

无黏性土的冲刷机理

殷成胜¹, 殷如阳², 卢佩霞³

- (1. 扬州市公路管理处, 江苏 扬州 225001;
2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410000;
3. 扬州工业职业技术学院 建筑工程学院, 江苏 扬州 225001)

摘要:无黏性土的剪切强度主要来源于颗粒间的摩擦力, 无黏性土的抗冲刷主要来源于土粒重量。根据无黏性土颗粒冲刷过程中的受力平衡分析, 无黏性土颗粒冲刷临界剪切应力(冲刷启动剪切应力)与颗粒粒径成正比, 已有的砂、砾冲刷试验结果验证了无黏性土颗粒冲刷临界剪切应力理论。

关键词:无黏性土; 砂; 冲刷; 临界剪切应力; 平均粒径

中图分类号:U416.212

文献标识码:A

文章编号:1671-5322(2016)01-0066-04

无黏性土边坡冲刷机理和模型一直是路基边坡冲刷防护研究的热点问题之一。Horton 提出^[1], 当路基边坡坡面流的冲刷力大于地表土的抗冲刷力, 路基边坡就会出现冲刷现象。如果路基边坡坡面的雨水供应量大于土的人渗量, 路基边坡表面即开始产生超渗径流, 坡面径流具有一定的运动速度及动能, 在水流运动方向上产生一种剪切动力, 称之为冲刷剪切应力。当径流冲刷剪切应力大于土的抗冲刷应力时, 则会引起土粒分散、搬运等, 路基坡面出现冲刷破坏现象。蒋泽锋等^[2]分析了坡面冲刷发生的临界条件、冲刷特征和冲刷的影响因素, 确定了坡面临界流量与坡面坡度的关系。沈水进等^[3]分析了坡面冲刷过程中土粒的受力特征, 探讨了坡面冲刷过程中土的失稳运动条件。

无黏性土路基边坡坡面冲刷过程中, 土颗粒除了受本身的重力作用外, 在水流作用下还会受到浮力、拖曳力、上举力、渗透压力, 以及运动过程中粒间离散力、摩擦阻力等多个力的综合作用, 影响因素众多, 机理非常复杂^[4]。研究冲刷过程各作用力间的平衡和特性, 是量化研究边坡冲刷的前提条件^[5]。本文在分析砂粒冲刷过程中力和力矩平衡的基础上, 揭示无黏性土路基边坡冲

刷机理, 建立无黏性土路基边坡冲刷模型。

1 砂粒冲刷受力

静水环境中, 水流速度 $v_x = v_y = 0$, 砂粒受到重力、孔隙水压力、相邻砂粒的接触应力和吸附作用力的共同作用, 如图 1 所示。

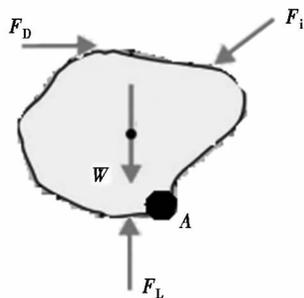


图 1 砂粒冲刷受力分析

Fig. 1 Erosion force of soil particles

(1) 水下重力 W 。表示为:

$$W = \alpha_1 \frac{\pi d_i^3}{6} (\rho_s - \rho_w) g \quad (1)$$

式中: α_1 为砂粒的形状系数; d_i 为砂粒的粒径, m; ρ_s 为砂的密度, kg/m^3 ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; g 是重力加速度, m/s^2 。

收稿日期: 2015-09-10

基金项目: 江苏省交通运输科技项目(2013Y04-2)

作者简介: 殷成胜(1968—), 男, 江苏泰兴人, 高级工程师, 主要研究方向为道路工程。

(2)接触力 F_i 。表示砂粒间接触应力和吸附力总和,大小与剪切强度 τ_f 有关,公式为:

$$F_i = \frac{\pi d_i^2}{4} \tau_f \quad (2)$$

剪切强度 τ_f (MPa) 受颗粒组成(粘土含量)、含水量、密度、土质结构、化学环境等因素的影响,表示为:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

式中: c 为土的黏聚力, MPa; φ 为内摩擦角, rad, σ 为正应力, MPa。

(3)上举力 F_L 。砂粒冲刷过程中,先是砂粒松动过程,后是砂粒起动过程。上举力来源于砂粒周围孔隙水压力差对砂粒松动起主要作用。上举力 F_L 的表达形式为:

$$F_L = \alpha_2 C_y \frac{\pi d_i^2}{4} \frac{\rho_w V_d^2}{2} \quad (4)$$

式中: α_2 为形状系数; C_y 为 y 向阻力系数; V_d 为砂粒表面的流速, m/s。

(4)拖曳力 F_D 。在砂粒的起动和运动过程中,水平拖曳力起主要作用。水平拖曳力与上举力都是来源于水流,具有与式(4)类似的表达式。

砂粒在水中起动瞬间满足对作用点 A 的力矩平衡条件

$$F_L l_1 + F_D l_2 = W l_1 + F_i l_3 \quad (5)$$

式中: l_1 、 l_2 和 l_3 分别为各力对作用点 A 的垂直距离。将式(1)~(4)代入式(5)得:

$$\rho_w V_d^2 = \frac{4C_1}{3} (\rho_s - \rho_w) g d_i + 2C_2 \tau_f \quad (6)$$

式中: $C_1 = \alpha_1 l_1 / (\alpha_2 l_1 C_y + \alpha_3 l_2 C_x)$,

$C_2 = l_3 / (\alpha_2 l_1 C_y + \alpha_3 l_2 C_x)$ 。

对数流速分布公式为:

$$V_y = 5.75 V_f \lg \left(30.2 \frac{\delta}{K_s \chi} \right) \quad (7)$$

式中: V_y 为距离床面 y 处的流速, m/s; V_f 为摩阻流速, m/s; K_s 为床面粗糙高度, m; δ 为近壁粘性底层厚度, m; $\delta = 11.6 \eta / V_f$, η 为水的运动粘滞系数, χ 与 K_s / δ 有关, $K_s / \delta > 10$, 属糙壁, $\chi = 1.0$; $K_s / \delta < 0.25$, 属光壁, $\chi = 0.3 K_s V_f / \eta$; $0.25 < K_s / \delta < 10$, 属过渡区。

底部作用流速 V_d 一般认为在 $y = \alpha K_s$ 高度处的流速, 取 $\alpha = 0.35$; $K_s = d_i = n d_{50}$, d_{50} 为砂粒中值粒径, m; n 为孔隙率。

$$V_d = 5.75 V_f \lg(10.6 \chi) \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 结合冲刷临界剪切应力公式 $\tau_c = \rho_w V_f^2$, 得到

$$\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) g d_{50}} = \frac{4C_1}{[5.75 \lg(10.6 \chi)]^2} \left[\frac{2}{3} C_1 n + \frac{C_2 \tau_f}{(\rho_s - \rho_w) g d_{50}} \right] \quad (9)$$

式(9)表明: 砂粒冲刷临界剪切应力与土的抗剪强度和砂粒直径有关。无黏性土的剪切强度可以不考虑, 重力起主要作用, 临界剪切应力与颗粒平均粒径的关系为:

$$\tau_c = \frac{2C_1 (\rho_s - \rho_w) g}{[5.75 \lg(10.6 \chi)]^2} d_{50} \quad (10)$$

式中 $(\rho_s - \rho_w) g$ 是常数。可见, 冲刷临界剪切应力与颗粒平均粒径成正比。

2 砂粒的冲刷模型

砂粒冲刷起动模型如图2所示。图2a是砂粒滑动冲刷, 图2b是滚动冲刷。对于滑动冲刷的砂粒, 假设砂粒为球状体, 流水对砂粒作用的剪切应力方向是沿冲刷面方向, 相邻砂粒以相同速度冲刷移动, 所以颗粒间没有相互作用力。水流剪

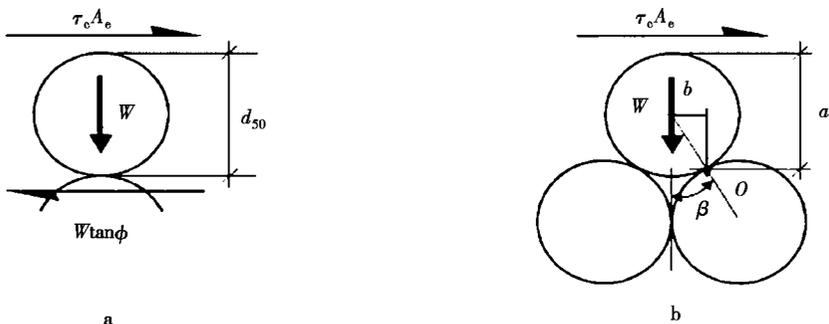


图2 砂粒冲刷模型
Fig. 2 Erosion model of sand particles

切应力超过砂粒间的摩擦力后,砂粒开始冲刷起
动,此时的水流剪切应力就是冲刷临界剪切应力。

$$\tau_c A_e = W' \tan \varphi \quad (11)$$

式中: τ_c 为冲刷临界剪切应力,MPa; A_e 为水
流过砂粒的有效面积, mm^2 ; W' 为砂粒在流体中的
有效重量,N; φ 为砂粒间的摩擦角,rad。假设水
流过砂粒的有效面积用砂粒的表面积表示,则

$$A_e = \alpha \pi d_{50}^2 \quad (12a)$$

式中: A_e 为冲刷面积, α 为比例系数, $0 \leq \alpha \leq$
 1.0 ,式(11)改写为:

$$\tau_c \alpha \pi d_{50}^2 = (\rho_s - \rho_w) g \frac{\pi d_{50}^3}{6} \tan \varphi \quad (12b)$$

即得到临界剪切应力为:

$$\tau_c = \frac{(\rho_s - \rho_w) g \tan \varphi}{6\alpha} d_{50} \quad (13)$$

从式(13)可以看出,冲刷临界剪切应力与砂
粒的平均粒径成正比。

Briaud 等^[4] 根据砂粒冲刷试验结果,得到:

$$\tau_c (\text{Pa}) = d_{50} (\text{mm}) \quad (14)$$

结合式(13)、(14),得到 $\alpha = 1.5$ 。冲刷面积
的比例系数不符合实际取值范围,无意义。

显然砂粒滑动冲刷模型不符合颗粒冲刷特
性,假设砂粒冲刷模型为滚动冲刷,如图 2b 所示,
砂粒滚动平衡条件为:

$$\tau_c A_e a = W' b \quad (15a)$$

$$\tau_c \alpha \pi d_{50}^2 \left(\frac{d_{50}}{2} + \frac{d_{50} \cos \beta}{2} \right) =$$

$$(\rho_s - \rho_w) g \frac{\pi d_{50}^3}{6} \frac{d_{50}}{2} \sin \beta \quad (15b)$$

由此得到:

$$\tau_c = \frac{(\rho_s - \rho_w) g \sin \beta}{6\alpha(1 + \cos \beta)} d_{50} \quad (16)$$

结合式(14)、(16),令 $\alpha = 1/4$,得到 $\beta = 10^\circ \sim$
 12° , β 值合理。从式(16)中看出,砂粒冲刷临界
剪切应力与平均粒径成正比,比例系数与砂粒的
密实度有关。

砂粒冲刷起流速和剪切应力与砂粒平均粒
径的相关关系如图 3 所示。图 3a 中的试验数据
引自 BRIAUD 等^[6],图 3b 中的试验数据引自 GAU-
CHER 等^[7],图 3c 中的数据引自 SHEPPARD^[8]。

3 结论

(1) 砂粒的冲刷归结于流水的剪切应力和涡
流冲击力,砂粒在流水中受到有效重力、接触力、

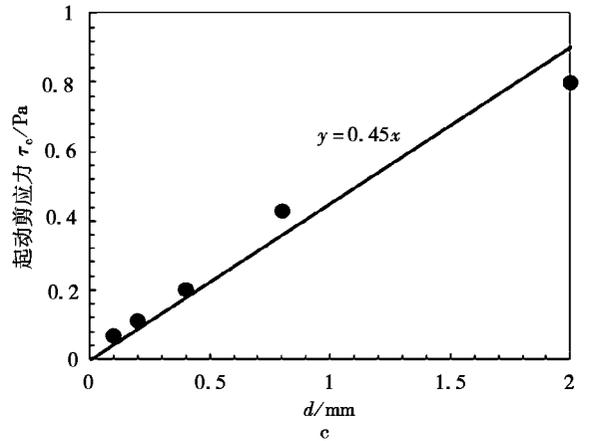
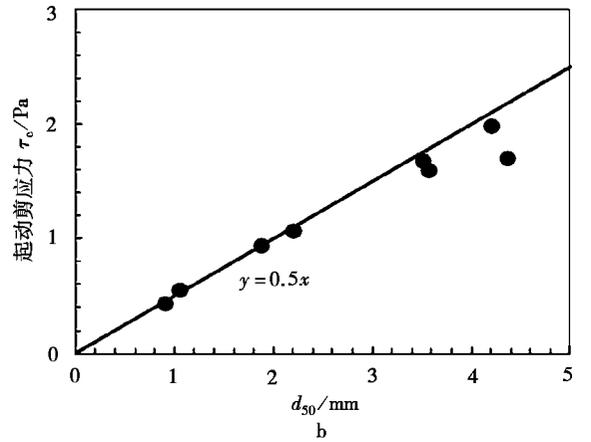
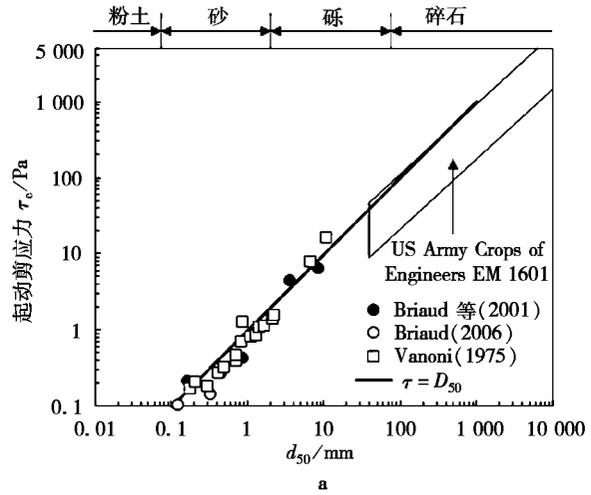


图 3 冲刷临界剪切应力与平均粒径的相关关系

Fig. 3 Relationship between critical shear stress and mean diameter of particles

上举力和拖曳力共同作用。根据单颗粒的力矩平
衡,砂粒冲刷临界剪切应力取决于砂粒的密度。

(2) 砂粒冲刷以砂粒滚动为主,颗粒间的水平
移动不是冲刷的主要运动形式。

(3)无黏性土的剪切强度很小,冲刷临界剪切应力与砂粒的平均粒径的比例系数介于0.45~1.0。冲刷临界剪切应力与颗粒的平均直径成正比关系。

参考文献:

- [1] 魏祥龙. 山区人行网箱桥水毁机理分析[J]. 盐城工学院学报:自然科学版,2015,28(2):75-78.
- [2] 蒋泽锋,朱大勇,沈银斌,等. 水流冲刷过程中的边坡临界滑动场及河岸崩塌问题研究[J]. 岩土力学,2015(S2):21-28.
- [3] 沈水进,孙红月,尚岳全,等. 降雨作用下路堤边坡的冲刷-渗透耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(12):2456-2462.
- [4] BRIAUD J L, TING F C K, CHEN H C, et al. Scrics: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers[J]. J. Geotech Geoenviron Eng, ASCE, 1999,125(4):237-246.
- [5] XU Y F, JIAO H, CHU F F, et al. Fractal model for surface erosion of cohesive sediments[J]. Fractals complex Geometry, 2014,22(3):321-329.
- [6] BRIAUD J L, CHEN H C, GOVINDASAMY A V, et al. Levee Erosion by Overtopping in New Orleans during the Katrina Hurricane. J. of Geotech. Geoenviron. Eng, 2014,134(5):618-632.
- [7] GAUCHER J, MARCHE C, MAHDI T F. Experimental investigation of the hydraulic erosion of noncohesive compacted soils. J. Hydraul. Eng. 2010,136:901-913.
- [8] SHEPPARD D M, BLOOMQUIST D, SLAGLE P M. Rate of Erosion Properties of Rock and Clay[J]. Correlation Analysis, 2006(12):102.

Erosion Mechanism of Cohesionless Soil

YIN Chengsheng¹, YIN Ruyang², LU Peixia³

- (1. Yangzhou Administering Bureau of Highway, Nantong Jiangsu 225101, China;
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410000, China
3. Institute of Architectural Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou Jiangsu 225127, China)

Abstract: Shear strength of cohesionless soil mainly comes from the friction between the particles of cohesionless soil, the anti-erosion force mainly comes from the soil grain weight. Based on force equilibrium analysis in the erosion process of cohesionless soil particle, the critical shear stress of cohesionless soil is proportional to the particle size. Existing sand and gravel erosion test results show erosion critical shear stress theory of cohesionless soils.

Keywords: Cohesionless soil; sand; erosion; critical shear stress; mean diameter

(责任编辑:张英健)