

# 花岗岩残积土边坡冲刷模拟试验研究

邓百洪<sup>1</sup>, 赵旭<sup>2</sup>, 龙志东<sup>2</sup>

(1.广东省长大公路工程有限公司, 广东 广州 510620; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为研究花岗岩残积土边坡坡面冲刷规律, 分析坡面冲刷产沙的影响因素, 采用新的试验方法及装置, 选取广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路花岗岩残积土为研究对象进行试验, 建立水流流量、流速、剪切力、含沙量、功率与边坡侵蚀程度之间的关系。结果表明, 随着时间的增长, 坡面水流速度不断变化, 产沙量前期增长快, 后期缓慢直至稳定; 随着时间的增长, 水流剪力增大, 与产沙量有明显的相关性; 总能量损失是水流克服土颗粒摩擦做功; 冲蚀深度前期增长较快, 达到最大冲蚀深度 30 cm 的时间为 120 min。

**关键词:** 公路; 边坡; 花岗岩残积土; 水流冲刷

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0088-05

花岗岩残积土是花岗岩体经过长期的风化侵蚀而形成的产物, 广泛分布于中国南方地区, 占广东省总面积的 30%~40%。由于花岗岩残积土风化不均匀和节理发育差异, 土体极易产生裂隙, 遇水发生崩解。在广东等多雨地区, 花岗岩残积土路堤常因降雨, 雨水汇集而发生冲刷破坏。路堤边坡的冲刷破坏可归结于降雨过程中雨水的直接冲刷及雨水在坡后汇集形成的冲刷, 后者是路基施工中边坡冲刷破坏的主要原因。

针对花岗岩残积土边坡的冲刷破坏, 王贺等分析认为在强降雨情况下花岗岩残积土边坡滑动面位置在饱水层与非饱水层之间; 邓喜等利用仿真软件 Geo-studio 模拟不同降雨强度下基质吸力的变化, 结合软化效应对边坡稳定性进行研究, 结果表明短时特大暴雨对边坡稳定性影响小, 长时间小雨影响大; 詹良通等研究表明土体的饱和渗透系数、抗剪强度参数、边坡坡角、雨型等因素对边坡的破坏显著; 吴谦等利用 PFC 模拟冲刷过程中颗粒流失情况, 结果表明颗粒流失从坡顶至坡脚呈增加趋势。目前的研究多利用数值模拟方法, 只考虑降雨作用下坡面渗流, 不能准确地反映边坡施工中因雨水径流而产生的冲蚀问题。该文设计一种新的试验装置及方法, 模拟坡后雨水汇集径流产生的冲刷破坏, 分析水流速度、水流剪切力、水流功率、单位水流功率、冲蚀深度与含沙量随时间的关系。

## 1 冲刷试验装置

试验装置为一个长 150 cm、宽 50 cm、深 30 cm

的钢槽, 其后端固定一根竖直升降杆, 通过调节升降杆可使钢槽绕前端旋转, 达到自由调节坡度(0~60°)的目的。钢槽底部设置一块底板, 底板上设有 10 排、每排 4 个直径为 1 cm 的小孔, 便于水自由下渗(见图 1)。试验开始前, 在底板上铺一层土工格栅后填土, 土工格栅的作用是防止土颗粒堵塞小孔。钢槽上方固定冲刷供水装置, 供水装置由稳水箱、水流槽、塑料软管和钢管等组成。稳水箱长 0.4 m、宽 0.15 m, 其高度可自行调节, 用来改变水头高度。通过水头高度标定, 确定稳水箱高度为 3.3、2.12 m 时水流平均流量为 3.3、2.6 L/min。

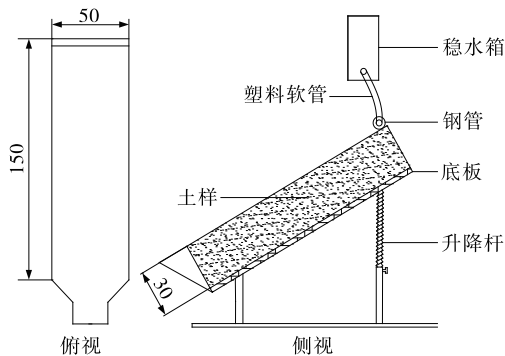


图 1 试验装置结构示意图(单位: cm)

## 2 试验方案及步骤

试验土样选自广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路 K117+070—130 路堤试验段, 其物理性质见表 1。根据土工试验规范对土样进行常水头渗透试验, 不同干密度  $\rho$  下的平均渗透系数见表 2。依据试验段路堤边坡实际破坏情况及压实度差异, 开展

3 组不同初始条件下边坡模拟冲刷试验,初始干密度  $\rho$  分别为 1.28、1.58 g/cm<sup>3</sup>,初始水流流速  $v$  分别为 3.3、2.6 L/min。边坡坡度取 1 : 1.5。

表 1 花岗岩残积土的物理性质与组成

项目		取值
土样取样深度/m		0~3
天然含水率/%		23.5
界限含水率	液限/%	42.0
	塑限/%	22.9
	液性指数	0.08
	塑性指数	19.1
	>2	28.8
	>0.5	40.3
各粒径( mm)		
颗粒组成/%	0.075~0.5	5.28
	<0.074	54.42
物质组成/%	石英	45
	叶蛇纹石	33
	白云母	22

表 2 花岗岩残积土的平均渗透系数

初始干密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	渗透系数/(m · s <sup>-1</sup> )			
	上部	中部	下部	平均值
1.28	$3.62 \times 10^{-5}$	$3.69 \times 10^{-5}$	$3.78 \times 10^{-5}$	$3.70 \times 10^{-5}$
1.58	$2.01 \times 10^{-6}$	$1.98 \times 10^{-6}$	$2.10 \times 10^{-6}$	$2.03 \times 10^{-6}$

试验开始前,将试验土均匀涂抹在钢槽底部及内壁上,使其表面粗糙程度与原土土体尽可能相似。再在其表面铺筑土工布,使其排水状况与实际坡体相似。用初始干密度及钢槽体积反算试验用土量,钢槽分 5 层填土,每层用土量为总土量的 1/5,每层填土控制高度为 6 cm。填土完成后用刮土刀将其表面刮毛,以便于土层之间紧密粘结。压实中注意处理钢槽边部,以减少边际效应对坡面水流的影响。之后用平尺刮平土壤表面,用纱布将土壤表面覆盖,用喷水壶均匀洒水,使土壤接近饱和。然后盖上塑料布以减少水分挥发,放置 24 h 使水分充分渗透,保证每次试验前的初始条件相同。同时调整坡度与流量,并进行校准,使初始流量达到预定值并稳定 5 min 后进行试验。

试验开始,打开控制阀门,水流通过塑料管进入稳水箱,经稳水箱流入钢槽升起端的横向钢管,钢管内分布 6 个直径 5 mm 的小孔使水流均匀流入坡体。为精确测量坡面径流速度,采用染色剂法,辅以高清摄像机,选择坡面上明显呈股流的坡面部位进

行观测。为减小观测误差,观测地点距离坡面 15~20 cm,观测坡面长度为 20 cm 并每间隔 2 min 记录一次水流经过的时间,采用这个区间内的平均流速作为坡面径流速度,同时利用钢尺测量这段坡面区间的最大冲刷深度。

在观测水流速度与测量水深的同时,每隔 2 min 使用标定好的塑料桶收集坡底流出的泥水,收集采样时间为 10~11 s,并记录其重量。整个冲刷试验持续约 16 min,待泥水沉淀后,倒出上部澄清液,放入烘箱中(温度为 105 ℃)测定冲出的泥土质量,进而确定该时间段水流冲刷产生的泥沙量。

3 冲刷过程及结果分析

3.1 水流速度与含沙量随时间的关系

水流速度是研究坡面冲刷过程的重要因素。在整个冲刷过程中,水流速度随时间的递增基本保持稳定,产沙量随着时间的增长而增加,前期增长较快,后期逐渐变缓。根据试验观测结果,坡面的产沙过程可分为 3 个阶段:1) 面蚀阶段(0~4 min)。该过程主要是坡面漫流,表面土颗粒被带走,并没有形成明显水沟(见图 2)。2) 细沟形成阶段(4~12 min)。该阶段坡面形成大量细沟,土颗粒因冲刷作用被大量带走。该阶段也是含沙量增长最快速的阶段(见图 3)。3) 细沟发育成熟阶段(12 min 以后)。该阶段细沟深度及宽度不断加深和扩宽(见图 4),随着土体结构逐渐稳定,含沙率呈缓慢增长趋势。



图 2 坡面漫流侵蚀



图 3 坡面形成细沟

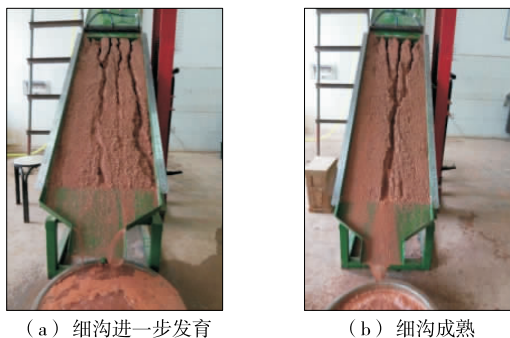
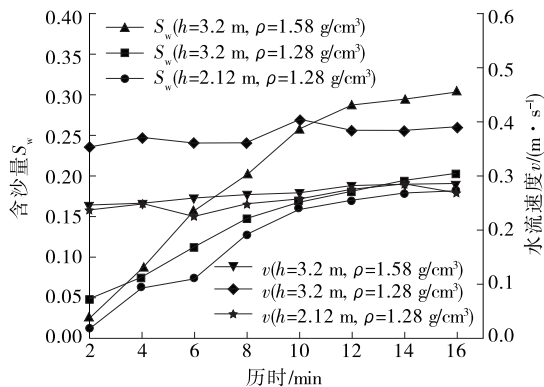


图4 细沟进一步发育及成熟

单位浑水重量所含泥沙重量即为含沙量或含沙浓度  $S_w$ , 即:

$$S_w = \frac{\text{泥沙所占重量}}{\text{浑水重量}} \quad (1)$$

不同初始干密度  $\rho$  和水位  $h$  下水流速度  $v$  与含沙量  $S_w$  随时间的变化见图 5。由图 5 可知: 在初始条件相同的情况下, 水流速度与含沙量之间并无明显相关性。同一高度位置的水箱在不同初始干密度下产沙量变化不大, 其主要原因是土体表层在试验开始之前已接近饱和状态, 在相同流量、流速条件下造成的破坏效果非常接近, 边坡产沙量变化不很明显; 当水箱位置较低时, 干密度  $1.28 \text{ g/cm}^3$  对应的初始水流速度较小, 流量也较小, 水流冲刷破坏效应减小, 边坡的产沙量也变小, 说明水流速度与边坡产沙量之间有着最直接的联系。

图5 不同初始干密度  $\rho$  和水位  $h$  下水流速度  $v$  与含沙量  $S_w$  随时间的变化

### 3.2 水流剪切力与含沙量随时间的关系

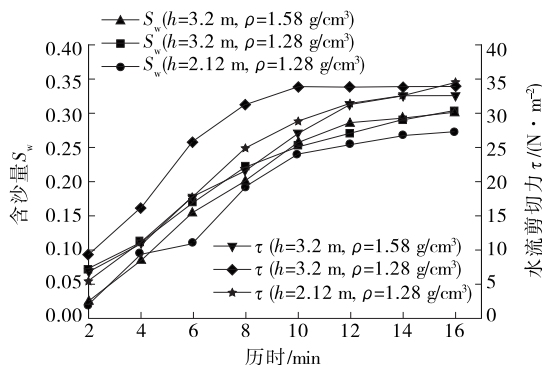
冲刷过程中会产生同流水方向一致的水流剪切力, 它是导致坡面产沙的直接原因。水流剪切力  $\tau$  的计算公式为:

$$\tau = \rho g h J \quad (2)$$

式中:  $h$  为水流深度,  $h = p / (\rho g)$ ;  $J$  为均匀流的水

力坡度,  $J = h_f / l = \sin \theta$ ;  $h_f$  为水头损失。

图 6 为不同初始干密度  $\rho$  和水位  $h$  下水流剪切力  $\tau$  与含沙量  $S_w$  随时间的变化。由图 6 可知: 随着剪切力的增大, 水流含沙量逐渐增加。在不同水位及初始干密度条件下, 初始干密度越小、水箱位置越高(流量大), 水流冲刷产沙量越高。根据式(2), 剪切力大小与水深成正比, 进一步说明水流剪力不断增大, 则冲蚀深度随之加深。

图6 不同初始干密度  $\rho$  和水位  $h$  下水流剪切力  $\tau$  与含沙量  $S_w$  随时间的变化

### 3.3 水流功率、单位水流功率与含沙量随时间的关系

坡面径流产沙的过程实际上也是水流对土壤颗粒做功的体现, 做的有用功越多, 水流含沙量越大。土壤侵蚀到坡面产沙的发展也是径流所具有的能量综合作用的结果, 这种能量对土壤做功使土颗粒分散, 并随着径流运动, 直到输出坡面。水流功率  $\omega$  及单位水流功率  $p$  计算公式分别为:

$$\omega = \rho g h v J = \tau v \quad (3)$$

$$p = \frac{\omega}{\gamma h} = v J \quad (4)$$

从物理学角度分析, 功率是物体单位时间内所做的功, 在水动力学中水流功率的物理意义是单位面积水体能量随时间的变化率。从水流功率推导公式来看, 水流功率与水流剪切力、流速成正比, 它们之间有着良好的线性关系。单位水流功率则反映单位质量水体所具有的能量随时间的变化率, 同时说明水流搬运泥沙的功率与其水流自身单位质量所具有的功率直接相关。

如图 7、图 8 所示, 水流含沙量与水流功率之间的相关性显著、与单位水流功率之间并无明显相关性, 说明在冲刷模拟试验边坡水流动力学参数中, 径流产沙量与水流功率之间关系紧密。从水流功率、单位水流功率的计算公式也可看出, 当水流速度变

化微小时,水流剪切力越大,则水流功率越大,径流产沙量越高。水流速度与单位水流功率之间是密切相连的,水流速度大小在很大程度上直接决定两者功率数值的大小。

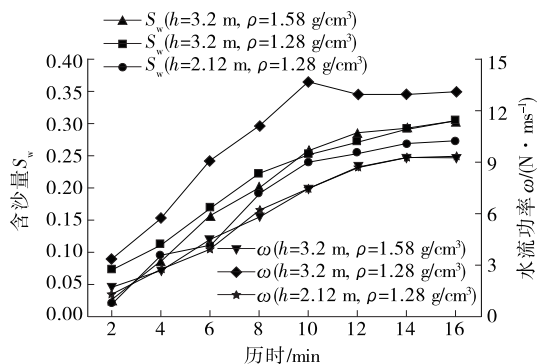


图 7 不同初始干密度  $\rho$  和水位  $h$  下水流功率  $\omega$  与含沙量  $S_w$  随时间的变化

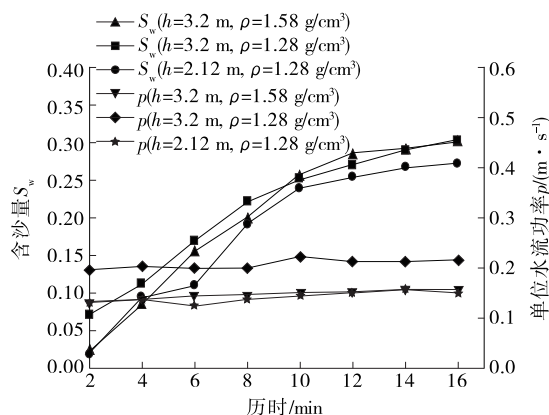


图 8 不同初始干密度  $\rho$  和水位  $h$  下单位水流功率  $p$  与含沙量  $S_w$  随时间的变化

### 3.4 冲蚀深度与含沙量随时间的关系

依据试验测量数据建立冲蚀深度与含沙量随时间的拟合方程:

$$y = \frac{x}{a + bx} \quad (5)$$

式中:  $y$  表示冲沙量、冲蚀深度;  $x$  表示冲刷历时;  $a$ 、 $b$  为拟合参数。

各组试验结果的拟合曲线见图 9~14, 拟合参数及对应拟合曲线相关系数  $R^2$  见表 3。

由表 3 及图 9~14 可知边坡侵蚀沟最大深度及产沙量随时间的变化规律: 短时间内冲刷深度增长速度明显, 后期缓慢增加, 当冲刷深度接近 30 cm 时, 由于冲刷沟底的坡度逐渐趋于水平, 冲刷深度不再增加; 含沙量有着与之相似的变化趋势, 含沙量达到 1.2 左右之后无明显增加。其原因是坡体的土体

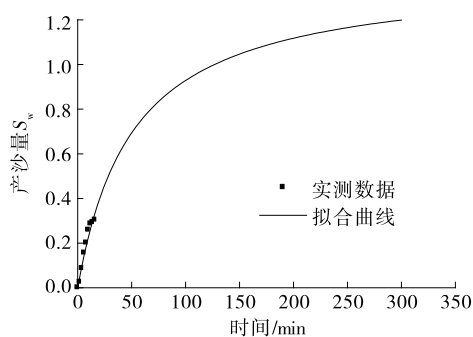


图 9 水位高 3.2 m、干密度 1.58 g/cm³ 下产沙量随时间的变化

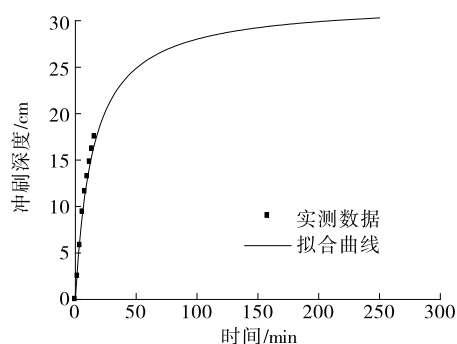


图 10 水位高 3.2 m、干密度 1.58 g/cm³ 下冲刷深度随时间的变化

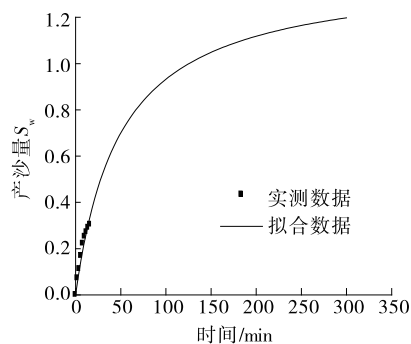


图 11 水位高 3.2 m、干密度 1.28 g/cm³ 下产沙量随时间的变化

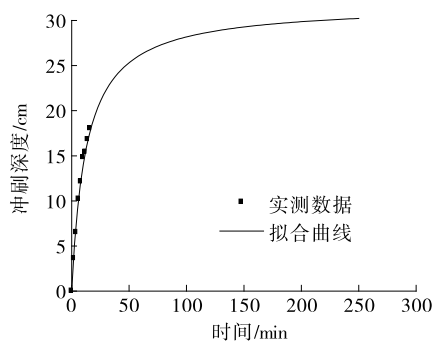


图 12 水位高 3.2 m、干密度 1.28 g/cm³ 下冲刷深度随时间的变化

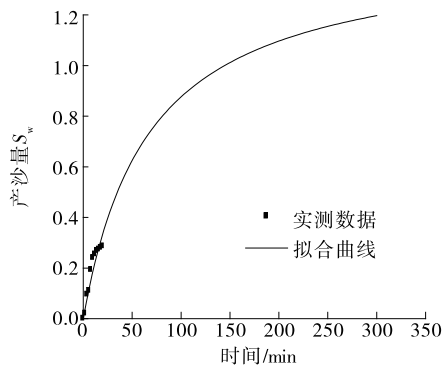


图 13 水位高 2.12 m、干密度 1.28 g/cm<sup>3</sup> 下产沙量随时间的变化

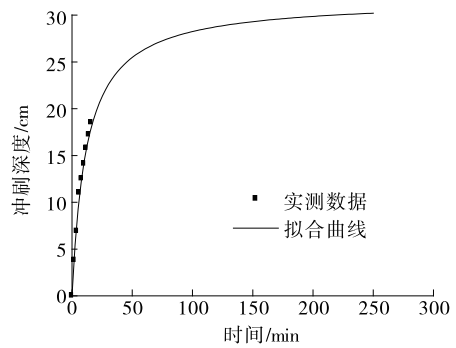


图 14 水位高 2.12 m、干密度 1.28 g/cm<sup>3</sup> 下冲刷深度随时间的变化

表 3 各组试验的拟合参数与相关系数

类别	$a$	$b$	$R^2$
水位高 3.2 m、密度 1.58 g/cm <sup>3</sup> 下产沙量	36.477 3	0.712 2	0.996 3
水位高 3.2 m、密度 1.58 g/cm <sup>3</sup> 下冲刷深度	0.449 5	0.031 2	0.993 1
水位高 3.2 m、密度 1.28 g/cm <sup>3</sup> 下产沙量	35.649 5	0.715 9	0.996 2
水位高 3.2 m、密度 1.28 g/cm <sup>3</sup> 下冲刷深度	0.401 1	0.031 5	0.995 5
水位高 2.12 m、密度 1.28 g/cm <sup>3</sup> 下产沙量	45.871 6	0.682 4	0.990 4
水位高 2.12 m、密度 1.28 g/cm <sup>3</sup> 下冲刷深度	0.384 3	0.031 6	0.996 4

结构逐渐稳定,水流运移泥沙的能力显著下降,冲蚀深度基本不再增加。坡面水流的侵蚀量逐渐减小,冲蚀量随着时间增加不再发生较大变化,此时的边坡侵蚀量可认为是边坡在一定降雨条件下的最大冲蚀规模。

#### 4 结论

(1) 相同初始干密度条件下,含沙量随着初始流量的递增而增大。在流量相同条件下,初始干密度对含沙量的影响并不显著。

(2) 水流剪力与含沙量呈正相关趋势,随着水流剪力的增大,含沙量逐渐增大。

(3) 坡面水流含沙量与水流功率、单位水流功率存在一定联系,水流速度大小在很大程度上决定两者功率数值的大小,水流功率与径流产沙量之间的关系最明显。

(4) 从能量角度分析,坡面产沙的主要原因是水流从坡顶流至坡脚的过程中因不断克服与土颗粒的摩擦做功导致能量损失,损失的能量越大,坡面产沙越严重。

#### 参考文献:

[1] 吴能森,赵尘,侯伟生.花岗岩残积土的成因、分布及工程特性研究[J].平顶山工学院学报,2004,13(4).

[2] 鲍晓东.深圳地区花岗岩残积土工程特性的研究[J].铁道勘察,2004,30(2).

[3] 张抒,唐辉明.非饱和和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J].岩土力学,2013,34(6).

[4] 简文彬,许旭堂,郑敏洲,等.土坡失稳的有效降雨量研究[J].岩土力学,2013,34(增刊 2).

[5] 邱路阳,刘毓胤,李大勇.高填方残积土路堤降雨滑塌机理与治理对策[J].岩土力学,2007,28(10).

[6] 涂国祥,黄润秋.降雨对路堤斜坡稳定性影响的时间效应[J].岩土力学,2015,36(增刊 1).

[7] 吴顺川.边坡工程[M].北京:冶金工业出版社,2017.

[8] 王贺,张洁,陈飞扬.强降雨条件下花岗岩残积土边坡的时变可靠度[J].武汉大学学报:工学版,2016,49(5).

[9] 邓喜,何忠明,付宏渊,等.降雨入渗对花岗岩残积土高路堤边坡稳定性的影响[J].矿冶工程,2016,36(4).

[10] 詹良通,李鹤,陈云敏,等.东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J].岩土力学,2012,33(3).

[11] 吴谦,王常明,李同录,等.黄土边坡降雨冲刷试验及颗粒流模拟[J].长安大学学报:自然科学版,2017,37(6).

[12] 王成皿,兰天,刘龙武.深层水毁防治技术在花岗岩残积土路基边坡中的应用研究[J].公路与汽运,2017(2).

[13] 汤兰.花岗岩残积土边坡冲蚀特性室内模拟试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.