

文章编号: 1000-7598-(2005) 08-1342-04

土工格室对黄土路堤边坡抗冲刷的试验研究

晏长根^{1,2}, 杨晓华², 谢永利², 李家春²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 长安大学 公路学院, 西安 710064)

摘 要: 在黄土地区, 植被恢复很慢, 由于黄土本身的特性以及突发性的暴雨, 对路堤边坡的冲刷作用十分明显, 甚至造成路基的坍塌。用格室防护黄土路堤边坡的冲刷试验研究, 目前尚未见报道。通过一系列对比试验并详尽分析, 发现土工格室对黄土路堤边坡冲刷防护的效果明显。在此基础上, 对土工格室的冲刷防护机理进行了初步探讨。

关 键 词: 黄土路堤; 冲刷; 土工格室; 对比试验

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Experimental research on anti-eroding effect of geocells in loess embankment

YAN Chang-gen^{1,2}, YANG Xiao-hua², XIE Yong-li², LI Jia-chun²

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Erosion of the road embankment caused by rainstorm, is very serious in loess zone, even leading to road embankment collapse. There has rarely reported about the anti-eroding effects of geotextiles on road embankment so far. Based on detailed analysis on results of a series comparing test on anti-eroding effect of geocells, a conclusion is drawn that the using geocells is an effective way to improve road embankment's anti-eroding ability. Finally, the anti-eroding mechanism of geocells is discussed.

Key words: losses embankment; erosion; geocells; comparison test

1 引 言

目前对于公路路堤冲刷防护的研究主要集中在河流拐弯处的常年流水冲刷上^[1~3], 或者是没有防护的边坡冲刷上^[4,5]。对于路堤边坡的冲刷防护问题, 由于大多数情况并不严重, 并且一般有排水沟而没有引起相应的重视。在黄土地区, 植被恢复较慢, 由于黄土本身的土性以及突发性暴雨, 对路堤边坡的冲刷作用较大, 有的甚至造成路基坍塌。目前对于黄土路堤边坡冲刷防护的方法主要有混凝土、片石等^[6], 对于土工格室和土工织物的边坡防护, 一般主要是有稳定性分析和防护步骤等^[7,8], 而没有具体的效果和试验研究, 防护设计时也无规范可依。笔者做了一系列土工格室对黄土路堤边坡冲刷防护的对比试验, 对土工格室的冲刷防护机理进行了初步探讨。

2 试验参数和条件

试验在长安大学公路学院水力实验室进行。模型箱长 5.4 m, 宽 1.5 m, 上部深 1.2 m, 下部深 0.6 m (图 1)。上部进水采用流量计控制, 并有一水池,

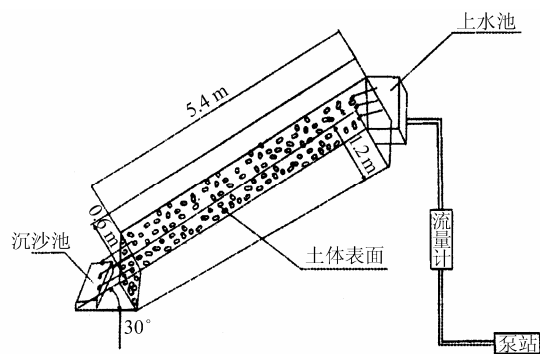


图 1 边坡冲刷试验系统简图

Fig.1 Testing system sketch for slope erosion

收稿日期: 2004-03-08

修改稿收到日期: 2004-06-21

基金项目: 西部交通建设科技项目 (No.200131800019) 资助。

作者简介: 晏长根, 男, 1975 年生, 博士研究生, 讲师, 主要从事边坡工程的研究与教学工作。E-mail: yanchangen@163.com

保持水流的形成均匀坡面流, 在水池和土接触处用纱布联接。

试验采用一般最常见的马兰黄土, 按照公路路堤的要求填实。根据甘肃省黄土地区的降雨资料以及黄土地区高速公路的宽度标准, 采用换算后的流量为 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 相当于甘肃省天水、平凉地区 10 年一遇最大 10 min 暴雨和 10 年一遇最大 5 min 暴雨。对路堤坡顶来流而言, 采用这个频率和时段是恰当的。冲刷历时应该与降雨历时一致, 也就是 10 min 和 5 min, 但考虑到野外是经历多次冲刷积累的, 故在冲刷时采取连续冲刷, 这对于路基是安全的, 也易于获得路堤冲刷规律。试验时采取连续冲刷 40 min, 采用 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$, $80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ 两种土工格室 (图 2), 坡度则采用黄土地区路堤边坡最常见的 1:1.75 和 1:1.5 两种坡度。考虑到试验时的条件难于掌握, 如压实度、湿度、坡面平整程度、水、气候、土的平整度、室内温度的变化等等, 故采用对比试验, 也就是一半进行填埋格室的冲刷, 另一半则没有格室进行冲刷。由于是在相同条件下对同样的土进行夯实, 在同一时间进行试验, 这样可以避免许多因素的干扰而直接对比出有无格室的效果。

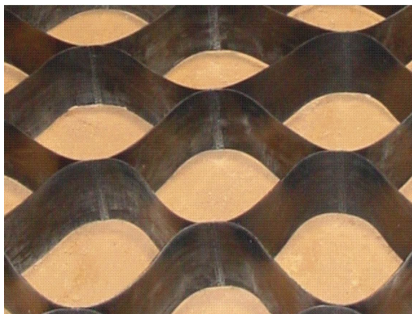


图 2 土工格室示意图
Fig. 2 Sketch of geocells

3 冲刷试验的结果分析

试验时每 2 min 分别对有无格室采集一个冲刷水样, 每次试验前测量每个量瓶的空瓶重量, 加水 (没有冲刷前的水) 重量以及冲刷后的水瓶重量。根据《土工试验规程》中的密度法, 可以推导含沙率 e_i (g/cm^3) 的计算公式。

$$e_i = \frac{r_s}{(r_s - r_w)v} (w_2 - w_1) \quad (1)$$

式中 v 为量瓶的体积, 试验采用 250 mL; r_s 为土的颗粒密度, 取 $2.71 \text{ g}/\text{cm}^3$; r_w 为水的密度; w_2 为瓶+水+土的重量; w_1 为瓶+水的重量。

知道了含沙率, 累计冲蚀量 S_m (kg), 可以根

据计算的时间段和流量计算出来, 公式为

$$S_m = \sum_{i=1}^n \bar{e}_i \frac{q}{1000t_i} \quad (2)$$

式中 $\bar{e}_i$ 为第 i 时段的平均含沙率, $\bar{e}_i = e_i$, $\bar{e}_i = \frac{e_i + e_{i-1}}{2}$; q 为流量的大小, 此处取 1.5 m 宽度流量 (cm^3/min); t_i 为第 i 时段 (min)。

含沙率是表示每次单位体积的含沙量, 而累计冲蚀量是表示 n 分钟内的所有冲蚀泥沙的量。从总的冲蚀效果分析, 累计冲蚀量更能说明问题。为了说明格室对累计冲蚀量所起的作用, 在这里特引入冲蚀降低率的概念, 即由于加格室引起某时段的累计冲蚀量的降低率:

$$\delta_i = \frac{Q_{t\text{无}} - Q_{t\text{有}}}{Q_{t\text{无}}} 100\% \quad (3)$$

式中 $Q_{t\text{无}}$ 为 $0 \sim t$ 时段无格室累计冲蚀量; $Q_{t\text{有}}$ 为 $0 \sim t$ 时段有格室累计冲蚀量。

由试验结果可以看出 (表 1), 刚开始 10 min 的, 普遍的累计冲蚀量都是有格室的比无格室的还要大, 随着时间的延长, 逐渐地反过来, 到最后的 10 min, 有格室的累计冲蚀量比无格室的小的多, 冲蚀降低率降低十分明显, 最小的也达到 30.55 %, 大的甚至达到 61.44 %, 平均值为 48.15 % (图 3、图 4)。可见随着时间的延长, 格室效果越来越明显。另外, 40 cm 格室与 80 cm 格室的总体变化规律一样, 但 40 cm 格室的冲蚀降低率比 80 cm 的普遍要大, 说明格室越小, 效果越好。

分析刚开始 10 min 出现负效果的原因, 主要是由于 3 点: ①在压实时, 由于有格室的支撑作用, 使格室的中表层土的压实度比无格室中土的压实度略小, 这样有格室的容易被冲蚀; ②在进行超填削坡时, 不可能正好使表层的土沿着格室表面削掉, 形成一比较平滑的坡面, 而是形成许多小的陡坎和跌穴, 这对于冲蚀是有利的^[7, 8]; ③削坡时虽然使表层的土产生扰动, 抗剪强度降低, 从而易于冲蚀掉, 但由于这些原因造成的短时间的累计冲蚀量增大对边坡的影响并不大, 原因是只是冲蚀了表层突起的松动土体, 而随着时间的增长, 这种情况不会持续下去。也就是说, 在格室中的与格室齐平或低于格室的土是不易冲蚀掉的, 这时格室也就真正发挥作用了。由于在实际的工程中, 路堤边坡总是要承受多次的降雨的冲蚀作用, 所以随着时间的推移和总计降雨时间的增长, 格室的效果将越来越明显, 试验中证明了这一点, 随着时间的延长冲蚀降低率是增加的。但一定的时候是否将保持在一定的

水平, 这有待于进一步的试验验证。

表 1 各时段有无格室累计冲蚀量及冲蚀降低率表

Table 1 Accumulated erosion amount and erosion decreasing ratio with and without geocells under different time intervals

试验类型	状态	时段(min)累计冲蚀量/kg			
		1~10	11~20	21~30	31~40
坡度 1:1.5 流量 $0.9\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	40 cm 格室	33.72	16.74	16.45	20.89
	无格室	31.58	21.35	21.87	34.49
	降低率/%	-6.76	21.56	24.76	39.43
坡度 1:1.5 流量 $1.5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	40 cm 格室	47.98	40.531	39.833	30.86
	无格室	36.09	41.167	50.585	44.439
	降低率/%	-32.9	1.54	21.26	30.56
坡度 1:1.75 流量 $1.5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	40 cm 格室	76.05	46.47	49.70	23.20
	无格室	63.99	65.53	71.09	52.22
	降低率/%	-18.84	29.084	30.09	55.57
	80 cm 格室	81.68	60.02	45.82	20.09
	无格室	77.67	72.09	57.81	43.42
坡度 1:1.75 流量 $0.9\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	80 cm 格室	36.28	29.73	24.56	10.92
	无格室	46.64	50.13	45.95	28.32
	降低率/%	22.22	40.69	46.556 11	61.44
平均值		-8.29	21.93	28.68	48.15

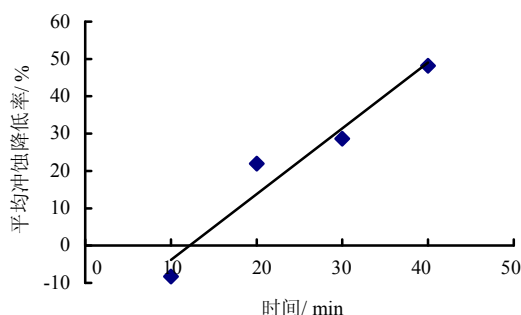


图 3 冲蚀降低率平均值随时段变化图

Fig.3 Average erosion decreasing ratio changed with time intervals

4 试验机理分析

从力学角度来讲, 边坡冲刷的机理主要是土颗粒在坡面上所受的重力、粒间粘结力、浮力、拖曳力、上举力、渗透压力的综合作用^[9~12], 加土工格室的效果, 主要是在于: (1) 增加水流流径的长度, 起到消能减冲的作用 (图 5), 可以减小拖曳力、上举力、渗透压力。从图 5 中可以看出, 如果将格室看作理想的菱形, 水流沿着边界流动和直线流动将增加约 1.414 倍, 这样直接冲击土的能量也将大大的减小; (2) 分散坡面径流, 使坡面径流平均化。在没有格室的情况下, 水流将沿着软弱的地方流动, 形成细沟, 并恶性循环, 形成冲沟, 不断增大冲沟的宽度和深度, 造成路基的局部破坏, 而有了格室之后, 格室使坡面径流平均化, 沿着格室边沿流动,

阻止了细沟的形成, 从而不会出现连续冲刷形成冲沟的现象; (3) 在相同条件下, 40 cm 格室的抗冲刷效果比 80 cm 的效果更好 (图 4), 说明格室越小, 坡面径流平均化的效果越好, 这亦证明了格室对坡面径流分散的效果确实存在。

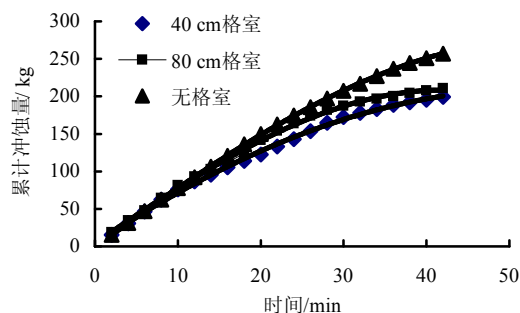


图 4 坡度 1:1.75, 流量 $1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 不同格室累计冲蚀量曲线

Fig. 4 Accumulated erosion amount under different geocells (Slope ratio 1:1.75, Flux $1.5\text{ m}^3/\text{h}$)

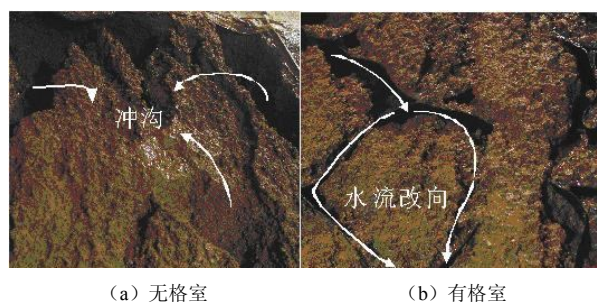


图 5 有无格室冲刷效果图

Fig. 5 Erosion effects on slopes with and without geocells

5 结 语

通过试验取得几点结论: (1) 土工格室对黄土边坡冲刷防护效果明显, 一般可以提高抗冲蚀能力 40%, 并随着时间的推移, 效果越来越明显。(2) 格室的格子越小效果越好, 但在格室深度上尚未有明显的要求, 需要试验加以检验。(3) 格室对于冲沟的形成可以起到很大的抑制作用, 一般有格室存在就不会形成连续的冲沟。

鉴于试验冲刷时有格室的冲刷深度不超过 15 cm, 经验设计时锚固格室的土钉长度为 50~60 cm 即可, 隔 3 m 左右一排, 具体的土钉数量计算可以参考王广月等^[9]的计算方法。由于各地的降雨以及土质情况不同, 还需要对不同的土质、不同的降雨强度、不同的格室大小做进一步组合试验研究。由于土工格室本身的轻便、便宜以及施工快捷, 而且可以保持路堤的绿化环境等特点, 是值得推广的一种黄土路堤防护措施。

参考文献

- [1] 田伟平, 李惠萍. 丁坝挑角等参数对坝头冲刷深度的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22 (5):42—44.
TIAN Wei-ping, LI Hui-ping. Influence on scour depth of spure dike parameter[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2002, 22 (5):42—44.
- [2] 田伟平, 李惠萍. 沿河路基的护坦冲刷防护试验研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 11—13.
TIAN Wei-ping, LI Hui-ping. Experimental research on the apron protection for riverside subgrade[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2002, 15(4): 11—13.
- [3] 张义青, 高冬光. 河湾冲刷与护坦基脚减冲的防护研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(3): 42—44.
ZHANG Yi-qing, GAO Dong-guang. A study of river bend scour and reduced scour with damguard[J]. **Journal of Xi'an Highway University**, 1998, 18(3): 42—44.
- [4] 李志刚, 刘建民. 高等级公路路堤边坡冲刷防护临界高度野外模拟试验研究[J]. 公路, 2003, 10: 43—46.
LI Zhi-gang, LIU Jian-min. Field simulating test and research on critical height of erosion protection for expressway embankment slopes[J]. **Highway**, 2003, (10): 43—46.
- [5] 李志刚, 吴伟, 陈云鹤. 高速公路路堤边坡冲刷防护临界高度初探[J]. 公路交通科技, 2003, (4): 24—27.
LI Zhi-gang, WU Wei, CHENG Yun-He. Primary research on critical height of erosive protection for embankment of freeways[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2003, (4): 24—27.
- [6] 金祥秋, 解赴东, 崔凌秋, 等. 路基防护类型的选择及加固方案[J]. 吉林交通科技, 2001, (4): 12—15.
JIN Xiang-qiu, XIE Fu-dong, CUI Ling-qiu, et al. Choice of reinforcement method for road embankment[J]. **Science and Technology of Jilin Communications**, 2001, (4): 12—15.
- [7] 王广月, 王银山, 杨建顺. 土工格室在边坡防护中的应用[J]. 中国水土保持, 2003, (2): 33—34.
WANG Guang-yue, WANG Yin-shan, YANG Jian-shun. Geocells applied in enforcement of slopes[J]. **Soil And Water Conservation of China(SWCC)**, 2003, (2): 33—34.
- [8] Ross A Sutherland. A critical assessment of the research conducted at the hydraulics and erosion control laboratory——a focus on rolled erosion control systems applied to hillslopes[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1998, 16: 87—118.
- [9] Forster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 1972, 15(1): 99—102.
- [10] 张晴雯, 雷廷武, 赵军. 细沟股流剥蚀率与载沙量以及沟长的耦合关系[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 92—95.
ZHANG Qing-wen, LEI Ting-wu, ZHAO Jun. Coupling relationship between rate with sediment load and rill Length[J]. **Journal of Soil and Water Conservation**, 2001, 15(2): 92—95.
- [11] 罗斌, 王秉纲, 胡厚田, 等. 路基边坡坡面冲刷发生条件探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 115—117.
LUO Bin, WANG Bing-gang, HU Hou-tian, et al. Study on occurring conditions of subgrade slope surface scouring[J]. **Journal of Soil and Water Conservation**, 2001, 15(4): 115—117.
- [12] 罗斌, 王秉纲, 王选仓. 路基边坡坡面冲刷基本理论[J]. 公路交通科技, 2002, 19(4): 27—29.
LUO Bin, WANG Bing-gang, WANG Xuan-cang. Basic theory of side slope surface scouring[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2002, 19(4): 27—29.