DOI：10.16285/j.rsm.2017.04.032

全风化花岗岩突水通道扩展的颗粒起动流速研究

刘金泉[1,2]，杨典森[1]，陈卫忠[1,3]，袁敬强[1]，李长俊[1]，亓宪寅[1]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心，山东 济南 250061）

摘 要：突水突泥是富水全强风化花岗岩隧道施工常见的地质灾害，地层颗粒的流失是导致突水通道扩展的关键因素，其中颗粒达到起动流速是其流失的临界条件。考虑水流冲刷和土体黏结作用，对突水通道断面颗粒进行三维受力分析，导出颗粒的临界起动条件，建立了考虑颗粒粒径、颗粒坡面位置、相对暴露度三因素的颗粒起动流速函数，并利用数值方法分析了上述三因素对起动流速的影响规律。计算分析表明：起动流速随粒径增大先减小后增大，通道断面不同坡面位置颗粒起动流速呈明显的对称性，总体上起动流速随相对暴露度的增大呈增大趋势。采用正交试验法研究了三因素对颗粒起动流速的敏感性，发现粒径对起动流速影响最为显著。同时根据断面颗粒起动最小流速标准及相对暴露度的随机性，简化颗粒坡面位置和相对暴露度两因素，导出颗粒起动流速的简化公式，最后利用室内试验和工程实例验证了该公式的合理性。

关 键 词：全风化花岗岩；突水通道；起动流速；粒径；颗粒坡面位置；相对暴露度

中图分类号：TU 452 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017)04－1179－09

Research on particle starting velocity in the expansion of water inrush channel in completely weathered granite

LIU Jin-quan[1,2], YANG Dian-sen[1], CHEN Wei-zhong[1,3], YUAN Jing-qiang[1],
LI Chang-jun[1], QI Xian-yin[1]

（1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics，Chinese Academy of Sciences，Wuhan，Hubei 430071，China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049,China；3. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China）

Abstract: Water and mud inrush is a common geological disaster in the completely weathered granite tunnel during construction. The key factor leading to the expansion of water inrush channel is the loss of soil particles, where the starting velocity is the critical condition of its loss. By considering the water erosion and particles adhesion, the particle 3D force in the water inrush channel cross-section was analyzed, and the function of particles starting velocity was established. The function includes the following factors, namely, the particle diameter, the particle position of channel cross-section and relative exposure degree of the particle. Meanwhile, numerical simulation was conducted to analyze the effect of the above three factors on the starting velocity. Numerical results showed that the starting velocity decreased initially and then increased with the increase of particle diameter. Furthermore, the starting velocities of channel cross-section at different positions were symmetry, and they were increased with the increase of relative exposure degree generally. By combining with orthogonal tests to analyze the sensitivity to starting velocity for the above three factors, the results showed that the diameter was the most sensitive factor. Accordingly, by considering the minimum starting velocity standard of channel cross-section and the randomness of relative exposure degree, the factors of particle position of channel cross-section and relative degree of exposure were simplified, and a simplified theoretical formula of the starting velocity was developed. Finally, the rationality of the starting velocity formula was verified by the laboratory test and field investigation.

Keywords: completely weathered granite; water inrush channel; starting velocity; particle diameter; particle slope position; relative exposure degree

收稿日期：2015-06-01
基金项目：国家重点基础研究发展计划 973 项目研究课题(No. 2013CB036006)；国家自然科学基金(No. 51379200，No. 51225902)。
This work was supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB036006) and National Natural Science Foundation (51379200, 51225902).
第一作者简介：刘金泉，男，1989 年生，博士研究生，主要从事地下工程突水突泥机理与灾害控制理论方面的研究工作。E-mail: jinquanliu99@163.com
通讯作者：杨典森，男，1978 年生，博士，博士生导师，主要从事岩体多场耦合方面的研究工作。E-mail: dsyang@whrsm.ac.cn

1 引 言

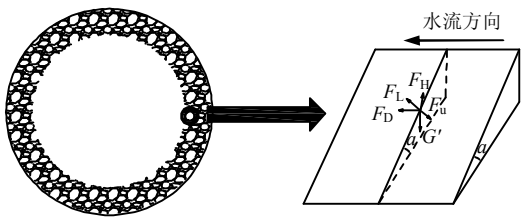
突水突泥是制约和危害隧道及地下工程安全施工最为常见的灾害之一，突水突泥灾害的预防及治理已成为隧道修建过程中的最大技术难点。全风化花岗岩土体具有自稳性差，胶结作用弱，在工程扰动和高水压作用下极易出现突水、突泥灾害[1−3]。厦门翔安海底隧道[4]在穿越富水软弱花岗岩风化槽地层修建时曾面临极大突水、突泥灾害风险，最终采用全断面帷幕注浆才得以完成。在建的广西岑溪大隧道[5]更是多次发生突水、突泥灾害。突水、突泥问题的研究关键在于对突水机制的认识，国内外不少学者针对岩溶、裂隙、断层等隧道及底板突水机制开展了大量研究[6−7]。然而，全风化花岗岩因其自稳性差，易崩解等不良工程特性，与岩溶、裂隙岩体等地质条件的突水机制显著不同。其突水通道形成是水压及工程扰动作用下土体细颗粒冲刷流失、粗颗粒乃至通道断面失稳造成的通道扩展过程。

因此，研究颗粒的流失规律对揭示全风化土体突水通道扩展演化过程至关重要，如何建立土体颗粒流失数学模型是研究其突水机制的关键。建立颗粒流失数学模型的前提是颗粒流失标准的确定，即颗粒起动流速的建立，由于全风化花岗岩土体突水机制本身研究的不足，对于起动流速方面研究工作较少，关于颗粒起动流速在河流动力学有较丰富的研究[8−10]，但河流动力学与全风化土体突水通道研究对象有所不同，前者为近乎半无限空间的河床泥沙颗粒，后者为整个断面具有颗粒存在的管道模型，见图 1 和图 2(a)。研究对象的不同导致颗粒的力学特性从二维也过渡到三维状态；另外，土体颗粒因黏粒等细颗粒含量及胶结程度较高所受的黏结力与河流动力学也有不同。因此，全风化土体中颗粒起动流速规律及起动标准的建立对突水通道扩展演化机制的研究有着重要意义。



图 1 河床断面颗粒示意图

Fig.1 Schematic diagram of river bed cross-section particle



(a) 突水通道示意图 (b) 通道边壁颗粒受力图

图 2 土体突水通道断面示意图

Fig.2 Schematic diagram of soil water inrush channel cross-section

2 颗粒起动的力学分析及起动流速公式

2.1 颗粒受力分析

为计算通道内颗粒起动流速，本文假设通道截面为圆形，颗粒形状为球体。取通道边壁一个微单元为研究对象，见图 2(b)，所示 a 角为颗粒所在斜面切线与水平线（右侧方向）夹角，表示颗粒所在坡面位置；F_D 为水流拖曳力，方向与水流方向一致；F_L 为上举力，由颗粒向水侧和背水侧的流速差异而形成，方向垂直于坡面指向通道一侧；F_u 为颗粒间的黏结力，由颗粒间的分子作用力及物理化学作用形成，方向垂直于坡面指向颗粒一侧；G' 为有效重力，方向竖直向下；F_H 为研究颗粒的下部颗粒对其支持力，方向沿两颗粒圆心线并指向研究颗粒一侧，该力对研究颗粒滚动力矩平衡没有贡献（力矩为 0），后续不作考虑。拖曳力、上举力及有效重力计算公式分别为[8]

$$F_D = \frac{C_D \rho}{2}\frac{\pi}{4}D^2 U_0^2 \tag{1}$$

$$F_L = \frac{C_L \rho}{2}\frac{\pi}{4}D^2 U_0^2 \tag{2}$$

$$G' = (\rho_S - \rho)g\frac{\pi}{6}D^3 \tag{3}$$

式中：C_D、C_L 分别为拖曳力及上举力系数；ρ 为水的密度；ρ_s 为颗粒的密度；D 为颗粒粒径；U_0 为作用在颗粒上的流速。

作用在颗粒上的黏结力计算公式为[11]

$$F_u = a_c\left(\frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}}\right)^{2.5}\frac{\pi}{2}\rho\varepsilon D \tag{4}$$

式中：a_c 为系数；γ_0 为泥沙干重度；γ_{0*} 为泥沙颗粒的稳定干重度；ε 为黏结力参数，$a_c\varepsilon = \varepsilon_0$，$\varepsilon_0$ 为综合黏结力参数，其值与颗粒的物理化学性质有关，可通过试验得知，对于一般泥沙 $\varepsilon_0 = 1.75\ \mathrm{cm^3/s^2}$。

将式（1）～（4）所涉及的力在颗粒所在的坡面进行分解，如图 3 所示。

取坡面 $ALNH$ 上的 E 点作为分析颗粒所在位置，记 F_D 在颗粒上的作用点为重心上方距离 L 处，将其移至通过颗粒重心，同时产生一个大小为 $F_D L$ 的力偶矩，方向为 EI 向，F_D、G' 沿坡面方向的分

力合力沿 EK 方向，记为 F_r，F_L、F_u、G' 在垂直于坡面方向的分力组成的合力记为 F_0，F_r 和 F_0 在 EKJ 平面内。移动 F_D 所产生的力偶矩在垂直于平 面 EKJ 的分力偶矩记为 M_r。颗粒所受各力的简化见图 4。F_0、F_r、M_r 的大小如下：

$$F_0 = G'\cos a + F_U - F_L \tag{5}$$

$$F_r = \sqrt{F_D{}^2 + (G\sin a)^2} \tag{6}$$

$$M_r = \frac{LF_D{}^2\cos a}{F_r} \tag{7}$$

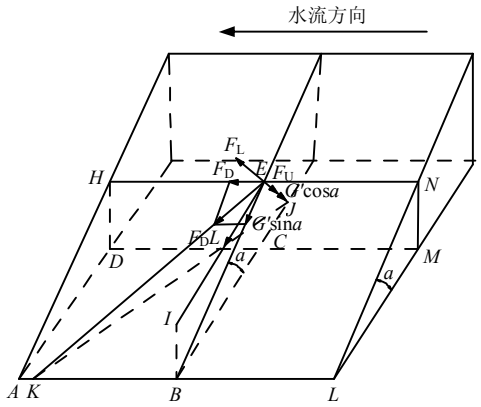


图 3　土体通道断面颗粒受力示意图

Fig.3　Force diagram of particle in channel cross-section

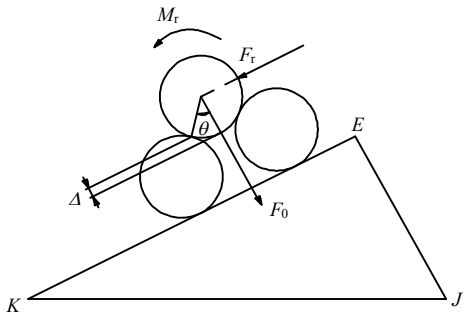


图 4　颗粒暴露度及受力简化图

Fig.4　Simplified force diagram of particle exposure degree

2.2　颗粒临界状态及起动流速公式

坡面颗粒的稳定通常分为滑动和滚动稳定两类，在突水通道断面的颗粒，由于颗粒间的相互作用起动方式以滚动形式更接近实际。颗粒滚动的力臂与周边的颗粒位置有关，河流动力学中经常采用暴露度来描述该特性，本文采用贾恺等[12−13]所定义的斜面暴露度来描述，暴露度定义为研究颗粒与下游颗粒接触点到其坡面最近点的距离，以 Δ 来表示，如图 4 所示，为表示简便，定义相对暴露度 $\Delta' = 2\Delta/D$，并定义研究颗粒与下游颗粒连心线与 F_0 作用线的夹角为 θ。

对图 4 进行受力分析，当外力对颗粒作用力矩达到平衡时，颗粒处于临界位置，此时对应的颗粒流速即为起动流速，由力矩平衡得到临界条件为

$$F_r(D/2)\cos\theta + M_r = F_0(D/2)\sin\theta \tag{8}$$

式中：$\cos\theta = 1-\Delta'$，$\sin\theta = \sqrt{2\Delta' - \Delta'^2}$。

将式（5）～（7）代入式（8），可以求得坡面颗粒由静止到滚动的临界条件为

$$\sqrt{F_D{}^2 + (G'\sin a)^2}\,\frac{D}{2}\cos\theta + \frac{LF_D{}^2\cos a}{\sqrt{F_D{}^2 + (G'\sin a)^2}} =$$

$$(G'\cos a + F_U - F_L)\frac{D}{2}\sin\theta \tag{9}$$

联合式（1）～（4）及式（9）可求得不同颗粒粒径、不同坡面位置以及不同暴露度下的颗粒起动速度。

3　颗粒起动流速规律分析

根据上述推导的起动流速公式，利用 Matlab 编写了计算起动流速与颗粒粒径、颗粒坡面位置角度、相对暴露度间关系的程序。计算公式参数见表 1。

表 1　起动流速公式计算参数

Table 1　Parameters of starting velocity formula

C_D	C_L	ρ /(g/m^3)	ρ_s /(g/cm^3)	$\frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}}$	ε_0 /(m^3/s^2)	L
0.4	0.1	1.00	2.75	1	1.75×10^{-6}	D/6

3.1　不同颗粒粒径下的起动流速

图 5 为在颗粒坡面角度 a =0°，相对暴露度 $\Delta' = 0.134$ 条件下不同颗粒粒径下的起动流速曲线，从图中可以看出，起动流速随粒径的增大呈先减少后增大变化规律，表现在粒径小于 0.5 mm 时起动流速随颗粒粒径增大而减小，而在粒径大于 0.5 mm 时，颗粒的颗粒起动流速由缓慢增大逐步过渡到快速增大。

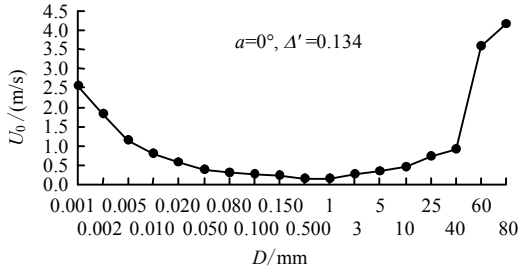


图 5　不同颗粒粒径下起动流速变化曲线

Fig.5　Starting velocity curve with different particle diameters

结合对应的颗粒作用力变化曲线（见图 6）可知，粒径小于 0.5 mm 前阻碍颗粒起动的黏结力相对其他作用力大得多，自然颗粒起动所需的流速更大，随着粒径增大，黏结力较其他作用力的增大速率更小，造成颗粒的起动流速开始下降。而在粒径大于 0.5 mm 后，重力作为颗粒起动的阻力，增长速率较其他作用力大很多，因此，所需的起动流速也逐步增大。

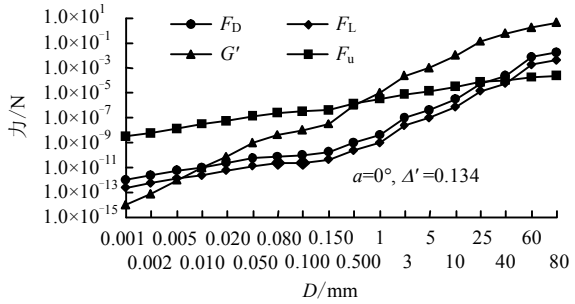


图 6 不同粒径下颗粒作用力变化曲线

Fig.6 Force curves with different particle diameters

从图 6 中黏结力和重力变化可以看出，粒径大于 0.5 mm 时重力大幅度增长，且逐步大于黏结力。在通道断面下半断面重力和黏结力都是阻碍颗粒起动的作用力，颗粒能在阻力作用下维持自稳而能考虑任意粒径下的起动流速。而在通道上半断面，重力成为颗粒起动的动力，仅黏结力为阻力，在粒径小于 0.5 mm 时通道断面上半面尚能维持自稳，可以考虑在水流拖曳力作用下的起动流速，但当粒径超过 0.5 mm 时重力远大于黏结力，此时单颗粒受力不能维持平衡，无法考虑起动流速，针对上半断面粗颗粒流失将另外分析。

3.2 不同坡面位置下的起动流速

图 7 为相对暴露度 $\Delta'=0.134$ 条件下的起动流速与颗粒坡面位置关系曲线。曲线呈明显的对称特性，通道上半断面流速较下半断面流速要大，最大流速在坡顶 180°处，起动流速总体上随着角度增大（0°～180°）呈增大趋势。

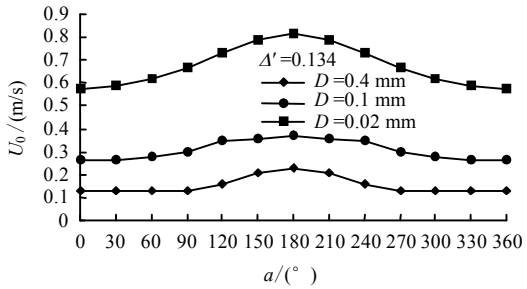


图 7 不同坡面位置下起动流速曲线

Fig.7 Starting velocity curves at different slope positions

从不同粒径下坡面不同位置起动流速的最大值和最小值中可以看出（见表 2），坡面各点起动流速变化幅度较小，均不超过 2 倍，且坡底（a=0°）起动流速近于最小。

表 2 不同坡面位置下起动流速极值（Δ'=0.134）

Table 2 Extreme values of starting velocity at different slope positions（Δ'=0.134）

D /mm	$U_{a=0°}$ /(m/s)	U_{max} /(m/s)	U_{min} /(m/s)	U_{max}/U_{min}	$U_{a=0°}/U_{min}$
0.02	0.575 6	0.817	0.576	1.419	1.000
0.10	0.261 3	0.371	0.261	1.419	1.000
0.40	0.158 6	0.225	0.128	1.751	1.000

3.3 不同相对暴露度下的起动流速

颗粒间相对暴露度表征颗粒间接触关系，暴露度越大，颗粒嵌入越深，根据文献[8]研究成果指出，当均匀颗粒紧密排列时相对暴露度最小，其值为 0.134，颗粒相对暴露度最大时为 1，即颗粒刚好被掩埋在其他颗粒之中。从颗粒起动流速与相对暴露度变化曲线可知（见图 8），起动流速随相对暴露度的增大大致呈增大趋势，但两者的关系并非完全的正相关性，期间均出现相应的波峰，说明颗粒的稳定存在一个最佳位置，且相对暴露度对起动流速影响受颗粒粒径影响很大。总体上粒径越小，相对暴露度对起动流速影响越大，随着粒径增大影响逐步减小。

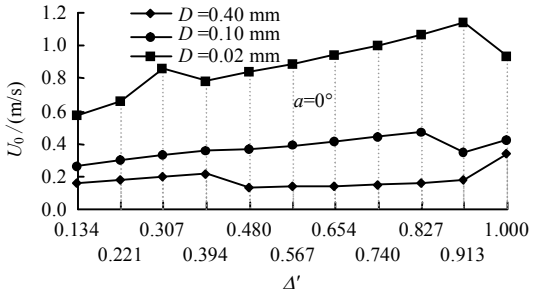


图 8 不同相对暴露度起动流速变化曲线

Fig.8 Starting velocity curves with different relative exposure degrees

3.4 起动流速影响因素的敏感性分析

为了考察起动流速对粒径 D、颗粒坡面位置 a、相对暴露度 Δ' 的敏感性，进行了 $L_{25}(5^3)$ 次正交试验，试验设计及相应结果见表 3，试验的极差及显著性分析见表 4、5。从表 4 可以得到 3 个因素的极差大小规律，即 $D>\Delta'>a$，极差越大，表示该因素对结果的影响越大。同时从表 5 的显著性分析可

以得到粒径 D 的 F 值远大于 $F_{0.01}$，a 的 F 值最小，Δ' 的 F 值在 $F_{0.05}$ 附近。F 值越大，表示因素对变量的影响越显著，说明粒径对起动流速的影响高度显著，Δ' 有一定影响，a 的影响很小。

表 3　正交试验设计及相应的结果
Table 3　Orthogonal test and its results

试验序号	D/mm	a/(°)	Δ'	U_0/(m/s)
1	0.01	0	0.134 0	0.813 3
2	0.01	72	0.350 5	1.189 8
3	0.01	144	0.567 0	2.012 4
4	0.01	216	0.783 5	2.389 3
5	0.01	288	1.000 0	2.225 8
6	0.11	0	0.350 5	0.327 5
7	0.11	72	0.567 0	0.436 5
8	0.11	144	0.783 5	0.709 5
9	0.11	216	1.000 0	0.545 0
10	0.11	288	0.134 0	0.271 2
11	0.21	0	0.567 0	0.294 7
12	0.21	72	0.783 5	0.388 5
13	0.21	144	1.000 0	0.377 1
14	0.21	216	0.134 0	0.224 4
15	0.21	288	0.350 5	0.263 9
16	0.31	0	0.783 5	0.302 1
17	0.31	72	1.000 0	0.421 3
18	0.31	144	0.134 0	0.161 4
19	0.31	216	0.350 5	0.233 7
20	0.31	288	0.567 0	0.269 3
21	0.40	0	1.000 0	0.336 9
22	0.40	72	0.134 0	0.116 1
23	0.40	144	0.350 5	0.162 1
24	0.40	216	0.567 0	0.227 6
25	0.40	288	0.783 5	0.293 3

表 4 极差分析结果
Table 4　Results of the range analysis

水平	D/mm	a/(°)	Δ'
k_{1j}	1.726 1	0.414 9	0.317 3
k_{2j}	0.457 9	0.510 44	0.435 4
k_{3j}	0.309 7	0.684 5	0.648 1
k_{4j}	0.277 6	0.724 0	0.816 5
k_{5j}	0.227 2	0.664 7	0.781 2
Q_j	8.077 7	0.344 9	0.945 3
MAX	1.726 1	0.724 0	0.816 5
MIN	0.227 2	0.414 9	0.317 3
极差	1.498 9	0.309 1	0.499 3

注：k_{ij} 是第 j 个因素第 i 个水平的所有试验结果指标值的均值；Q_j 为第 j 个因素的均方和；*MAX* =MAX（k_{1j}, k_{2j}...k_{5j}）; *MIN*=MIN（k_{1j}, k_{2j}...k_{5j}）; 极差=*MAX*～*MIN*。

表 5　方差分析
Table 5　Variance analysis

差异源	Q	f	MS	F 值	$F_{0.01}$	$F_{0.05}$	$F_{0.1}$	结论
D	8.077 7	4	2.019 4	29.721	5.41	3.26	2.48	显著
a	0.344 9	4	0.086 2	1.269	5.41	3.26	2.48	不显著
Δ'	0.945 3	4	0.236 3	3.478	5.41	3.26	2.48	较显著
误差	0.815 4	12	0.067 9					
总计	10.1833	24						

注：Q 为均方和；f 为自由度；MS 为方差估计值，MS=Q/f。自由度及方差计算方法见文献[14]。

4　颗粒起动流速标准讨论及断面流速

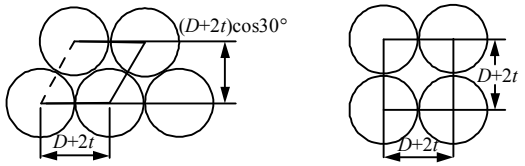
4.1　颗粒起动流速标准讨论

颗粒起动流速大小与其受力状况直接相关，对于细颗粒尤以黏结力影响为甚，一旦颗粒发生起动流失，颗粒间的接触情况由较密实转化成疏松状态，颗粒间的接触由三颗粒转化为两颗粒接触，如图 9 所示，图中 t 为薄膜水厚度。在不考虑物理化学作用下的黏结力计算公式由式（10）变为式（11）[8]，黏结力大小下降了 1/3。

$$P_{\mathrm{u}} = 3P_{\mathrm{u}'}\cos 30° \tag{10}$$

式中：$P_{\mathrm{u}'}$ 为颗粒间正接触的粘结力。

$$P_{\mathrm{u}} = 2P_{\mathrm{u}'}\cos 30° \tag{11}$$



(a) 三颗粒示意图　　(b) 两颗粒示意图

图 9　颗粒接触示意图（t 为薄膜水厚度）
Fig.9　Schematic diagrams of particle contact

图 10 为相对暴露度为 0.134 条件下，粒径分别为 0.10、0.02 mm 的颗粒，在黏结力下降 1/3 前后的不同坡面位置下起动流速曲线。图中表明黏结力下降后断面不同坡面位置所有颗粒起动流速均明显下降，且由图 10 及先前分析知，通道不同断面位置颗粒起动流速以底部（a =0°）最小，一旦底部颗粒发生流失，断面其他位置颗粒接触形式将从原三颗粒接触变为两颗粒接触，甚至是单颗粒接触，此时断面其他位置颗粒黏结力至少下降 1/3。对此，除底部颗粒外，其余颗粒起动流速应按黏结力下降 1/3 来计算。

同时通过对黏结力下降 1/3 后断面各坡面位置起动流速与下降前断面底部起动流速进行对比发现，下降后的断面大部分位置的起动流速均小于下

降前断面底部的起动流速，仅在顶部（a =180°）附近略大于下降前的底部流速（见图 10，两条直虚线表示黏结力下降前通道底部起动流速）。这说明一旦底部颗粒发生流失，断面其他位置颗粒因黏结力下降也将达到起动流速而流失。即使对于顶部颗粒也成立，其原因一方面是通道底部流速已达到其起动流速的 90%以上；另一方面是随着颗粒流失，顶部颗粒附近将不只一个颗粒流失，其黏结力及起动流速会进一步下降，致使其起动流速低于底部起动流速而发生流失。

因此，对于通道断面任意坡面位置颗粒起动流速，并非要达到该位置对应起动流速，只要达到底部颗粒所需的起动流速即可，再者底部流速是整个断面最小流速。因此，对于整个断面不同位置颗粒的起动流速可采用通道断面最小起动流速作为标准。

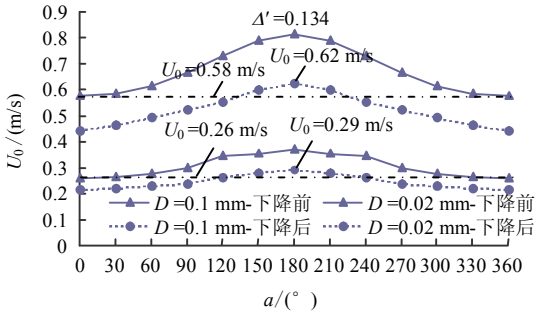


图 10 颗粒黏结力下降前后起动流速对比

Fig.10 Comparison of the starting velocity before and after the fall of bond strength of particles

另外，由先前敏感性分析可知，相对暴露度对颗粒起动流速有一定影响，韩其为等[8]研究成果指出，颗粒相对暴露度是随机变量，其分布函数与颗粒分布有关，对于均匀土颗粒，粒径是个常数，相对暴露度概率函数分布为

$$p(\Delta')=\begin{cases}1.155 & (\Delta'_{\mathrm{m}}\leqslant\Delta'\leqslant 1)\\ 0 & (\Delta'_i\ \text{为其他值})\end{cases} \tag{12}$$

对于非均匀土颗粒，粒径 D_i 也是个随机变量，相对暴露度在土体的分布较为复杂，本文由于重心在粒径为固定的单颗粒起动研究，故此处不做深入探讨。对于非均匀土颗粒，采用筛分法将颗粒进行分组，各组颗粒的粒径 $\bar{D}_i$，采用该组粒径的上、下界粒径的算术平均值来代替：

$$\bar{D}_i=(D_{i-1}+D_i)/2 \tag{13}$$

式中：D_{i-1}、D_i 分别为第 i 组粒径的上、下界粒径。

则第 i 组粒径组可看作为粒径为 $\bar{D}_i$ 的均匀颗粒，其相对暴露度概率函数分布仍采用式（12）。

利用上述相对暴露度的概率函数，将颗粒起动流速 U_0 在[Δ'_{m}, Δ'_{M}]内求积分，便可得到考虑相对暴露度随机性的起动流速期望值 $E(U_0)$，即

$$E(U_0)=\int_{\Delta'_{\mathrm{m}}}^{\Delta'_{\mathrm{M}}} p(\Delta')U_0(a,\ D,\ \Delta')\mathrm{d}\Delta' \tag{14}$$

式中：Δ'_{m} 为最小相对暴露度，取 0.134；Δ'_{M} 为最大相对暴露度，取 1，$U_0(a,\ D,\ \Delta')$ 为式（9）导出的起动流速函数表达式。

因此，针对起动流速的 3 个因素，在保留对起动流速影响最为重要的粒径基础上，结合断面颗粒起动最小流速标准和考虑颗粒随机分布的相对暴露度值来简化颗粒坡面位置和相对暴露度，即将 a =0°代入式（9），求得断面底部流速表达式 $U(0^\circ, D, \Delta')$，再将 $U(0^\circ, D, \Delta')$ 代入式（14）求得考虑相对暴露度的颗粒起动流速期望值，即得简化的颗粒起动流速公式：

$$E(U_0)=0.957\ 7\sqrt{\frac{8\ 984.325D^2+2.747\ 5\times10^{-3}}{157D}} \tag{15}$$

5 颗粒起动流速公式验证

5.1 颗粒起动流速试验

5.1.1 试验设计

为验证不同颗粒起动流速大小，设计图 11 试验装置，其中水槽长为 200 cm，宽为 10 cm，高为 6 cm。水槽两端分别设置进水口与出水口，进水端设有流速调节阀门，最大流速可达 3 m/s。试验用土样放在距离进水口 50 cm 位置处，试验用土样采用工程现场土样。

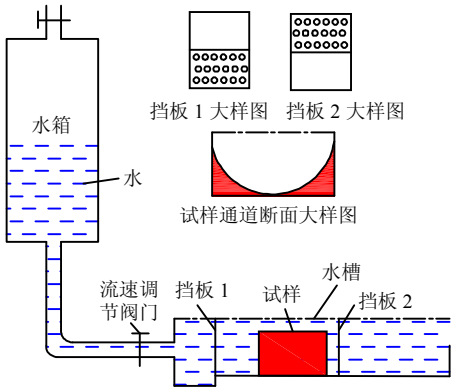


图 11 试验装置示意图

Fig.11 Schematic diagram of testing equipment

5.1.2 试验方案

采用标准筛对现场土样分别筛分出粒径为

0.1～0.25、0.25～0.5、2～3 mm 的 3 组粒径，开展不同颗粒的起动流速试验，试验方案如下：

（1）采用标准筛将各组粒径筛分好，按设计分层压实加入试验水槽，人工制成半圆柱形涌水通道，通道长为 40 cm，直径为 5 cm，湿润养护 1 d。

（2）采用浮标法测定水流平均流速，通过调节进水口阀门控制流速。流速从 0 m/s 缓慢提高，每次提高范围控制在 0.1 m/s 内，并控制该级流速 5 min 不变。

（3）根据窦国仁[11]的研究，起动的颗粒数量不同，作用在颗粒上的底部瞬时流速与平均流速关系也不同，颗粒的起动按先后分成将动未动、个别起动和普遍动 3 个状态。3 个状态下的通道断面平均流速 $\overline{u}_{\mathrm{d}}$ 与颗粒起动流速 $E(U_0)$存在式（16）～（18）关系[13]。试验过程观察水槽内颗粒起动状态，按照颗粒将动未动、个别起动和普遍动三状态分别记录对应的流速。

将动未动状态：

$$\overline{u}_{\mathrm{d}}=\frac{E(U_0)}{2.11}\sqrt{\frac{4C_{\mathrm{D}}}{\lambda}} \tag{16}$$

个别动状态：

$$\overline{u}_{\mathrm{d}}=\frac{E(U_0)}{1.74}\sqrt{\frac{4C_{\mathrm{D}}}{\lambda}} \tag{17}$$

普遍动状态：

$$\overline{u}_{\mathrm{d}}=\frac{E(U_0)}{1.37}\sqrt{\frac{4C_{\mathrm{D}}}{\lambda}} \tag{18}$$

式中：λ 为沿程阻力系数，由尼古拉兹曲线得到[15]。

5.1.3　试验结果

试验观察颗粒运动的 3 个状态，按照式（16）～（18）可分别求出颗粒的底部流速 $E(U_0)$。

以 0.10～0.25 mm 粒径组为例，在水流断面流速为 0.53 m/s 时，有极少数颗粒发生运动，但很快停止；流速达到 0.67 m/s 时，不同位置相应有少数颗粒发生起动，颗粒达到个别起动状态；当流速达到 1.05 m/s 时，大部分颗粒开始起动，此时颗粒达到普遍起动状态。各组试验数据见表 6。试验过程中的图片见图 12。

表 6　试验颗粒起动流速（单位：m/s）

Table 6　Particle starting velocities of tests (unit: m/s)

粒径组范围 D/mm	将动未动		个别动		普遍动		式（15）理论值
	$\overline{u}_{\mathrm{d}}$	$E(U_0)$	$\overline{u}_{\mathrm{d}}$	$E(U_0)$	$\overline{u}_{\mathrm{d}}$	$E(U_0)$	$E(U_0)$
0.1～0.25	0.53	0.33	0.67	0.30	1.05	0.34	0.32
0.25～0.5	0.48	0.27	0.56	0.25	0.85	0.26	0.25
2～3	0.61	0.40	0.75	0.38	1.23	0.36	0.37



(a) 试验试样及通道预制

(b) 粒径组为 0.10～0.25 mm 的颗粒起动流速试验图片

(c) 粒径组为 0.25～0.50 mm 的颗粒起动流速试验图片

(d) 粒径组为 2～3 mm 的颗粒起动流速试验图片

图 12　不同颗粒粒径起动流速试验图片

Fig.12　Photos of different starting velocity tests with different particle diameters

同时根据式（15）计算出各组粒径下的理论近底瞬时流速，与颗粒起动下 3 个不同状态换算得到的试验近底流速进行对比发现，试验得到流速与理

论值较为接近。说明本文推导的公式具有一定适用性。

5.2 工程实例

在建的广西岑溪隧道是包茂高速（G65）岑溪至水汶段的控制性工程，隧道围岩主要为全风化花岗岩，隧道埋深大，区域富水，水压高，土体强度低，在工程扰动下已多次发生突水、突泥灾害，土体颗粒冲刷严重，已形成明显的突水通道，给工程施工和突水、突泥灾害防治带来很大的技术难题，开展突水通道扩展演化机制研究迫在眉睫。

在某次开挖涌水过程中，经测定某涌水通道直径约 40 mm，涌水量约 7 m^3/h，按照式（15）换算成通道底部水流流速为 0.373 3 m/s。图 13 为原状土颗粒级配与该通道涌出泥沙颗粒级配曲线，原状土粒径分布较广，<0.075 mm 粒径比重较大，而突泥颗粒分布曲线较原状土曲线更陡，颗粒分布主要在 0.1～5.0 mm 之间。考察突水前原状土颗粒的起动流速，将颗粒分成表 7 对应的粒径组，按照本文推导的式（15）求得各组粒径起动流速，得到粒径在 0.1～3.0 mm 内颗粒起动流速均小于实际通道底部水流流速 0.373 3 m/s，其他粒径范围均大于实际通道底部水流流速。

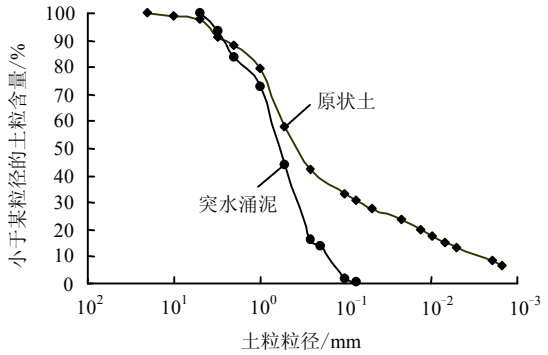


图 13 颗粒分级曲线

Fig.13 Particle classification curves

表 7 原状土与突水涌泥颗粒分级及颗粒起动流速

Table 7 Particle classification of undisturbed soil and mud and the undisturbed soil particle starting velocity

粒径组范围/mm	粒径组起动流速/(m/s)	原状土含量/%	突水涌泥粒径含量/%
<0.075	0.655 8	30.70	0.90
0.075～0.10	0.433 6	2.30	1.15
0.10～0.25	0.317 7	8.94	14.45
0.25～0.50	0.250 0	16.10	27.37
0.5～1.0	0.246 5	21.18	29.03
1.0～2.0	0.299 1	8.58	11.13
2.0～3.0	0.371 0	3.20	9.34
3.0～5.0	0.462 6	6.38	6.65
5.0～10.0	0.629 1	1.28	0.00
>10.0	0.887 9	1.34	0.00

对比表 7 颗粒流失情况起动流速公式可得到很好的验证，颗粒的流失范围集中在 0.1～3.0 mm 内，起动流速小于 0.373 3 m/s 的颗粒占流失总量的 91.3%。说明由式（15）计算得到的起动流速在小于实际通道底部水流流速的颗粒均发生流失。这也验证了本文推导的颗粒起动流速合理性。

6 结 论

（1）考虑水流冲刷与颗粒间黏结作用，对突水通道断面边壁颗粒三维受力状态进行分析，建立通道边壁颗粒起动的临界条件。

（2）分析了颗粒起动流速随颗粒粒径、通道断面颗粒坡面位置、相对暴露度的变化规律，发现起动流速随粒径的增大而先减小后增大，通道断面颗粒坡面位置流速呈明显的对称性，总体上起动流速随相对暴露度的增大呈增大趋势。

（3）利用正交试验研究粒径等三因素对起动流速的敏感性，发现颗粒粒径对起动流速的影响最大，相对暴露度及颗粒断面位置对起动流速的影响有限。

（4）根据断面颗粒起动最小流速标准和考虑相对暴露度随机性简化颗粒通道断面位置和相对暴露度，得到颗粒起动流速的简化公式，并利用室内试验和工程实例验证了所推导的起动流速公式合理性，该公式可作为颗粒流失的判断标准，对于土体突水通道的扩展演化判断具有重要理论意义。

参 考 文 献

[1] 于洪丹, 陈卫忠, 郭小红, 等. 厦门海底隧道强风化花岗岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 381－387.
YU Hong-dan, CHEN Wei-zhong, GUO Xiao-hong, et al. Resreach on mechanical characteristics of strongly weathered granite for Xiamen subsea tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 381－387.

[2] 刘金泉, 陈卫忠, 袁敬强. 全风化花岗岩注浆加固体抗冲刷特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1767－1775.
LIU Jin-quan, CHEN Wei-zhong, YUAN Jing-qiang. Test on anti-scouring property of grouting reinforced body in completely weathered granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2016, 35(9): 1767－1775.

[3] 周运祥. 富水隧道全风化花岗岩和蚀变大理岩段涌水

涌砂加固治理技术[J]. 铁道标准设计, 2015, (6): 96－102.
ZHOU Yun-xiang. The control of sand-gushing and water-bursting of water-rich tunnel located in area with fully weathered granite and alteration marble[J]. **Railway Standard Design**, 2015, (6): 96－102.

[4] 谈瑾希. 厦门海底隧道穿越风化槽段施工的风险控制[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
TANG Jin-xi. Risk control of the construction of Xiamen tunnel through regolith sections[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

[5] LIU Jin-quan, CHEN Wei-zhong, YUAN Jing-qiang, et al. Groundwater control and curtain grouting for tunnel construction in completely weathered granite [J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2017: 1－17. doi:10.1007/s10064-017-1003-x.

[6] LI Li-ping, TU Wen-feng, SHI Shao-shuai, et al. Mechanism of water inrush in tunnel construction in karst area [J]. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, 2016, 7(Supp. 1): 1－12.

[7] 张士川, 郭惟嘉, 孙文斌, 等. 深部开采隐伏构造扩展活化及突水试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3111－3120.
ZHANG Shi-chuan, GUO Wei-jia, SUN Wen-bin, et al. Experimental research on extended activation and water inrush of concealed structure in deep mining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3111－3120.

[8] 韩其为, 何明民. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
HAN Qi-wei, HE Ming-min. Incipient motion and incipient velocity for sediment[M]. Beijing: Science Press, 1999.

[9] BONG C H J, LAU T L, GHANI A A, et al. Sediment deposit thickness and its effect on critical velocity for incipient motion[J]. **Water Science and Technology**, 2016, 74(8): 1876－1884.

[10] 韩其为, 胡春宏. 50 年来泥沙研究所主要研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, (3): 170－182.
HAN Qi-wei, HU Chun-hong. Research progress of sediment research institute for 50 years[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2008, (3): 170－182.

[11] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999, (6): 1－9.
DOU Guo-ren. Re-discussions on starting velocity of sediment[J]. **Journal of Sediment Research**, 1999, (6): 1－9.

[12] 贾恺, 曹洪, 李兴华, 等. 双层堤基管涌通道扩展机制和计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2368－2376.
JIA Kai, CAO Hong, LI Xing-hua. Research on mechanism and computational method of piping channel expansion of double-layer dike foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(11): 2368－2376.

[13] 贾恺. 双层堤基渗透破坏发展机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
JIA Kai. Research on mechanism of emergence and expansion of seepage failure of dike foundation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

[14] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京, 化学工业出版社, 2005: 98－102.
LI Yun-yan, HU Chuan-rong. Experiment design and data processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 98－102.

[15] HERBERT OERTEL. Prandtl-essentials of fluid mechanics[M]. New York: Springer, 2010: 160－163.

上接第 1178 页

[16] 苏静波, 邵国建, 刘宁, 等. 基于单元的子区间摄动有限元方法研究[J]. 计算力学学报, 2007, 24(4): 524－528.
SU Jing-bo, SHAO Guo-jian, LIU Ning, et al. Static subinterval perturbed finite element method based on the elements[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2007, 24(4): 524－528.

[17] XIA B, YU D. Modified interval and subinterval perturbation methods for the static response analysis of structures with interval parameters[J]. **Journal of Structural Engineering**, 2013, 140(5): 1－12.

[18] SIEGFRIED M. Rump. Fast and parallel interval arithmetic[J]. **BIT Numerical Mathematics**, 1999, 39(3): 534－554.

[19] RABCEWICZ L V. The new Austrian tunnelling method[J]. **Water Power**, 1964, 16(11): 453－456.

[20] ROUSSERV P. Calculation of the displacements and Pacher's rock pressure curve by the associative law for the fluidity-plastic flow[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1998, 13(4): 441－451.

[21] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218-94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218-94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.