

# 公路边坡降雨侵蚀特征及土的崩解试验

李家春<sup>1</sup>, 崔世富<sup>2</sup>, 田伟平<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 安康市公路管理局, 陕西 安康 725000)

**摘要:**为研究公路边坡降雨侵蚀的特殊性以及土质边坡的可蚀性,通过观察分析,并利用自行研制的崩解仪进行了压实黄土浸水崩解试验。试验结果表明,公路边坡降雨侵蚀中的重力侵蚀所占比例较大,坡面土的崩解是主要分散方式。建立了有效空隙比与崩解速率的相关关系,说明压实度、含水量对崩解影响的本质,即压实度、含水量的变化可统一用土的有效空隙比说明崩解规律,回归公式可用于预测压实土的崩解速率。土的崩解性反映了压实土的可蚀性,通过对比得出,边坡上压实土的可蚀性可用崩解速率表征,在工程水土保持研究中可用崩解速率作为土的可蚀性评价指标。

**关键词:**道路工程; 降雨侵蚀; 崩解; 压实度; 含水量; 可蚀性

中图分类号:U416.14

文献标志码:A

## Erosion characteristic of road slope and test of soil disintegration

LI Jia-chun<sup>1</sup>, CUI Shi-fu<sup>2</sup>, TIAN Wei-ping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Highway Administration of Ankang City, Ankang 725000, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the characteristic of road slope and soil erodibility, a soil disintegration instrument is developed to test compacted loess disintegration under water. It is pointed out that gravitational erosion is a main form of rainfall erosion, the soil disintegration is the key reason of incompactness behavior. The law of disintegration rate with moisture and level of compaction is described with residual voids content. The regressed formula can be used to calculate the disintegration rate of compacted loess. The results also show that disintegration rate is a reasonable index for estimate erodibility of compacted soil in civil engineering. 2 tabs, 5 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; rainfall erosion; soil disintegration; degree of compaction; moisture; soil erodibility

## 0 引言

土的崩解,土工上叫湿化,是指土在静水中发生碎裂解体塌落或强度减弱的现象。20 世纪 50 年代,有人把土的崩解作为评价土壤可蚀性的一项相关指标来进行研究,但当时的研究主要为农业服务,

崩解只能用于评价一少部分土的可蚀性,随后便被其他评价指标(如团聚粒含量、粘粒含量、有机质含量等)所代替。蒋定生(1995)研究了黄土高原土壤崩解速率的分布情况,所取土样为原状土<sup>[1]</sup>。公路边坡一般较陡,其降雨侵蚀特点与自然斜坡不同,表现出更多的重力侵蚀特征;同时,也由于坡度大,土

粒的分散方式也不同。在研究坡面侵蚀时,这两个方面是影响侵蚀强度的重要因素。通过野外观察和试验发现,在陡坡侵蚀中存在大量崩解现象,尤其在工程中压实土里较多。本文用自制崩解仪首次对压实土的崩解进行了试验研究,考虑含水量、压实度对崩解的影响,找出其中的规律,并对压实土的可蚀性评价指标进行探索<sup>[2-5]</sup>。

## 1 公路边坡降雨侵蚀的特殊性

### 1.1 重力侵蚀明显

有关研究表明,缓坡上的降雨侵蚀泥沙运动与河床泥沙运动基本规律一致,即在坡面饱和水条件下水流切应力是泥沙起动的控制条件。正因为如此,水土保持领域一般借用河流泥沙运动动力学的原理分析坡面侵蚀产沙过程。

由斜坡上物体的受力特点可知,物体的受力主要有重力、坡面的支持力和摩擦力。坡度越大,重力沿坡面向下的分力越大;在缓坡时,欲使坡面上的颗粒运动,主要是克服坡面摩擦力。但是,公路边坡较陡,比较常见的坡比有:1:1.75、1:1.5、1:1.25、1:1等,最大的有1:0.20,相当于直立边坡。与缓坡相比,由于重力的作用,陡坡上的土颗粒更易起动,这是显而易见的。

水土保持研究中把侵蚀动力分为水力侵蚀和重力侵蚀,而在斜坡上这两种侵蚀都存在,因此很难把二者区分开。在缓坡上,水力侵蚀是主要的。为研究方便,一般不区分水力侵蚀和重力侵蚀,在侵蚀计算时只考虑水力条件和坡面条件,将重力的影响包含在坡度中。以往由于没有意识到陡坡的重力作用,常将重力侵蚀忽略,因而对公路边坡降雨侵蚀,仅从水力、泥沙运动角度无法建立可靠的侵蚀计算模型。

### 1.2 坡面土的分散方式

相关研究表明,降雨侵蚀存在起始降雨强度,公路工程水土流失问题主要研究暴雨条件下的侵蚀。坡面土体具有一定的结构,只有土的结构破坏、土粒分散时,地表径流才能将其带出坡面。使土粒分散的作用包括:①雨滴击溅作用;②水流切应力和上举力;③粘性土浸水后软化,强度减小;④非饱和和粘性土浸水后崩解。

坡面侵蚀过程是土粒分散、被带离原来位置的过程。缓坡时,分散土粒也不一定能被带走,是否运动与水流条件有关。但在陡坡上,只要土粒被分散,在重力和水的参与下总是能带出坡面。因此土体是

否被分散是陡坡侵蚀发生的充分必要条件。使土粒分散的4个方面作用中。前3个无论缓坡还是陡坡都存在,第4个方面为浸水崩解,只发生在前期含水量较小(小于20%)的粘性土坡面。当坡度较小时,降雨及径流使坡面饱和,有时饱和层较厚,坡面起动的是饱和状态下的土颗粒。当坡度较大时,在水流作用下,饱和土是很难稳定在坡面上的,在重力及很小的水流作用下就会移动;在暴雨时坡面的饱和层厚度一般不会大,此时作用在坡面上的水就会引起土体崩解,崩解形成的碎屑、颗粒为侵蚀搬运的主要物质来源。

坡面侵蚀含沙率过程曲线也说明了上述观点。图1是一条常见的路堤边坡降雨侵蚀产沙率过程曲线,降雨一开始含沙率很高,约是侵蚀稳定阶段含沙率的2倍<sup>[6]</sup>。以往的解释是,开始坡面径流将坡面松散土粒带出坡面,并且一开始以雨滴击溅为主。但若将坡面和松散土粒清扫干净,曲线形状并不发生明显变化。此外,在公路路堤边坡降雨冲蚀试验中,坡顶冲刷最严重,除了坡顶挟沙能力更强外,土体遇水首先发生崩解也是土由密实状态变为松散状态的重要原因。

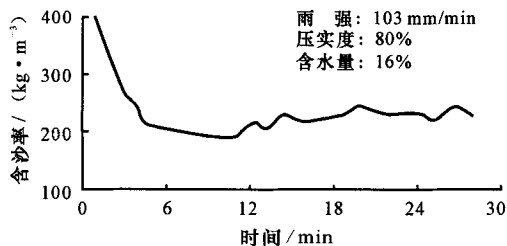


图1 黄土路堤降雨冲蚀含沙率过程曲线

由此可见,在暴雨坡面侵蚀中,土质坡面松散的主要原因是崩解。土的崩解是指粘性土由于浸水而发生碎裂、散体的现象。崩解是由于土体浸入水中后,水进入孔隙或裂隙中的情况不平衡,引起粒间扩散层增厚的速度也不平衡,以致粒间斥力超过吸力的情况不平衡,产生应力集中,使土体沿着斥力超过吸力最大的面崩落下来。根据试验及有关文献,崩解发生的条件<sup>[7]</sup>为:①存在临空面;②粘性土中粘粒含量小于30%;③含水量小于22%。这几个条件在黄土边坡上都成立。在公路边坡中,土的崩解性反映了土的可蚀性,研究土的崩解性对工程侵蚀计算及排水、防护都有指导意义<sup>[8-10]</sup>。

## 2 压实土崩解速率试验

### 2.1 土样制备

试验用土取自西安东郊黄土( $Q_3$ ),按土工实验

规程取土,并按所需的含水量加水,放置 24 h 以上,使含水量充分均匀后,用击实筒按要求的压实度压实,取出后用土工刀削成 200 cm<sup>3</sup> 环刀的容量大小。试样制做过程尽量快,减少水分损失。试验方案主要考虑两个控制因素:土样质量压实度  $K$ 、土样质量含水量  $w$ 。 $K$  分别取 80%、85%、90%、95%、100%; $w$  取 8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%,由于含水量会影响到压实效果,所以在较大压实度时含水量变化范围缩小。这两个因素组合,每个试样进行平行试验以检验可靠性,共完成崩解试验 50 多组。

### 2.2 试验仪器及试验方法

目前尚没有成型的粘性土崩解试验仪,本试验采用自行研制的粘性土崩解试验仪进行了研究。仪器由两部分构成,如图 2 所示。内筒为浮筒,直径为 5 cm;外筒直径 20 cm;内筒上固定有上下 6 个定位指针,底部坠一个小托盘,用于放置土样。外筒盛自来水(最好用蒸馏水,但用量较大),侧壁上标有刻度,最小分度为毫米。外筒上还设有溢水管和注水管,在试验过程中能保持筒内水位恒定。

测定水温(本次试验水温控制在 27 ℃),然后将土样放入测试仪中,同时注意使水位稳定。由于土样发生崩解,重量减轻,内筒上浮,从外筒的刻度尺上可直接读出初始读数 and 崩解过程中的瞬时刻度。显然,试样大小、形状不同,崩解量也不同。为尽量减少试样形状对崩解的影响,试验采用圆柱形试样,大小取 200 cm<sup>3</sup> 环刀容量,有利于对比和试验的标准化。为消除量纲的影响,试验用累积崩解模数表示崩解量。累积崩解模数是指经过时间  $t$  崩解体积与试样原体积的比值,由下式计算

$$B_t = \pi r^2 (H_0 - H_t) / 200 \tag{1}$$

式中: $B_t$  为累积崩解模数(无量纲); $r$  为内筒半径(2.5 cm); $H_0$  为初始指针读数(cm); $H_t$  为时间指针读数(cm)。

### 2.3 试验过程

将压实黄土试样放入清水中,由于土样表面细小分散颗粒进入水中,周围立即混浊。这时,有大量气泡逸出,紧接着土样表面开始崩解。崩解的碎屑

物以鳞片状为主,也有粒状。在整个崩解过程中不断有气体逸出,水质混浊,崩解速率开始较慢,然后进入稳定崩解,最后由于土样体积及表面积都减小,崩解速率减缓,直至崩解完成。

### 2.4 崩解曲线及崩解速率

崩解量与时间的关系曲线称崩解曲线,其基本形状为倒 S 形。图 3 是一条比较典型的实测崩解曲线,回归分析得: $B_t = -0.0004t^3 + 0.0116t^2 - 0.0402t + 0.0398$ , $R^2 = 0.9965$ 。崩解曲线基本可分 3 段: $0a$  段反映浸水后水进入孔隙、微裂隙的过程,此时表现为土样表层孔隙中的气体被挤出,还没有发生明显的崩解; $ab$  段较陡,是崩解的主要阶段,土样表面大量破裂、脱落,崩解剧烈,但崩解速率较稳定; $bc$  段反映大部分崩解基本完成,在水的浸泡下剩余部分寻找水下稳定角,少量土散落,崩解速率较小,最终崩解完成。

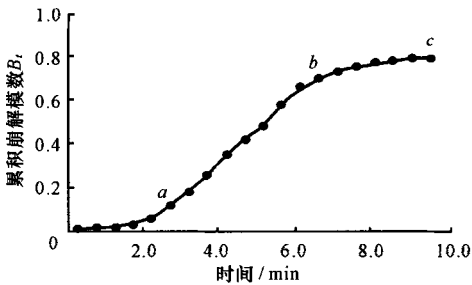


图 3 崩解曲线( $K=85\%$ , $w=80\%$ )

由崩解曲线可知,曲线  $ab$  段的陡缓反映了崩解的快慢,试验表明,这个阶段的崩解速率较稳定,用  $ab$  段平均斜率表征崩解的快慢是可行的。崩解速率由下式计算

$$V_1 = (B_b - B_a) / (T_b - T_a) \tag{2}$$

式中: $V_1$  为崩解速率( $\text{min}^{-1}$ ); $B_b$ 、 $B_a$  分别为  $b$  点和  $a$  点对应的累积崩解模数; $T_b$ 、 $T_a$  分别为  $b$  点和  $a$  点对应的崩解时间(min)。

按上述方法从每一条崩解曲线上确定崩解速率,结果见表 1。崩解速率与土样质量含水量关系曲线如图 4 所示。可以看出:①在相同含水量下,崩解速率随压实度的增大而减小;②在同一压实度下,崩解速率随含水量的增加而减小;③压实度小于 85% 时,崩解速率较大,而且表现出较大的随机性;④含水量大于 20% 时,崩解性基本消失;⑤压实度接近 100% 时,崩解性基本消失。

## 3 崩解速率与孔隙比的关系

孔隙比  $e$  是土的孔隙体积与土粒体积之比。土中的孔隙被气体和水占据。被空气占据的体积与土

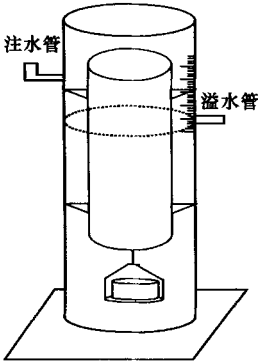


图 2 崩解试验仪

表 1 压实黄土崩解速率  $\text{min}^{-1}$

参 数	$K=80\%$	$K=85\%$	$K=90\%$	$K=95\%$	$K=100\%$
$w=8\%$	0.206	0.142	0.098	0.080	0.033
$w=10\%$	0.224	0.179	0.092	0.095	0.021
$w=12\%$	0.275	0.172	0.152	0.073	0.024
$w=14\%$	0.219	0.193	0.115	0.053	0.012
$w=16\%$	0.339	0.172	0.068	0.018	0.011
$w=18\%$	0.368	0.128	0.041	0.021	0
$w=20\%$	0.378	0.028	0	0	
$w=22\%$	0.068	0.031			
$w=24\%$	0				

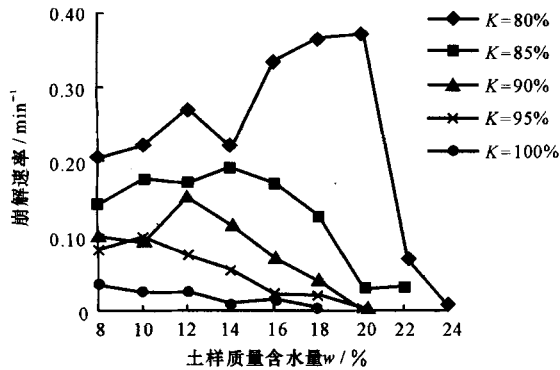


图 4 崩解速率与土样质量含水量的关系

粒体积之比称为有效空隙比  $e_v$ 。通过土的物理性质指标间的关系可推导出

$$e_v = \rho_s \left( \frac{100}{K\rho_{\max}} - \frac{w}{100\rho_w} \right) - 1 \tag{3}$$

式中： $e_v$  为土的有效空隙比； $\rho_s$  为土粒密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )； $K$  为土的压实度 (%)； $\rho_{\max}$  为土的最大干密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )； $w$  为土的质量含水量 (%)； $\rho_w$  为孔隙中水的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。本次试验取： $\rho_s=2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ ， $\rho_w=1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ， $\rho_{\max}=1.92 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

将试验数据整理，得到崩解速率与有效空隙比的关系，如表 2 和图 5 所示。图 5 所示的变化规律较明显，回归结果为

$$V_1 = 0.5256e_v - 0.09481e_v^2 \tag{4}$$

相关系数  $R^2=0.79$ ，相关性较好。

含水量和压实度是工程中用于控制施工质量、易于获得的指标，有效空隙比反映了这两个指标对崩解的影响，说明土的“可渗入性”控制了崩解速率，它们的关系是非线性的。当孔隙较大时，由于存在相对较大的孔隙和裂隙，水的渗入不均衡更加突出，在曲线上数据点的变差增大。有效空隙比小于 0.13 时，崩解速率小于  $0.05 \text{ min}^{-1}$ 。可通过增加压实度或增大含水量的办法降低崩解速率。

表 2 崩解速率与有效空隙比关系的试验结果

$V_1/\text{min}^{-1}$	$e_v$	$V_1/\text{min}^{-1}$	$e_v$	$V_1/\text{min}^{-1}$	$e_v$	$V_1/\text{min}^{-1}$	$e_v$
0	0.023	0.024	0.112	0.080	0.284	0.172	0.360
0	0.065	0.028	0.164	0.092	0.317	0.179	0.409
0	0.072	0.031	0.114	0.095	0.235	0.193	0.311
0	0.169	0.033	0.210	0.098	0.366	0.206	0.561
0.011	0.014	0.041	0.121	0.115	0.219	0.219	0.414
0.012	0.063	0.053	0.137	0.128	0.213	0.224	0.512
0.018	0.088	0.068	0.170	0.142	0.458	0.275	0.463
0.021	0.038	0.068	0.218	0.152	0.268		
0.021	0.161	0.073	0.186	0.172	0.262		

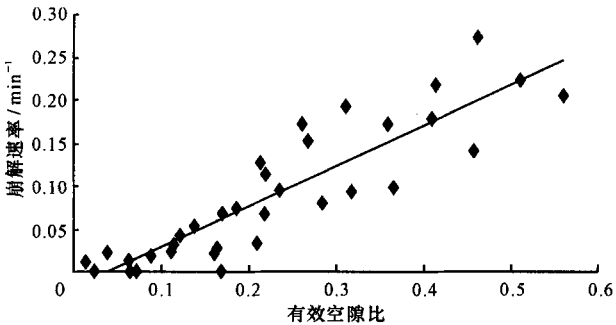


图 5 崩解速率与有效空隙比的关系

4 结 语

(1)数据处理时消除了试样大小的影响，提出的崩解速率指标反映了土体本身的可蚀性。

(2)研究了压实度、含水量与崩解速率间的内在相关性，所得崩解速率计算公式可用于预测压实土的崩解速率。

(3)将试验结果与大型人工模拟降雨侵蚀试验结果比较，降雨侵蚀模数(强度)与压实度、含水量的关系，与崩解速率反映的规律是一致的，说明崩解速率可作为土质边坡降雨侵蚀的可蚀性评价指标，显然崩解试验的成本要小得多。

参考文献：

References：

[1] 蒋定生,李新华. 黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究[J]. 水土保持通报,1995,15(3):20-27. JIANG Ding-sheng, LI Xin-hua. Loess plateau soil disintegration speed change rule and influence factor research [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15 (3): 20-27.

[2] 李家春,田伟平. 黄土路堤坡顶及土路肩暴雨冲刷破坏机理试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):27-29.

(3)针对该隧道的病害特征,建议采用环氧树脂嵌补及凿槽嵌入钢拱架法处治衬砌开裂。

## 参考文献:

## References:

- [1] 赵占厂. 黄土公路隧道结构工程性状研究[D]. 西安:长安大学,2004.
  - [2] 党进谦,李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报,2001,32(7):79-83.  
DANG Jin-qian, LI Jing. The structural strength and shear strength of unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(7): 79-83.
  - [3] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报,2001,23(1):3-12.  
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-12.
  - [4] 赵占厂,谢永利,杨晓华,等. 黄土公路隧道衬砌受力特性测试研究[J]. 中国公路学报,2004,17(1):66-69.  
ZHAO Zhan-chang, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Observation research on the mechanical characteristic of highway tunnel lining in loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 66-69.
  - [5] 杨新安,黄宏伟. 隧道病害与防治[M]. 上海:同济大学出版社,2003.
  - [6] 杨晓华,谢永利. 公路隧道坍方综合处治技术[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):61-64.  
YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Synthetical treatment technique for highway tunnel collapse[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 61-64.
  - [7] 来弘鹏,谢永利,杨晓华. 黄土公路隧道受力特性测试[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(6):53-56.  
LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Mechanical characteristic of highway tunnel in loess[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(6): 53-56.
  - [8] 夏才初,李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海:同济大学出版社,1999.
  - [9] JTJ 026-90,公路隧道设计规范[S].
  - [10] 景宏君,张斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报,2004,4(2):14-18.  
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Loess subgrade strength law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 14-18.
- 
- (上接第26页)
- LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Rainfall erode mechanism on loess road shoulder and tope of side-slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Sciences Edition, 2004, 24(2): 27-29.
  - [3] 丁云峰,李占斌. 土壤抗蚀性的动态研究[J]. 水土保持科技情报,2001,(1):36-39.  
DING Yun-feng, LI Zhan-bin. Soil corrosion resistant dynamic research[J]. Conservation of Water and Soil Scientific and Technical Information, 2001, (1): 36-39.
  - [4] 李家春,郭平,周怀治. 黄土地区公路排水沟渠出口破坏机理及工程防治[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(4):26-30.  
LI Jia-chun, GUO Ping, ZHOU Huai-zhi. Damage mechanism and protection of highway ditch exit at loess area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 26-30.
  - [5] 汪益敏,王秉纲. 公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J]. 中国公路学报,2005,18(1):24-29.  
WANG Yi-min, WANG Bing-gang. Fuzzy evaluation method of scouring stability on soil subgrade slop[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 24-29.
  - [6] 李家春. 黄土山区高等级公路排水技术研究[D]. 西安:长安大学,2000.
  - [7] 唐大雄,孙隽文. 工程岩土学[M]. 北京:地质出版社,1987.
  - [8] 苗英豪,胡长顺. 土工格栅加筋陡边坡路堤位移特性的试验研究[J]. 中国公路学报,2006,19(1):47-52.  
MIAO Ying-hao, HU Chang-shun. Research on displacement characteristics of geogrid reinforced embankment with steep slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 47-52.
  - [9] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
  - [10] 石刚,王晋国,支喜兰,等. 黄土地区公路工程地基承载力仓区计算方法[J]. 交通运输工程学报,2005,5(4):48-52.  
SHI Gang, WANG Jin-guo, ZHI Xi-lan, et al. Calculation method of foundation bearing capacity based on division in loess area for highway engineering[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 48-52.