水　利　学　报

2021年3月　　SHUILI　XUEBAO　　第52卷　第3期

文章编号:0559-9350(2021)03-0323-10

重塑粗粒土-黏性土混合物冲刷特性研究

高晓静[1,2]，王秋生[2]，李　勇[3]，邹福林[3]

（1. 交通运输部公路科学研究院 桥梁隧道研究中心，北京　100088；2. 北京工业大学 建筑工程学院，北京　100124；
3. 中铁十一局集团有限公司，湖北 武汉　430061）

摘要：针对粗粒土-黏性土混合物的冲刷特性与无黏性土、黏性土的不同，采用冲刷函数测定仪对三种重塑粗粒土-粉质黏土混合物进行了冲刷特性试验研究，分析了不同粉质黏土含量情况下三种混合土体冲刷速率和起动切应力的变化规律，根据冲刷速率和起动切应力的取值确定了三种混合土体临界黏性颗粒含量的范围。随黏性颗粒含量的增加混合土体的冲刷行为逐渐由无黏性变为黏性，基于这一特点，提出冲刷黏性度的概念，作为衡量混合土体是否具有黏性冲刷行为的度量，考虑无黏性颗粒粒径和黏粒含量对混合土体冲刷特性的影响，给出冲刷黏性度表达式，根据本文冲刷试验数据确定了表达式参数的取值，通过已有其他试验数据，验证了冲刷黏性度表达式的合理性和准确性。

关键词：冲刷；混合土体；起动切应力；临界黏性颗粒含量；黏粒含量；冲刷黏性度

中图分类号：TU442　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20200303

1　研究背景

岩土类材料的冲刷是造成河岸迁移、桥墩冲刷破坏、土石坝溃决以及水库淤积等工程问题的主要原因[1-2]。无黏性砂砾和黏性土是土体冲刷特性研究的主要对象[3-6]。然而，许多自然环境下，无黏性砂砾和黏性土并不是单独地存在，而是以混合物的形式分布[7-8]。近年来，混合土体冲刷特性研究主要针对砂土-黏性土混合物展开[9]，砾石-黏性土混合物的研究较少[2]。混合土体的冲刷过程涉及许多复杂的物理和化学过程，重塑土在制样时可以对其成分和性质进行控制，采用重塑土可以更好地研究混合土体冲刷特性的影响因素和演化规律[10]。

泥沙沉积工程中，土颗粒粒径大于2 mm的为砾石，颗粒粒径范围0.063～2 mm的为砂粒，颗粒粒径范围0.004～0.063 mm的为粉粒，粒径小于0.004 mm的颗粒为黏粒[11]。文中颗粒粒径小于0.063 mm的粉粒和黏粒统称为黏性颗粒（粒径小于0.063 mm的颗粒），黏性颗粒含量(p_m)是指混合土体中黏性颗粒所占的质量百分比，黏粒含量(p_c)是指混合土体中黏粒（粒径小于0.004 mm的颗粒）所占的质量百分比。

不同于砂砾和黏性土，随着黏性颗粒含量的变化，混合土体表现不同的冲刷行为，临界黏性颗粒含量是判断混合土体冲刷行为的重要参数。研究发现，无黏性砂砾中加入少量的黏性土，其冲刷特性会发生明显的变化，随着黏性土含量的增加，混合土体的抗冲刷性能增强，冲刷速率降低，混合土体表现出黏性土的冲刷特性[12]。基于试验研究，学者们给出了混合土体冲刷特性由无黏性转变为黏性时对应的黏性颗粒含量范围，并定义为临界黏性颗粒含量(p_{mc})。Alvarez-Hernandez[13]通过砂土-黏土混合物冲刷特性试验，指出黏粒含量范围在5%～15%时，砂土-黏土混合物的冲刷特性由无

收稿日期：2020-05-03；网络首发时间：2021-01-13

网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210112.1102.001.html

基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2020-9032)；国家自然科学基金项目(51679003，51538001)；交通运输部公路科学研究所(院)科技创新专项资金项目(2019-C505)；山西省交通科技项目(2017-1-6)

作者简介：高晓静(1990-)，博士，助理研究员，主要从事土体冲刷特性、隧道及地下工程围岩稳定性等研究。
E-mail：xiaojing.gao1990@foxmail.com

黏性变为黏性。Mitchener等[12]和Houwing[14]根据其研究结果得出混合土体临界黏性颗粒含量的范围分别为3%～15%和20%～30%。Van Ledden等[11]认为采用临界黏粒含量来判断混合土体冲刷行为由无黏性转为黏性更为准确。

相同水流强度条件下，无黏性土的冲刷速率可以高出黏性土两个数量级。合理预测混合土体的冲刷速率，需要根据临界黏性颗粒含量的范围，正确判断混合土体的冲刷行为。目前临界黏性颗粒含量的取值范围主要根据试验现象和试验结果定性给出，基于砾石-黏性土混合物冲刷试验研究匮乏，有必要开展相关混合土体临界黏性颗粒含量的研究。混合土体冲刷行为主要根据砂粒、粉粒和黏粒含量进行分区判断[11]，缺乏衡量混合土体冲刷行为的物理量。本文应用冲刷函数测定仪，对三种粗粒土-粉质黏土混合物进行了冲刷特性试验，研究了三种混合土体冲刷速率和起动切应力的变化规律，得出临界黏性颗粒含量的范围，提出了混合土体冲刷黏性度的概念，基于试验数据确定了冲刷黏性度的计算表达式。

2　冲刷特性试验

2.1　试验制备与方案　试验测试的三种混合土体由粗粒土和黏性土组成。粗粒土选用中值粒径为1.5 mm的均匀石英砂以及粒径为5.5 mm和7 mm的均匀砾石，无黏性砂砾的中值粒径用d_s表示。黏性土选用北京某地铁施工现场的粉质黏土。采用激光粒度分析仪测定粉质黏土的粒径分布，粒径级配曲线如图1所示，粉质黏土中值粒径为0.0164 mm，砂粒含量为17%、粉粒含量为59%，黏粒含量为24%，黏性颗粒含量为83%。使用液塑限联合测定仪测得粉质黏土的液限为32%，塑限为17%，塑性指数I_p为15%。采用击实仪测得粉质黏土最优含水率为13.63%，最大干密度为1937 kg/m^3。

为得到较为均匀的试样，采用固结的方式制备土样。将现场取回的粉质黏土烘干后磨碎，过2 mm的筛子，将粉质黏土与粗粒土按一定比例混合，得到干燥的粗粒土-粉质黏土混合物，混合土体中粉质黏土的质量百分比称为粉质黏土含量(p_{sc})。取适量的自来水倒入混合土体中，均匀搅拌至稠状并静置24 h，将稠状混合物倒入固结仪中进行排水固结，固结压力设置为100 kPa，当试样在24 h内的固结变形量小于0.01 mm时，固结完成。用Shelby试样筒从固结仪中取出已固结好的试样，进行冲刷试验，固结仪中剩余的土样用以测量混合土体的物理力学参数：密度ρ，含水率w，干密度ρ_d和孔隙比e，结果如表1所示。

表1　试验方案及混合土体物理力学参数

混合土体	试样编号	p_{sc}/%	d_s/mm	ρ/(kg/m^3)	w/%	ρ_d/(kg/m^3)	e
G1	1	0	1.5	1714.9	14.00	1504.3	0.76
	2	20	1.5	2082.2	13.71	1831.1	0.45
	3	22.5	1.5	2170.3	14.11	1901.9	0.39
	4	25	1.5	2204.2	13.20	1947.2	0.37
	5	30	1.5	2257.9	13.91	1982.2	0.34
G2	1	0	5.5	1919.9	11.00	1729.7	0.53
	2	20	5.5	2332.8	10.79	2105.5	0.26
	3	30	5.5	2491.1	10.99	2244.4	0.19
	4	32.5	5.5	2473.3	11.34	2221.4	0.20
	5	35	5.5	2368.9	10.76	2138.8	0.25
G3	1	0	7	1995.2	11.00	1797.5	0.47
	2	20	7	2362.9	8.16	2184.7	0.22
	3	30	7	2530.3	11.67	2265.9	0.18
	4	32.5	7	2431.4	10.09	2208.6	0.21
	5	35	7	2469.6	12.69	2191.3	0.22

用符号G1、G2、G3代表砂土(d_s=1.5 mm)–粉质黏土混合物、砾石(d_s=5.5 mm)–粉质黏土混合物、砾石(d_s=7mm)–粉质黏土混合物。三种混合土体各进行5组试验，为获取较为精确的临界黏性颗粒含量范围，每种混合土体5组试样中粉质黏土含量的取值根据试验现象采用二分法确定，具体试验方案如表1所示。

2.2 试验设备与步骤 采用冲刷函数测定仪[15](图2)开展混合土体冲刷特性试验。冲刷函数测定仪可以进行粒径小于10 mm土体的冲刷特性试验[16]，试验流速范围为0.1 ~ 6 m/s。

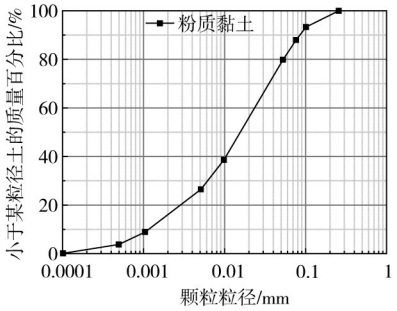


图1 粉质黏土粒径级配曲线

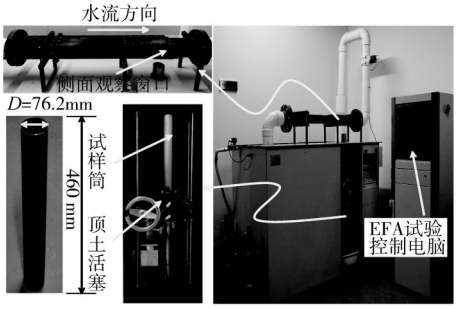


图2 冲刷函数测定仪

试验步骤如下[17]：(1)将装有土样的Shelby试样筒固定在顶土活塞槽内，通过顶土活塞将土样顶出试样筒并刮平土样表面；(2)转动摇杆使试样筒顶部与矩形试验管道底部齐平；(3)设置流速，通常初始流速值为0.2 m/s；(4)开始试验，记录时间和数据，试验过程中观察土样冲刷情况并保持土样表面与管道底齐平，当土样表面出现明显的凹凸不平时，停止试验并刮平土样，然后继续试验，直到冲刷时间超过60 min或者50 mm的土样被冲刷；(5)重复步骤(3)、(4)，测试4 ~ 8个水流速下的冲刷速率，并得到冲刷速率–水流速和冲刷速率–水流切应力曲线。

水流切应力计算公式如下：

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho_w u^2 \tag{1}$$

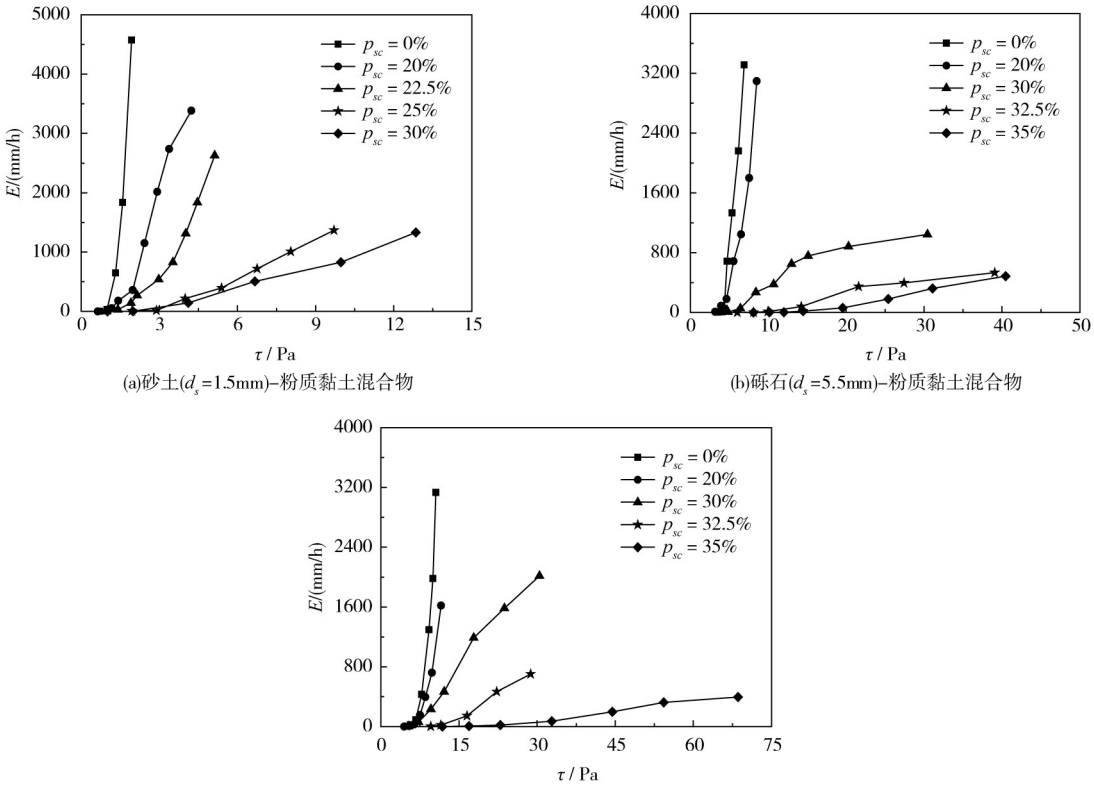
式中：τ为床面水流切应力；ρ_w为水的密度；f为摩阻系数；u为断面平均流速。

摩阻系数f是雷诺数Re与相对粗糙度k_s/D的函数，可根据Moody图确定[15]，本文中水力直径D=68 mm，粗糙度平均值k_s取0.5 d_{50}[15]，d_{50}为混合土体的中值粒径。

3 试验结果

3.1 冲刷速率 混合土体G1、G2、G3的冲刷速率曲线如图3所示。从图中可以看出，对于某种混合土体，在一定的水流切应力作用下，冲刷速率E随粉质黏土含量p_{sc}的增加而减小，混合土体的冲刷速率与粉质黏土含量密切相关。Mitchener等[12]和Smith等[18]研究发现，黏性颗粒含量小于50%的情况下，随黏性颗粒含量的增大，砂土–黏性土混合物的抗冲蚀特性明显增强，冲刷速率显著降低。p_{sc}=25%时G1的冲刷速率明显小于p_{sc}=22.5%时的冲刷速率，p_{sc}=30%时G2的冲刷速率明显减小，p_{sc}=35%时G3的冲刷速率明显减小。由此可以得到，混合土体中粗粒土粒径越大，混合土体冲刷速率显著降低时的黏性颗粒含量越大。

3.2 起动切应力 在水流作用下土体颗粒由静止状态转变为运动状态时所对应的水流切应力为起动切应力。学者们根据不同的冲刷试验给出了定量求解起动切应力的方法。McNeil等[19]采用深水水槽冲刷装置(Sedflume)对重塑土和非扰动原位土进行了冲刷特性研究，根据试验结果给出了起动切应力的定量化定义，即冲刷速率为10^{-4} ~ 10^{-3} cm/s对应的水流切应力。时连强等[20]参照呼和敖德教授对连云港和长江口处泥沙进行的冲刷试验结果，以冲刷速率范围为0.4×10^{-3} ~ 0.8×10^{-3} cm/s对应的切应力定义起动切应力。Smith等[18]采用封闭有压管道对泥沙混合物进行了冲刷试验，定义冲刷速率为10^{-4} cm/s对应的水流切应力为起动切应力。起动切应力是土体在不发生冲刷破坏情况下所能承受的最大水流



(a)砂土(d_s=1.5mm)–粉质黏土混合物　(b)砾石(d_s=5.5mm)–粉质黏土混合物

(c)砾石(d_s=7mm)–粉质黏土混合物

图3　粗粒土–粉质黏土混合物冲刷速率曲线

切应力，即土颗粒在起动时所受到的水流切应力，由于此时土颗粒刚发生起动现象，其相应的冲刷速率应该是大于零而足够小的。对比分析上述学者的研究成果，作者采用10^{-4} cm/s(3.6 mm/h)对应的水流切应力作为起动切应力，基于冲刷速率曲线对起动切应力进行确定[21]。

在冲刷速率–切应力曲线图中画水平线x=3.6 mm/h，如果冲刷速率曲线与水平线存在交点，则交点所对应横坐标的取值即为起动切应力。如果冲刷速率曲线与水平线没有交点，连接冲刷速率曲线上冲刷速率大于3.6 mm/h最小的两个点，并延长该两点构成的直线，该直线与水平线x=3.6 mm/h相交点对应的切应力即为起动切应力，如图4所示。不同粉质黏土含量情况下，三种混合土体起动切应力的计算结果如表2所示。

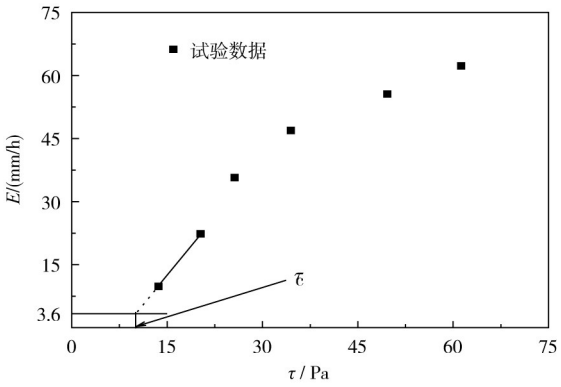


图4　起动切应力确定方法

表2　混合土体起动切应力

G1		G2		G3	
p_{sc}/%	τ_c/Pa	p_{sc}/%	τ_c/Pa	p_{sc}/%	τ_c/Pa
0	0.69	0	3.46	0	5.38
20	0.92	20	3.16	20	5.25
22.5	1.29	30	3.91	30	6.45
25	1.64	32.5	8.59	32.5	9.7
30	2.0	35	12.21	35	14.09

三种混合土体起动切应力与粉质黏土含量的变化规律如图5所示。由图可知，粉质黏土含量一定的情况下，混合土体中无黏性颗粒粒径越大其起动切应力越大。研究表明，无黏性土的起动切应力与颗粒粒径成正相关关系[22]。当粉质黏土含量较低时，混合土体的起动以无黏性颗粒为主导，无黏性颗粒粒径越大，混合土体起动切应力越大。当粉质黏土含量较高时，混合土体的起动以无黏性颗

粒和黏性细颗粒的微团为主，无黏性颗粒粒径越大，混合土体起动时微团的直径越大，混合土体起动时的阻力越大，起动切应力越大。

从图5中可以看出砂土(d_s=1.5 mm)–粉质黏土混合物的起动切应力随粉质黏土含量的增大而增大，当p_{sc}=0%时，砂土(d_s=1.5 mm)–粉质黏土混合物的起动切应力取最小值，这一变化规律与Van Ledden[23]、Kothyari等[2]、Ahmad等[24]以及Ye等[10]的研究结果一致，而Torfs等[25]和Barry等[26]的研究结果显示砂土–黏性土混合物的冲刷速率随黏性颗粒含量的增大先减小后增大。图5表明，两种砾石–粉质黏土混合物的起动切应力随粉质黏土含量的增大先减小后增大，当p_{sc}=20%时，两种砾石–粉质黏土混合物的起动切应力取最小值。

分析无黏性颗粒起动时的受力情况。假设颗粒以滚动的形式起动，颗粒受力情况如图6所示。

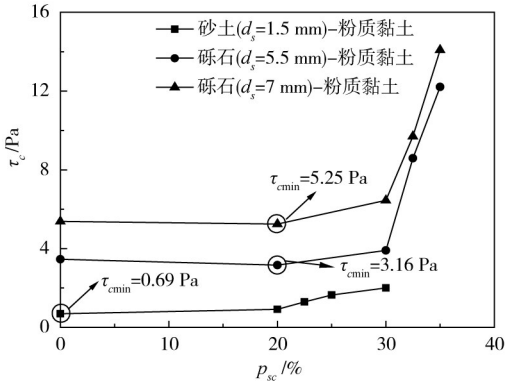


图5　三种混合土体起动切应力变化规律

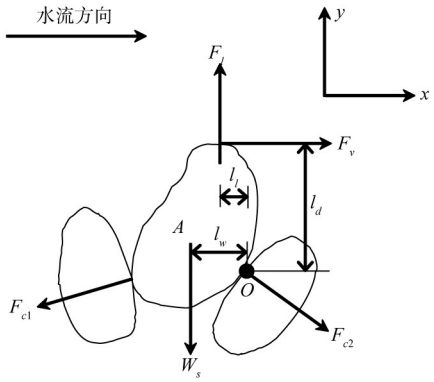


图6　无黏性颗粒起动时受力

作用在颗粒A上的力包括：水流的推动力(F_d)，由于水流不均匀而产生的上举力(F_l)，颗粒浮重度(W_s)以及颗粒之间的黏结力(F_{c1}，F_{c2}，……，F_{cn})[7,27]。颗粒A起动的瞬间，满足以O点为力矩点的力矩平衡：

$$F_d l_d + F_l l_l = W_s l_w + M_c \tag{2}$$

式中：l_d、l_l、l_w分别为水流推动力、上举力和浮重度的力臂；M_c为颗粒A与周围颗粒之间黏结力的力矩。

水流推动力、上举力和浮重度的表达式分别为：

$$F_d = C_d \rho_w a_1 d_s^2 u^2 \tag{3}$$

$$F_l = C_l \rho_w a_2 d_s^2 u^2 \tag{4}$$

$$W_s = (\rho_s - \rho_w) g a_3 d_s^3 \tag{5}$$

式中：C_d为水流推动力的系数；C_l为上举力的系数；ρ_s为无黏性颗粒的密度；$a_1 d_s^2$为水流推动力的作用面积，a_1是系数；$a_2 d_s^2$为上举力的作用面积，a_2是系数；$a_3 d_s^3$为无黏性颗粒的体积，a_3是系数。



(a)试样冲刷前　　(b)试样冲刷后

图7　粉质黏土含量20%，砂土(d_s=1.5mm)–粉质黏土混合物

粉质黏土含量20%情况下，砂土(d_s=1.5mm)-粉质黏土混合物冲刷前后的试验现象如图7所示。试验现象表明冲刷前砂土颗粒和粉质黏土细颗粒胶结在一起，在水流作用下，砂土颗粒和粉质黏土细颗粒几乎同时起动，此时混合土体起动时颗粒粒径大于砂土颗粒粒径。根据公式(3)(4)(5)可知，颗粒粒径增大，浮重度和颗粒起动时的阻力增大，土体起动需要的水流流速和剪应力增大，所以砂土混合物在p_{sc}=20%时的起动切应力大于p_{sc}=0%时的起动切应力。随着p_{sc}的增大，颗粒之间的黏结力增加，颗粒起动时阻力逐渐增大，起动切应力逐渐增大。

粉质黏土含量20%情况下，砾石(d_s=5.5mm)-粉质黏土混合物冲刷前后的试验现象如图8所示。试验结果显示，冲刷前粉质黏土细颗粒黏附在砾石表面或填充在砾石颗粒之间，当水流流速较小时，砾石未起动，粉质黏土细颗粒被冲刷，细颗粒的冲刷引起混合土体孔隙比增大，同时被冲刷的细颗粒进入水流中导致水变浑浊(图8(b)的清晰度明显低于图8(a))，可以认为水流密度增大，根据公式(3)和(4)可知，水流密度增大，推动力和上举力不变的情况下，需要的水流流速变小，颗粒起动需要的切应力变小。随着水流速的增大，混合土体中砾石颗粒以单颗粒的形式起动，其中会有少量细颗粒黏附于砾石颗粒表面，砾石颗粒粒径远大于粉质黏土颗粒，少量黏附于砾石表面的细颗粒质量可以忽略不计。研究发现，土体的起动切应力随孔隙比的增大而减小[2]。p_{sc}=20%情况下，砾石(d_s=5.5 mm)-粉质黏土混合物的起动以砾石颗粒冲刷为主导，由于粉质黏土细颗粒的冲刷，混合土体的孔隙比增大、水流密度增大，导致砾石颗粒的起动切应力减小。当粉质黏土含量增大，砾石颗粒与粉质黏土颗粒之间的黏结作用增强，混合土体以砾石颗粒与黏性颗粒组成的微团的形式起动，混合土体起动时阻力增大，起动切应力增大。



(a)试样冲刷前　　(b)试样冲刷后

图8　粉质黏土含量20%，砾石(d_s=5.5mm)-粉质黏土混合物

3.3　临界黏性颗粒含量　目前临界黏性颗粒含量(p_{mc})范围的确定主要通过观察试验现象定性给出。根据本文试验现象和冲刷速率试验结果，可以初步得到混合土体G1、G2、G3临界粉质黏土含量的范围为：p_{sc}>22.5%，p_{sc}>20%，p_{sc}>30%。Mitchener等[12]研究发现，砂土混合物中黏性颗粒含量为10%时，混合土体的起动切应力是砂土起动切应力的2～5倍，同时混合土体的冲刷速率较砂土明显减小。

基于Mitchener等[12]的研究，本文尝试提出进一步确定混合土体临界黏性颗粒含量的方法：如果一定黏性颗粒含量(p_m)条件下，混合土体的起动切应力是无黏性颗粒起动切应力的2倍及以上，同时混合土体的冲刷速率较小于p_m最大值情况下混合土体的冲刷速率明显降低，认为此时p_m即为临界黏性颗粒含量。

根据上述提出的方法，得到G1、G2、G3临界粉质黏土含量的范围为：22.5%～25%、30%～32.5%、32.5%～35%。通过冲刷速率和起动切应力的取值确定的临界粉质黏土含量的范围包含在通过试验观察得到的范围内，而且取值范围更精确。粉质黏土中粉粒含量为59%，黏粒含量为24%，黏性颗粒含量为83%。由此可知G1、G2、G3临界黏性颗粒含量范围分别为：18.68%～20.75%、24.90%～26.98%、26.98%～29.05%，临界黏粒含量范围分别为：5.4%～6%、7.2%～7.8%、7.8%～8.4%，三种混合土体临界黏粒含量的取值范围在Alvarez-Hernandez[13]通过试验结果给出的临界黏粒含量范围(5%～15%)之内，这一结果表明，通过冲刷速率和起动切应力确定混合土体临界黏性颗粒含量取值范围的方法是可行的。

4　混合土体冲刷黏性度

4.1　公式推导　一定水流切应力作用下，混合土体的冲刷行为随黏性颗粒含量的增加逐渐由无黏性变为黏性，考虑混合土体冲刷行为的变化，提出冲刷黏性度这一概念，作为衡量混合土体是否具有黏性冲刷行为的度量，用符号D_c表示，D_c越大，混合土体的黏性冲刷行为越明显，D_c的取值范围为[0，1]。研究表明土体中只有粒径小于0.004 mm的黏粒具有黏性，混合土体的黏性冲刷特性是由黏粒颗粒引起的[11]，D_c与黏粒含量p_c密切相关。混合土体中黏粒含量越大，土体的黏性冲刷特性越明显，冲刷黏性度越大，当p_c=0时，混合土体表现无黏性冲刷特性D_c=0，当p_c=100%时，混合土体表现黏性冲刷特性D_c=1，D_c与p_c之间是正相关关系。

Alvarez-Hernandez[13]通过对不同粒径砂土-黏土混合物进行冲刷特性试验，发现混合土体冲刷特性由无黏性变为黏性时的黏粒含量即临界黏粒含量p_{cc}与无黏性颗粒粒径d_s有关。假设混合土体中黏性土含量为某一特定值，如果混合土体中无黏性颗粒粒径d_s足够小，其值近似等于0.004 mm，则混合土体表现黏性冲刷特性，此时D_c取值较大；如果d_s取值较大，大于砾石粒径，此时混合土体的冲刷特性由无黏性颗粒主导，D_c取值较小，由此推断，D_c与d_s呈负相关关系。

黏粒含量p_c和无黏性颗粒粒径d_s分别反映混合土体中黏性土和无黏性土的性质，假设p_c和d_s对D_c的影响独立且互不干扰。用符号D_{c1}和D_{c2}分别表示p_c和d_s影响部分的混合土体冲刷黏性度。假设D_{c1}与p_c的关系曲线为抛物线(如图9所示)，表达式写为：

$$D_{c1} = ap_c^{\,2} + bp_c + c \tag{6}$$

根据边界条件(0，0)、(1，1)以及抛物线的对称轴为p_c=1得出a=-1、b=2、c=0，式(6)的具体表达式为：

$$D_{c1} = -p_c^{\,2} + 2p_c \tag{7}$$

正态分布是一个在数学、物理及工程等领域都非常重要的概率分布。水流对土体的冲刷具有随机性，正态分布广泛应用于土体冲刷特性的研究。正态分布的期望值μ决定了正态曲线的位置，标准差σ决定了分布的幅度。采用图10中所示的概率密度函数表示D_{c2}与d_s的关系：

$$D_{c2} = \mathrm{e}^{-\frac{\left(d_s/d_{c50}-1\right)}{2\sigma^2}} \tag{8}$$

式中：σ=2 d_{s50}/d_{c50}，其中d_{s50}代表砂土和砾石分界线的颗粒粒径，取值2 mm，d_{c50}表示粉粒和黏粒分界线的颗粒粒径，取值0.004 mm。

将式(7)和(8)相加得p_c和d_s影响下混合土体冲刷黏性度D_c的表达式：

$$D_c = -p_c^{\,2} + 2p_c + \mathrm{e}^{-\frac{\left(d_s/d_{c50}-1\right)^2}{2\sigma^2}} \tag{9}$$

由式(9)计算的D_c取值可以大于1，根据定义，D_c取值范围为[0，1]，所以需要对式(9)进行优化，采用如下的表达式：

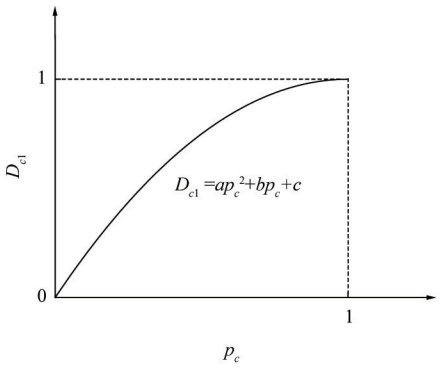


图9　冲刷黏性度与黏粒含量的关系

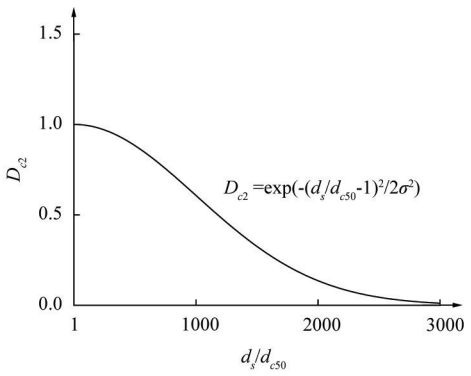


图10　冲刷黏性度与无黏性颗粒粒径的关系

$$D_c=\frac{-{p_c}^2+2p_c+A\mathrm{e}^{-\frac{\left(d_s/d_{c50}-1\right)^2}{2\sigma^2}}}{1+A\mathrm{e}^{-\frac{\left(d_s/d_{c50}-1\right)^2}{2\sigma^2}}} \tag{10}$$

式中系数A的取值根据混合土体冲刷试验数据确定。

4.2 参数标定 由冲刷黏性度的定义可知，不同种类混合土体，在临界黏粒含量范围内，D_c的取值范围应该相同，基于这一原则，经过不断的尝试，确定A=1/9，将A的取值带入公式(10)得冲刷黏性度的完整表达式：

$$D_c=\frac{-9{p_c}^2+18p_c+\mathrm{e}^{-\frac{\left(d_s/d_{c50}-1\right)^2}{2\sigma^2}}}{9+\mathrm{e}^{-\frac{\left(d_s/d_{c50}-1\right)^2}{2\sigma^2}}} \tag{11}$$

根据式(11)计算得到三种混合土体临界黏粒含量范围内对应的D_c范围分别为：0.189～0.199、0.174～0.185、0.170～0.181，计算结果表明，三种混合土体临界黏粒含量范围对应D_c的范围均在0.17～0.20之间，该计算结果符合D_c的定义，认为式(11)为混合土体冲刷黏性度的计算表达式。

为了验证公式(11)的准确性，采用Panagiotopoulos等[28]的试验数据计算冲刷黏性度D_c的取值范围，计算结果与试验结果对比。Panagiotopoulos等[28]对两种砂土–黏性土混合物P1、P2进行了冲刷特性试验研究。试验所用无黏性土是中值粒径为0.1525 mm和0.215 mm的均匀石英砂，黏性土为天然河口粉质黏土沉积物，黏性土的中值粒径为0.0032 mm，黏性土中黏粒含量为20%，试验结果显示当黏粒含量超过6%时，混合土体冲刷速率明显降低，由此可知Panagiotopoulos等[28]试验得到的临界黏粒含量小于6%。

表3 Panagiotopoulos等[28]测试混合土体的冲刷黏性度计算结果

P1(d_s=0.1525 mm)			P2(d_s=0.215 mm)		
p_m/%	p_c/%	D_c	p_m/%	p_c/%	D_c
5	1	0.118	5	1	0.118
10	2	0.136	10	2	0.136
20	4	0.171	20	4	0.170
25	5	0.188	25	5	0.187
30	6	0.205	30	6	0.204
40	8	0.238	40	8	0.238
50	10	0.271	50	10	0.271

应用式(11)计算Panagiotopoulos等[28]试验中不同黏性土含量情况下混合土体的冲刷黏性度D_c，计算结果如表3所示。由本文三种混合土体试验结果可知，临界黏粒含量范围对应的冲刷黏性度取值范围为0.17～0.20，该范围内对应的混合土体P1、P2的临界黏粒含量范围为4%～6%，该计算结果与Panagiotopoulos等[28]的试验结果相吻合，由此证明了本文提出的混合土体冲刷黏性度计算公式的准确性。

5 结论

本文针对三种重塑粗粒土–粉质黏土混合物，开展了不同粉质黏土含量情况下的冲刷特性试验，分析了三种混合土体的冲刷行为及冲刷速率、起动切应力的变化规律，主要得出以下结论：

(1)黏性颗粒含量小于50%的情况下，砂土–粉质黏土混合物和砾石–粉质黏土混合物的冲刷速率均随黏性颗粒含量的增大单调递减，在粉质黏土含量为25%、30%、35%时，三种混合土体G1、

G2、G3的冲刷速率显著降低。混合土体中粗粒土粒径越大，混合土体冲刷速率显著降低时的黏性颗粒含量越大。

(2)混合土体的起动切应力与粗粒土粒径大小有关，黏性颗粒含量一定的情况下，混合土体中粗粒土粒径越大起动切应力越大；粗粒土粒径不同，随黏性颗粒含量的变化，混合土体起动切应力的变化规律不同。随粉质黏土含量的增大，砂土-粉质黏土混合物的起动切应力呈单调递增的变化趋势；砾石-粉质黏土混合物的起动切应力随粉质黏土含量的增大先减小后增大。

(3)随黏性颗粒含量的增加，混合土体的冲刷特性由无黏性变为黏性，这一转变对应的黏性颗粒含量为临界黏性颗粒含量。通过分析试验结果，考虑冲刷速率和起动切应力的变化特点，得到三种混合土体G1、G2、G3的临界黏性颗粒含量范围分别是18.68%～20.75%、24.90%～26.98%、26.98%～29.05%。

(4)针对混合土体具有的无黏性冲刷行为和黏性冲刷行为，提出冲刷黏性度的概念，用以衡量混合土体具有黏性冲刷行为的程度，混合土体的黏性冲刷行为越明显，冲刷黏性度取值越大。考虑粗粒土颗粒粒径及黏粒含量的影响，给出冲刷黏性度的计算表达式，基于本文三种混合土体冲刷试验结果，确定了参数的取值，根据已有的其他试验数据验证了冲刷黏性度表达式的准确性。由三种粗粒土-粉质黏土混合物的试验数据得出，临界黏粒含量取值范围对应的冲刷黏性度的取值范围为0.17～0.20。

参 考 文 献：

[1] 蔡蓉蓉，张罗号，张红武．李保如泥沙起动流速公式修正研究[J]．水利学报，2019，50(5)：547-554．

[2] KOTHYARI U C，JAIN R K．Influence of cohesion on the incipient motion condition of sediment mixtures[J]．Water Resources Research，2008，44：W04410．

[3] 孙志林，谢鉴衡，段文忠，等．非均匀沙分级起动规律研究[J]．水利学报，1997(10)：25-32．

[4] 洪大林，缪国斌，邓东升，等．粘性原状土起动切应力与物理力学指标的关系[J]．水科学进展，2006，17(6)：774-779．

[5] GRABOWSKI R C，DROPPO I G，WHARTON G．Erodibility of cohesive sediment：The importance of sediment properties[J]．Earth-Science Reviews，2011，105(3/4)：101-120．

[6] 韩其为．泥沙运动统计理论前沿研究成果[J]．水利学报，2018，49(9)：1040-1054．

[7] WU W M，PERERA C，SMITH J，et al．Critical shear stress for erosion of sand and mud mixtures[J]．Journal of Hydraulic Research，2018，56(1)：96-110．

[8] 舒安平，朱福杨，王澍，等．溃坝泥石流起动过程及其动力学特征[J]．水利学报，2019，50(6)：661-669．

[9] 张红武．泥沙起动流速的统一公式[J]．水利学报，2012，43(12)：1387-1396．

[10] YE Z H，CHENG L，ZANG Z P．Experimental study of erosion threshold of reconstituted sediments[C]// Proceedings of the 30th International Conference on Ocean，Offshore and Arctic Engineering，2011．

[11] VAN LEDDEN M，VAN KESTEREN W G M，WINTERWERP J C．A conceptual framework for the erosion behaviour of sand-mud mixtures[J]．Continental Shelf Research，2004，24(1)：1-11．

[12] MITCHENER H，TORFS H．Erosion of mud/sand mixtures[J]．Coastal Engineering，1996，29(1/2)：1-25．

[13] ALVAREZ-HERNANDEZ E M．The influence of cohesion on sediment movement in channels of circular cross-section[D]．Newcastle：University of New Castle Upon Tyne，1990．

[14] HOUWING E J．Sediment dynamics in the pioneer zone in the land reclamation area of the Wadden Sea，Groningen，The Netherlands[D]．Utrecht：University of Utrecht，2000．

[15] BRIAUD J L，TING F C K，CHEN H C，et al．Erosion function apparatus for scour rate predictions[J]．Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2001，127(2)：105-113．

[16] SHAFII I．Relationship between erodibility and properties of soils[D]．Texas：Texas A&M University，2018．

[17] 王秋生，苏瑞林，高晓静．重塑黏性土及不同砂砾含量土体的起动试验研究[J]．水利学报，2018，49(8)：975-985．

[18] SMITH J, PERKEY D, PRIESTAS A. Erosion thresholds and rates for sand-mud mixtures[R]. US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, 2015.
[19] MCNEIL J, TAYLOR C, LICK W. Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(6): 316-324.
[20] 时连强, 李九发, 应铭, 等. 现代黄河三角洲潮滩原状沉积物冲刷试验[J]. 海洋工程, 2006, 24(1): 46-54.
[21] GAO X J, WANG Q S, MA G W. Experimental investigation on the erosion threshold and rate of gravel and silty clay mixtures[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(4): 867-875.
[22] 舒安平, 张欣, 段国胜, 等. 非均质泥石流起动判别关系式[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 757-764.
[23] VAN LEDDEN M. Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins[D]. Delft: Delft University of Technology, 2003.
[24] AHMAD M F, DONG P, MAMAT M, et al. The critical shear stresses for sand and mud mixture[J]. Applied Mathematical Sciences, 2011, 5(2): 53-71.
[25] TORFS H, JIANG J, MEHTA A J. Assessment of the erodibility of fine/coarse sediment mixtures[J]. Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes, 2000, 3: 109-123.
[26] BARRY K M. The effect of clay particles in pore water on the critical shear stress of sand[D]. Gainesville: University of Florida, 2003.
[27] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报, 1963(2): 1-12.
[28] PANAGIOTOPOULOS I, VOULGARIS G, COLLINS M B. The influence of clay on the threshold of movement of fine sandy beds[J]. Coastal Engineering, 1997, 32(1): 19-43.

Study on the erodibility of reconstituted cohesive and non-cohesive soil mixtures

GAO Xiaojing[1, 2], WANG Qiusheng[2], LI Yong[3], ZOU Fulin[3]

(1. *Bridge and Tunnel Research Center, Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing* 100088, *China*;
2. *College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*;
3. *China Railway 11 Bureau Group Co., LTD., Wuhan* 430061, *China*)

Abstract: The erodibility of cohesive and non-cohesive soil mixtures is different from that of cohesive soils and non-cohesive soils. In this paper, erosion tests were conducted to investigate the erodibility of three different non-cohesive soil and silty clay mixtures using an erosion function apparatus. The variations of mixtures' erosion rate and critical shear stress were analyzed according to the experimental data. The critical mud content of the three mixtures were obtained by analyzing the data of erosion rate and critical shear stress. Erosion experiments have clearly demonstrated that the erosion characteristics of mixtures can change dramatically when the mud content changes. Considering the variation of mixture erosion behavior, the concept of degree of cohesive erosion behavior were proposed for cohesive and non-cohesive soil mixtures, which can be used to estimate if the mixture exhibits cohesive erosion behavior. A formula was developed for the degree of cohesive erosion behavior for mixtures. The formula was expressed as a function of the grain size of non-cohesive coarse particles and cohesive soil, and clay content. The final form of the developed formula was tested using the experimental data from the present study and the literature.

Keywords: erosion; cohesive and non-cohesive soil mixture; critical shear stress; critical mud content; clay content; degree of cohesive erosion behavior

(责任编辑: 耿庆斋)