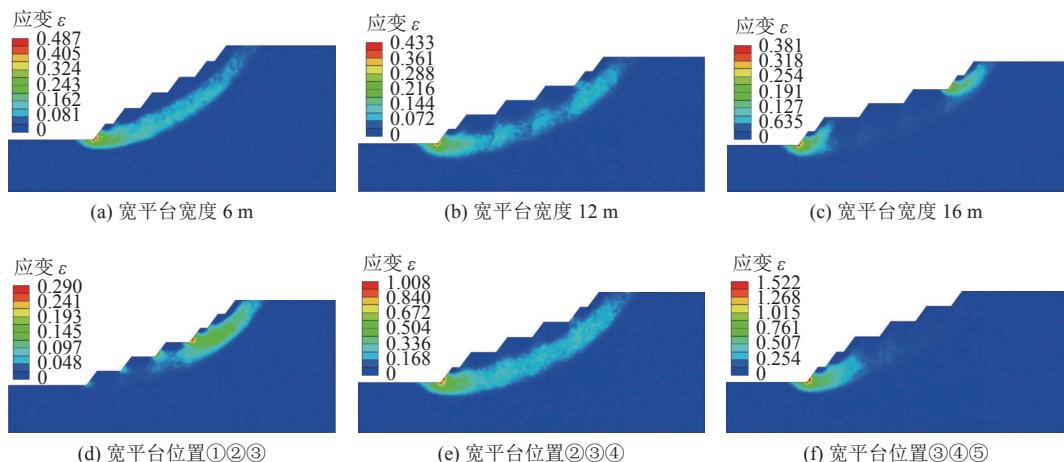


图 6 30 m 高边坡 3 个宽平台时塑性应变区分布
Fig.6 Plastic strain area of three-wide platforms of the 30 m high slope

4) 4 个宽平台

当宽平台宽度小于 14 m 时,4 个宽平台位置变化引起的有效塑性应变区、最大应力应变与双宽平台相似;当宽平台宽度大于 14 m 时,高边坡可当作多个单独坡考虑。

5.1.2 50 m 高边坡不同设置工况

1) 1 个或 2 个宽平台

对于 50 m 高边坡,单宽平台和双宽平台稳定性较

差,宽平台位置变化对整体稳定性影响较小,有效塑性应变区、最大应力应变、稳定性与 30 m 高边坡有一定的相似性。

2) 3 个宽平台

以宽平台位置③⑤⑦为例,当宽平台宽度分别为 6、12、16 m 时(图 7a—图 7c),最大有效塑性应变及有效塑性应变区的变化与 30 m 单宽平台相同,在宽度达到 16 m 时弱化现象变得明显,边坡整体稳定性在宽

度16 m时个别满足要求。

以宽平台宽度14 m为例,将宽平台设置在位置①②③、④⑤⑥、⑦⑧⑨(图7d—图7f),有效塑性应变区近乎完全的被宽平台分割开,最大有效塑性应变逐

渐减小,边坡整体稳定性先增强后减弱。宽平台集中分布在两侧时虽然能很好地改变塑性应变区,但边坡的整体稳定性较差。

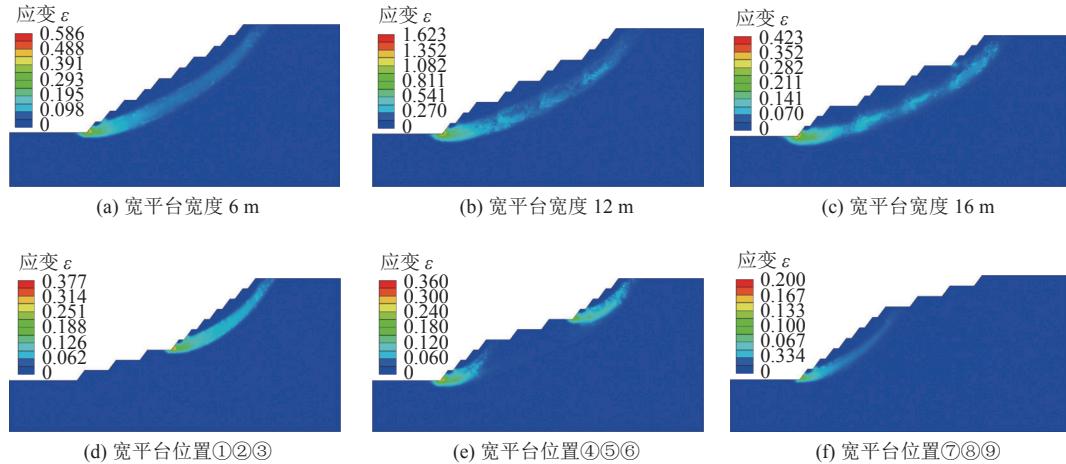


图7 50 m高边坡3个宽平台时塑性应变区分布

Fig.7 Plastic strain area of three-wide platforms of the 50 m high slope

3) 4个宽平台

以宽平台位置③④⑥⑦为例,当宽平台宽度分别为6、12、16 m时(图8a—图8c),有效塑性应变区在宽度达到16 m时完全被分割开,最大有效塑性应变变化与三宽平台一致,边坡整体稳定性在宽度12 m时部分满足要求。

以宽平台宽度16 m为例,将宽平台设置在位置

③④⑤⑥、④⑤⑥⑦、⑥⑦⑧⑨(图8d—图8f),宽平台连续分布对有效塑性应变区的影响作用明显,当下边坡有3个平台时,不存在有效塑性应变区,上边坡与之相同,有效塑性应变区从宽平台开始。最大有效塑性应变和稳定系数 K_s 均为先增大后减小。当宽平台连续分布时,可将边坡分为2个独立的边坡来分析计算,但边坡的整体稳定性差,因此,应避免宽平台连续分布。

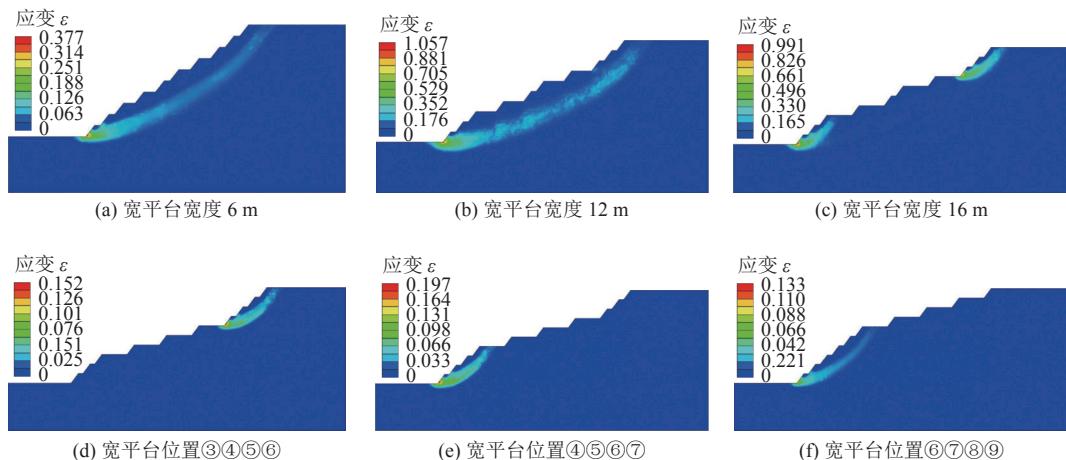


图8 50 m高边坡4个宽平台时塑性应变区

Fig.8 Plastic strain area of four-wide platforms of the 50 m high slope

5.2 稳定性

不同宽平台的模型模拟所得的边坡稳定系数如图9所示。

对于30 m高边坡,当有1个宽平台时(图9a),宽平台宽度14 m、宽平台位置③即可满足稳定性要求;当有2个宽平台时(图9b),除位置①②、①⑤、④⑤,

宽平台宽度达到10 m的其余位置组合均可满足稳定性要求,其中,位置②④对应的稳定系数最大;当有3个宽平台时(图9c),仅有宽平台宽度为6 m的高边坡稳定性未满足要求,其中,位置②③④对应的稳定系数最大;当有4个宽平台时(图9d),宽平台位置变化对边坡整体稳定性影响较小,基本均能满足要求。

对于 50 m 高边坡, 当有 1 或 2 个宽平台时(图 9e、图 9f), 稳定系数分别在宽平台位置⑤和④⑥处达到最大, 但均无法满足稳定性要求; 当有 3 个宽平台时(图 9g), 宽平台宽度 16 m、宽平台位置②④⑦、②⑤⑦、③④⑦、③⑤⑦、③⑤⑧、③⑥⑦的高边坡稳定性可满足要求, 其中, 位置③⑤⑦对应的稳定系数最大; 当有 4 个宽平台时(图 9h), 宽平台宽度达到 12 m 后有部分高边坡可满足稳定性要求, 其中, 位置

③④⑥⑦对应的稳定系数最大。

当宽平台位置和数量相同时, 宽平台宽度越大, 边坡稳定系数越大。30 m 高边坡选取 1 个宽平台即可, 宽平台位置宜选择边坡中部③处; 50 m 高边坡最少需选择 3 个宽平台, 宽平台位置的选取应靠近边坡中部, 间隔布置, 宜选择位置③⑤⑦, 避免宽平台连续分布或偏上偏下。

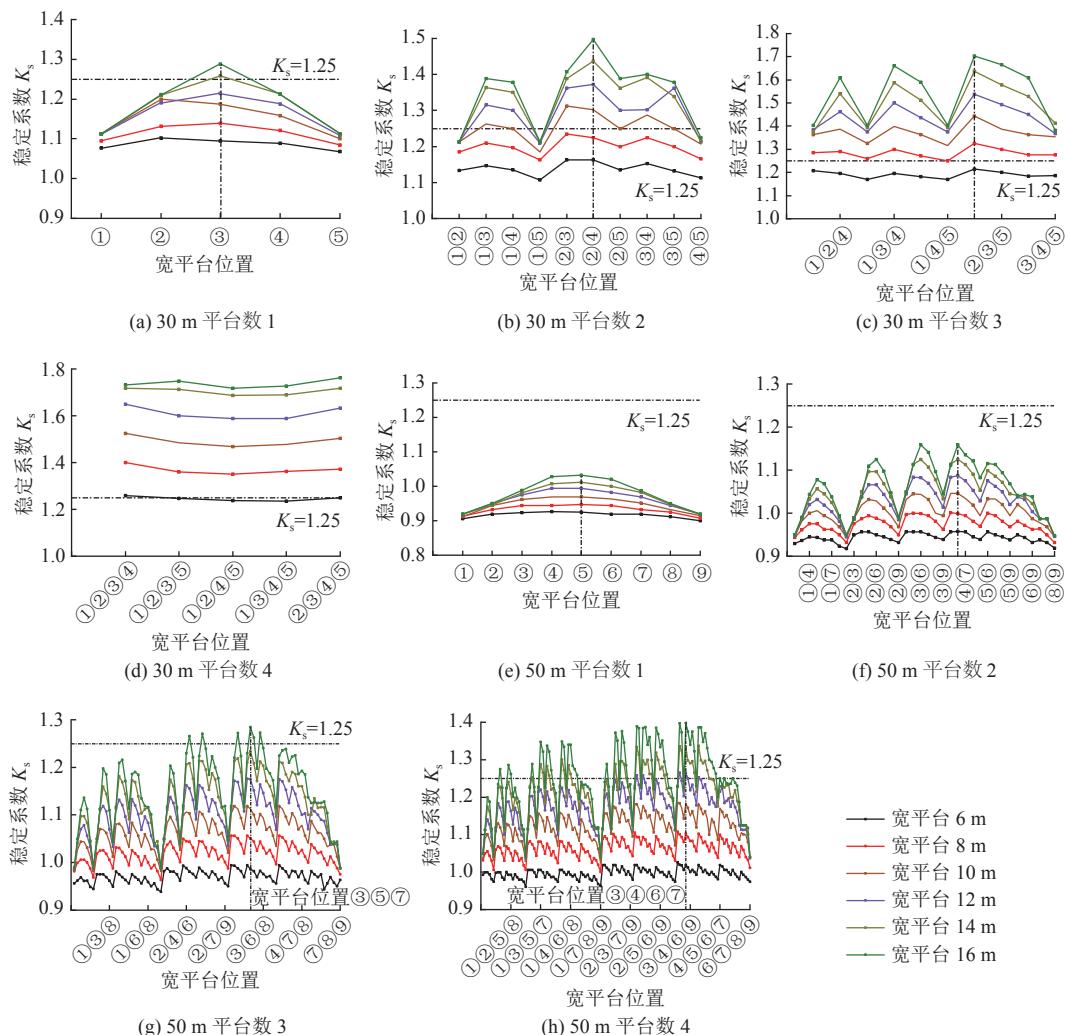


图 9 不同高边坡宽平台数量和位置与稳定系数关系

Fig.9 Relationship between the number and position of wide platforms and the stability coefficient in different high slopes

5.3 基于开挖量和稳定性结合的边坡优化设计

宽平台宽度、位置和数量决定了开挖量的大小, 在满足边坡整体稳定的条件下, 开挖量最小即为最优边坡。本次所建模型模拟结果满足整体稳定性的边坡共有 212 个, 其中 30 m 高边坡有 107 个, 编号为 1—107(图 10a), 50 m 高边坡有 105 个, 编号为 1—105(图 10b)。开挖量与稳定系数关系如图 10 所示。

综合考虑高边坡抗冲刷单坡坡率、整体稳定性及开挖量, 30 m 高边坡最优边坡设计为第 9 个模型: 2 个

宽平台、位置③⑤、宽度 10 m、开挖量 438 m^3 (图 10a); 50 m 高边坡最优边坡设计为第 51 个模型: 4 个宽平台、位置③⑤⑧⑨、宽度 14 m、开挖量 1800 m^3 (图 10b)。

6 结论

a. 陕北地区粉黄土高边坡最优单坡坡高 5~6 m, 坡率为 1:0.75。

b. 合理设置宽平台可以改变潜在滑移面的位置、减弱有效塑形应变区的连续性、提高边坡的整体稳定

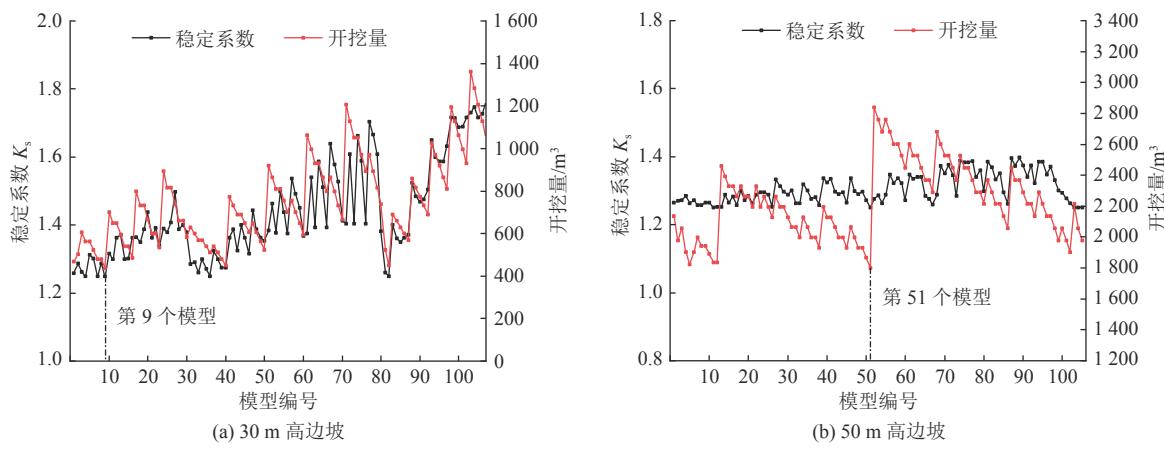


图 10 不同高边坡开挖量与稳定系数关系

Fig.10 Relationship between the excavation quantity and stability coefficient in different high slopes

性,弥补传统黄土高边坡稳定性分析评价中假设潜在滑移面贯穿整个边坡的缺陷。

c. 仅考虑边坡的整体稳定性,30 m 高边坡设置1个宽度较大的宽平台,稳定性即可满足要求。50 m 高边坡设置1~2个宽平台无法满足稳定性要求,需设置3~4个宽平台。

d. 综合考虑抗冲刷、整体稳定性与开挖量,高边坡最优坡形为:30 m 高边坡单坡高5 m、坡率1:0.75,窄平台宽度3 m,布置2个宽平台、位置③⑤、宽度10 m;50 m 高边坡单坡高5 m、坡率1:0.75,窄平台宽度3 m,布置4个宽平台、位置③⑤⑧⑨、宽度14 m。该研究成果从一定程度上解决了以经验为主的高边坡坡形选取难题,能够直接为工程建设提供指导,具有重要的理论和实际指导意义。

参考文献(References)

[1] 叶万军, 刘忠祥, 董西好. 基于能量判据的某黄土高边坡优化设计[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(20): 213~218.
YE Wanjun, LIU Zhongxiang, DONG Xihao. Optimization design of high loess slope based on energy criterion[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(20): 213~218.

[2] 徐永建, 牛彦平, 胡少雷. 浅谈黄土高边坡变形破坏特征[J]. 中国新技术新产品, 2020(9): 132~133.
XU Yongjian, NIU Yanping, HU Shaolei. Discussion on the deformation and destruction characteristics of loess high slope[J]. *New Technology & New Products of China*, 2020(9): 132~133.

[3] 郑秀红. 浅谈黄土高边坡变形破坏特征[J]. 科技创新与应用, 2017(14): 149~150.
ZHENG Xiuhong. Discussion on the deformation and destruction characteristics of loess high slope[J]. *Technology Innovation and Application*, 2017(14): 149~150.

[4] 蒲小武, 王兰民, 吴志坚, 等. 兰州丘陵沟壑区挖方黄土高边坡面临的工程地质问题及稳定性分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38(5): 787~794.
PU Xiaowu, WANG Lanmin, WU Zhijian, et al. Engineering geological problems and stability analysis of cut-and-cover loess high slope in Lanzhou hilly and gully region[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2016, 38(5): 787~794.

[5] 巨能攀, 赵建军, 邓辉, 等. 公路高边坡稳定性评价及支护优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1152~1161.
JU Nengpan, ZHAO Jianjun, DENG Hui, et al. Stability evaluation of high slope for highways and optimized support design[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1152~1161.

[6] 许宇明. 基于FLAC^{3D}的山区高速公路高边坡支护方案优化设计[J]. 公路工程, 2015, 40(6): 145~148.
XU Yuming. Optimization design of expressway in mountain area slope support scheme based on FLAC^{3D}[J]. *Highway Engineering*, 2015, 40(6): 145~148.

[7] 叶万军. 基于可靠度理论的黄土高边坡优化设计[D]. 西安: 长安大学, 2003.
YE Wanjun. Reliability applied to stability analysis of loess slope[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003.

[8] 辛立光, 李典庆, 曹子君. 基于概率充分因子的高效土质边坡可靠度优化设计[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(5): 696~700.
XIN Liguang, LI Dianqing, CAO Zijun. Efficient reliability-based design optimization in soil slope using probability sufficiency factor[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(5): 696~700.

[9] 张宏伟, 曹智, 程玉竹, 等. 基于拓扑优化方法的开挖边坡设计[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 73~78.
ZHANG Hongwei, CAO Zhi, CHENG Yuzhu, et al. Slope design based on a topology optimization method[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2015(2): 73~78.

[10] 叶万军, 杨更社. 基于坡面稳定的黄土路堑高边坡优化设计[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 531~535.
YE Wanjun, YANG Gengshe. Cutting high loess slope optimization design based on slope surface stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 531~535.

[11] 胡斌, 王伟, 张腾, 等. 露天矿最终边坡角优化设计模拟分析[J]. 金属矿山, 2013(9): 14~18.
HU Bin, WANG Wei, ZHANG Teng, et al. Simulation analysis

geological problems of loess high excavation slope in loess hilly and gully region of Lanzhou and its stability analysis[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(5): 787~794.

[5] 巨能攀, 赵建军, 邓辉, 等. 公路高边坡稳定性评价及支护优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1152~1161.
JU Nengpan, ZHAO Jianjun, DENG Hui, et al. Stability evaluation of high slope for highways and optimized support design[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1152~1161.

[6] 许宇明. 基于FLAC^{3D}的山区高速公路高边坡支护方案优化设计[J]. 公路工程, 2015, 40(6): 145~148.
XU Yuming. Optimization design of expressway in mountain area slope support scheme based on FLAC^{3D}[J]. *Highway Engineering*, 2015, 40(6): 145~148.

[7] 叶万军. 基于可靠度理论的黄土高边坡优化设计[D]. 西安: 长安大学, 2003.
YE Wanjun. Reliability applied to stability analysis of loess slope[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003.

[8] 辛立光, 李典庆, 曹子君. 基于概率充分因子的高效土质边坡可靠度优化设计[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(5): 696~700.
XIN Liguang, LI Dianqing, CAO Zijun. Efficient reliability-based design optimization in soil slope using probability sufficiency factor[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(5): 696~700.

[9] 张宏伟, 曹智, 程玉竹, 等. 基于拓扑优化方法的开挖边坡设计[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 73~78.
ZHANG Hongwei, CAO Zhi, CHENG Yuzhu, et al. Slope design based on a topology optimization method[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2015(2): 73~78.

[10] 叶万军, 杨更社. 基于坡面稳定的黄土路堑高边坡优化设计[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 531~535.
YE Wanjun, YANG Gengshe. Cutting high loess slope optimization design based on slope surface stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 531~535.

[11] 胡斌, 王伟, 张腾, 等. 露天矿最终边坡角优化设计模拟分析[J]. 金属矿山, 2013(9): 14~18.
HU Bin, WANG Wei, ZHANG Teng, et al. Simulation analysis

of the final sloping angle design and optimization on the open-pit mine[J]. *Metal Mine*, 2013(9): 14–18.

[12] 宋志飞, 辛晓平, 贺言言. 某露天矿边坡稳定性分析与优化设计[J]. *煤矿安全*, 2014, 45(7): 216–218.
SONG Zhifei, XIN Xiaoping, HE Yanyan. Analysis of slope stability and optimization design in an open-pit mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(7): 216–218.

[13] 李鹏, 刘世杰, 郭敏, 等. 汽车振动作用下黄土阶状坡动力响应规律[J]. *公路交通科技*, 2019, 36(7): 53–62.
LI Peng, LIU Shijie, GUO Min, et al. Dynamic response rule of loess stepped slope subjected to vehicle vibration[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 36(7): 53–62.

[14] 王光谦, 李铁键, 薛海, 等. 流域泥沙过程机理分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2006, 14(4): 455–462.
WANG Guangqian, LI Tiejian, XUE Hai, et al. Mechanism analysis of watershed sediment processes[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2006, 14(4): 455–462.

[15] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green–Ampt模型与Philip入渗模型的对比分析[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 13–16.
WANG Quanjiu, LAI Jianbin, LI Yi. Comparison of Green–Ampt model with Philip infiltration model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(2): 13–16.

[16] 李毅, 王全九, 邵明安, 等. Green–Ampt入渗模型及其应用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(2): 225–230.

LI Yi, WANG Quanjiu, SHAO Ming'an, et al. Green–Ampt model and its application[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(2): 225–230.

[17] 倪三川. 模拟降雨条件下黄土区植被坡面产流下渗与侵蚀特征研究[D]. 西宁: 青海大学, 2008.
NI Sanchuan. Study on characteristics of runoff infiltration and erosion on the vegetation slope in the loess area under the condition of artificial rainfall simulation[D]. Xining: Qinghai University, 2008.

[18] 曾昌禄, 李荣建, 关晓迪, 等. 不同雨强条件下黄土边坡降雨入渗特性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊1): 111–115.
ZENG Changlu, LI Rongjian, GUAN Xiaodi, et al. Experimental study on rainfall infiltration characteristics of loess slopes under different rainfall intensities[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(Sup.1): 111–115.

[19] 廖华容. 路基边坡冲刷机理及防护研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
LIAO Huarong. Study on slope erosion mechanism and protective of subgrade[D]. Changsha: Hunan University, 2012.

[20] 张栋樑, 王炳龙. 边坡植物防护计算方法的研究[J]. *华东交通大学学报*, 2006, 23(1): 52–55.
ZHANG Dongliang, WANG Binglong. Research on calculation way for slope plant protection[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2006, 23(1): 52–55.

(责任编辑 周建军)