

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.061



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



透明砂土休止角和起动流速基本特性试验研究

殷峰¹, 周航¹, 丁选明¹, 陈胜利², 裴安青², 李佑²

(1. 重庆大学 土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆市城市建设投资(集团)有限公司, 重庆 400023)

摘要:人工合成透明土材料结合粒子图像处理技术在模型试验中已得到广泛应用,但使用该技术研究桩基冲刷问题还需对其开展更多特性研究。基于熔融石英砂与正十二烷和15#白油混合液制备成透明砂土,通过室内试验研究透明砂土的基本物理特性、休止角和起动流速。结果表明:透明砂土的透明度除1~2 mm粒径组显著较差外,其余相差不大;各粒径组透明砂土的容重相差甚小;干容重随粒径增大先增大后减小;孔隙液体剪切速率与切应力表现为较好线性关系,属于典型的牛顿流体;液下休止角随中值粒径的增大而增大;粒径组为0.1~0.2 mm的透明砂粒起动流速随液体深度增大而增大,利用沙莫夫公式进行拟合,拟合结果与试验结果吻合较好。

关键词:透明砂土;物理特性;休止角;起动流速

中图分类号: TU411.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0028-08

Experimental study on basic characteristics of angle of repose and initiation velocity of transparent sand

YIN Feng¹, ZHOU Hang¹, DING Xuanming¹, CHEN Shengli², PEI Anqing², LI You²

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing City Construction Investment (Group) Co., Ltd, Chongqing 400023, P. R. China)

Abstract: Artificially synthesized transparent soil materials combined with particle image processing technique has been widely used in model testing. However, further study of pile foundation scour and research on its characteristics is essential. Based on the transparent sand prepared by the mixture of fused silica sand, twelve alkane and 15# white mineral oil, the basic physical properties, angle of repose and starting velocity of the transparent sand were studied through laboratory experiments. The results show that the transparency of the mixture is not much different except for the 1-2 mm particle size group which is significantly worse; the bulk density of transparent sand in each particle size group is of slight difference; the bulk density of transparent sand in each particle size group is also of neglectable difference; dry bulk

收稿日期: 2021-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(52027812); 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jscx-msxmX0107)

作者简介: 殷峰(1995-), 男, 主要从事桩基冲刷与防护研究, E-mail: yinfemail@163.com。

周航(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: zh4412517@163.com。

Received: 2021-01-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52027812); Chongqing Technical Innovation and Application Development Project (No. cstc2019jscx-msxmX0107)

Author brief: YIN Feng (1995-), main research interests: pile foundation scour and protection, E-mail: yinfemail@163.com. ZHOU Hang (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: zh4412517@163.com.

density increases first and then decreases with the increase of particle size; the pore liquid shear rate and shear stress show a good linear relationship, which is a typical Newtonian fluid; the submerged angle of repose increases with increase of the median diameter; the initiation velocity of transparent sand with a particle size group of 0.1~0.2 mm increases with increase of liquid depth, fitting by Shamov's formula, indicating the better anastomosis effect.

Keywords: transparent sand; physical characteristics; angle of repose; initiation velocity

桥梁桩基冲刷是水流从桩基周围淘掘并带走泥沙及其他物质的过程,是一个受水深、流向、流速、桩基形状、泥沙特性等诸多因素影响的动态现象^[1]。针对这类问题,模型试验一直是主要的研究手段,但已有冲刷试验主要侧重于冲刷结束后冲刷深度和冲刷坑形态以及单桩基础周围流态变化的分析^[2],而针对冲刷过程冲刷坑的形态演化、复杂桩基结构周围流态变化等问题的研究甚少。导致这种情况的主要原因是,现有的冲刷试验技术在含沙量较大的浑水冲刷和复杂桩基结构的情况下难以实时捕捉清晰的流态特征和河床形态演化图像。将人工合成透明土材料与粒子图像处理技术相结合的可视化模型试验技术引入到现有桩基冲刷试验中可以弥补这些缺点,可以实现桩基周围土体内部形变、渗透的可视化观测。

熔融石英砂已成为模拟天然砂土最为常用的透明固体材料,针对其配制而成的透明砂土,研究人员开展了直剪试验^[3-5]、单轴试验^[6-7]、三轴试验^[3-4,6,8-10]、渗透试验^[3,6]、热传导试验^[11]、颗粒破碎分析试验^[6]、共振柱和动扭剪试验^[12]等。但将透明砂土推广到桩基冲刷的试验研究中还需对其更多特性进行研究。

笔者选用以熔融石英砂、正十二烷和15#白油混合液为材料合成的透明砂土,基于室内试验方法,对其基本物理特性、休止角和起动流速进行研究,为桩基冲刷的可视化研究提供技术支撑和材料数据参考。

1 材料基本物理特性

选取的透明砂粒为江苏徐州新沂万和矿业有限责任公司生产的熔融石英砂,无色透明颗粒,莫氏硬度为7,折射率为1.458 5。图1为熔融石英砂的实物图,分为0.1~0.2 mm、0.2~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm、2~3 mm、3~5 mm共6个粒径组,中值粒径取粒径组上下限值的平均值,即0.15、0.35、0.75、

1.5、2.5、4 mm。

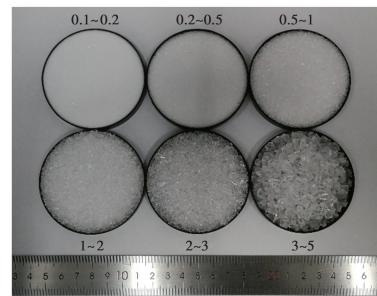


图1 不同粒径组的熔融石英砂样品

Fig. 1 Fused quartz sand samples of different particle size groups

1.1 透明砂土的制备

为实现桩基冲刷的可视化研究,需制备与透明砂粒具有相同折射率的孔隙液体^[13]。室温恒为25℃时,将正十二烷和15#白油按质量1:4进行混合,并微调至折射率为1.458 5,即得到孔隙液体。将透明砂粒均匀撒布在盛有孔隙液体的容器内,同时,用玻璃棒不断搅拌,期间液面始终略高于顶部砂粒,然后采用真空法排除内部空气^[14]。

图2为利用不同粒径组透明砂粒制备的透明砂土,其中透明砂粒厚度均为10 cm。由图2可知,由1~2 mm砂粒制备的透明砂土透明度显著低于其他粒径组,主要是由于该粒径组砂粒内部存在较多小裂隙致孔隙液体无法填充,内部小裂隙可能是生产破碎该粒径的工艺所致。其余粒径组透明砂土的透明度从高到低依次为2~3 mm、3~5 mm、0.5~1 mm、0.1~0.2 mm、0.2~0.5 mm,此部分透明度存在差异的主要原因是砂粒间空隙里的空气排除程度不同。

1.2 透明砂粒的容重与干容重

砂土实有重量与实有体积的比值称为砂土的容重。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)采用长颈比重瓶进行测定。每种粒径组进行3次平行试验,取其算术平均值,试验结果如表1所示。可以看出,各粒径组透明砂粒的容重基本一致,

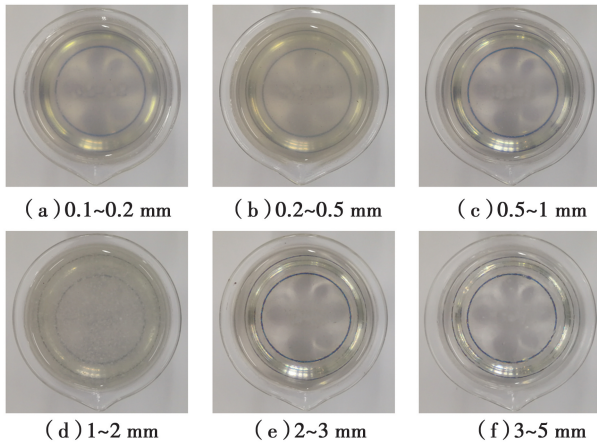


图 2 各粒径组制备的透明砂土

Fig. 2 Transparent sand prepared by each particle size group

主要是由于熔融石英砂的二氧化硅纯度为 99.998%，且颗粒裂缝及内部密闭气泡较少。

表 1 透明砂粒容重试验结果

Table 1 Bulk density of transparent sand

粒径组/mm	容重/(t·m ⁻³)	粒径组/mm	容重/(t·m ⁻³)
0.1~0.2	2.192	1~2	2.189
0.2~0.5	2.188	2~3	2.191
0.5~1	2.190	3~5	2.192

砂土干容重是指单位体积中淤积物固体材料所占的重量,采用量筒法进行测定。试验量筒容量为 500 mL,需要说明的是,透明砂粒是在孔隙液体中进行静置淤积,试验结果如表 2 所示。可以看出,同一粒径组下,淤积干容重随沉淀时间增长而增大,直至稳定;同一沉淀时间下,淤积干容重随粒径增大先增大后减小,1~2 mm 粒径组的淤积干容重最大。

表 2 透明砂粒干容重随时间变化情况

Table 2 Change of dry bulk density of transparent sand with time

时间/h	t/m ³					
	0.1~0.2 mm	0.2~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	2~3 mm	3~5 mm
0	0.950	1.033	1.075	1.130	1.078	1.063
6	0.973	1.044	1.084	1.138	1.083	1.065
24	0.973	1.048	1.092	1.148	1.092	1.070
48	0.980	1.048	1.092	1.148	1.094	1.072
72	0.984	1.053	1.092	1.148	1.097	1.075
96	0.984	1.053	1.094	1.148	1.097	1.075
120	0.984	1.053	1.094	1.148	1.097	1.075

1.3 孔隙液体的密度与黏度

孔隙液体的密度试验参照《液体石油化工产品

密度测定法》(GB/T 2013—2010)推荐方法,采用比重瓶法。在 25 °C 室温条件下,通过 3 次平行测定,得到孔隙液体密度为 0.831 9 g/cm³。

孔隙液体的黏度试验采用 Anton Paar GmbH 制造的 MCR302 型旋转流变仪,参照《液体粘度的测定》(GB/T 22235—2008)进行。在 25 °C 室温条件下,得到 2~600 s⁻¹ 剪切速率下孔隙液体剪切速率与切应力的关系如图 3 所示。由图 3 可知,孔隙液体剪切速率与切应力呈显著线性关系,相关系数 R² 为 0.999 6,是典型的牛顿流体,黏度即为其斜率值,18.2 mPa·s。

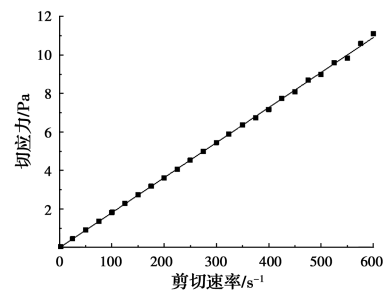


图 3 孔隙液体剪切速率与切应力的关系

Fig. 3 Relationship between pore liquid shear rate and shear stress

2 休止角试验

砂土在静止的流体中自然堆积成丘时,由于摩擦力的作用,可以堆积成一定角度的稳定倾斜面而不致塌落,此倾斜面与水平面的夹角称为砂土的休止角^[1,15]。

2.1 试验仪器和方法

按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中无黏性土休止角试验推荐的圆盘法进行测定。试验仪器采用南京精科宇盛仪器有限公司生产的 QR-1 型休止角测定仪,如图 4 所示。

试验时,选择直径为 20 cm 的圆盘,将圆盘通过制动器落在底盘,用小勺沿测杆四周缓慢倾倒烘干砂粒,小勺离试样表面的高度始终保持在 1 cm 左右,直至圆盘外缘完全盖满为止,缓慢转动制动器使圆盘平稳升起至与底盘内试验分离,记录锥顶与测杆接触处度数,即为自然休止角。值得注意的是,在进行液下休止角试验时,先将圆盘慢慢沉入装有孔隙液体的槽内,槽内液面达到测杆 0 刻度处,按自然休止角装样步骤完成装样,然后转动制动器使圆盘

缓慢下降,直至锥体顶端达液面,待其充分饱和且无气泡上升时,记录锥顶与测杆接触处度数,即为液下休止角。为保证数据准确性,每组试样进行 3 次平行试验,当 3 次结果偏差在规定值内,取其算数平均值为最终结果。



图 4 休止角测定仪

Fig. 4 Angle of repose tester

2.2 休止角试验结果

按照休止角测试方法,分别对 6 种粒径组的熔融石英砂的自然休止角和液下休止角进行测定,试验结果如表 3 所示。

表 3 休止角试验结果

Table 3 Angle of repose test results

粒径组/mm	中值粒径/mm	自然休止角/(°)	液下休止角/(°)
0.1~0.2	0.15	37.3	32.2
0.2~0.5	0.35	35.7	33.3
0.5~1	0.75	36.7	34.5
1~2	1.5	37.2	35.7
2~3	2.5	38.1	37.2
3~5	4	39.1	38.3

图 5 为不同介质中透明砂粒休止角与粒径的关系。由图 5 可知,透明砂粒自然休止角大于液下休止角,且随中值粒径增大,二者差值越趋近,与学者们^[15-17]针对自然休止角与水下休止角的对比试验结果相吻合,主要是因为,随着粒径增大,颗粒间咬合力作用逐渐较孔隙液体浮力和润滑作用更明显,则当砂粒较大时,液下休止角可用自然休止角近似代替。当中值粒径大于 0.35 mm 时,透明砂粒自然休止角随中值粒径增大而增大,而中值粒径 0.15 mm 的试样显著高于中值粒径 0.35 mm 的砂粒。其原因

可能是,对于中值粒径为 0.15 mm 的砂粒,颗粒具有较大内聚力和颗粒间存在较大黏结力^[16];对于中值粒径大于 0.35 mm 的砂粒,颗粒间的黏结力和吸附力微乎其微,颗粒间摩擦主要是颗粒间的咬合力^[18],且粒径越大导致透明砂粒棱角的峥嵘度越大,进而颗粒间的咬合力越大^[15]。透明砂粒液下休止角随中值粒径增大而增大,与自然休止角规律略有不同,这可能是由于孔隙液体对中值粒径为 0.15 mm 透明砂粒的颗粒内聚力和颗粒间黏结力破坏程度较大。

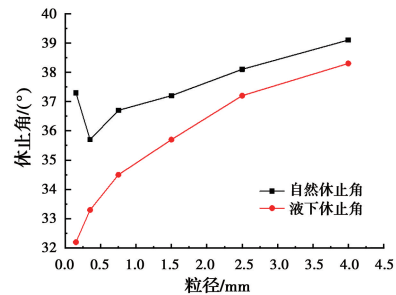


图 5 不同介质中透明砂粒休止角与粒径关系

Fig. 5 Relationship between the angle of repose and particle size of transparent sand in different media

3 起动流速试验

砂粒的起动流速是表征砂粒运动特征的重要物理量^[19]。静止于河床表面的砂颗粒,当水流强度逐渐加大到某一临界值时,砂颗粒就会开始起动,将这一临界值时的垂线平均流速称为砂粒的起动流速^[18]。

3.1 试验装置

起动流速试验装置包括循环水槽系统和粒子图像测量系统,如图 6 所示。循环水槽系统包括水槽支撑架、水槽、连接管道、造流泵和变频调速器,水槽长 4.5 m、宽 0.2 m、高 0.3 m,上游和下游均设置 1.5 m 的平顺水流段,正中段 1 m 凹槽处为试验段,凹槽深 0.25 m;粒子图像测量系统包括示踪粒子、计算机、片状光源激光器、平面镜、CCD 高速相机及后期图像处理软件。

3.2 试验过程

在水槽试验段凹槽内先后架设框型支架和有机玻璃隔板,保证凹槽铺砂深度达 6 cm,从水槽下游缓慢注入孔隙液体,直至高出凹槽 1 cm;将透明砂

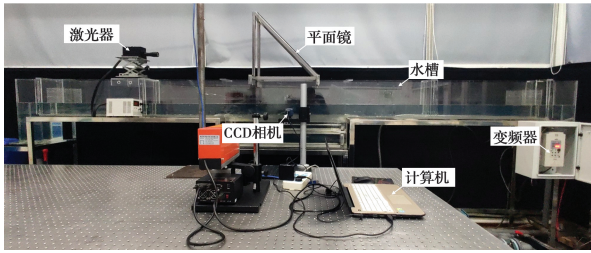


图6 起动流速试验装置

Fig. 6 Initiation velocity test device

土以统一高度缓慢均匀撒布在凹槽内,待透明土高出凹槽 0.5 cm 后,用抹泥板将其抹平至与前后的平顺水流段齐平。将激光器布置在试验段上游侧,经平面镜反射,保证片状光源从凹槽上侧居中垂直射入并与水槽侧壁平行,将 CCD 相机放置于试验段侧面,通过计算机控制进行拍摄。设备具体布置情况如图 7 所示。

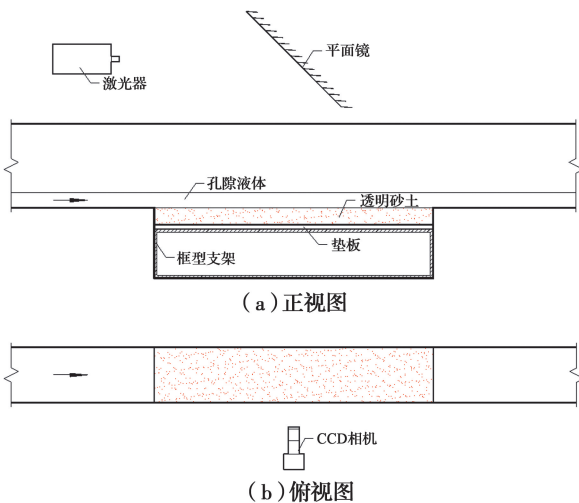


图7 设备布置情况示意图

Fig. 7 Schematic diagram of equipment layout

试验时,注入孔隙液体至设计深度,打开激光器和 CCD 相机,开启造流系统,缓慢加大流量至接近颗粒起动时,再微调流量,同时观测起动情况,待流场稳定后,读取流量,拍摄照片;后期采用 PIV 图像处理软件得到孔隙液体流速矢量图,进而计算得到起动流速。

3.3 起动流速试验结果

泥沙起动视床面砂粒运动状态分为个别起动、少量起动、大量起动 3 个级别^[20-21]。个别起动是指纵向床面上有个别颗粒做间歇性移动;少量起动是指纵向床面上约有 20% 的颗粒做间歇性移动,其运动状态可连续观测到;大量起动是指纵向床面上有

50% 以上的颗粒做连续运动,其运动速度和连续性均比少量起动强。

通过上述起动流速试验装置和方法,对 0.1~0.2 mm 粒径组的透明砂粒进行 3、6、9 cm 这 3 种深度下的起动流速试验,得到各状态下孔隙液体矢量流速。其中,少量起动孔隙液体的矢量流速如图 8 所示,同一液体深度下,其余起动状态的矢量流速分布规律基本一致。特别说明,受装置最大流量影响,无法使其余粒径组透明砂粒达到起动状态。

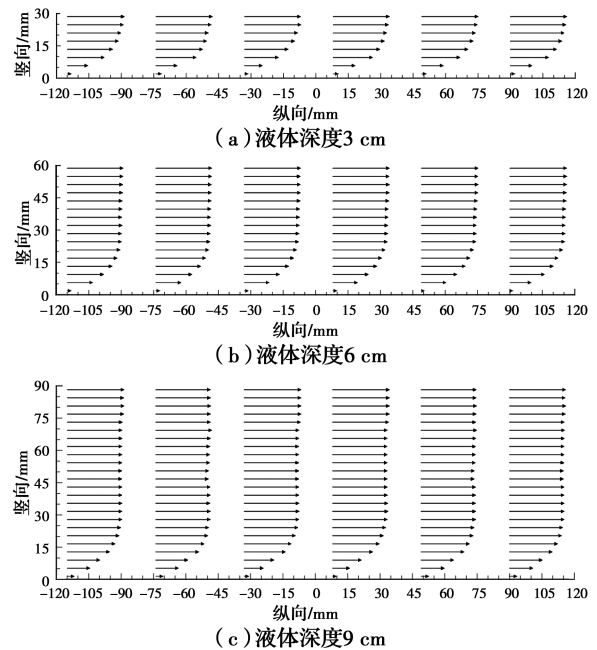
图8 0.1-0.2 mm 粒径组透明沙粒少量起动
孔隙液体流速矢量图

Fig. 8 Flow velocity vector diagram of the pore liquid when the transparent sand with a particle size of 0.1-0.2 mm starts in a small amount

起动流速采用图解法进行计算,即将矢量流速图末端连线包围的面积除以液体深度^[22],计算结果如表 4 所示。可以看出,粒径组为 0.1~0.2 mm 透明砂粒起动流速在各状态下的起动流速均随深度增大而增大。采用的透明砂粒粒径大于 0.1 mm,且材料本身基本无黏性,视为较粗的散粒砂^[23]。因此,考虑采用沙莫夫公式对试验数据进行拟合,即

$$v_0 = K \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \left(\frac{h}{d}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (1)$$

式中: v_0 为起动流速; h 为液体深度; d 为砂粒中值粒径; γ_s 、 γ 分别为透明砂粒和孔隙液体的容重; g 为重力加速度; K 为沙莫夫系数。

表4 0.1-0.2 mm 粒径组透明砂粒起动流速试验结果

Table 4 Experimental results of initiation velocity of transparent sand particles with a particle size of 0.1-0.2 mm

深度/cm	流速/(cm·s ⁻¹)		
	个别起动	少量起动	大量起动
3	14.05	16.28	18.84
6	16.00	18.73	21.82
9	16.60	19.50	22.72

通过对试验数据的拟合,得到在个别起动、少量起动和大量起动状态下拟合式(1)中 K 值分别为 1.18、1.38 和 1.61。将拟合式计算值与试验实测值进行比较,如图 9 所示。由图可知,透明砂粒起动流速计算值与实测值均匀分布在直角坐标 45°线的两侧,表明可以利用该拟合式来描述透明砂粒起动流速。

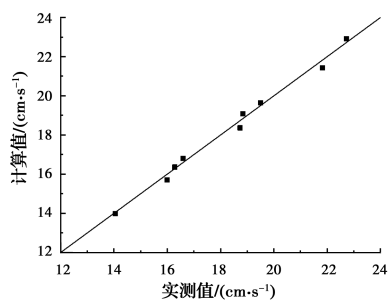


图9 0.1-0.2 mm 粒径组透明砂粒起动流速与深度关系

Fig. 9 Relationship between initial flow velocity and depth of transparent sand in the particle size group of 0.1-0.2 mm

4 结论

基于熔融石英砂与正十二烷和 15# 白油混合液制备成的透明砂土,开展了基本物理特性、休止角和起动流速试验研究,得到以下结论:

1) 由不同粒径组砂粒配制而成的透明砂土的透明度,粒径组为 1~2 mm 的透明度显著低于其余粒径组,其余粒径组透明度从高到低依次为 2~3 mm、3~5 mm、0.5~1 mm、0.1~0.2 mm、0.2~0.5 mm。

2) 在选取的粒径范围内,透明砂粒容重为 2.188~2.192 t/m³,各粒径组相差很小;透明砂粒干容重为 0.984~1.148 t/m³,同一粒径组的淤积干容重随沉淀时间增长而增大,直至稳定,且在相同的沉淀时间,淤积干容重随粒径增大先增大后减小。

3) 在 25 °C 条件下,孔隙液体的密度为 0.831 9

g/cm³,剪切速率与切应力在 2~600 s⁻¹ 剪切速率时为线性关系,是典型的牛顿流体,黏度为 18.2 mPa·s。

4) 在选取的粒径范围内,透明砂粒自然休止角大于液下休止角,且随中值粒径增大二者差值越趋近。透明砂粒自然休止角为 35.7°~39.1°,中值粒径大于 0.35 mm 时,随中值粒径增大而增大,中值粒径为 0.15 mm 的试样显著增大;透明砂粒液下休止角为 32.2°~38.3°,随中值粒径增大而增大。

5) 当孔隙液体深度为 3~9 cm 时,同一液体深度下,粒径组为 0.1~0.2 mm 的透明砂粒各起动状态的矢量流速分布规律基本一致,透明砂粒在各状态下的起动流速为 14.05~16.60 cm/s(个别起动)、16.28~19.50 cm/s(少量起动)、18.84~22.72 cm/s(大量起动),各状态起动流速均随深度增大而增大。提出了透明砂粒起动流速拟合式,计算值与实测值吻合较好。

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): 235-248.
XIANG Q Q, LI Y D, WEI K, et al. Review of bridge foundation scour [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 235-248. (in Chinese)
- [2] 马丽丽,国振,王立忠,等. 单向流条件下单桩桩周冲刷过程特征试验研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(1): 136-146,156.
MA L L, GUO Z, WANG L Z, et al. Scour characteristics at the periphery of a vertical pile under steady flow [J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(1): 136-146,156. (in Chinese)
- [3] SUITS L D, SHEAHAN T C, EZZEIN F M, et al. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling [J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(6): 103808.
- [4] 孔纲强,刘璐,刘汉龙,等. 玻璃砂透明土与标准砂土强度特性对比三轴试验[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2): 250-255.
KONG G Q, LIU L, LIU H L, et al. Comparative analysis of the strength characteristics of transparent glass sand and standard sand [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(2): 250-255. (in Chinese)
- [5] 孙学谨,孔纲强,李春红,等. 温度影响下透明土-混凝土接触面摩擦力学特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 632-638.

- SUN X J, KONG G Q, LI C H, et al. Experimental on interface mechanical of transparent sand concrete influenced by temperature [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(4): 632-638. (in Chinese)
- [6] GUZMAN I L, ISKANDER M, SUESCUN-FLOREZ E, et al. A transparent aqueous-saturated sand surrogate for use in physical modeling [J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(2): 187-206.
- [7] 孔纲强, 孙学谨, 肖扬, 等. 透明土与标准砂压缩变形特性对比试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1895-1903.
- KONG G Q, SUN X J, XIAO Y, et al. Comparative experiments on compressive deformation properties of transparent soil and standard sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1895-1903. (in Chinese)
- [8] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(6): 1140-1146.
- KONG G Q, LIU L, LIU H L, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(6): 1140-1146. (in Chinese)
- [9] 孔纲强, 孙学谨, 李辉, 等. 孔隙液体对玻璃砂透明土强度特性影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(2): 377-384.
- KONG G Q, SUN X J, LI H, et al. Effect of pore fluid on strength properties of transparent soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 377-384. (in Chinese)
- [10] 魏静, 鲍宁, 魏平, 等. 透明砂土力学性质三轴试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2018, 35(11): 14-19.
- WEI J, BAO N, WEI P, et al. Research on the mechanical properties of transparent sand based on triaxial test [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2018, 35(11): 14-19. (in Chinese)
- [11] SIEMENS G A, MUMFORD K G, KUCHARCZUK D. Characterization of transparent soil for use in heat transport experiments [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 20140218.
- [12] 孔纲强, 李辉, 王忠涛, 等. 透明砂土与天然砂土动力特性对比 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(6): 1935-1940, 1947.
- KONG G Q, LI H, WANG Z T, et al. Comparison of dynamic properties between transparent sand and natural sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(6): 1935-1940, 1947. (in Chinese)
- [13] 周东, 刘汉龙, 仇文岗, 等. 被动桩侧土体位移场的透明土模型试验 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2686-2694.
- ZHOU D, LIU H L, ZHANG W G, et al. Transparent soil model test on the displacement field of soil around single passive pile [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(7): 2686-2694. (in Chinese)
- [14] 刘汉龙, 钟海怡, 顾鑫, 等. 平行隧道开挖引起场地沉降的透明土模型试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(1): 1-10.
- LIU H L, ZHONG H Y, GU X, et al. Transparent soil model testing on ground settlement induced by parallel tunnels excavation [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(1): 1-10. (in Chinese)
- [15] 孟震, 王浩, 杨文俊. 无黏性泥沙休止角与表层沙摩擦角试验[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2015, 48(11): 1014-1022.
- MENG Z, WANG H, YANG W J. Experiment on angle of repose and angle of surface friction of cohesionless sediment [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015, 48(11): 1014-1022. (in Chinese)
- [16] 金宗川. 钙质砂的休止角研究与工程应用[J]. *岩土力学*, 2018, 39(7): 2583-2590.
- JIN Z C. Study of natural repose angle of calcareous sand and engineering application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2583-2590. (in Chinese)
- [17] 薛伟, 雷雪婷, 俞冰, 等. 新型 PS 模型沙特性研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6): 659-663.
- XUE W, LEI X T, YU B, et al. Characteristics of novel artificial sediment (PS) [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(6): 659-663. (in Chinese)
- [18] 王兴奎. *河流动力学基础*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- WANG X K. *Fundamental River Mechanics* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2002. (in Chinese)
- [19] 黄岁梁, 陈稚聪, 府仁寿, 等. 模型沙性质研究现状综述[J]. *长江科学院院报*, 1995, 12(2): 14-22.
- HUANG S L, CHEN Z C, FU R S, et al. Review of

- present research situation on characteristics of model sand [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1995, 12(2): 14-22. (in Chinese)
- [20] 宋东升, 李国斌, 许慧, 等. 竹粉模型沙特性试验研究 [J]. 泥沙研究, 2014(1): 27-32.
SONG D S, LI G B, XU H, et al. Experimental research on characteristics of bamboo powder model sediment [J]. Journal of Sediment Research, 2014(1): 27-32. (in Chinese)
- [21] 张幸农, 唐存本. 新型 BZY 模型沙的研制及其特性试验研究 [J]. 泥沙研究, 1995(1): 40-47.
ZHANG X N, TANG C B. Development and experiment of a new model sand BZY particles [J]. Journal of Sediment Research, 1995(1): 40-47. (in Chinese)
- [22] 牟明艳. 明渠非恒定流摩阻流速与平均流速相互关系初探 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
MOU M Y. Primary exploration for the relationship between friction velocity and average flow velocity of unsteady flow in open channel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [23] 王延贵, 胡春宏, 朱毕生. 模型沙起动流速公式的研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(5): 518-523.
WANG Y G, HU C H, ZHU B S. Study on formula of incipient velocity of sediment in model test [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 518-523. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)