

# 麦秸秆加筋黄土的抗侵蚀性试验

卢 浩<sup>1</sup>, 晏长根<sup>1</sup>, 杨晓华<sup>1</sup>, 薛晓辉<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006)

**摘 要:**通过麦秸秆和石灰加筋黄土对黄土公路边坡进行坡面防护, 试图解决黄土公路边坡因强降雨引起的坡面冲蚀破坏问题。为了研究麦秸秆加筋黄土的抗侵蚀性能及其防护效果, 制备了原状黄土、麦秸秆加筋黄土、加石灰的麦秸秆加筋黄土试样, 进行直剪试验、崩解性试验和抗冲刷性试验, 分析抗剪强度特性、崩解性以及抗冲性的变化规律, 评价麦秸秆加筋黄土的抗冲蚀性能, 最后通过模拟降雨冲刷对比试验, 验证麦秸秆加筋黄土的防护效果。研究结果表明: 直剪试验中麦秸秆加筋增强了土体的抗剪强度, 主要表现为粘聚力随着龄期的增长呈明显增长趋势, 最大粘聚力增长率达到了 311.6%, 内摩擦角的增长趋势较不明显, 最大内摩擦角增长率约为 50%, 加石灰的麦秸秆加筋黄土的粘聚力、内摩擦角比不加石灰的分别提高了 44.5% 和 19.8%, 石灰的加入改善了麦秸秆的加筋效果; 崩解性试验和抗冲试验中, 麦秸秆加筋降低了土体的崩解速率, 提高了土体的抗冲刷系数, 最小崩解速率降低了 79.9%, 最大抗冲刷系数增长了 156.9%, 土体的抗蚀性、抗冲性得到明显提高, 石灰的加入进一步增强了麦秸秆加筋黄土的抗蚀、抗冲性; 降雨冲刷试验明显地显示了麦秸秆加筋黄土防护效果, 最大累计冲蚀量降低率达到 41.9%, 加石灰的麦秸秆加筋黄土的防护效果比不加石灰的防护效果更好。采用麦秸秆加筋黄土是黄土边坡值得推广的一种防护措施。

**关键词:**道路工程; 黄土边坡; 麦秸秆加筋黄土; 抗剪强度; 崩解速率; 抗冲刷系数; 模拟降雨试验  
**中图分类号:** U416.14 **文献标志码:** A

## Experiment on anti-eroding property of reinforced loess with wheat straw

LU Hao<sup>1</sup>, YAN Chang-gen<sup>1</sup>, YANG Xiao-hua<sup>1</sup>, XUE Xiao-hui<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

**Abstract:** Erosion of loess highway slope, which is caused by heavy rain, is to be solved by reinforcing loess with wheat straw and lime to protect the loess highway slope. In order to study the anti-eroding property and protective effect of reinforced loess with wheat straw, some samples were prepared, including undisturbed loess, reinforced loess with wheat straw, and reinforced loess with wheat straw and lime. Then direct shear tests, disintegration tests and anti-scouring tests were carried out to analyze the shear strength, disintegration and anti-scouring were analyzed and to evaluate the performance of anti-erosion of reinforced loess with wheat straw.

收稿日期: 2016-08-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41272285); 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题基金项目(KLTCR-Y12-5)

作者简介: 卢 浩(1988-), 男, 江西赣州人, 工学博士研究生, E-mail: luhaocofidence@163.com。

通讯作者: 杨晓华(1961-), 男, 河北唐山人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: xiaohuay@126.com。

Finally, simulated rainfall comparison tests were conducted to verify the protection effect of the reinforced loess with wheat straw. The results show that reinforcement with wheat straw enhances the shear strength of soil. To be specific, cohesion has a obvious growth trend with the growth of age, and the maximum increment of cohesion reaches to 311.6%; the growth trend of frictional angles is not significant, and the maximum increment of frictional angle reaches approximately to 50%; the cohesion and frictional angles of reinforced loess with wheat straw and lime increase by 44.5% and 19.8% compare with that without lime, which indicates that lime improves the reinforcement effect of wheat straw. In disintegration tests and anti-scouring tests, reinforcement with wheat straw reduces the disintegration ratio of soil, and enhances the anti-scouring coefficient, the minimum disintegration ratio decreases by 79.9% while the maximum anti-scouring coefficient increases by 156.9%; the anti-scouring and anti-eroding ability of soil are improved significantly; lime enhances the anti-scouring and anti-eroding ability of the reinforced loess with wheat straw. The protection effect of the reinforced loess with wheat straw is significant, the maximum decreasing ratio of accumulated erosion amount reaches to 41.9%, and the protection effect of the reinforced loess with wheat straw and lime is better than that without lime. Reinforcement loess with wheat straw is one of effective means for protecting loess slope, which is worth to be popularized. 6 tabs, 8 figs, 20 refs.

**Key words:** road engineering; loess slope; wheat straw reinforced loess; shear strength; disintegration ratio; anti-scouring coefficient; simulated rainfall test

## 0 引 言

在中国,使用树木枝条、草筋、作物秸秆或竹片的加筋技术已有很久远的历史,许多地区的土长城、土房子及河岸护堤等都是这样修筑的<sup>[1]</sup>。由于植物纤维加筋效果良好,且具有造价低廉、易降解、生态环保等优点,植物纤维作为加筋材料的研究越来越受到重视。

纤维材料的加筋效果主要取决于筋土界面的作用强度及加筋材料本身的抗拉强度<sup>[2-3]</sup>。麦秸秆具有一定的抗拉强度和延伸性,适合作为加筋材料<sup>[4]</sup>。西北地区许多土房子常用这种植物纤维作为加筋材料修筑土墙,沿海地区也有用纤维加筋盐渍土或软土以改善路基的强度性能。余沛等对麦秸秆加筋滨海盐渍土进行了一系列试验,结果表明麦秸秆使土的抗压强度、抗剪强度及抗变形能力显著提高<sup>[5]</sup>;李敏等通过麦秸秆加筋石灰土的抗剪强度试验表明,麦秸秆的 3 种布筋位置均能提高石灰土的抗剪强度和抗变形能力,不同的布筋位置对加筋土的内摩擦角改变较小,对粘聚力的增长影响较大<sup>[6]</sup>;Bouhicha 等通过试验证实了麦秸秆加筋可以降低土体的收缩,减少固化时间及提高土体的压缩强度<sup>[7]</sup>;Ashour 等通过麦秸秆加筋粘土和沙混合物,发现麦秸

秆加筋可以显著提高混合物的强度及延展性<sup>[8]</sup>;魏丽等通过麦秸秆加筋材料的抗拉性能试验发现,无茎节麦秸秆的极限拉力和极限延伸率均高于 1 茎节麦秸秆,SH 胶浸泡麦秸秆可使其抗拉性能得到增强<sup>[9]</sup>;张奇等通过麦秸秆加筋软土的无侧限抗压试验,发现麦秸秆加筋可以显著提高软土抗剪力学性能<sup>[10]</sup>;柴寿喜等通过击实麦秸秆石灰加筋盐渍土试样的无侧限抗压试验发现,重型击实试样的适宜加筋长度为 50 mm,轻型击实试样的适宜加筋长度为 30 mm,麦秸秆和石灰共同加筋固化可以使盐渍土的强度和抗变形能力显著增强<sup>[11]</sup>。上述研究表明,麦秸秆加筋可以显著地提高盐渍土或软土的强度和抗变形能力,适宜作为一种加筋材料。但这些研究主要集中在滨海盐渍土、软土地基处理方面,麦秸秆加筋材料在边坡坡面防护中的研究较少,尤其是在黄土边坡中的应用,麦秸秆加筋土的抗冲蚀性能研究则更少。

由于中国西北地区年降雨量少,且黄土结构主要呈粒状架空形式,直立性较好,在未浸水状态下具有较高的抗剪强度,使得该地区的大部分公路边坡(坡体本身稳定)不采取任何防护措施;然而该地区的降雨量却比较集中,且多以短时强降雨形式出现,因此黄土公路边坡坡面冲蚀破坏问题较为严重,冲

沟、掉块剥落现象常见,不仅影响沿线公路的视觉美观,而且可能影响到整个坡体的稳定性。麦秸秆加筋土具有较高的强度和抗变形能力,若用于黄土边坡坡面防护(坡体本身稳定),可以提高坡面土体的强度。麦秸秆是一种易腐烂的材料,在天然遇水条件下易失去加筋作用,但可以通过周期性多次喷护(施工简便、快捷,造价低廉),或者在加筋土中掺入一些耐旱草本植物种子,通过后期草本植物根系的加筋作用来代替麦秸秆腐烂产生的加筋失效问题,麦秸秆还可为草本植物的生长提供一定的营养。因此,麦秸秆加筋土能否用于黄土边坡坡面防护的关键问题是其本身的抗冲蚀性能,如果抗冲蚀性能差,与原状黄土无区别,无论多少次喷护也起不到防护作用,也无法为草本植物生长提供前期稳定的土壤环境(种子随加筋土遇水流失)。为此,本文通过麦秸秆加筋黄土的直剪试验、崩解性试验和抗冲刷试验研究其抗冲蚀性能,并通过室内模拟降雨试验验证麦秸秆加筋黄土防护层的抗冲蚀效果,为麦秸秆加筋黄土在黄土边坡防护中的应用提供一定的理论依据。

1 试验材料、方法和评价指标

1.1 试验材料

(1)试验采用陕北原状黄土,黄土的基本物理力学性质见表 1。

表 1 黄土基本物理力学性质

Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of loess						
重度 $\gamma$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	含水率 $w/\%$	孔隙 比 $e$	塑限 $W_L/\%$	塑性指 数 $I_P$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$
15.6	9.8	1.05	16.5	10.3	19	21

(2)麦秸秆取自当年产的新鲜麦秸秆,直径为 4~5 mm,去除干枯麦叶,加筋长度分别为 30、50 mm,各占 50%(提高纤维在土中的分散度),质量加筋率为 0.5%。

(3)石灰为袋装石灰粉,钙镁含量为 84.67%,石灰掺量分别为 0%、5%、8%。

(4)试验用水直接采用饮用水,加水量按水土比 0.37 添加。

1.2 试验方法

(1)剪切试验。先将混合料拌和均匀,再加水搅拌,装入固定模具中,静力挤压至试样成型。静置 10 min 后推出试样,放入养护箱中,分别养护至 3、7、15、20 d。试样直径为 61.8 mm,高为 20 mm。采用不固结不排水剪切试验,试验仪器采用南京土壤

仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式电动四联直剪仪,围压分别取 100、200、300、400 kPa,剪切速率为 0.8 mm/min,试验按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中规定的步骤进行。

(2)崩解性(抗蚀性)试验。采用静力挤压法制样,分别养护至 7、14、21 d,试样尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm。试验所用仪器采用李家春等研制的黏性土崩解试验仪,这种仪器共由两部分组成,如图 1 所示<sup>[12]</sup>。内筒为浮筒,直径为 5 cm;外筒直径为 20 cm。内筒靠近顶部和底部处分别固定 3 个三角形定位指针,底部挂有 1 个小网板,网板孔径为 1 cm;外筒用于装自来水,外筒内壁上有刻度,最小精度为毫米,外筒上有溢水孔和注水管。试验步骤为:①向崩解仪内注水至溢水孔位置;②测定水温后,将装有土样的内筒放入外筒内,并注意保持水位的稳定;③当浮筒指针稳定后开始计时,并计入初始读数;④之后每隔 1 min 计入指针读数,直到试样崩解完毕,并根据试样崩解情况适当调整读数的时间间隔。试验结束后,计算崩解模数为

$$D_t = \frac{A_t - A_0}{A_0}$$

(1)

式中: $D_t$  为麦秸秆加筋土试样在  $t$  时刻的崩解模数; $A_t$  为  $t$  时刻浮筒指针的读数; $A_0$  为试验开始时浮筒指针稳定时的初始读数。

(3)抗冲性试验。采用静力挤压法制样,分别养护至 7、14、20 d,试样尺寸为 60 mm×60 mm×60 mm。抗冲性试验采用原状土冲刷槽法,目前中国暂无统一的原状土冲刷槽法仪器。根据吴普特等的试验研究,试验仪器采用自制的抗冲刷仪器,如下页图 2 所示,冲刷槽长 100 cm,宽 6 cm,高 8 cm<sup>[13-14]</sup>。试验步骤为:①试验前先将试样浸水 24 h,试验时静置 1 min,去掉多余的重力水,称其

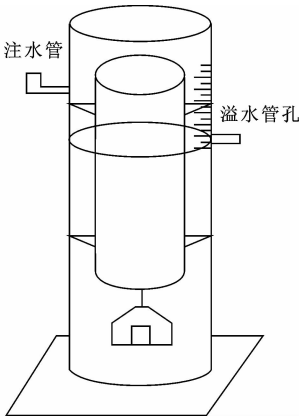


图 1 崩解试验仪  
Fig. 1 Disintegration tester

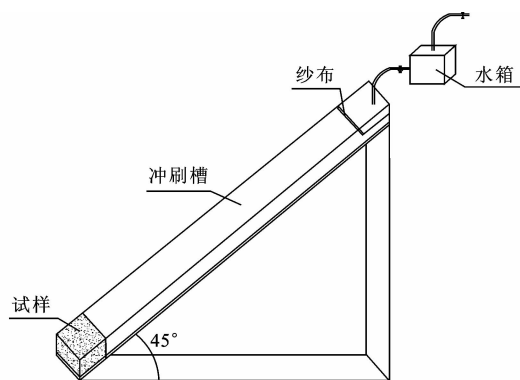


图 2 抗冲试验仪

Fig. 2 Anti-scouring tester

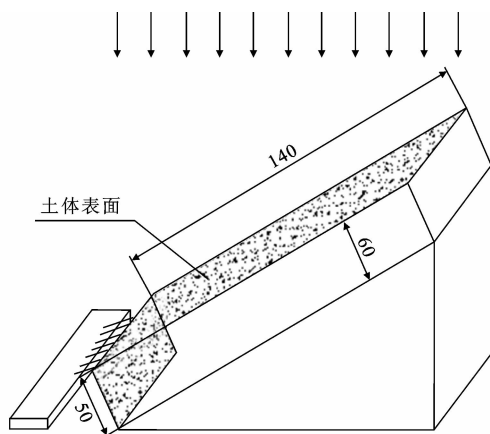
质量;②调节钢槽坡度为 45°(黄土地区公路边坡常用坡度);③将试样置于冲刷槽底部,以一定的流量放水冲刷,冲刷水量由时间控制,根据西安地区降雨资料,取百年一遇的最大降雨强度所产生的地坡面径流量 900 L/h,分别进行 1、3、5 min 共 3 次冲刷试验;④当冲刷结束后,静置 1 min 后进行称重,并计算各次试验抗冲刷系数及平均冲刷系数<sup>[15-17]</sup>。抗冲刷系数计算式为

$$R = \frac{qt}{w} \quad (2)$$

式中: $R$  为抗冲刷系数(L/g); $q$  为流量(L/min); $w$  为  $t$  时段内被动水冲走的土体质量(g)。

(4)人工模拟降雨对比冲刷试验。试验在长安大学人工降雨大厅进行。冲刷模型采用改装设计后的有机玻璃槽进行,槽体宽 0.4 m,长 1.4 m,上端深 0.6 m,下端深 0.5 m,如图 3 所示。冲刷槽出水口接一圆柱形有机玻璃,便于在出口处连续取样进行径流量及含泥量的测量。根据西安及附近地区的降雨特征,模拟降雨强度采用关中地区百年一遇的高强度暴雨,即 60 mm/h。为了更好地反映边坡的冲蚀规律,本次试验的降雨历时设为 1 h,冲蚀过程中连续采集径流冲刷试样,保证在数据分析过程中可任意选取某个时段内的冲蚀量或累计冲蚀量进行分析。根据黄土公路边坡常用的坡比,本次试验采用路堤边坡常用的一种坡比 1:1.5。

本次试验采用的模拟降雨仪器是日本 Daiki Rika Kogyo Co. Ltd. 公司生产的模拟降雨器,型号为 DIK-6000,模拟降雨器由雨滴产生装置和供水箱组成,如图 4 所示。雨滴产生装置的尺寸为 1 400 mm×1 400 mm×2 542 mm,有效降雨面积为 1.040 4 m<sup>2</sup>,可模拟的最大降雨强度为 80 mm/h,最小降雨强度为 5 mm/h,有效降雨高度为 2 m,产生直径为 1.7~2.8 mm 的雨滴。



单位: cm

图 3 边坡降雨冲刷试验

Fig. 3 Test of slope rainfall erosion



图 4 模拟降雨器 DIK-6000

Fig. 4 Rainfall simulator DIK-6000

考虑到试验时的条件难以掌握,如压实度、湿度、坡面平整程度、土的平整度、室内温度的变化等因素,所以采用对比试验,采用 2 个模型箱:一个进行有麦秸秆加筋土防护的冲刷;另一个则是裸露黄土边坡的冲刷。由于是在相同条件下对同样的土进行夯实,且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麦秸秆加筋土的抗冲蚀效果。

模拟降雨试验开始前,对降雨器进行调试,保证降雨强度的准确性。试验开始后每 1 min 用量筒分别对有无麦秸秆加筋土防护的边坡采集冲蚀水样,并测定水样的体积,由量筒直接读取,收集水样中的泥沙,泥沙质量采用烘干法测定。本文主要通过各时段内的累计冲蚀量及其降低率来分析其抗冲蚀效果。

### 1.3 评价指标

为了评价麦秸秆加筋黄土的抗冲蚀效果,设定 5 个评价指标,分别是黏聚力增长率、内摩擦角增长率、崩解速率降低率、抗冲刷系数增长率及累计冲蚀

量降低率<sup>[18]</sup>,其计算公式见式(3)~式(7)。

黏聚力增长率  $\Delta c$  为

$$\Delta c = \frac{c_r - c_l}{c_l} \tag{3}$$

式中: $c_r$  为麦秸秆加筋黄土的黏聚力(kPa); $c_l$  为原状黄土的黏聚力(kPa)。

内摩擦角增长率  $\Delta \varphi$  为

$$\Delta \varphi = \frac{\varphi_r - \varphi_l}{\varphi_l} \tag{4}$$

式中: $\varphi_r$  为麦秸秆加筋黄土的内摩擦角; $\varphi_l$  为原状黄土的内摩擦角。

崩解速率降低率  $\Delta V$  为

$$\Delta V = \frac{V_l - V_r}{V_l} \tag{5}$$

式中: $V_l$  为原状黄土的崩解速率; $V_r$  为麦秸秆加筋黄土的崩解速率; $V$  为崩解速率, $V = (D_b - D_a) / (t_b - t_a)$  ( $D_b$ 、 $D_a$  分别为崩解曲线稳定阶段  $b$  点和  $a$  点对应的累计崩解模数; $t_b$ 、 $t_a$  分别为  $b$  点和  $a$  点对应的崩解时间(min),见文献[12])。

抗冲刷系数增长率  $\Delta R$  为

$$\Delta R = \frac{R_r - R_l}{R_l} \tag{6}$$

式中: $R_r$  为麦秸秆加筋黄土的抗冲刷系数(L/g); $R_l$  为原状黄土的抗冲刷系数(L/g)。

累计冲蚀量降低率  $\Delta Q_t$  为

$$\Delta Q_t = \frac{Q_{t1} - Q_{t2}}{Q_{t1}} \tag{7}$$

式中: $Q_{t1}$  为  $0 \sim t$  时段内裸露边坡的累计冲蚀量; $Q_{t2}$  为  $0 \sim t$  时段内麦秸秆加筋黄土防护边坡的累计冲蚀量。

2 抗冲蚀效果评价

2.1 麦秸秆加筋黄土的抗剪强度分析

坡面土体的冲蚀破坏实质上是薄层径流产生的动水压力作用在土体上,产生了剪应力作用,当这种剪应力超过土体本身的抗剪强度时,土体就发生剪切破坏,土体随之被径流带走脱离母体,所以坡面土体的冲蚀破坏程度与土体本身的抗剪强度关系密切。麦秸秆加筋黄土用于黄土坡面防护时,抗剪强度是其抗冲蚀性的一个重要影响因素。麦秸秆加筋黄土的黏聚力、内摩擦角及其较原状黄土的增长率见表 2。不同石灰掺量的麦秸秆加筋黄土的黏聚力增长率、内摩擦角增长率随龄期的变化如图 5、图 6 所示。

由表 2 及图 5、图 6 可知:①不同养护龄期下的

表 2 麦秸秆加筋黄土的黏聚力、内摩擦角及其增长率

Tab. 2 Cohesion, frictional angle and increment ratio of reinforced loess with wheat straw

土的类型	石灰掺量/%	养护龄期/d	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力增长率/%	内摩擦角增长率/%
原状黄土			19.0	21.0		
麦秸秆加筋黄土	0	3	22.8	21.2	20.0	0.8
		7	27.5	23.2	44.7	10.4
		15	45.9	25.8	141.6	22.9
		20	54.1	26.8	184.7	27.7
	5	3	25.8	29.0	35.8	38.1
		7	40.0	31.1	110.5	48.0
		15	61.5	31.4	223.7	49.5
		20	78.2	32.1	311.6	52.7
	8	3	24.0	24.5	26.3	16.5
		7	48.9	27.4	157.4	30.6
		15	55.1	28.1	190.0	33.6
		20	73.8	29.5	288.4	40.4

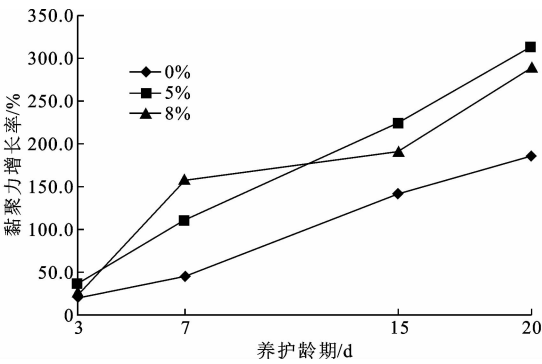


图 5 麦秸秆加筋黄土的黏聚力增长率随龄期的变化曲线  
Fig. 5 Curves of cohesion increment of reinforced loess with wheat straw with ages

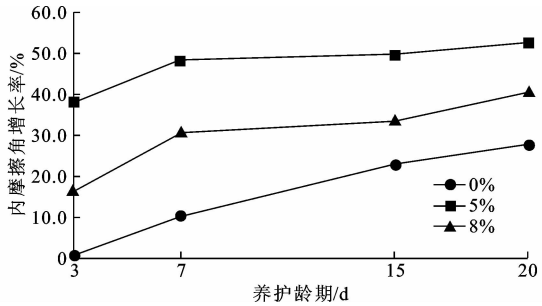


图 6 麦秸秆加筋黄土内摩擦角增长率随龄期的变化曲线  
Fig. 6 Curves of frictional angle increment of reinforced loess with wheat straw changing with ages

麦秸秆加筋黄土的黏聚力、内摩擦角均比原状黄土的高,麦秸秆加筋增强了土体的抗剪强度;②掺石灰的麦秸秆加筋黄土 20 d 的黏聚力、内摩擦角最大值分别为 78.2 kPa 和 32.1°,比不掺石灰的麦秸秆加筋黄土(54.1 kPa 和 26.8°)分别提高了 44.5%和

19.8%,说明石灰对麦秸秆加筋作用有增强的效果;③麦秸秆加筋黄土的黏聚力、内摩擦角均随龄期的增长而增长,黏聚力的增长趋势较为明显,内摩擦角的增长相对不明显,增长趋势趋于平缓,说明麦秸秆加筋主要提高了土体的黏聚力;④加 8%石灰的麦秸秆加筋黄土的黏聚力增长率变化趋势与加 5%石灰的麦秸秆加筋土的相似,前 20 d 的变化近似线性增长,而不加石灰的麦秸秆加筋黄土 20 d 后的黏聚力增长趋势平缓,加 5%石灰的麦秸秆加筋黄土的黏聚力 20 d 的增长率达到了 311.6%,而不加石灰的相对最小,为 184.7%;⑤麦秸秆加筋黄土的内摩擦角增长率整体趋于平缓,增长都不大,加入石灰后增长率略有增大,加 5%石灰的麦秸秆加筋土 20 d 后的内摩擦角增长率为 59.7%,比加 8%石灰和 不加石灰的加筋土的都要高。

由于试样制作初期主要是按混合料的拌和难易程度来施加用水量(水土比为 0.37)的,试样初期的含水率大于最佳含水率,土颗粒表面的结合水膜较厚,使得土颗粒之间的润滑作用增强,筋土之间的摩擦作用减小,加筋作用不明显,随着龄期的增长,试样的含水率逐渐降低,土颗粒之间的结合水膜变薄,其黏结作用逐渐增强,筋土之间的摩擦力也得到提高,加筋效果得到更好的发挥。石灰的加入有增强加筋效果的作用,石灰的硝化作用在土体中形成胶结物,增强了土颗粒之间的联结力,同时这些胶结物使土中分散的胶粒凝聚成团,胶结物的强胶结性也使麦秸秆在土中更易形成一种空间网状结构,约束土体的变形,提高土体的结构强度。

### 2.2 麦秸秆加筋黄土的崩解性分析

边坡坡面径流对土体主要有两方面的作用,其中一方面是坡面土颗粒在下渗雨水的浸泡下发生崩解分散,为坡面径流冲刷提供重要的物质来源,因此,可根据土体在静水中的崩解速率来评价土体抗蚀性的强弱。加筋率固定为 0.5%,选取不加石灰和加 5%石灰的麦秸秆加筋黄土及原状黄土进行不同龄期的土体崩解性试验。不同龄期的麦秸秆加筋黄土的崩解速率及其较原状黄土的降低率见表 3。

由表 3 可知:①不同龄期的麦秸秆加筋黄土崩解速率均比原状黄土的小,且随着龄期的增长崩解速率降低率有缓慢增长的趋势;②不加石灰的麦秸秆加筋黄土的 14 d 崩解速率为 0.055,降低率达到了 74.5%,这说明麦秸秆加筋黄土在静水中的稳定性强于原状黄土,麦秸秆加筋提高了土体的水稳定性;③加入石灰的麦秸秆加筋黄土的 21 d 崩解速

表 3 麦秸秆加筋黄土的崩解速率及其降低率

Tab. 3 Disintegration ratio and decreasing ratio of reinforced loess with wheat straw

土的类型	石灰掺量/%	养护龄期/d	崩解速率/ min <sup>-1</sup>	崩解速率降低率/%
原状黄土			0.217	
麦秸秆加筋黄土	0	7	0.077	64.4
		14	0.055	74.5
		21	0.067	69.1
	5	7	0.054	75.0
		14	0.045	79.0
		21	0.043	79.9

率为 0.043,降低率为 79.9%,比不加石灰的稍高,这主要是因为石灰的硝化、硬化作用使加筋土体脱水、膨胀挤密,对麦秸秆纤维表面进行挤压,改善了麦秸秆与黄土之间的黏结效果。

### 2.3 麦秸秆加筋黄土的抗冲性分析

边坡坡面径流对土体的另一方面作用是径流产生的动切力对坡面表层土体推移冲切的作用<sup>[16]</sup>。麦秸秆加筋黄土的防冲蚀效果与其抵抗动水冲切作用的能力有很大关系。

选取不加石灰和加 5%石灰的麦秸秆加筋黄土及原状黄土,对不同龄期的麦秸秆加筋土进行动水作用下的抗冲刷试验。不同龄期的麦秸秆加筋土抗冲刷系数及其较原状黄土的增长率见表 4。

表 4 麦秸秆加筋黄土的抗冲刷系数及其增长率

Tab. 4 Anti-scouring coefficient and increment ratio of reinforced loess with wheat straw

土的类型	石灰掺量/%	养护龄期/d	抗冲刷系数/(L·g <sup>-1</sup> )	抗冲刷系数增长率/%
原状黄土			0.43	
麦秸秆加筋黄土	0	7	0.74	72.0
		14	0.77	79.5
		21	0.73	69.6
	5	7	0.92	114.6
		14	0.98	127.9
		21	1.10	156.9

由表 4 可知:①不同龄期的麦秸秆加筋黄土的抗冲刷系数比原状黄土的大,且随龄期有增长趋势;②不加石灰的麦秸秆加筋黄土 14 d 的抗冲刷系数为 0.77,增长率为 79.5%,抗冲性得到明显的提高;③加 5%石灰的麦秸秆加筋土 21 d 的抗冲刷系数为 1.10,增长率达到了 156.9%,为同期不加石灰的麦秸秆加筋黄土的 1.5 倍,石灰的加入进一步增强了麦秸秆加筋黄土的抗冲性,石灰不仅起到了很好的水化固化作用,且石灰的加入可以增大麦秸秆纤维

密度,改善其在土中的分散<sup>[19]</sup>;④石灰的水化作用可以使麦秸秆纤维中的部分果胶、木质素和半纤维等小分子杂质溶解以及使纤维表面部分刻蚀而变得粗糙,从而提高麦秸秆与土体之间的咬合作用<sup>[20]</sup>。

2.4 麦秸秆加筋黄土防护边坡与裸露黄土边坡的降雨侵蚀对比分析

选取加 5%石灰和不加石灰的麦秸秆加筋黄土防护的黄土边坡与裸露黄土边坡进行室内模拟降雨冲刷试验,麦秸秆加筋黄土防护层的厚度为 8 cm。麦秸秆加筋黄土防护的黄土边坡与裸露黄土边坡各时段的累计冲蚀量及其降低率见表 5、表 6,降低率随时间的变化曲线如图 7 所示。

表 5 各时段有无麦秸秆加筋黄土防护的累计冲蚀量  
Tab. 5 Accumulated erosion amount with and without the protection of wheat straw-reinforced loess under different time intervals

试验类型	石灰 掺量/%	各时段(min)累计冲蚀量/g					
		1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
裸露黄土 边坡		2.86	4.17	4.21	6.28	5.92	6.13
麦秸秆加 筋黄土防 护边坡	0	4.61	4.74	4.46	4.42	4.58	4.47
	5	3.19	3.44	3.43	3.65	3.90	3.58

表 6 各时段有无麦秸秆加筋黄土防护的冲蚀量降低率  
Tab. 6 Erosion amount decreasing ratio with and without the protection of wheat straw-reinforced loess under different time intervals

试验类型	石灰 掺量/%	各时段(min)累计冲蚀量降低率/%					
		1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
麦秸秆加 筋黄土防 护边坡	0	-60.81	-13.73	-5.89	29.64	22.79	27.09
	5	-11.23	17.33	18.56	41.90	34.20	41.60

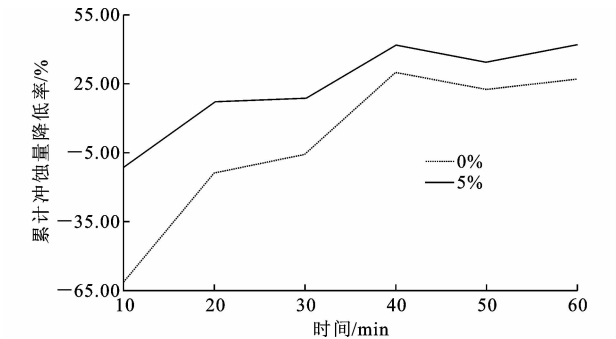
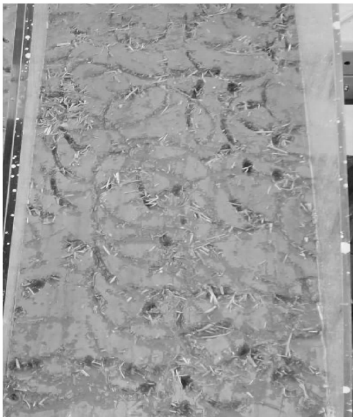


图 7 冲蚀量降低率变化  
Fig. 7 Change of erosion decreasing ratio

由表 5 可知:裸露黄土边坡在降雨进行的前 10 min 内,累计冲蚀量比较低,随着降雨历时的增长,累计冲蚀量逐渐增大,尤其是在 30 min 之后,累计冲蚀迅速增长,这时裸露黄土边坡坡脚处开始出现局部坍塌,如图 8 所示;有麦秸秆加筋黄土防护层



(a) 裸露黄土边坡



(b) 麦秸秆加石灰加筋黄土防护边坡

图 8 裸露黄土边坡和麦秸秆加筋黄土防护边坡冲蚀效果  
Fig. 8 Erosion of slope without protection and with the protection of wheat straw-reinforced loess

的黄土边坡各时段累计冲蚀量均比较稳定,相差不大,且随着降雨历时的增长,有减小的趋势;不加石灰的麦秸秆加筋黄土防护的各时段累计冲蚀量均比加 5%石灰的麦秸秆加筋黄土防护的大;加 5%石灰的麦秸秆加筋黄土防护的累计冲蚀量在 10 min 之后比裸露黄土边坡的小,而不加石灰的麦秸秆加筋黄土防护的累计冲蚀量则是在 30 min 之后小于裸露黄土边坡的累计冲蚀量。

由表 6、图 8 可知:(1)麦秸秆加筋黄土防护的累计冲蚀量降低率随着降雨历时的增长而增长,降雨历时在 0~40 min 内的降低率增长迅速,之后增长趋势较为平缓;不加石灰的麦秸秆加筋土防护的降低率最大值为 29.64%,起到了较好的抗冲蚀效果,加 5%石灰的麦秸秆加筋黄土防护的降低率最大值为 41.9%,起到了更好的抗冲蚀效果。(2)加 5%石灰的麦秸秆加筋黄土防护的累计冲蚀量降低率在前 0~10 min 内出现负值,其主要原因有以下几点:①降雨初期,裸露黄土边坡坡面土体渗透性比麦秸秆加筋土防护层的好,孔隙率大,且原状黄土的

含水量低,降雨初期的雨水主要下渗到坡面土体内,因此形成的坡面径流量很小,而坡面径流量越小,其冲蚀能力越小,冲蚀量也就小;②麦秸秆加筋黄土的渗透性差,降雨在坡面迅速形成径流,径流的冲蚀作用相对于裸露黄土边坡的更明显;③防护层表面的黄土和麦秸秆之间有一定的勃结,雨滴的冲击作用容易将表层的麦秸秆剥离分开,为径流冲蚀提供了一定的土颗粒来源。(3)不加石灰的麦秸秆加筋黄土防护的累计冲蚀量降低率在0~30 min内均为负值,0~10 min内的降低率达到了-60.81%,约为加石灰麦秸秆加筋黄土防护同时段的6倍,其原因除了以上3点外,还有一点重要原因是,不加石灰的麦秸秆加筋黄土抗剪强度、水稳定性及其抗冲刷性均比加石灰的麦秸秆加筋黄土的要差,因此其抗冲蚀能力要比加石灰的弱,累计冲蚀量更大。

### 3 结 语

(1)麦秸秆加筋提高了土体抗剪强度,主要表现为黏聚力随着龄期的增长呈明显增长趋势,内摩擦角也随龄期的增长而增长,但不明显;加5%石灰的麦秸秆加筋黄土的黏聚力增长率比不加石灰的麦秸秆加筋土的高,石灰对麦秸秆加筋作用有增强的效果。

(2)不同龄期下麦秸秆加筋黄土崩解速率均小于原状黄土,麦秸秆加筋提高了土体的抗蚀性。加石灰的麦秸秆加筋黄土21 d的降低率为79.9%,比不加石灰的麦秸秆加筋黄土高出约10%,说明石灰改善了麦秸秆与黄土之间的黏结效果,提高了麦秸秆加筋土的抗水蚀能力。

(3)麦秸秆加筋提高了土体的抗冲能力,不加石灰的麦秸秆加筋土的抗冲刷系数增长率比加5%石灰的麦秸秆加筋黄土的小,石灰的加入提高了麦秸秆加筋黄土在动水中的抗冲性能。

(4)麦秸秆加筋黄土防护的抗冲蚀效果明显,能提高坡体尤其是近坡脚部位的强度和稳定性,且随着降雨历时的增长,其抗冲蚀效果会更明显。加石灰的麦秸秆加筋黄土防护效果比不加石灰的好,石灰的加入提高了麦秸秆加筋黄土的抗冲蚀破坏能力。

(5)试验中麦秸秆加筋黄土的抗冲蚀性能良好,防护效果明显,且麦秸秆加筋黄土防护层的造价低廉,施工简便、快捷,宜就地取材,具有生态环保意义,是值得推广的一种黄土边坡防护措施。

(6)本文只对麦秸秆加筋黄土的抗冲蚀性能及

室内模拟降雨防护效果进行了研究,下一步应主要针对麦秸秆加筋黄土防护层的耐久性、天然状态下的防护效果及加入草种后的绿化效果进行研究。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2010.  
ZHENG Ying-ren, CHEN Zu-yu, WANG Gong-xian, et al. Engineering treatment of slope & landslide[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [2] 张艳美,张旭东,张鸿儒. 土工合成纤维补强机理试验研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1323-1326.  
ZHANG Yan-mei, ZHANG Xu-dong, ZHANG Hong-ru. Test research of geotechnique textile soil reinforcement mechanism and engineering application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1323-1326.
- [3] 王 军,葛永生. 失稳加筋土挡土墙喷网锚注加固技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(12): 80-81, 84.  
WANG Jun, GE Yong-sheng. Reinforcement technology of sprayed concrete with bar nets and anchor grouting on failure earth retaining walls[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(12): 80-81, 84.
- [4] 陈昌富,刘怀星,李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2041-2045.  
CHEN Chang-fu, LIU Huai-xing, LI Ya-ping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041-2045.
- [5] 余 沛,柴寿喜,王晓燕,等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的加筋效应及工程应用问题[J]. 天津城市建设学院院报, 2010, 16(3): 161-165.  
YU Pei, CHAI Shou-xi, WANG Xiao-yan, et al. Reinforcement effect and engineering application problems of littoral saline soil reinforced with wheat straw[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2010, 16(3): 161-165.
- [6] 李 敏,柴寿喜,杜红普,等. 麦秸秆加筋土的合理布筋位置和抗剪强度模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3923-3929.  
LI Min, CHAI Shou-xi, DU Hong-pu, et al. Reasonable reinforcement position and shear strength model of reinforced saline soil with wheat straw and lime[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3923-3929.



- [7] BOUHICHA M, AOUISSI F, KENAI S. Performance of composite soil reinforced with barley straw[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(5): 617-621.
- [8] ASHOUR T, BAHNASAWAY A, WU W. Compressive strength of fiber reinforced earth plasters for straw bale buildings[J]. Australian Journal of Agricultural Engineering, 2010, 1(3): 86-92.
- [9] 魏 丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆加筋材料抗拉性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 128-132.  
WEI Li, CHAI Shou-xi, CAI Hong-zhou, et al. Research on tensility of wheat straw for reinforced material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 128-132.
- [10] 张 奇, 王常明, 李振亚, 等. 麦秸秆加筋软土的试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(增 1): 294-297.  
ZHANG Qi, WANG Chang-ming, LI Zhen-ya, et al. Experimental study on soft soil reinforced with wheat straw[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(S1): 294-297.
- [11] 柴寿喜, 王 沛, 王晓燕. 麦秸秆布筋区域与截面形状下的加筋土抗剪强度[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 123-127.  
CHAI Shou-xi, WANG Pei, WANG Xiao-yan. Effect of reinforcing range and cross section of wheat straw on shear strength of reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 123-127.
- [12] 李家春, 崔世富, 田伟平. 公路边坡降雨侵蚀特征及土的崩解试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(1): 23-26, 49.  
LI Jia-chun, CUI Shi-fu, TIAN Wei-ping. Erosion characteristic of road slope and test of soil disintegration[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(1): 23-26, 49.
- [13] 蒋定生. 黄土区不同利用类型土壤抗冲刷能力的研究[J]. 土壤通报, 1979(4): 20-23.  
JIANG Ding-sheng. Research on anti-scourability of soil of different land uses in loess area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1979(4): 20-23.
- [14] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性研究及有关问题[J]. 水土保持研究, 1997(增 1): 91-101.  
LIU Guo-bin. Soil anti-scourability research and its perspectives in Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997(S1): 91-101.
- [15] 汪益敏. 路基边坡坡面冲刷特性与加固材料性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003.  
WANG Yi-min. Study on erosion and soil stabilizer properties for highway subgrade slope[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2003.
- [16] 马 璠, 王 健, 张鹏辉, 等. 干湿交替处理对土壤抗冲性的影响试验研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(35): 178-184.  
MA Fan, WANG Jian, ZHANG Peng-hui, et al. Effects of dry-wet alternation treatment on anti-scourability of soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(35): 178-184.
- [17] 周利军, 齐 实, 王云琦. 三峡库区典型林分林地土壤抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 186-188, 216.  
ZHOU Li-jun, QI Shi, WANG Yun-qi. Research on forest soil anti-erosion and anti-scour of typical forests in Three Gorges Reservoir areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 186-188, 216.
- [18] 晏长根, 杨晓华, 谢永利, 等. 土工格室对黄土路堤边坡抗冲刷的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1342-1344, 1348.  
YAN Chang-gen, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. Experimental research on anti-eroding effect of geocells in loess embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1342-1344, 1348.
- [19] 唐朝生, 施 斌, 顾 凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 610-614.  
TANG Chao-sheng, SHI Bin, GU Kai. Microstructural study on interfacial interactions between fiber reinforcement and soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 610-614.
- [20] 韩春国, 许玉芝, 王春鹏, 等. 麦秆纤维/氨基树脂塑料的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2011, 39(9): 109-112.  
HAN Chun-guo, XU Yu-zhi, WANG Chun-peng, et al. Study on preparation and properties of straw fiber/amino resin mould plastics[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(9): 109-112.