

DOI: 10.11779/CJGE2020S1039

基于改进 SSRT 测试方法的砂土颗粒侵蚀特性试验

袁野, 王琛*, 梁发云

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 探究局部流场作用下土体颗粒起动后的运移规律, 建立其侵蚀过程的细观机理与宏观现象之间的联系是深入研究冲刷发生发展机理的重要手段之一。在已有的土体抗冲刷能力的简化测试方法(SSRT) 的基础上, 利用改进后的试验装置对颗粒粒径为 0.075, 0.25, 0.5, 2.0 mm 的 4 种砂土试样进行了室内试验。针对叶片转速为 50, 70, 90 r/min 时产生的局部流场, 分别测试了试样的侵蚀深度、堆积高度和堆积范围, 分析了土体颗粒起动后局部流场及颗粒粒径对泥沙运移的影响。根据砂土颗粒在水流作用下的不同特点, 利用计算得到的“普遍起动”流速及试验测试得到的界限流速, 将砂土分为不易侵蚀砂土、易侵蚀易堆积砂土和易侵蚀不易堆积砂土三类, 进而判断土体的抗冲刷性能。在此基础上, 根据侵蚀区及堆积区土体体积之比定义了土体颗粒保有率的概念, 建立了界限流速与“普遍起动”流速之间的定量关系。

关键词: 土体侵蚀; 室内试验; “普遍起动”流速; 界限流速; 泥沙运移

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S1-0198-05

作者简介: 袁野(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土体冲刷力学特性的研究。E-mail: 1832385@tongji.edu.cn。

Erosion resistance of sand particles based on improved device in simplified scour resistance tests

YUAN Ye, WANG Chen, LIANG Fa-yun

(Department of Geotechnical and Underground Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Establishing the relationships among the erosion process, development mechanism and macroscopic phenomena by exploring the movement of soil particles under the local flow field is one of the important methods to study the mechanism of scour. Four sand samples with particle sizes of 0.075, 0.25, 0.5 and 2.0 mm are tested in laboratory by using the improved test device based on the simplified scour resistance tests (SSRT). The erosion depth, deposit height and deposit range of the samples under the local flow field generated by the blade at the speed of 50, 70 and 90 r/min are recorded, and the influences of local flow field and particle size on sediment transport are analyzed. According to the different characteristics of sand particles under the flow condition, sand samples can be divided into three categories: non-erodible sand, sand which is erodible and easy to deposit, and sand which is erodible but not easy to deposit, with the calculated “universal start” velocity and the critical velocity obtained from the laboratory tests, so as to judge the scour resistance of soil. On this basis, the concept of soil particle retention ratio is defined based on the proportion of soil volume in the erosion area and the deposit area, and the quantitative relationship between the critical velocity and the “universal start” velocity is established.

Key words: soil erosion; laboratory test; universal start velocity; limit velocity; sediment transport

0 引言

随着中国江河流域经济的不断发展, 跨江海桥梁作为沿岸城市协同发展的关键环节, 其跨度和规模日益增大, 所处的环境和自然条件也愈发复杂。这些桥梁在建设和服役期间, 不可避免地会面临冲刷带来的安全隐患。统计表明, 作为涉水桥梁破坏的主要原因之一^[1], 冲刷现象对桥梁基础的稳定性有重要影响^[2-4], 近年来一直是学者们关注的重点。

为了探究冲刷这一复杂自然现象的内在机理, 国

内外学者对此学科交叉问题展开了大量研究。从岩土工程和水利工程的角度, 已有研究综合考虑河床材料及流水作用, 包括相对冲刷深度 d_s/D , 水流强度 v/v_c , 临界剪切应力 τ_c 等, 分析了相关变量对冲刷结果的影响^[5-6]。在上述研究的基础上, 各个国家或地区结合室内试验及当地现场实测结果, 从经验和半经验的角度

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51908421); 上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“晨光计划”项目(19CG21)

收稿日期: 2020-06-02

*通信作者 (E-mail: cwang33@tongji.edu.cn)

提出了多种冲刷预测模型，并不断进行修正，发展成为各地现行的设计规范^[7-9]。特别地，研究泥沙运动方面的学者从土体颗粒入手，探究了水流作用下的泥沙起动及颗粒运移规律。窦国仁^[10]通过对单颗粒的受力分析，提出了水流作用下的泥沙起动计算公式，并从起动概率的角度出发将泥沙起动状态分为“将动未动”、“部分起动”、“普遍起动”三类。Engelund^[11]提出了泥沙起动剪切应力的概念，进一步完善了泥沙起动的判定和计算理念。由于江河流域水文地质条件的差别，不同地区泥沙起动过程中的颗粒运移规律也存在显著区别。为此，杨欧等^[12]对长江口北支颗粒沉积的宏观分布规律进行了研究，验证了二维沉积物粒径趋势分析模型对于河口泥沙搬运研究的适用性。然而，已有研究主要从宏观角度出发，采用经验或半经验模型对泥沙运动和冲刷过程进行分析，很少从细观颗粒角度出发，揭示其起动过程中的运移规律。

为了进一步探究土体侵蚀的发展机理，揭示冲刷过程中泥沙的起动和运移规律，需要从细观颗粒角度出发，建立冲刷细观机理与宏观现象的内在联系。Briaud 着眼于土-水相互作用，针对土体抗冲刷性能与土体各参数间的关系开展了研究^[13]。同样从细观颗粒角度出发，Wang 等^[14]提出了土体抗冲刷能力的简化测试方法（SSRT），为冲刷机理分析提供了一种方便有效的室内试验手段。

本文在上述研究的基础上，对土体抗冲刷能力的简化测试方法（SSRT）中的装置进行了改进，并以此对多种粒径的砂土开展了室内试验，探究了土体特性及局部流场在颗粒起动过程中对泥沙运移的影响，并利用侵蚀区及堆积区的土体体积关系，提出了土体颗粒保有率的概念，用以评估流场和粒径对土体侵蚀的影响，并以此为依据对其冲刷性能进行分析。

1 试验概述

1.1 试验设备

在保证原有功能的基础上，本文对原有的 SSRT 装置进行了改进，加入了可产生稳定层流流场的试验装置，以便同时针对土体颗粒的起动和运移过程开展研究。此外，本试验装置采用可拆卸土样盒，便于试验中重塑土或原位土的制备和装卸。改进后的试验装置可根据试验方案生成漩涡和层流条件下的局部流场，观测待测土体在不同流场条件下的起动和堆积过程。

装置的主体部分由动力装置和试验发生器组成。其中，动力装置经传动装置与叶片相连，通过调节叶片转速模拟不同局部流场的涡流条件。所用的叶片宽

76 mm，高 22 mm，转速范围为 0~150 r/min，可以模拟 0~0.60 m/s 的流速范围；试验发生器为土样侵蚀过程的主要发生场所，其内径 90 mm，总高 128 mm，内部结构可分为紊流模拟器、层流模拟器和土样盒三部分，如图 1 所示。紊流模拟器位于试验发生器上部，用于生成局部涡流流场；层流模拟器为一方形管道，宽 90 mm，高 20 mm，两端与水循环系统相连接，用于生成稳定的层流流场；可拆卸土样盒用于装载试验土样，通过螺纹接口与层流模拟器相连。土样盒内的试样厚度均为 40 mm，自由液面在水-土交界面上方 30 mm 处。装置顶部及侧面架设有两台摄像机，用于记录水流作用下试验土样的动态侵蚀过程。

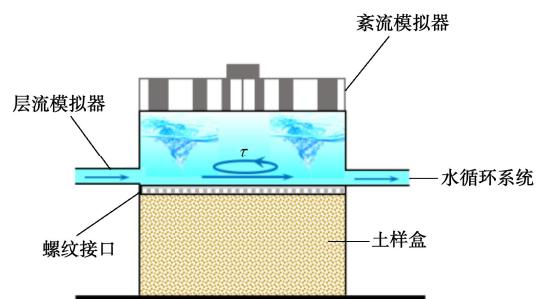


图 1 试验发生器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test generator

1.2 试验材料

本次试验土样均采用福建标准砂制备而成。试验开始前，先将试验用砂置于烤箱中干燥 24 h，待砂土完全干燥后，利用筛分机对砂土进行颗粒筛分，得到试验所需的 0.075, 0.25, 0.5, 2.0 mm 四种粒径的土体颗粒，其参数如表 1 所示。

表 1 单粒径土样参数

Table 1 Parameters for samples with a single particle size

编号	粒径/mm	干密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	颗粒相对密度	休止角 /($^{\circ}$)
1	0.075	1.62	2.66	29
2	0.25	1.61	2.65	30
3	0.5	1.60	2.65	30
4	2.0	1.58	2.62	31

筛分完成后，采用落雨法进行试验土样制备。将筛分所得砂土在距离土体表面 15 cm 的高度逐层沉积至土样达到 40 mm 厚度。为保证试样初始条件的一致性，待土体沉积完成后，向土样盒内缓慢注水，确保土体仅受轻微影响，并将其静置 24 h。

1.3 试验方案设计

试验分别在叶片转速为 50, 70, 90 r/min（可产生的最大水流流速分别为 0.20, 0.28, 0.36 m/s）的三种条件下，对上述 4 种土样开展测试。本试验的操作过程遵循 SSRT 试验^[14]的基本要求，但在细节上略有差异。

具体的试验步骤为：①将土样盒与试验发生器相连，通过输水管缓慢将蒸馏水注入容器中，待自由液面到达水-土交界面上方 30 mm 位置时停止注水。②启动装置。为避免因叶片转速提升过快产生局部流场突变，造成水-土分界面扰动，可在试验开始后逐步缓慢提高转速至既定值。③保持转速不变，记录土样开始发生侵蚀、达到最大侵蚀深度及平衡状态所需的时间，并记录对应时刻的土样状态。④待冲刷达到平衡状态，且侵蚀区及堆积区土样形态 30 s 内无明显变化后，关闭试验装置。⑤将土样静置 20 min，待水流中悬砂完全沉积后，测量土样侵蚀区深度，堆积区沉积物的高度及堆积区域半径。⑥采用其他土样重复上述试验步骤，整理并分析结果。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

根据窦国仁^[10]的泥沙起动公式可知，局部最大流速为 0.28 m/s（叶片转速为 70 r/min）时，颗粒粒径为 0.075, 0.25, 0.5 mm 的砂土均已达到“普遍起动”状态，而颗粒粒径为 2.0 mm 的砂土在同样条件下处于“部分起动”状态。随着试验的进行，由于颗粒起动状态不同，稳定涡流作用下，试验土样出现了两种不同的颗粒迁移现象。

对于颗粒粒径较大的土样，水-土交界面处的颗粒受水流作用，在土体表面附近位置起动翻滚，逐渐向涡流中心流速较低处移动并堆积，试验过程中的形态如图 2 所示。根据与初始水-土界面相对位置的不同，可将土样形态分为侵蚀区和堆积区两部分。对于颗粒粒径较小的土样，大量土体颗粒将被水流带走，小部分颗粒在土体表面附近处翻滚，并向涡流内部堆积。

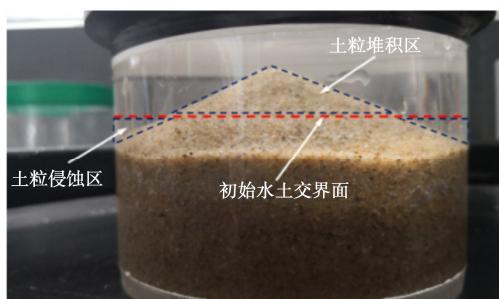


图 2 试验过程中的土样形态 ($d=0.5 \text{ mm}$, 转速为 70 r/min)

Fig. 2 Soil sample during tests ($d=0.5 \text{ mm}$, 70 r/min)

2.2 试验分析

以 70 r/min 转速条件下的试验为例，土样侵蚀随时间发展曲线如图 3 所示。从图中可以看出，试验初期，粒径为 0.25 mm 及 0.5 mm 的土样在水流作用下被侵蚀并逐渐形成侵蚀区。与此同时，部分回落土体在堆积区开始堆积，随后迅速发展，最终达到稳定状

态。期间，土样侵蚀区深度和堆积区高度基本同步增大。然而，当土体颗粒粒径较小时 ($d=0.075 \text{ mm}$)，水流作用下的土体颗粒易被卷扬带走却不易沉积。因此，在试验初期，侵蚀区迅速发展，而堆积区发展则较为缓慢，较侵蚀区的发展明显滞后，尽管最终形成的土样形态与大颗粒土样类似，但试验过程中出现了明显的悬砂及大量颗粒被卷扬带走的现象（下文中称为土体颗粒流失现象）。四种颗粒粒径的试验土样中，只有粒径为 2.0 mm 的土样处于“部分起动”状态。此时，水流作用下仅有部分颗粒发生了起动，发生土体侵蚀所需的时间较长，试验过程中侵蚀区及堆积区发展也较为缓慢，颗粒滚动是发生侵蚀和堆积的主要原因。

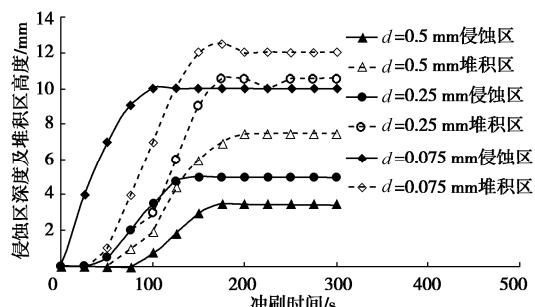


图 3 70 r/min 转速下的侵蚀/堆积发展曲线

Fig. 3 Curves of erosion/deposit development at 70 r/min

图 4 给出了局部最大流速为 0.36 m/s（叶片转速为 90 r/min）时，0.25, 0.5, 2.0 mm 颗粒粒径土样在水流作用下的侵蚀及堆积随时间发展曲线。在水流作用下，0.5 mm 及 2.0 mm 两种粒径土样的侵蚀区及堆积区基本同步发展，整体趋势与低流速情况类似，但发展速率更快。然而，与局部最大流速为 0.28 m/s 时不同，粒径为 0.25 mm 的土样在水流作用下出现了明显的悬砂及土体颗粒流失现象，其堆积区较侵蚀区的发展也明显滞后。由上述现象可知，除了土体颗粒粒径外，水流流速也对土体颗粒的起动运移产生较大影响。值得注意的是，由于粒径为 2.0 mm 的土样颗粒尺寸较大，水流作用下土体颗粒的微小运动都将对土样侵蚀区及堆积区发展产生明显影响。因此，其侵蚀区及堆积区发展曲线呈现阶梯状缓慢上升。

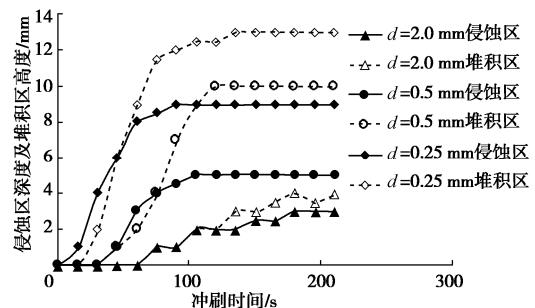


图 4 90 r/min 转速下的侵蚀/堆积发展曲线

Fig. 4 Curves of erosion/deposit development at 90 r/min

根据水流作用下砂土颗粒运移现象的不同, 大致可将砂土分为以下 3 种类型: (I) 不易侵蚀, 此类砂土在水流作用下没有或只有小部分颗粒发生运移堆积, 土体侵蚀所需时间较长; (II) 易侵蚀易堆积, 水流作用下, 该类土体颗粒在土体表面发生明显起动, 并在附近堆积, 土体侵蚀过程中侵蚀区及堆积区同步发展; (III) 易侵蚀不易堆积, 大量颗粒在水流作用下被卷扬带走, 无法在堆积区形成有效堆积。堆积区滞后于侵蚀区发展, 且冲刷过程中有明显的悬砂及土体颗粒流失现象。其中, I 类土为不易冲刷砂土, II 类土及 III 类砂土为易冲刷砂土。实际河流中, 局部流场复杂多变, 对于第 II 类砂土形成的冲刷坑, 其周围堆积的土体颗粒在复杂流场作用下会一定程度上补偿回填冲刷坑, 减小最大冲刷坑深度。然而, 第 III 类在水流作用下不会堆积, 冲刷过程将持续发展, 冲刷深度会持续增长直到达到平衡状态。

根据试验分析, 水流流速及颗粒粒径共同影响着土体颗粒起动与运移的细观过程。因此, 在对砂土进行分类时应综合考虑粒径及流速的影响。当流速较低时, 土体颗粒未达到“普遍起动”状态, 土体颗粒不易发生起动运移, 则土样属于 I 类砂土; 当流速达到颗粒“普遍起动”流速 v_s 时, 颗粒在土样表面起动翻滚, 随后在附近堆积, 则该土样属于 II 类砂土; 随着水流流速的进一步增大, 大量颗粒在这一过程中将被卷扬带走, 开始出现明显的悬砂及土体颗粒流失现象, 此时的土体为 III 类砂土。这种正好区别 II 类与 III 类砂土的水流流速称为界限流速, 记作 v_L 。由此可得三种砂土所对应的水流流速范围:

$$\begin{cases} v \leq v_s & (\text{为 I 类土}), \\ v_s < v < v_L & (\text{为 II 类土}), \\ v_L \leq v & (\text{为 III 类土}), \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_s 为“普遍起动”流速, v_L 为界限流速。

3 土体颗粒保有率

为了进一步对易冲刷砂土颗粒的流失情况进行定量探究, 明确 II 类及 III 类砂土间的界限流速, 本文将堆积区与侵蚀区土体颗粒体积之比定义为土体颗粒保有率, 记作 R_s 。土体颗粒保有率越小, 堆积区与侵蚀区土体体积差异越大, 颗粒流失情况越严重, 反之同理。堆积区及侵蚀区土体颗粒体积可利用冲刷后地形的曲面函数计算得到, 其计算公式如下:

$$R_s = \frac{V_a}{V_e}, \quad (2)$$

$$V_a = \iint_{\Omega} \Psi(x, y) d\sigma, \quad (3)$$

$$V_e = \frac{\pi D^2}{4} - \iint_{\Omega} \Psi(x, y) d\sigma + \iint_{\Omega_2} \Psi(x, y) d\sigma, \quad (4)$$

式中, V_a 为堆积区颗粒体积, V_e 为侵蚀区颗粒体积, $\Psi(x, y)$ 为冲刷后地形的曲面函数, Ω 代表侵蚀区, Ω_2 代表试验区域, D 为试验装置直径。

根据式(4)可分别计算得到水流流速 $v=0.20, 0.28, 0.36 \text{ m/s}$ (分别对应叶片转速为 50, 70, 90 r/min) 时不同土样的土体颗粒保有率。图 5 给出了不同流速条件下土样颗粒粒径与土体颗粒保有率之间的关系曲线。由图可知, 颗粒粒径较大时, 水流流速对土体颗粒保有率曲线的影响较小; 颗粒粒径较小时, 水流流速越小, 土体颗粒保有率曲线越陡, 相同颗粒粒径条件下的土体颗粒保有率越大。

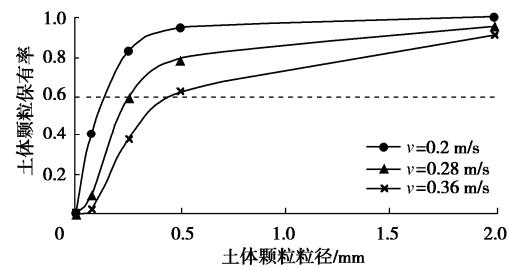


图 5 土体颗粒保有率随粒径变化曲线

Fig. 5 Curves of soil particle retention rate with particle size

流速一定时, 土体颗粒保留率随土体粒径的变化过程大致可分为两类。 R_s 小于 0.6 时, 以 $v=0.28 \text{ m/s}$ 为例, 土样粒径为 0.25 mm 比粒径为 0.075 mm 的 R_s 提高 0.51。此时, 粒径增大使土体颗粒保留率迅速增大, 土体颗粒流失显著减小, 运移模式以卷扬运移为主, 呈现 III 类砂土的特点。当 R_s 达到 0.6 后, 粒径变化产生的影响减小, 颗粒运移形式以表面附近位置堆积为主, 土体呈现 II 类砂土的颗粒冲刷特性。因此, $R_s=0.6$ 所对应的流速可认为是 II 类砂土与 III 类砂土的界限流速。该界限流速与“普遍起动”流速的关系曲线如图 6 所示, 两者之间的关系为

$$v_L = 1.5v_s - 0.135, \quad (5)$$

式中, v_L 为界限流速, v_s 为“普遍起动”流速。

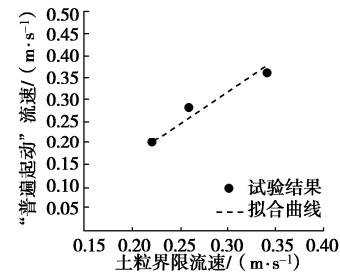


图 6 界限流速随“普遍起动”流速变化曲线

Fig. 6 Curves of limit velocity with “universal start” velocity

在实际工程中, 对于 I 类砂土, 由于水流流速并

未达到土体“普遍起动”流速，土体受水流冲刷作用影响较小，针对该类土体进行设计时，可视情况减少对冲刷影响的考虑；对于Ⅱ类砂土，水流流速已达到土体“普遍起动”流速，在实际涉水工程中，土体会发生较为明显的冲刷现象，在冲刷设计时可遵循现有规范进行计算，并在基础设计时充分考虑冲刷产生的影响；对于Ⅲ类砂土，由于砂土颗粒起动后无法在冲刷坑附近形成沉积，实际工程中由于冲刷所产生的影响更为明显，因此，进行设计时应增大安全储备，如采用抛石等增大河床表面颗粒粒径等方式提高其抵抗冲刷（特别是洪水期间）的能力。

4 结 论

本文在土体抗冲刷能力的简化测试方法（SSRT）基础上，对试验装置进行了改进，并以此对 0.075, 0.25, 0.5, 2.0 mm 四种粒径的土样进行了室内试验，得到了以下 4 点结论。

(1) 相同粒径条件下，土体的侵蚀发展速率随水流流速的增大而增大；相同流速条件下，小颗粒粒径土体更易侵蚀，大颗粒粒径更易沉积。

(2) 由于流场条件及土体颗粒粒径的不同，可将砂土分为不易侵蚀（Ⅰ类砂土），易侵蚀易堆积（Ⅱ类砂土）和易侵蚀不易堆积（Ⅲ类砂土）三类。

(3) 颗粒粒径较大时，水流流速对土体颗粒保有率曲线的影响较小；颗粒粒径较小时，水流流速越小，相同颗粒粒径条件下的土体颗粒保有率越大。

(4) 土体颗粒保有率达到 0.6 时，土体颗粒运移现象发生明显变化，由卷扬运移转变为表面附近位置堆积，土体类型由Ⅲ类土变为Ⅱ类土，其界限流速可由式(5)计算得到。

参 考 文 献：

- [1] 向琪芪, 李亚东, 魏 凯, 等. 桥梁基础冲刷研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 21 - 34. (XIANG Qi-qi, LI Ya-dong, WEI Kai, et al. Review of research on bridge foundation erosion[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 21 - 34. (in Chinese))
- [2] LIANG F Y, ZHANG H, HUANG M S. Extreme scour effects on the buckling of bridge piles considering the stress history of soft clay[J]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1143 - 1159.
- [3] LIN C, et al. Analysis of laterally loaded piles in soft clay considering scour-hole dimensions[J]. Ocean Engineering, 2016, 111(1): 461 - 70.
- [4] LEHANE B M, et al. Scour effects on p-y curves for shallowly embedded piles in sand[J]. Géotechnique, 2016.
- [5] MELVILLE B W, SUTHERLAND A J. Design method for local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 1988, 114(10): 1210 - 1226.
- [6] WHITE C M. The Equilibrium of Grains on the Bed of a Stream[J]. Mathematical and Physical Sciences, 1940, 174(958): 322 - 338.
- [7] RICHARDSON E V, DAVIS S R. Evaluating scour at bridge[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2001.
- [8] 公路工程水文勘测设计规范：JTGC30—2015[S]. 北 2015. (Code for Hydrological Survey and Design of Highway Engineering: JTGC30—2015[S]. 2015. (in Chinese))
- [9] MELVILLE B W, COLEMAN S E. Bridge Scour[M]. Colorado: Water Resources Publications, 2000.
- [10] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1 - 9. (DOU Guo-ren. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1 - 9. (in Chinese))
- [11] ENGELUND F. A sediment transport model for straight alluvial channels[J]. Nordic Hydrology, 1976(7): 293 - 376.
- [12] 杨 欧, 刘苍字. 长江口北支沉积物粒径趋势及泥沙来源研究[J]. 水利学报, 2002(2): 79 - 84. (YANG Ou, LIU Cang-zi. Study on particle size trend and sediment source of the North Branch of the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(2): 79 - 84. (in Chinese))
- [13] BRIAUDJ L. Scour depth at bridges: method including soil properties. I: maximum scour depth prediction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(2): 04014104.
- [14] WANG C, YU X, LIANG F Y. A preliminary design of apparatus for scour resistance test in riverbed sediments[C]// Installation, Testing, and Analysis of Deep Foundations. Geotechnical Special Publication, 2018: 746 - 757.

（编校：孙振远）