

引用格式:赵本海,吕擎峰,汪鹏飞,等.非均匀砂坡面沟蚀起动粒径[J].科学技术与工程,2018,18(1):103—108

Zhao Benhai, Lü Qingfeng, Wang Pengfei, et al. Particle size of incipient motion for non-uniform sediment in slope gully erosion[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(1): 103—108

水利工程

非均匀砂坡面沟蚀起动粒径

赵本海¹ 吕擎峰^{1*} 汪鹏飞² 徐震² 王生新³

(兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室¹,兰州 730000;中国石油西部管道公司²,
乌鲁木齐 830013;甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所³,兰州 730000)

摘要 在充分紊流区,推移质泥沙中滑动形式占很大比重,即便是滚动颗粒,通常也并不是起动后一直发生滚动,而是间或发生滑动,因此,有必要研究滑动形式下的泥沙起动机理。从泥沙起动概率出发,以床沙及侵蚀物颗粒组成为基础,确定泥沙起动粒径,根据水下泥沙的受力分析,建立非均匀砂滑动平衡方程,利用土槽试验资料确定公式系数,并采用野外实测资料进行验证,结果表明,对于粗颗粒泥沙起动,公式的计算值与实测值符合良好。

关键词 非均匀砂 沟蚀 起动概率 起动粒径 滑动平衡

中图法分类号 TV142.2; **文献标志码** A

泥沙起动是一种随机现象,必须通过概率论和力学相结合的方法,才能理解泥沙起动现象的物理本质^[1]。泥沙起动判别标准具有很大的任意性,窦国仁^[2]提出泥沙个别起动、少量起动和大量起动三种运动状态分别对应三种不同的起动概率;文献[3,4]认为少量起动时的起动概率可作为泥沙的起动标准;冷魁等^[5]以个别运动状态作为起动临界条件,提出以颗粒数计的起动判别标准。非均匀沙起动机理复杂,大多数研究是在均匀沙基础上,考虑泥沙在冲刷过程中粗细颗粒间的隐暴作用。在对非均匀砂受力分析中,唐存本^[6]针对细砂起动与理论的差异性,考虑了砂粒间的黏着力;秦荣昱^[7]认为泥沙起动受到粗化作用施加的阻力,提出了附加阻力的概念,并假定附加阻力与混合沙的抗剪力成比例;李荣等^[8]在秦荣昱提出的附加阻力的基础上,引入了相对暴露度的概念;杨具瑞等^[9]提出附加流速引起附加作用力的概念。泥沙颗粒受力失衡时发生滑动,但由于河床表面的粗糙不平,颗粒运动方式往往转换成滚动,滑动与滚动交替进行^[1];有研究^[10]表明,在充分紊流区的运动泥沙中,滚动模式占 59%,

滑动模式占 38%。在对非均匀砂受力分析基础上,前人多建立滚动平衡方程,因此有必要对滑动条件下的泥沙起动进行研究。

以洪积扇上油气管道细沟侵蚀灾害防治研究为目的,选取甘肃山丹地区典型洪积扇碎石土为试验材料,进行不同流量和不同坡度土槽冲刷试验,测量了侵蚀产砂粒径组成;基于泥沙运动力学建立滑动条件下非均匀砂起动粒径公式,并结合野外实测资料进行验证。

1 试验材料和方法

采用甘肃山丹典型洪积扇碎石土为试验材料,颗粒组成情况见表 1。试验装置为自行设计的土槽冲刷模型,模型长 2.5 m、宽 1 m,由供水槽、缓冲槽、冲刷槽、收集池及测量系统组成。试验流量选用 1.5 L/s、2.4 L/s、3.3 L/s,坡度选用 1°、3°、5°,共进行 9 组试验。在装填土之前,在冲刷槽底部铺设透水纱布,以保证试验土层透水情况接近天然坡面。将碎石土加水拌和均匀铺设到土槽内,塑造一定宽度和深度的矩形细沟,量测沟道几何特征,为保证试验的准确性,每次塑造的细沟形状及宽深应近似相同。用洒水器均匀洒水,洒水量控制在土壤表面饱和但没有产流的程度,静置 48 h 后进行放水冲刷试验。细沟径流稳定后,分别在坡面 0 m、0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m 处用便携式流速仪对径流流速进行测定,取平均值为径流平均流速。试验

2017 年 6 月 9 日收到 中国石油天然气股份有限公司西部管道

分公司科技开发项目(XG11-2015-001)资助
第一作者简介:赵本海(1994—),硕士研究生。研究方向:地质灾害。E-mail:zhaobh16@lzu.edu.cn。

*通信作者简介:吕擎峰(1971—),博士,副教授。研究方向:岩土工程及地质灾害。E-mail:lvqf@lzu.edu.cn。

表 1 试验土颗粒组成情况

Table 1 Particle composition of test soil

粒径/mm	占比/%	粒径/mm	占比/%
<0.075	10.32	5~10	14.25
0.075~0.25	9.09	10~20	13.75
0.25~0.5	8.22	20~40	9.44
0.5~1	5.31	40~60	9.76
1~2	3.51	>60	2.68
2~5	13.67		

结束后,取侵蚀物烘干后进行筛分并称重,各试验条件下的侵蚀物筛分结果见表 2。

2 非均匀砂起动粒径的确定

对于非均匀砂,在一定的水流强度下,不存在某一特定粒径,超过该粒径泥沙颗粒均不起动,小于该粒径泥沙颗粒均起动,因此细沟内泥沙起动具有随机性。假定在试验开始前,细沟内各粒径泥沙充分混合,对任意取自细沟内的泥沙,其级配均相同。将细沟内泥沙按粒径分为 n 组,对于第 i 组粒径泥沙,假设该组泥沙含量为 P_i 。

设细沟泥沙总质量为 G ,则对于第 i 组粒径泥沙,其质量为

$$G_i = P_i G \quad (1)$$

将泥沙颗粒作为球体考虑,则第 i 组泥沙的颗粒数 A_i 可表示为

$$A_i = \frac{G_i}{\pi} \gamma_s D_i^3 = \frac{6P_i G}{\pi \gamma_s D_i^3} \quad (2)$$

式(2)中, γ_s 为泥沙颗粒的容重, kN/m^3 ; D_i 为第 i 组泥沙粒径, m 。

泥沙颗粒总数 A 为

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = \frac{6G}{\pi \gamma_s} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i^3} \quad (3)$$

若以泥沙颗粒含量表示细沟泥沙级配,则泥沙级配可表示为

$$P(D_i) = \frac{A_i}{A} = \frac{\frac{P_i}{D_i^3}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i^3}} \quad (4)$$

Bagnold^[11]在研究泥沙起动标准中指出,泥沙床面可动层厚度可表示为

$$\alpha_c = 1.4D_c \quad (5)$$

式(5)中, D_c 为起动泥沙粒径, m 。

则单位面积细沟内可动层泥沙质量为

$$G = \gamma_0 \alpha_c = 1.4 \gamma_0 D_c \quad (6)$$

式(6)中, γ_0 为泥沙的干容重, kN/m^3 。

将式(6)代入式(3),得单位面积细沟内可动的泥沙颗粒总数 N 为

$$N = \frac{8.4 \gamma_0 D_c}{\pi \gamma_s} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i^3} \quad (7)$$

由式(4)知,粒径为 D_c 的泥沙颗粒数占泥沙颗粒总数的比值为

$$P(D_c) = \frac{\frac{P_c}{D_c^3}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i^3}} \quad (8)$$

因此,单位面积细沟内可动层 D_c 粒径级的颗粒数为

$$N_c = N P(D_c) = \frac{8.4 \gamma_0 P_c}{\pi \gamma_s D_c^2} \quad (9)$$

韩其为等^[12]对淤积物的干容重进行了相关研究,根据其研究结果,结合本次试验碎石土粒径级配,取碎石土干容重为 20.8 kN/m^3 , γ_s 取 26.5 kN/m^3 , 则式(9)可表示为

$$N_c = \frac{6.6 P_c}{\pi D_c^2} \quad (10)$$

式(10)中, P_c 为细沟泥沙中 D_c 粒径泥沙所占比重。

假定收集的侵蚀物为起动泥沙,设侵蚀物质量为 M ,对侵蚀物进行粒径分组,第 j 组粒径颗粒对应

表 2 侵蚀物颗粒组成情况
Table 2 Particle composition of erosion products

流量/ (L·s ⁻¹)	坡度/(°)	各粒径区间侵蚀物所占比重/%									
		<0.075	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2	2~5	5~10	10~20	20~40	40~60
1.5	1	22.51	20.51	8.67	10.36	7.65	22.64	6.12	1.53		
	3	23.38	18.75	10.19	8.45	3.76	14.63	12.97	7.56	0.22	
	5	16.82	17.33	9.11	8.45	5.36	17.59	15.90	8.92	0.34	
2.4	1	17.78	14.19	9.12	10.32	6.65	20.52	11.64	8.35	1.44	
	3	12.78	14.47	11.11	8.16	3.96	13.10	14.31	16.09	6.00	
	5	11.75	10.16	6.96	7.28	4.78	12.69	19.30	18.73	8.35	
3.3	1	11.55	14.64	10.31	11.45	6.44	24.73	13.08	5.93	1.86	
	3	9.95	21.64	5.95	5.58	2.61	12.80	16.41	20.52	7.94	
	5	10.43	11.97	9.93	4.18	2.35	17.79	18.78	17.20	6.11	1.27

的含量为 P'_j , 则 D_j 粒组起动质量为

$$M_j = P'_j M \quad (11)$$

将泥沙颗粒作为球体考虑, 坡面细沟长度及平均宽度的乘积作为细沟侵蚀面积, 定义为 S , 则单位面积内 D_j 粒组起动泥沙颗粒数为

$$N'_j = \frac{P'_j M}{\rho_s S \pi D_j^3 / 6} = \frac{6 P'_j M}{\pi S \rho_s D_j^3} \quad (12)$$

则 D_e 粒径泥沙的起动概率为

$$P(D_e) = N'_e / N_e = \frac{M P'_e}{1.1 \rho_s S P_e D_e} \quad (13)$$

式(13)中, M 为侵蚀物质量, kg; ρ_s 为泥沙颗粒密度, 取 $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; S 为细沟侵蚀面积, m^2 ; P'_e 侵蚀物中 D_e 粒径泥沙所占比重。

利用标准筛对细沟泥沙及侵蚀物进行筛分并分组, 采用等效粒径代表该粒组粒径。按照式(13)计算各粒组泥沙的起动概率, 利用插值法求解少量起动概率下的起动粒径。将收集到的侵蚀物烘干后, 称重并进行筛分试验, 得出侵蚀物特征粒径。各试验条件下计算得出的起动粒径和侵蚀物特征粒径见表 3。

比较各试验条件下的计算起动粒径与侵蚀物最大粒径 d_{\max} 的关系, 见图 1, 结果表明, 当起动粒径较小, 计算的起动粒径近似等于侵蚀物最大粒径, 表明起动泥沙基本被收集到侵蚀物中; 当起动粒径较大时, 计算的起动粒径则稍大于侵蚀物最大粒径, 原因是泥沙移动受阻而无法收集完全。所以选取少量

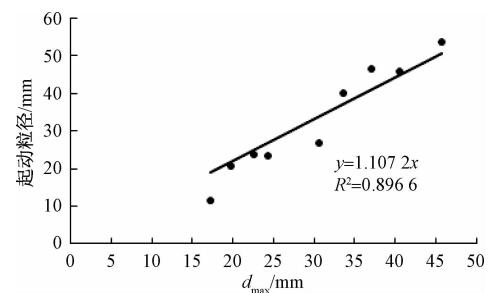


图 1 计算起动粒径与 d_{\max} 的比较

Fig. 1 Comparison between calculated particle size of incipient motion and d_{\max}

起动条件下计算的起动粒径作为各试验条件下的起动粒径。

对起动粒径和侵蚀物特征粒径进行相关分析, 探讨起动粒径和侵蚀物特征粒径之间的关系, 见表 4。

由表 4 可知, 泥沙起动粒径与侵蚀物 d_{80} 关系最为密切, 点绘起动粒径与 d_{80} 的散点图并进行回归分析, 见图 2。由图 2 可知, 起动粒径与 d_{80} 具有极为显著的线性关系, 可用线性函数 $d_{\text{起动}} = 3.6962 \times d_{80} (R^2 = 0.961)$ 表示。

3 非均匀砂起动粒径公式的建立

对水下泥沙颗粒进行受力分析, 见图 3。

泥沙颗粒在水下的质量为

表 3 各试验条件下计算起动粒径及侵蚀物特征粒径

Table 3 Calculated particle size of incipient motion and characteristic particle size of erosion products under different experimental conditions

流量/(L·s ⁻¹)	坡度/(°)	起动粒径/mm	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{50}/mm	d_{60}/mm	d_{80}/mm	d_{\max}/mm
1.5	1	11.55	0.03	0.14	0.45	0.90	3.37	17.21
	3	23.28	0.03	0.14	0.44	0.96	5.32	24.29
	5	26.79	0.05	0.21	0.90	2.36	6.65	30.60
2.4	1	20.82	0.04	0.23	0.93	2.28	5.61	19.70
	3	40.09	0.06	0.31	1.88	4.18	11.31	33.68
	5	46.62	0.06	0.58	4.14	6.65	13.78	37.07
3.3	1	23.82	0.07	0.34	1.32	2.68	5.34	22.55
	3	46.00	0.09	0.25	3.40	5.89	12.66	40.58
	5	53.56	0.07	0.44	3.88	6.07	13.79	45.71

表 4 起动粒径与侵蚀物特征粒径的相关系数矩阵

Table 4 Correlation matrix between particle size of incipient motion and characteristic particle size of erosion product

参数	起动粒径	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}	d_{80}	d_{\max}
起动粒径	1						
d_{10}	0.748	1					
d_{30}	0.732	0.516	1				
d_{50}	0.933	0.741	0.835	1			
d_{60}	0.947	0.789	0.825	0.986	1		
d_{80}	0.985	0.714	0.753	0.949	0.968	1	
d_{\max}	0.935	0.760	0.829	0.935	0.932	0.905	1

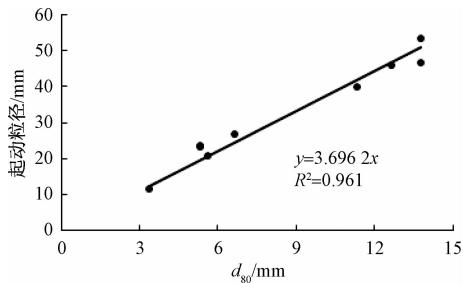
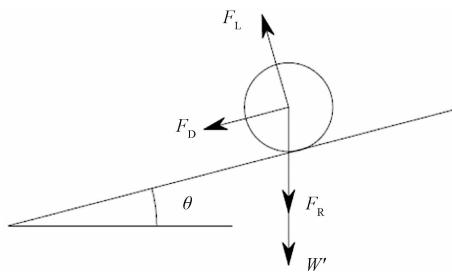
图 2 起动粒径与 d_{80} 之间的关系Fig. 2 The relation between particle size of incipient motion and d_{80} 

图 3 泥沙颗粒水下受力

Fig. 3 Force of sediment grain in water

$$W' = \frac{\pi}{6}(\gamma_s - \gamma)D^3 \quad (14)$$

拖曳力:

$$F_D = C_D \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho v^2}{2} \quad (15)$$

上举力:

$$F_L = C_L \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho v^2}{2} \quad (16)$$

式(16)中, C_D 为阻力系数; C_L 为上举力系数, C_D 、 C_L 与细沟砂粒周围的绕流流态有关; D 为起动粒径, m; v 为作用于砂粒上的底流速。

秦荣昱^[7]指出泥沙颗粒还受到附加阻力, 并假定附加阻力 F_R 与混合沙的平均抗剪力 τ_c 成比例, 所以附加阻力 F_R 表示为

$$F_R = \varphi_R \tau_c \alpha D^2 \quad (17)$$

式(17)中, φ_R 为比例系数; α 为颗粒面积系数; φ_R 、 α 与细沟颗粒组成有关。

由滑动条件下的临界起动条件^[1], 建立滑动平衡方程:

$$\frac{F_D + (F_R + W') \sin \theta}{(F_R + W') \cos \theta - F_L} = f \quad (18)$$

式(18)中, θ 为细沟坡度, ($^\circ$); f 为摩擦系数, $f = \tan \varphi$, φ 为泥沙在水下的休止角, 其大小与泥沙粒径及干容重有关。

将式(14)~式(17)代入式(18), 得:

$$\frac{\pi}{6}(\gamma_s - \gamma)D^3 + \varphi_R \tau_c \alpha (\sin \theta - f \cos \theta) =$$

$$\frac{\pi}{6}(\gamma_s - \gamma)(f \cos \theta - \sin \theta)D \quad (19)$$

将式(19)化简, 得:

$$D = \frac{3}{4} \frac{(C_D + fC_L)\rho}{\gamma_s - \gamma} \frac{1}{f \cos \theta - \sin \theta} v^2 - \frac{6\varphi_R \alpha}{\pi(\gamma_s - \gamma)} \tau_c \quad (20)$$

混合沙的平均抗剪力 τ_c ^[7] 可写成:

$$\tau_c = K_m m (\gamma_s - \gamma) D_m \quad (21)$$

式(21)中, D_m 为床沙的平均粒径, 可用 d_{50} 代替, m; K_m 为无因次系数; m 为紧密系数, 与不均匀度有关。

因此式(20)可写为

$$D = \frac{3}{4} \frac{(C_D + fC_L)\rho}{\gamma_s - \gamma} \frac{1}{f \cos \theta - \sin \theta} v^2 - \frac{6\varphi_R K_m D_m m \alpha}{\pi} \quad (22)$$

用水的密度近似代替径流密度, γ_s 取 26.5 kN/m³, γ 为水的重度, 式(22)可化简为

$$D = \frac{C_D + fC_L}{22} \frac{1}{f \cos \theta - \sin \theta} v^2 - \frac{6\varphi_R K_m D_m m \alpha}{\pi} \quad (23)$$

4 起动粒径公式系数的确定

在野外实际应用中, 河沟道坡度一般较小, 如西北干旱区洪积扇细沟侵蚀坡度基本处于 0°~5° 之间, 故式(23)可化简为

$$D = k \frac{1}{\cos \theta - \sin \theta} v^2 - b m D_m \quad (24)$$

式(24)表明, 泥沙起动粒径可表示为坡度和径流流速的函数, 系数 k 、 b 为常数, 主要与泥沙组成有关。点绘各试验条件下泥沙起动粒径与 $v^2 / (\cos \theta - \sin \theta)$ 的关系并进行线性回归, 见图 4, 得出泥沙起动粒径经验公式:

$$D = 0.0195 \frac{1}{\cos \theta - \sin \theta} v^2 - 0.0092, \\ R^2 = 0.8715 \quad (25)$$

结合试验土样特性, 取 $k = 0.0195$, $b = 2.54$ 。

由泥沙起动粒径经验公式可知, 当坡度为 0 时, 泥沙临界起动流速为 0.687 m/s。结合秦荣昱^[7]对不均匀沙起动规律的研究, 泥沙起动流速与床沙级配有关, 如宜昌床沙较细, 临界起动流速为 0.46 m/s, 而姜射坝床沙较粗, 临界起动流速为 1.05 m/s。

5 公式验证及讨论

利用寸滩、宜昌及万县水文站^[13,14]的实测资料, 对非均匀沙起动粒径式(24)进行验证, 见图 5。

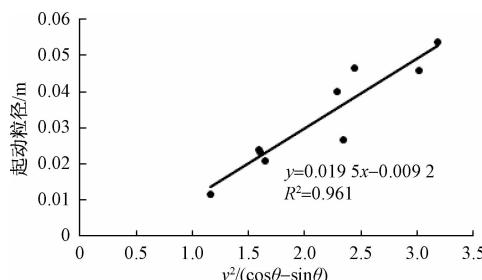


图4 起动粒径与 $v^2 / (\cos\theta - \sin\theta)$ 的关系
Fig. 4 The relation between particle size of incipient motion and $v^2 / (\cos\theta - \sin\theta)$

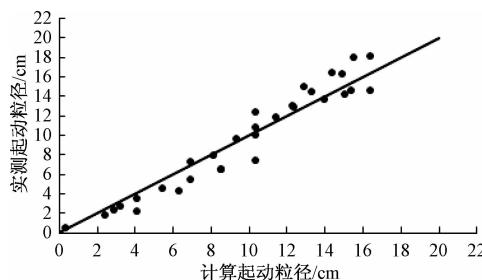


图5 计算起动粒径与实测值对比
Fig. 5 Comparison between calculated and measured for particle size of incipient motion

可知,式(24)得出的起动粒径与三家水文站的实测值相符较好,说明公式的推导过程中,文中的假设及系数的确定是合理的。由式(24)可知,泥沙起动粒径随流速增大而增大,这与文献[3,6,15]对细颗粒泥沙的研究成果有出入,但在流速大于0.687 m/s时,起动粒径与流速的关系与他们的结果基本一致。因此,本文推导的滑动模式下的起动粒径公式更适合于粗颗粒泥沙,细颗粒泥沙的运移方式复杂,不宜采用滑动模式考虑,故不适用于本公式。

6 结论

从泥沙起动概率出发,分析床沙及侵蚀产砂粒径组成,确定起动粒径,根据水下泥沙的受力分析,建立非均匀砂滑动平衡方程,利用土槽试验资料确定非均匀砂起动粒径公式系数,并采用野外实测资料进行了验证,得出如下结论。

(1)在室内冲刷试验数据处理过程中,少量起动标准下计算的泥沙起动粒径可作为试验条件下的起动粒径,并且起动粒径与侵蚀物特征粒径 d_{80} 相关性显著,可用线性函数表示。

(2)对水下泥沙进行受力分析,建立了滑动条件下非均匀砂起动粒径公式。

(3)用水文实测资料验证了起动粒径公式,表明该式适用于粗颗粒泥沙的起动判别,可应用在洪积扇上油气管道细沟侵蚀灾害防治中。

参 考 文 献

- 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学.北京:科学出版社,2003:123—128
Qian Ning, Wan Zhaohui. Mechanics of sediment transport. Beijing: Science Press, 2003: 123—128
- 窦国仁.泥沙运动理论.南京:南京水利科学研究所,1963
Dou Guoren. Sediment transport theory. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1963
- 窦国仁.再论泥沙起流动速.泥沙研究,1999;(6):1—9
Dou Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment. Journal of Sediment Research, 1999; (6): 1—9
- 张小峰,谢葆玲.泥沙起动概率与起流动速.水利学报,1995;(10):53—59
Zhang Xiaofeng, Xie Baoling. Incipient motion probability and incipient velocity of sediment. Journal of Hydraulic Engineering, 1995; (10): 53—59
- 冷魁,王明甫.泥沙起动判别标准的研究.人民黄河,1994;(7):1—4
Leng Kui, Wang Mingfu. Study on criterion of sediment incipient motion. Yellow River, 1994; (7): 1—4
- 唐存本.泥沙起动规律.水利学报,1963;(2):1—12
Tang Cunben. Laws of sediment incipient motion. Journal of Hydraulic Engineering, 1963; (2): 1—12
- 秦荣昱.不均匀沙的起动规律.泥沙研究,1980;(复刊号):83—91
Qin Rongyu. Starting laws of non-uniform sediment. Journal of Sediment Research, 1980; (Resume Publication): 83—91
- 李荣,李义天,王迎春.非均匀沙起动规律研究.泥沙研究,1999;(1):27—32
Li Rong, Li Yitian, Wang Yingchun. Study on laws of threshold motion for non-uniform sediment. Journal of Sediment Research, 1999; (1): 27—32
- 杨具瑞,方铎,何文社,等.非均匀沙起动规律研究.水利学报,2002;(10):82—86
Yang Jurui, Fang Duo, He Wenshe, et al. Study on laws of incipient motion for non-uniform sediment. Journal of Hydraulic Engineering, 2002; (10): 82—86
- 王兴奎,邵学军,李丹勋.河流动力学基础.北京:水利水电出版社,2002:209—210
Wang Xingkui, Shao Xuejun, Li Danxun. Foundamental river mechanics. Beijing: China Water & Power Press, 2002: 209—210
- Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics. U S Geological Survey Profession Paper, 1966; 422 (1): 231—291
- 韩其为,王玉成,向熙珑.淤积物的初期干容重.泥沙研究,1981;(1):1—13
Han Qiwei, Wang Yucheng, Xiang Xilong. Initial specific weight of deposits. Journal of Sediment Research, 1981; (1): 1—13
- 彭润泽,吕秀贞.长江寸滩卵石推移质输沙规律.水利学报,1990;(1):38—43
Peng Runze, Lü Xiuzhen. Sediment transport law of pebble bed load at Chang Tan Station of Yangtze River. Journal of Hydraulic Engineering, 1990; (1): 38—43
- 韩其为,何明民,王崇浩.卵石起动流速研究.长江科学院院

报, 1996; 13(2): 17—22

Han Qiwei, He Mingmin, Wang Chonghao. Studies on incipient velocity of pebbles. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1996; 13(2): 17—22

15 韩其为. 泥沙起动规律及起动流速. 泥沙研究, 1982; (2): 11—26

Han Qiwei. Characteristics of incipient sediment motion and incipient velocity. Journal of Sediment Research, 1982; (2): 11—26

Particle Size of Incipient Motion for Non-uniform Sediment in Slope Gully Erosion

ZHAO Ben-hai¹, LÜ Qing-feng^{1*}, WANG Peng-fei², XU Zhen², WANG Sheng-xin³

(Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment Mechanics, Lanzhou University¹,

Lanzhou 730000, China; Petro China West Pipeline Company², Urumqi 830000, China;

Geological Hazards Research and Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences³, Lanzhou 730000, China)

[Abstract] In the sufficient turbulent region, the sliding mode of bed load sediment accounts for a large proportion, and the rolling particle are not rolling usually before ceasing, it also slides in some case. Therefore, it is necessary to research the initiation mechanism of sliding sediment. The particle size of incipient motion is determined base on incipient probability and particle composition, and establishes sliding equilibrium equation of non-uniform sediment according to force analysis, and defines coefficient of incipient formula based on soil-bin tests. The results reveal that the calculated values of the formulas are in good agreement with the measured values for the coarser sediment initiation.

[Key words] non-uniform sediment gully erosion incipient probability particle size of incipient motion sliding equilibrium