

文章编号: 1000-7598(2009)02-0531-06

基于坡面稳定的黄土路堑高边坡优化设计

叶万军¹, 杨更社²

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 西安 710054; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘要: 通过室内外黄土边坡的冲刷试验结果发现, 随着坡度的增加, 坡面上的最大冲沟深度呈先减少、后增大的趋势。黄土边坡坡角值越接近临界坡角, 坡面产生破坏的可能性越小。根据坡面流理论, 导出黄土路堑高边坡抗冲刷的临界坡角。根据调查发现, 当边坡的坡角相同时, 单级坡体越高, 坡体(即坡长越长)越易形成明显的冲沟。根据坡角、坡面长和坡面冲刷量之间的关系, 建立了基于坡面稳定的黄土路堑高边坡优化设计模型。用该模型对典型路堑高边坡进行计算验证, 优化结果和实际情况吻合较好。

关键词: 黄土高边坡; 坡面; 稳定性; 优化设计

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

Cutting high loess slope optimization design based on slope surface stability

YE Wan-jun¹, YANG Geng-she²

(1. College of Geology & Environment, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Laboratory and field scour testing studies for loess slope indicate that the increasing of slope angle degree causes the maximum rill depth of slope surface firstly decreases and then increases later on; the nearer of the difference between the slope angle degree with the critical angle, the smaller possibility of slope surface erosion. The theoretical formula for calculating critical angle of cutting loess slope is derived based on Gradient current theory. A conclusion drawn from investigation is that the longer of the slope height is, the more erosion of the slope surface is. The optimization design model for cutting loess high slope based on surface stability is built when the relationship among slope angle, slope surface length and the erosion mass quantity is studied. At last, this model is verified by a typical example of cutting loess slope; and the result shows that this model agrees well with the actual situation.

Key words: loess high slope; slope surface; stability; optimization design

1 引言

黄土边坡破坏大体可分为两种形式: 坡面破坏和坡体破坏。长期以来, 由于生产需要, 边坡破坏受到多方面的关注, 研究较为深入, 而坡面破坏因其危害小而不被重视。事实上, 坡面破坏不仅仅是美观问题, 它将危害边坡和坡体稳定条件, 进而触发边坡坡体破坏。因此, 为了将边坡灾害消灭在萌芽状态, 有必要开展边坡坡面破坏的研究。

降雨对坡面的浸湿能力、产沙系统以及冲刷规律, 水利、环保及地质等部门曾进行了长期的大量

研究工作^[1-5], 但这些研究主要从水土保持、环境保护及灾害防治角度入手, 针对坡面很缓的天然山坡情况, 探索侵蚀的力学分析和试验模拟。近年来, 罗斌等^[6]对非黄土性路堑边坡坡面的冲刷问题开展了较系统的理论和试验研究。此外, 针对路基边坡冲刷情况, 伍石生^[7]、李志刚^[8-9]对路基边坡的冲刷及渗水问题开展了试验研究工作, 初步掌握了路基边坡受地表水冲刷的一些规律。孔亚军^[10]、Liu^[11]、胡明鉴^[12-13]研究了坡面土体形态在降雨作用下的特性, 这些研究对正确认识黄土边坡坡面冲刷具有重要意义, 但如何从黄土路堑边坡稳定性出

收稿日期: 2007-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No.40802068、40872177); 陕西省自然科学基金项目资助 (No.2007E209)。

第一作者简介: 叶万军, 男, 1976年生, 在站博士后, 副教授, 主要研究方向为公路岩土工程、特殊土的工程性质。E-mail: yewanjun 2004@126.com

发, 研究降雨对坡面的冲刷规律及其对边坡坡型设计的影响, 需做进一步的工作。本文通过室内外试验, 结合理论分析, 探讨在坡面稳定的条件下黄土高边坡优化设计。

2 坡度对边坡坡面稳定的影响

2.1 黄土路堑高边坡抗冲刷的室内外试验结果

针对天然黄土边坡和室内人工填筑的边坡进行了边坡降雨冲刷试验。其中, 现场试验在铜黄公路沿线天然边坡上进行, 试验前按要求将边坡刷制成预定的坡比, 然后进行人工降雨。采用消防车拉水并模拟自然降雨情况, 将水均匀地喷洒在试验所选定边坡范围内。由于黄土地区降雨具有强度大、历时短和面积小等特点, 因此试验中以模拟短历时、高强度的降雨为主。人工降雨持续时间约 30 min 左右, 降雨强度按 1.5 mm/min 设计。在试验前半个月, 边坡受到了持续的小至中雨的浸湿, 表层 4 cm 范围土体含水率大于天然含水率, 呈湿土状。经人工降雨浸渗后, 不同坡比的坡面上可见干土的最大深度在 44.0 cm 以内。室内试验在长安大学筑机性能实验室的大土槽中进行, 土槽长为 108.0 m、宽为 7.5 m、深为 2.5 m。边坡经人工填筑形成后放置了 1 年时间, 以使土体形成一定的结构。为模拟暴雨情形, 采用 X 型下喷头式喷头, 并在母管上安装电磁阀以实现快速切换控制。降雨强度变化的范围

为 0.26~3.8 mm/min, 均匀度达 70 % 以上。对不同坡比的黄土边坡按两种降雨浸渗方式进行, 一种是通过降雨喷头将雨水直接喷洒在边坡上; 另一种为通过坡顶放水装置, 使雨水均匀地在坡面上流动, 以模拟坡面汇水的影响。由于各喷头上的水压难以保证完全一致, 喷洒的相互交叉也可能使降雨在整个面积上分布不均匀。因此, 在试验前要对拟采用的降雨强度进行率定。表 1~3 给出了有关的测试结果, 图 1 给出了现场降雨浸渗试验照片, 图 2 给出室内模拟试验照片。

表 1 现场黄土边坡人工降雨浸渗试验结果
Table 1 Experiment result of loess slope scour with man-made rainfall on-the-spot

坡高 /m	平均坡比	平均降雨强度 /(mm/min)	降雨持续时间 /min	坡面上最大冲沟深度 /cm
36	1:1.081	1.44	30	17.0
34.5	1:0.790	1.51	30	16.8
36.8	1:0.640	1.50	30	5.7
33.7	1:0.5350	1.49	30	12.3
40.0	1:0.350	1.52	30	25.4

表 2 不同坡长的冲刷强度
Table 2 Erosion intensities of different slopes length

坡长 /m	降雨强度 /(mm/min)	降雨 历时 /min	累计 径流量 /kg	累计 冲刷量 /kg	平均 含泥量 /%	冲刷强度 /(kg/(m ² ·min))
8.0	1.21	30	44.80	0.58	3.33	0.006 8
32.8	1.20	30	119.75	10.22	5.88	0.084 6
36.8	1.22	30	233.5/8	26.78	7.79	0.117 5
44.7	1.20	30	389.77	29.35	6.28	0.135 8

表 3 室内黄土边坡人工降雨浸渗试验结果
Table 3 Experiment result of loess slope scour with man-made rainfall indoor

参数	坡比									
	1:1		1:0.75		1:0.6		1:0.5		1:0.25	
	降雨	汇水流	降雨	汇水流	降雨	汇水流	降雨	汇水流	降雨	汇水流
平均降雨强度 /(mm/min)	1.21	1.23	1.19	1.21	1.20	1.19	1.21	1.22	1.20	1.22
降雨持续时间 /min	30.5	10.0	30.6	10.0	30.6	10.0	30.5	10.0	30.0	10.0
坡面上最大冲沟深 /cm	16.7	15.4	15.1	12.8	10.8	11.2	13.7	16.0	14.3	14.0
坡面上湿土深度 /cm	17.0	11.9	15.5	9.8	15.5	9.8	14.3	8.8	10.1	8.7



(a)



(b)

图 1 现场黄土边坡降雨浸渗试验

Fig.1 Experiment for loess slope erosion with man-made rainfall on-the-spot



(a) 坡面汇水冲刷



(b) 人工降雨冲刷

图2 室内黄土边坡降雨浸渗试验

Fig.2 Experiment for loess slope erosion with man-made rainfall indoor

从室内外边坡的冲刷试验结果可以看出,随着坡度的增加,坡面上的最大冲沟深度呈先减少、后增大的趋势。当坡角达到某个坡度时,坡面产生的冲沟深度最小。在一定坡长的情况下,地面的坡度愈大,径流速度越大,水流冲刷能力强,坡面冲刷越强烈;当坡度超过了一定的界限时,坡面侵蚀量反而随坡度增大而减小。这是因为在一定的坡长的情况下,地面的坡度愈大,径流速度越大,水流冲刷能力强,坡面冲刷越强烈;当坡度超过了一定的界限时,坡面侵蚀量反而随坡度增大而减小,即边坡坡面冲刷存在一个临界坡度,因此,确定临界坡度具有重要的理论和实际意义。

2.2 黄土路堑高边坡抗冲刷临界坡角的导出

如图3,假设坡面流为平衡流,没有加速度,为均匀流。根据力学性质,有如下关系式:

$$\tau_0 = \gamma h J = \gamma h \sin \theta \quad (1)$$

式中: τ_0 为坡面流冲刷能力; h 为面流厚度; θ 为坡角; J 为水力坡降。 γ 为土体的重度。

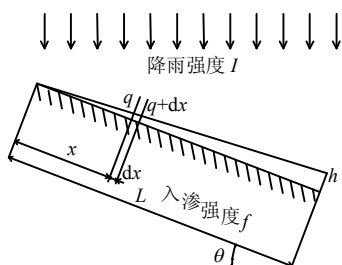


图3 坡面水流分析图

Fig.3 Water current analysis on slope surface

设坡面单宽径流量顺坡向下的增量为 dq/dx , 可得

$$dq = (I - f) \cos \theta dx \quad (2)$$

式中: I 为降雨强度; f 为降雨入渗强度。

坡面流从坡顶往下沿途不断有水流补给, 径流增加, 冲刷能力加强, 挟沙量增多, 能量消耗也增加, 坡面流在距坡顶 x 处达到平衡水流冲刷能力最强, 此时 x 处的单宽流量为

$$q = \int_0^L \frac{\partial q}{\partial x} dx = \int_0^L (I - f) \cos \theta dx = (I - f) L \cos \theta \quad (3)$$

式中: q 为单宽流量 (m^2/s); L 为坡长 (m)。

根据曼宁公式, X 处的流速 v 为

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} (\tan \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: n 为曼宁系数。

$$q = v h \quad (5)$$

由式(1)~(4)可得

$$h = \left[\frac{n(I - f)L \cos \theta}{\tan^{\frac{1}{2}} \theta} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (6)$$

坡面土体颗粒沿坡面向下运动的合力 τ 为水流拖拽力与颗粒水下重量沿坡面分量之和:

$$\tau = \gamma h \sin \theta + \gamma' \frac{\pi D^3}{6} \sin \theta \quad (7)$$

式中: D 为土粒平均粒径; γ' 为土粒的浮重度。

将式(6)代入式(7)得

$$\tau = \gamma n (I - f) L \cos^{1.1} \theta \sin^{0.5} \theta + \gamma' \frac{\pi D^3}{6} \sin \theta \quad (8)$$

令 $\frac{d\tau}{d\theta} = 0$, 变换得

$$\frac{0.5 \cos^{1.1} \theta}{\sin^{0.5} \theta} - \frac{1.1 \sin^{1.5} \theta}{\cos^{0.9} \theta} + \frac{\gamma' \pi}{\gamma} \frac{D^3}{6 n (I-f) L} = 0 \quad (9)$$

如图 2 的室内边坡模型, 坡高 2.5 m, 降雨强度为 2 mm/min, $n=0.02$, 入渗强度为 0.2 mm/min, γ 为 18 kN/m³, $\frac{D^3}{l} \approx 1 \times 10^6$, $b = -6 \sim -9$, $\frac{\gamma' \pi}{\gamma} \approx 0.15$, 将以上数据代入式 (9), 解得 θ 值为 47.2°。

由式 (8) 及室内冲刷试验检测结果, 可得图 4。

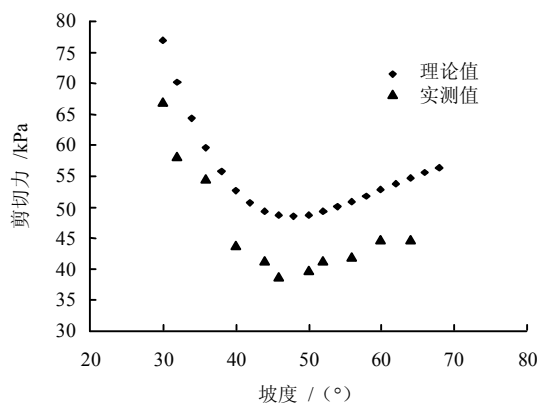


图 4 边坡冲刷力理论计算值及实测结果分布图

Fig.4 Distribution of the testing and theoretical values

由图 4 可见, 坡面剪切力随着坡度的增大而先减小, 在 47.2°附近达到最小, 然后随着坡度的增大而增大。理论计算值和实测值相一致。由于理论推导时简化了一些条件, 比如坡面的粗糙率、植被覆盖率、土质的不均匀性等, 同时在计算时的相关参数 (比如 D 、 l 等) 的取值受人为经验的影响, 从而导致了实测值和理论计算值出现偏差。

3 坡长对边坡坡面稳定的影响

影响坡面径流与侵蚀的因素错综复杂, 地貌因素, 尤其是坡长因素对侵蚀的影响往往因地因时而异。为了认识某地的土壤侵蚀规律, 就必须对实测资料进行具体分析研究。通过对西铜公路黄土边坡坡面冲刷情况的调查, 发现当边坡的坡角相同时, 单级坡体越高, 坡体 (即坡长越长) 越易形成明显的冲沟, 这是因为当假定边界条件沿程不变, 坡面流沿程变化律不变。当离分水岭 L 距离的径流深为 h' 时, 则径流深度的递增率 Z 可用下式表示:

$$Z = \frac{dh'}{dL} \quad (10)$$

对任何一点 x 处, 坡长 L_x 的径流深度 h'_x 为

$$h'_x = \frac{dh'}{dL} L_x \quad (11)$$

也就是说, 在坡度一定的条件下, 随坡长增加, 径流深将不断增加, 从而径流所具有的能量将随之增加, 其冲刷量亦将愈大。

4 基于坡面冲刷损失的优化设计模型

从上述分析可以看出, 边坡的形态对坡面的稳定也有一定的影响。坡角越靠近临界坡度, 坡长越小, 坡面产生破坏的可能性越小。定义坡面冲刷损失造价量为 E , 指单宽坡面受冲刷破坏后所需要维护的费用, 有如下关系式:

$$E = \lambda A |\alpha - \theta| \frac{dh}{dL} L_x + \xi \quad (12)$$

式中: E 为坡面冲刷损失造价; A 为维护坡面冲刷破坏的单位造价; α 为临界坡角; λ 为修正系数; ξ 为修正值, 与边坡的土质、当地的百年一遇的降雨强度与植被发育情况有关。其意义为当坡角与临界坡角相等时边坡坡面的冲刷损失, 也就是在相同降雨条件下边坡的最小损失, 根据经验确定。

式 (12) 的意义为, 当坡角与临界坡角相等时, 坡面受冲刷影响最小; 当坡角远离临界坡角时, 坡面维护费用随着坡角和临界坡角的差值及坡长的增大而增大。

5 算 例

按坡面冲刷损失评价及优化设计模型, 对黄延公路某黄土高边坡进行计算。该边坡地处陕北黄头沟壑区, 坡体主要由马兰黄土和离石黄土组成。天然重度为 17.58 kN/m³, 内摩擦角为 45.8°, 土的凝聚力为 75 kPa。当地降雨强度一般为 0.7~3.2 mm/min。根据该边坡所处的地理位置、植被、气候等等情况, 考虑坡面修复费用, 按浆砌片石考虑, 参考交工发[1996]610 号文颁发《公路工程预算定额》、《公路基本建设工程概、预算编制办法》, 浆砌石护坡单价为 127 元/m³, λ 取为 1, ξ 假定为 500 元 (由于最后优选时采取相对比较的方法, 因此, 其值不影响结果)。按本文提出的优化方法进行计算, 结果见表 4。

由表 4 可见, 若按坡面冲刷损失为目标, 5 种方案的优劣排序为

$$a_1 > a_3 > a_2 > a_4 > a_5$$

表4 黄延公路某路堑高边坡优选方案及其优化结果

Table 4 Optimization plan and optimization design result for cutting loess slope in Huang ling-Yan'an highway

坡体编号	坡型			稳定系数	破坏概率/%	期望造价/(元/m)	坡面冲刷损失/(元/m)
	单级坡比	单级坡高/m	平台宽度/m				
a_1	1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.6-1: 0.75	8-8-8-8-8-8-8-8-8	4-4-4-10-4-4-10-4	1.70	0.6	26 707	1 899
a_2	1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5	8-8-8-8-8-8-8-8-8	4-4-4-12-4-10-4	1.76	0.5	24 000	2 220
a_3	1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5-1: 0.5	8-8-8-8-8-8-8-8-8	4-4-10-4-4-10-4	1.27	1.2	23 527	2 130
a_4	1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6	8-8-8-8-8-8-8-8-8	3-3-3-12-3-14-3	1.73	0.7	27 168	3 234
a_5	1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.6-1: 0.75-1: 0.75	8-8-8-8-8-8-8-8-8	3-3-12-3-3-14-3	1.22	1.9	26 448	4 450

注: A-B-C-D-E-...中, A 为第 1 级单级坡比(坡高, 平台宽度), B 为第 2 级单级坡比(坡高, 平台宽度), 依次类推。

按安全可靠为目标, 5 种方案的优劣排序为

$$a_2 > a_4 > a_1 > a_3 > a_5$$

按最小费用为目标, 5 种方案的优劣排序为

$$a_3 > a_2 > a_5 > a_1 > a_4$$

实际上, 该路堑高边坡的设计方案为 1~6 级单级边坡坡比为 1:0.5, 第 7 级边坡坡比为 1:0.6, 第 8 级坡比为 1:0.75; 单级坡高、平台宽度同表 4 中 a_3 方案。从该边坡刷坡成型至今已有近 5 年时间, 该边坡坡面平整, 几乎没有冲刷破坏现象。

6 结 论

(1) 从室内外边坡的冲刷试验结果及理论计算结果发现, 随着坡度的增加, 坡面上的最大冲沟深度呈先减少后增大的趋势。坡角越靠近临界坡度, 坡面产生破坏的可能性越小。

(2) 在一定的坡长的情况下, 地面的坡度愈大, 径流速度越大, 水流冲刷能力强, 坡面冲刷越强烈; 当坡度超过了一定的界限时, 坡面侵蚀量反而随坡度增大而减小。

(3) 建立了基于坡面冲刷损失的优化设计模型。该模型的意义为, 当坡角与临界坡角相等时, 坡面不受冲刷影响; 当坡角远离临界坡角时, 坡面维护费用随着坡角和临界坡角的差值及坡长的增大而增大。

(4) 利用该模型对典型黄土路堑高边坡进行基于坡面冲刷损失的优化设计, 计算结果和实际情况吻合较好。

参 考 文 献

- [1] 曹文洪, 祁伟, 郭庆超, 等. 小流域产汇流分布式模型[J]. 水利学报, 2003, 9(9): 48-54.
CAO Wen-hong, QI Wei, GUO Qing-chao, et al. Distributed model for simulating runoff yield in small watershed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 9(9): 48-54.
- [2] BEASLEY D B, HUGGINS L F, MONKE E J ANSWIJS. A model for watershed planning [J]. *Transactions of the ASCE*, 1981, 23(4): 938-944.
- [3] 刘青泉, 陈力, 李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(5): 449-456.
LIU Qing-quan, CHEN Li, LI Jia-chun. Influences of slope gradient on soil erosion[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2001, 22(5): 449-456.
- [4] 赵晓光, 吴发启, 刘秉正, 等. 再论土壤侵蚀的坡度界限[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 42-46.
ZHAO Xiao-guang, WU Fa-qi, LIU Bing-zheng, et al. The critical slope degrees of soil erosion[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(2): 42-46.
- [5] 丁文峰, 李占斌, 崔灵周. 黄土坡面径流冲刷侵蚀试验研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 99-101.
DING Wen-feng, LI Zhan-bin, CUI Ling-zhou. Study on runoff scouring erosion on loess slope surface[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(2): 99-101.
- [6] 罗斌, 胡厚田, 卢才金, 等. 清连公路沿线坡面冲刷研究[J]. 公路交通科技, 2000, 11(1): 66-69.
LUO Bin, HU Hou-tian, LU Cai-jin, et al. A study on slope surface erosion along Qing-Lian Expressway[J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(1): 66-69.