

黏性土起动研究现状综述

洪大林¹ 繆国斌² 邓东升² 谢 瑞¹ 张思和¹

(1. 南京水利科学研究院 江苏 南京 210029 ; 2. 江苏省水利厅 江苏 南京 210029)

摘要 综述国内外学者在泥沙起动(包括散体沙的起动和新淤土的起动)研究和黏性土的起动模式、影响因素等方面的研究成果,指出各研究者、研究思路、研究成果的差别,以及现有研究成果所存在的问题;由于黏性土本身的复杂性,加之各研究者考虑的参数不尽相同,现已建立的黏性土起动模式差别较大,影响黏性土起动的因素主要有土的物理因素、土力学参数、化学特性等。认为今后的研究重点应放在黏性原状土上,在此基础上再进行重塑土试验,以探求各影响因素等起动切应力之间的关系,进而分析黏性土起动机理及其影响因素,确定黏性土起动的物理模式,并选择足够的土样,通过大量的水槽试验,积累资料,从中分析综合内在规律。

关键词 黏性土 原状土 起动流速 抗剪强度 塑性指数

中图分类号 :TV142+ .1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2005)06-0102-05

Summarization of cohesive soil initiation / HONG Da-lin, MIAO Guo-bin, DENG Dong-sheng, XIE Rui, ZHANG Si-he (1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China ; 2. Jiangsu Water Conservancy Department, Nanjing 210029, China)

Abstract : A summary was made of the advances in research at home and aboard on sediment initiation (including the loose sediment and newly sedimentary soil), the initiation model, and some affecting factors. The thoughts of and results from different research works in this area were compared, and some problems existing were listed. Owing to the complexity of cohesive soil and the different parameters adopted in different research works, the initiation models of cohesive soil, which have been developed in former research works, are of great differences. The factors affecting the initiation of cohesive soil mainly lie in the physical factors, geomechanical parameters, and chemical characteristics. It is considered that, in the further study, the emphasis should be placed on the undisturbed cohesive soil, and that manipulated soil tests should be performed to find the relationship between each affecting factor and the shear stress of initiation, to analyze the mechanism of cohesive soil initiation and its affecting factors, and further to determine the physical model. Thus, the inherent law can be found by information accumulation of enough soil samples from great amount of flume tests.

Key words : cohesive soil ; undisturbed cohesive soil ; threshold velocity ; shear strength ; plasticity index

在水利、交通工程中,经常涉及黏性土的抗冲性能等问题。例如在新开挖河道的规划中,设计何种形式的行洪断面及其断面尺寸,对河道安全宣泄洪水及使河道在行洪过程中保持稳定都是很重要的;在泄水建筑物的下游过渡段,同样存在河道边界的抗冲刷问题,如设计、施工不当,则有可能使下游河道冲刷剧烈,影响泄水建筑物的稳定,并最终导致破坏。黏性土的抗冲性能可用临界起动条件来表示,一般取起动切应力或起动流速。对黏性土临界起动条件的研究,国内外很多学者做过许多有益的工作,但由于问题的复杂性,各研究者的成果很难达成统一,因此,为更好地研究黏性土的临界起动特性,有必要

对国内外学者的研究成果分别进行分析和总结,明确其研究成果的合理性及其发展方向,为进一步研究黏性土的起动和冲刷奠定基础。

1 模式的建立

1816 年, Du Buat 发表了被认为是预报冲刷过程的第一部论著——《水力学原理》。到了 20 世纪 50 ~ 60 年代,我国学者在黏性泥沙起动方面的研究达到了巅峰状态,沙玉清^[1]、窦国仁^[2]、唐存本^[3]、张瑞瑾^[4]等根据力的平衡原理,建立了泥沙起动流速公式,这些公式有着共同的特点,即考虑了泥沙颗粒的重力和颗粒间黏结力因素的影响,尽管各研究者的

具体研究手段不同,对泥沙起动物理本质的理解也存在分歧,但各家公式对以后的研究工作及其工程实践都作出了重要贡献。

他们的研究成果由于考虑了颗粒间的黏结力,使得其成果对黏性泥沙也适用,而黏性泥沙即是黏性土中的新淤土,尽管与固结黏性土的起动特性有着较大的差别,但这毕竟可以提供一种可供借鉴的研究方法和途径,为以后的研究奠定了基础。

与此同时,黏性土的起动和冲刷问题正为国内外学者所重视,并开展了一系列的研究,取得了一定的成果。

Sundborg^[5]提出阻止颗粒掀动的凝聚力与标准土壤试验中测定的泥沙抗剪强度成比例,其作用方向与流体力相反,得到水平床面上黏性泥沙临界起切应力的关系:

$$\tau_c = \frac{c_1 a_1}{c_2 a_2} (\rho_s - \rho) d_s \tan \theta + c_3 s_v \quad (1)$$

式中: s_v 为泥沙的抗剪强度,与泥沙临界起切应力 τ_c 单位相同; c_3 为常数; θ 为泥沙水下休止角; c_1 为颗粒体积系数, $c_1 = \frac{V}{d_s^3}$; c_2 为系数; $\frac{c_1 a_1}{c_2 a_2}$ 为临界起切拖曳力系数。

Sundborg首次提出了颗粒间静摩擦力和抗剪强度对泥沙起动的的影响,开创了黏性土起切研究的新思路。

Dunn^[6]在关于黏性土渠道抗冲刷强度的论著中提出了“冲刷时黏性土的抗冲刷能力与内聚力相关”的观点。他曾在科罗拉多、内布拉斯加、怀俄明州的黏性土渠道中测定了从沙到黏性土的 τ_c 值,并建立了起切应力与抗剪强度、塑性指数 I_p 之间的关系。当塑性指数在5~16之间时,得到

$$\tau_c = 0.001(s_v + 180) \tan(30 + 1.73 I_p) \quad (2)$$

需要说明的是,起切应力 τ_c 和抗剪强度 s_v 的单位为 bf/ft^2 ($1 \text{ bf/ft}^2 = 47.8803 \text{ Pa}$), $\tan$ 中的数值以度计。Dunn在这里考虑了两种因素的影响。

Smerdon等^[7]曾测定密苏里11种黏性土的 τ_c 值,建立了临界起切应力与塑性指数、黏性土百分含量与泥沙的一些统计参数的关系。在明渠水槽中进行试验,得出了 τ_c 值与塑性指数 I_p 以及分散度 D_r 的关系:

$$\tau_c = 0.163 (I_p)^{0.84} \quad (3)$$

$$\tau_c = 1.04 (D_r)^{-0.63} \quad (4)$$

根据他们的关系式,当土壤的塑性指数为8或分散比率为40时,临界起切应力为0.93 Pa。

俄罗斯的 Мирцхулава^[8]在总结前人研究成果的基础上,根据力作用的独立性原理得出黏性土宽

浅紊流底部冲刷流速(相当于起流速)公式:

$$V_H = \left(\lg \frac{8.8H}{D} \right) \sqrt{\frac{2m}{2.6\rho n} [(\rho_s - \rho)gd + 1.25 C_y^H K]} \quad (5)$$

式中: H 为水深 m ; d 为黏性土团直径(黏性土剥离开来的节理块),缺乏资料时可取0.004 m; m 为系数,对Ⅰ级建筑物取1.3,对Ⅱ级建筑物取1.4,对Ⅲ级建筑物取1.6; n 为考虑水流近底脉动影响的系数,一般可令 $n=4$ 或用公式 $n=1+\left(0.3+\frac{\nu^2}{gD^3}\right)^{1/3}$ 计算, ν 为水的动力黏滞系数; ρ_s 为黏性土密度, kg/m^3 ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; C_y^H 为黏性土的抗疲劳强度,与土的凝聚力 C_0 有关, $C_y^H=0.035 C_0$,Pa; K 为考虑内聚力值偏离标准值概率的安全系数, $K=1-\frac{\alpha\sigma_0}{c}$, σ_0 为凝聚力 c 的均方差, α 为系数(Ⅰ级建筑物取2.65,Ⅱ级建筑物取2.5,Ⅲ级建筑物取2.0)。

Briaud等^[9,10]在进行土壤冲刷试验前,使用了一种简称为EFA的装置,试验中将所取的土样(松散的或黏性原状土)装在矩形管道下方的圆柱形筒中,表层高出水槽表面1 mm,测量这1 mm土层被冲刷的历时即可得到冲刷率。(但从笔者的试验观察来看,要想使1 mm厚的泥沙被均匀冲刷,几乎是不可能的。)他们的试验并没有得出土壤冲刷率与原状土土力学因子(土壤性质参数)之间的关系,而只是建立了桥墩冲刷率与时间的关系,这似乎不能用来解决类似的问题,但其方法是可以借鉴的,特别是试验方法。

曹叔尤^[11]采用黄河花园口、苏北夸套河口、海河口淤泥,在环形水槽中进行冲刷试验,试验包括两种不同孔隙率的新淤黏性土,共12组。其中一种用搅拌机将黏性土配制成孔隙率为0.739,对应干密度为0.70 g/cm³的土样;另一种用自然淤积法,经两个多月的沉积,制成干密度为0.556 g/cm³的土样。分别测量两种黏性土的抗剪强度(用锥角60°、质量60 g的落锥)。试验结果将其冲刷率表示为

$$E = K \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \quad (6)$$

$$R = \frac{ds}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{E_0}{\rho_s h} \right) = \frac{E}{\rho_s h} = \frac{K}{\rho_s h} \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \quad (7)$$

式中: E 为冲刷率; τ 为床面切应力; s 为体积比含沙量; R 为单位时间内水体中泥沙含量体积比的变化率 h^{-1} ; ρ_s 为泥沙密度, kg/m^3 ; E_0 为单位床面水体含沙量, kg/m^2 ; K 为一复杂参数, $K=-13.9-133e_r$, e_r 为自由孔隙比。

徐伦^[12]在研究水库溯源冲刷时,根据黏性土的固结密实程度,将土大致分为3个区域:①新淤黏性土($\rho_d < 700 \text{ kg/m}^3$);②低固结密实黏性土($\rho_d = 700 \sim 850 \text{ kg/m}^3$);③高固结密实黏性土($\rho_d > 850 \text{ kg/m}^3$).他认为黏性土的固结密实程度是影响黏性土起动特征和抗冲刷能力的主要因素,并由此得出花园口黏性土的临界起动切应力公式为

$$\tau_c = 0.291\rho_d^{3.81} \tag{8}$$

式中: ρ_d 为淤积物干密度, g/cm^3 .试验中干密度的变化范围为 $0.646 \sim 0.979 \text{ g/cm}^3$.

华景生等^[13]的研究主要是针对新淤黏性土,在经过用花园口淤泥进行试验后得出黏性土的起动切应力可与其宾汉切应力建立关系的结论,即

$$\frac{\tau_{cl}}{\alpha(p_0)} = \tau_B \tag{9}$$

式中: τ_{cl} 为黏性土起动时水流拖曳力; $\alpha(p_0)$ 为某一水流条件下其作用在床面上的拖曳力在概率为 p_0 情况下的对应值与时均拖曳力的比值; τ_B 为黏性土的宾汉切应力.他根据有关资料确定了系数 $\alpha(p_0) = 1.72$,相应的 $p_0 = 18\%$,即当水流作用在床面上的拖曳力有 18% 的可能性超过黏性土的 τ_B 值时,黏性土床面将被破坏,达到黏性土的起动条件.

黄岁梁等^[14]利用黏性土边坡滑动破坏和河流中黏性土起动冲刷的相似性,建立了黏性土的起动模式,起动切应力 τ_c 与抗剪强度 τ_f 之间的关系可以用下式表示:

$$\frac{\tau_c + \rho_s g j l}{\tau_f} = C \tag{10}$$

式中: ρ_s 为黏性土的密度; g 为重力加速度; j 为河道纵坡; l 为起动土体的弧长; C 为常数.他认为黏性土的起动不仅与土体的抗剪强度有关,而且还与土体受到的有效重力有关.且指出,对应于不同的固

结程度,土体重力作用的相对重要性是不同的,不可忽略.但该模式并没有得到试验资料的验证,以后也未见有相关论文发表.

另外,我国学者李华国^[15]、杨美卿^[16]、张玮^[17]、韩其为^[18,19]、呼和敖德^[20]、夏军强^[21]、张兰丁^[22,23]等也相继不同程度地研究过黏性土的起动问题,这里不再详述.

国内学者虽在这方面也进行了大量的研究,但纵观其成果不难发现,各研究者大都采用重塑土进行试验,采用原状土进行试验的很少,因此不可避免地会对试验成果的实用性产生影响.

迄今,在黏性土起动模式研究方面尚未有统一的意见,每一位学者都有自己的试验结果,而由于黏性土本身的复杂性,使得试验结果不具有完全的代表性,往往都是只考虑了其中某些局部的影响因素,由此建立计算公式,很难完全反映各种黏性土的真实水力特性.表1列出了部分学者的研究成果,可见各家公式所考虑的参数不尽相同,因而模式也有较大差别.

2 黏性土起动的影响因素

对散体沙来说,重力的作用是最主要的,对黏性泥沙来说,颗粒间的黏结力不可忽略.这已是泥沙研究领域众多学者的共识.对黏性土的起动来说,各学者的观点则不尽相同,他们根据自己的研究资料,提出了各自的观点.

Sundborg^[5]认为,黏性土的起动主要取决于颗粒的重力及土体的抗剪强度(内聚力和水下休止角).Dunn^[6]则指出,土的塑性指数与抗剪强度是影响黏性土起动的主要因素.Smerdon等^[7]对抗动土进行了研究,并对其塑性指数、黏性百分比及泥沙的一些统计参数进行分析,认为黏性土的起动切应力与土的

表1 起动临界条件公式比较

研究者	公式形式	影响因素	适用范围
沙玉清	$U_c = R^{\frac{1}{5}} \left(1.1 \left(\frac{0.7 - \epsilon}{d} \right)^{\frac{1}{5}} + 0.43 d^{\frac{3}{4}} \right)^{\frac{1}{2}}$	粒径 d 、孔隙率 ϵ	
窦国仁	$U_c = m \ln 11 \frac{h}{\Delta} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d + 0.19 \frac{g h \delta + \epsilon k}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$	粒径 d 、水深 h 、薄膜水 δ	新淤黏性土或淤泥及散体沙
唐存本	$U_c = \frac{m}{m+1} \left(\frac{H}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \left(3.2 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d + \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{10} \frac{C}{\rho d} \right)^{\frac{1}{2}}$	粒径 d 、湿密度 σ	
张瑞瑾	$U_c = \left(\frac{H}{d} \right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + h}{d^{0.72}} \right)^{\frac{1}{2}}$	粒径 d 、水深 h	
Sundborg	$\tau_c = \frac{c_1 a_1}{c_2 a_2} (\rho_s - \rho) d_s \tan \theta + c_3 s_v$	静摩擦力、抗剪强度	黏性土
Dunn	$\tau_c = 0.001 (s_v + 180) \tan (30 + 1.73 I_p)$	抗剪强度、塑性指数	$I_p = 5 \sim 16$
Smerdon 等	$\tau_c = 0.017 I_p^{0.84}, \tau_c = 1.04 D_r^{-0.63}$	塑性指数、分散度等	黏性土
Мирицхулава	$V_H = \left(\lg \frac{8.8 H}{D} \right) \sqrt{\frac{2m}{2.6 \rho n} [(\rho_s - \rho) g d + 1.25 C_y^H K]}$	团粒直径、凝聚力	黏性土

塑性指数和分散度有关。Partheniades^[24~26]则提出了一个新的观点,他认为对中等强度和高强度黏性土而言,其起动切应力随抗剪强度的增加而增大,而对低强度黏性土来说,并没有揭示出应力与侵蚀性之间有明确的关系,除此之外还应考虑表面湿度、密度、潜在膨胀和颗粒定位等因素。

Kamphuis^[27]根据其研究成果指出:①固结黏性土抗冲刷能力随黏性物质强度的增加而增加;②高固结黏性土使其床面团粒之间的黏结力较其单颗粒的黏结力小;③起动切应力随塑性指数的增大而增大;④起动切应力随黏性土含量的增加而增大;⑤起动切应力随黏性土固结压力的增大而增大,且当固结压力超过 200 kPa 时,起动切应力陡然增加,黏性土在通常的自然条件下将不会被冲刷;⑥一旦达到黏性土的起动切应力值,冲刷就会迅即发生,而与水流过程(历史)几乎无任何联系;⑦一旦初始黏性土表面发生变化,由于黏性土表面水力糙度的增加,冲刷过程将加快。这里 Kamphuis 实际上总结了影响固结黏性土抗冲性能的因素,包括黏性土的强度、塑性指数、黏性土含量、固结压力。另外,由于冲刷产生的床面水力糙度也是影响进一步冲刷的因素,但不是内部影响因素,而是外部影响因素。

Grissinger 等^[28]提出,黏性土的抗冲刷能力是与其保持湿润状态的时间成正比的。当黏性土首次被湿润时,自由水使颗粒间的黏结力解除,但当自由水被吸收,黏性土矿物水化,这时黏结力又增强。因为水化作用是一个缓慢的过程,这样黏性土便能够在它还未达到充分强度以前的某个时间被冲刷。在他们的试验中,直至试验材料维持湿润状态接近 8 h,冲刷速率还没有减小到它们的最后值。

Martin^[29]强调黏性土的含水量、含盐量和离子交换等对黏性土强度的重要性。他指出,仅仅从黏性土中把盐洗掉,黏性土的强度就可以减小,但减小的幅度并不大,仅为原含盐度时强度的 1/100 ~ 1/1000。他同时指出,对两种不同的黏性土,如伊利土和蒙脱土的同样处理,对强度具有完全不同的影响。Altschaeff^[30]也认为,黏性土的可冲刷性可以因加入分散剂而降低,因而再次说明化学环境对黏性土性能的重要影响。

因此,黏性土起动的影响因素非常复杂,且各学者的观点相差甚远,但综合可见,黏性土的起动所涉及的影响因素可概括为物理指标(如塑性指数、含水量、密度、黏性土百分数、颗粒级配等)、土力学指标(凝聚力或抗剪强度等)、化学特性(含盐量、pH 值等),而化学性能是通过影响黏性土结构和强度来实现对黏性土起动的影响的。

3 存在的问题

综观目前黏性土起动研究成果,可见尚存在诸多问题:

a. 所采用的土样性质存在差别,导致研究成果的结论不一致。由于各学者在研究过程中,受各种条件或其他因素的限制,所采用的土样千差万别,很少一部分学者采用的是原状土,而大都采用重塑土,两者的土力学性质可能相差甚远,因此研究成果自然也就没有可比性。

b. 采用的模式不一样,涉及的影响因素也就不同。根据不同公式计算的结果无法比较,如 Dunn^[6](其公式只适用于塑性指数为 5~16 的情况)的成果与 Smerdon 等^[7]的成果之间就反映了这一差别。大部分公式是基于力的平衡原理,物理概念较为明确,也有根据实验结果得到的经验公式,本身没有明显的物理内涵。

c. 所采用的指标有抗剪强度、含水量、塑性指数、分散度、黏性土含量等,但各指标的影响程度如何,目前尚无定论。

d. 从已有的试验结果^[31]来看,土质成因、形成历史是影响黏性土起动的重要因素,但由于该因素很难定量描述,因此,在目前的研究手段中无法考虑该因素的影响。

e. 温度、pH 值、矿物成分等对起动的影响肯定存在,但却无法定量描述,仍需进行大量的试验研究工作,才能确定其影响程度。

f. 由于黏性土的起动是以微团起动为特征,其起动的判别标准问题则对试验成果的影响很大,确定一个较为客观的标准非常重要,也非常困难。

g. 采用重塑土进行试验,虽然可得出较有规律的成果,但由于与原状土的结果相差甚远,在实际应用中无法与工程实际发生关系,不能很好地解决工程实践中遇到的实际问题,必须进行原状土起动试验,确定客观的起动临界指标,才能解决黏性土的冲刷问题。

4 结 语

a. 不同研究者建立了起动切应力与不同指标(塑性指数、抗剪强度、分散度等)之间的关系,但由于研究者所采用的土样各不相同,试验方法和起动判别标准有差别,因此计算所得的数值差别很大,有的甚至相差几百倍。

b. 研究者大多采用重塑土进行试验,采用黏性原状土研究的甚少。但从土力学的角度来看,两者之间的性质存在很大的差别,原状土所具有的性质,重

塑土是无法复制的,这势必带来两者冲刷特性(起动和冲刷)有较大的差别。

c. 在土样的选取上还不能满足要求,有的研究者往往只有很少的土样,不可避免地出现片面的观点,也影响对试验成果的正确分析和取舍,从而导致研究成果千差万别。

d. 由于黏性土形成的年代不同、成因不同,都可能对其结构产生影响,使得黏性土具有不同的抗剪强度;另外,黏性土中往往夹有各种各样的夹层或砂礓,从而使其呈现各向异性,试图将各种土体的起动用统一的公式来概括是非常困难的,这一点可用已有的试验结果来证明^[31],从3条河流所取的土样起动情况来看,其起动切应力与抗剪强度之间的关系基本趋势是一致的,但当点绘在同一张图上时,却又毫无规律可循。

e. 在今后的研究中,应根据实际情况,将研究重点放在黏性原状土上,在此基础上,再进行重塑土试验,以探求各影响因素与起动切应力之间的关系,并进而分析黏性土起动机理及其影响因素,确定黏性土起动的物理模式,并选择足够多的土样(必须具有一定的代表性),通过大量的水槽试验,逐步积累资料,从中分析综合其内在的规律。

参考文献:

[1] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京:中国工业出版社, 1965. 302—310.

[2] 冀国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报, 1960(4): 44—60.

[3] 唐存本. 泥沙起动的规律[J]. 水利学报, 1963(2): 1—12.

[4] 张瑞瑾. 河流泥沙工程学[M]. 北京:水利电力出版社, 1983. 49—56.

[5] Sundborg A. The river Klareilven study of pluvial processes [J]. Geografist, 1956, 38(2~3): 125—316.

[6] Dunn J S. Tractive resistance of cohesive channels[J]. J of Soil Mech and Foundation Division, ASCE, 1959, 85: 1—24.

[7] Smerdon E T, Beasley R P. Tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soils[R]. Res Bull No 715, Agri Exp Sta, Univ Missouri, 1959. 60—68.

[8] Мирцхулава Ц. Е. Основы физики и механически эрозии русел[M]. Ленинград Гидрометеониздат, 1988. 212—358.

[9] Briaud J L, Ting F C K. Erosion function apparatus for scour rate predictions[J]. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001, 127(2): 123—129.

[10] Briaud J L, Chen H C. Multiflood and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers[J]. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001, 127(2): 140—144.

[11] 曹叔尤. 黏性土冲淤的试验研究[J]. 泥沙研究, 1986(4): 73—82.

[12] 徐伦. 水库黏性淤积体溯源冲刷试验研究[A]. 水利水电科学研究院科学论文集[C]. 第33集. 北京: 水利水电科学研究院, 1986.

[13] 华景生, 万兆惠. 黏性土及黏性土夹沙的起动规律研究[J]. 水科学进展, 1992, 3(4): 271—278.

[14] 黄岁梁, 陈雅聪, 府仁寿, 等. 黏性类土的起动模式研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1997, 12(1): 1—7.

[15] 李华国, 袁美琦, 张秀芹. 淤泥临界起动条件及冲刷率试验研究[J]. 水道港口, 1995, 6(9): 20—26.

[16] 杨美卿, 王桂玲. 黏性细泥沙的临界起动公式[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995(3): 23—28.

[17] 张玮, 陈锡林, 林选震. 新沂河海口控制工程物理模型试验研究[R]. 江苏省水利工程建设局, 江苏省水利勘测设计研究院, 河海大学, 1997.

[18] 韩其为, 何明民. 细颗粒泥沙成团起动及其流速的研究[J]. 湖泊科学, 1997(4): 307—316.

[19] 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. 200—212.

[20] 黄咏烨, 李文正, 金癸, 等. 长江口北槽河床沉积物的冲刷特性[A]. 左其华. 第十一届中国海岸工程学术讨论会暨2003年海峡两岸港口及海岸开发研究会论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 2003. 72—79.

[21] 夏军强. 黄河下游的岸滩侵蚀[J]. 泥沙研究, 2002(3): 14—21.

[22] 张兰丁. 黏性泥沙起动流速的探讨[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2000, 15(1): 82—88.

[23] 张兰丁. 固结黏土起动流速的探讨[J]. 水动力学研究与进展(B辑), 1998, 10(增刊): 45—48.

[24] Partheniades E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1965, 91(HY1): 105—139.

[25] Partheniades E, Paaswell R E. Erodibility of channels with cohesive boundary[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96(HY3): 755—771.

[26] Partheniades E. Erosion and deposition of cohesive materials[J]. River Mechanics, 1971, 2: 91.

[27] Kamphuis J W, Kevin R. Hall Cohesive Material by Unidirectional Current[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(1): 304—309.

[28] Grissinger E H, Asmussen L E. Discussion of“ channel stability in undisturbed cohesive soils” [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1963, 89(HY6): 259—264.

[29] Martin T R. Discussion of experiments on the scour resistance of cohesive sediments[J]. Journal of Geophysical Union, 1941, 90(3): 262—284.

[30] Altchaeffl A G. discussion of“ Erosion and Deposition of Cohesive Soils” [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1953, 91(34): 77—88.

[31] 洪大林, 张思和. 天然原状土起动试验研究[R]. 南京水利科学研究院, 2000.

(收稿日期: 2004-09-21 编辑: 马敏峰)