

· 地基与基础 ·

天津港区硬质黏土切削过程的有限元模拟^{*}苏召斌^{1,2}, 陈九肖¹

(1. 中交天津航道有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要:硬质黏土的挖掘存在效率低的问题,需要研究该种土质的切削机理。利用数值模拟技术,建立刀齿切削硬质黏土的三维分析模型。土体的本构模型采用非线性弹塑性模型,应用单元损伤失效准则模拟硬质黏土的切屑,并基于显式积分算法实现了硬质黏土全物理过程的数值仿真,分析不同时刻的土体变形状态,得到刀齿的切削荷载。结果表明,对于所选定的硬质黏土参数,切削厚度分别为50、100和150mm时,数值模拟与切削试验的误差分别为27%、9%和5%。考虑到土体的不均匀性,建议用数值模拟结果的切削力峰值表达切削荷载。

关键词:疏浚;黏土;切削;数值模拟

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0173-06

Finite element simulation for cutting process of hard clay in Tianjin Port area

SU Zhao-bin^{1,2}, CHEN Jiu-xiao¹

(1.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2.Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: Aiming at the problem of the low efficiency of hard clay excavation, it is necessary to study the cutting mechanism of the clay. By using the method of numerical simulation, we establish the 3D model of cutting hard clay by cutter tooth, build the soil constitutive model by the nonlinear elastoplastic model, realize the numerical simulation of hard clay physical process based on the explicit integral algorithm and chip simulation unit damage failure criterion of hard clay, analyze the status of soil deformation in different times, and obtain the cutting force of the tooth. The results show that as the selected hard clay parameters, when the selected cutting thicknesses are 50mm, 100mm and 150mm, the errors of numerical simulation and cutting experiment are 27%, 9% and 5% respectively. Considering the inhomogeneity of soil, it is suggested to express the cutting load with the peak value of cutting force obtained from numerical simulation.

Keywords: dredging; clay; cutting; numerical simulation

在中国沿海港口-25~-20m深的施工土质中,硬质黏土普遍存在^[1-4],以耙吸挖泥船为代表的疏浚船舶在挖掘过程中存在生产效率低的问题。黏土是一种细粒土,塑性是表征其物理性能的重要特征,用塑性指数表示,当塑性指数大于17时称之为黏土^[5]。黏土的塑性指数越大,表明土颗粒越细、比表面积越大、黏粒含量越高。黏土的

软硬程度用液性指数表示,液性指数越大,土质越软,反之亦然。根据液性指数大小,土的状态依次为流动、软塑、可塑、硬塑和坚硬,其中液性指数小于0时为坚硬状态,液性指数在0~0.25时为硬塑状态^[6]。疏浚工程中的硬质黏土可以表示为“硬塑或坚硬的黏土”,即塑性指数大于17,液性指数小于0.25。

收稿日期: 2021-03-01

*基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0805308);中国交通建设集团项目(2013-ZJKJ-15)

作者简介:苏召斌(1986—),男,硕士,高级工程师,从事疏浚工程施工装备理论研究和设计开发。

在疏浚技术领域, Miedema^[7-9] 对水下密实砂土进行多年的研究, 提出二维切削模型, 对于黏土的切削考虑了黏附力、内摩擦角、黏聚力等参数。对于较硬的岩石, Nishimatsu 等^[10] 提出切削模型, 有一定的借鉴价值; Yilmaz 等^[11] 利用多元线性回归分析预测高强度岩石中钻头径向切削力。而唐立志^[12] 制备了不同土体配比的硬质黏土, 得到不同抗剪强度的试验土, 围绕高压淹没射流对破土影响, 开展相关的试验研究。土质软硬、切削参数和刀齿形状都是影响刀齿切削荷载的重要因素, 其中土体的直剪试验和三轴剪切试验能够得到土体的一些土质参数, 天津市疏浚工程技术企业重点实验室开展了一系列硬质黏土的内剪切试验^[13], 研究不同切削参数对切削荷载的影响, 还进行二维和三维切削的对比。然而, 室内切削试验中制备的试验土质和现场土质不能完全一致, 尤其是对含水量参数的控制需要耗费大量的时间。

随着数值模拟技术的发展, 应用计算机可以模拟各种土质的切削过程, 难点是如何得到准确的土质本构模型, 通过静力分析方法能够得到切削刃附近的土体应力变化^[14]。上海交通大学等^[15]、天津大学等^[16-17] 使用有限元方法实现了岩土切削过程的动态模拟。天津大学等^[18-19] 分别采用离散元和有限元分析方法实现了绞刀破岩的动态切削过程, 其中有限元方法采用 Drucker-Prager 屈服准则模拟岩石的弹塑性本构关系。研究硬质黏土切削机理需要对多种工况下的剪切试验结果进行分析和比较, 利用数值模拟技术指导或代替部分实际试验, 节省时间和费用, 推动研究进度。利用有限元技术研究不同参数下的硬质黏土的切削荷载, 掌握不同参数下硬质黏土的切削机理, 有利于提高疏浚挖掘机具(主要是绞刀和耙头)的研发水平。

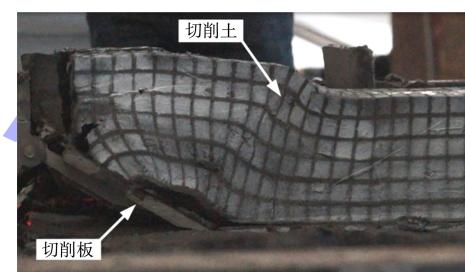
1 室内切削试验

进行多组次的硬质黏土室内切削试验, 如图 1 所示。试验过程包括切削刀齿(切削板)和模型土(切削土)制作, 切削设备包括数据采集系统和数

据分析系统。试验中进行了不同切削深度、切削角度、切削宽度等试验, 其中切削深度分别为 50、100 和 150 mm。



a) 三维切削试验



b) 二维切削试验

图 1 硬质黏土室内切削试验

刀齿的材料为 Q345 钢, 弹性模量 $E = 208 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$ 。土体取自天津港地区的硬质黏土, 主要参数为: 弹性模量 $E = 11.088 \text{ MPa}$, 密度 $\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$, 泊松比 $\nu = 0.19$, 液限为 44.4%, 塑限为 23.9%, 按照直剪试验测得的黏聚力 $c = 8.0 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 2.9^\circ$, 黏附力 $A = 8.1 \text{ kPa}$, 无侧限抗压强度 $q_u = 16.6 \text{ kPa}$ 。试验切削速度为 0.03 m/s, 切削时间为 40 s。

2 有限元仿真模型

2.1 模型简介

根据 Miedema 的二维切削模型建立硬质黏土切削模型, 如图 2 所示。在刀齿与硬质黏土接触的下侧和两侧, 考虑因硬质黏土的黏聚力而产生的破坏, A 为下侧破坏区域, B 和 C 分别为两侧破坏区域。刀齿与切削平面呈一定的角度, 称为切削角。随着刀齿沿着切削速度方向不断运动, 土体被逐渐破坏。

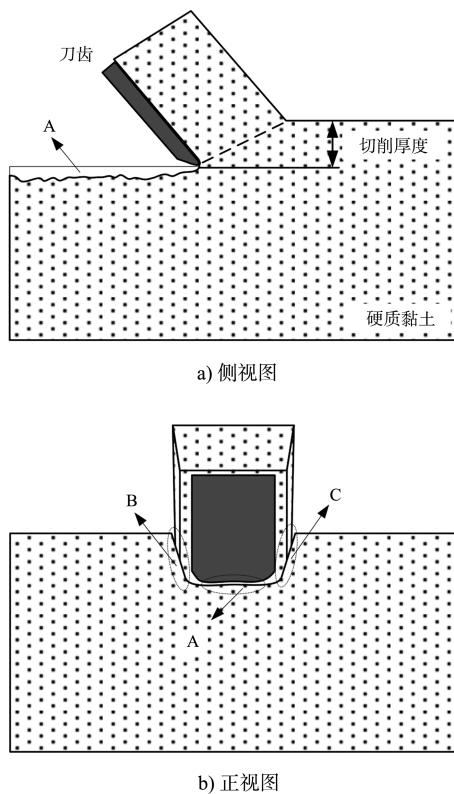


图2 硬质黏土切削模型

在有限元模型建立过程中, 假定初始时刻刀齿与土体接触。试验刀齿的长度为350 mm、厚30 mm, 切削角度为45°, 网格数为103。试验土体的尺寸为1 200 mm×1 000 mm×1 500 mm(长×宽×高), 网格数为6万个。鉴于研究的是硬质黏土的切削问题, 对模型进行适当的简化, 施加的荷载和边界条件为: 1) 整个仿真过程中将刀齿的速度设为0.03 m/s; 2) 约束土体的边界自由度, 硬质黏土的上表面设置为自由表面; 3) 利用接触模拟刀齿和土体之间的相互作用。

2.2 土体模型

土体材料特性对刀齿的荷载分布产生显著的影响, 因此土体模型的选择尤为重要。需要模拟实际的硬质黏土的特性, 采用与之对应的本构关系。Drucker-Prager模型(简称DP模型)通常用来模拟土体, DP模型具有非线性弹塑性本构关系^[20]:

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

式中: F 为屈服面函数; t 为偏应力参数; p 为平均应力, 又称为等效压应力; β 为屈服面在 $p-t$ 应力空间上的倾角, 与摩擦角有关; d 为屈服面在

$p-t$ 应力空间上 t 轴上的截距, 其值与硬化参数有关, 当硬化参数由剪切因素控制时, 有:

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \tau (1 + \frac{1}{k}) \quad (2)$$

式中: τ 为剪切强度; k 为塑性参数, 在三维问题中可表示为:

$$k = \frac{3 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi} \quad (3)$$

式中: φ 为内摩擦角, 本文硬质黏土的 $\varphi < 22^\circ$ 按式(3)计算, 当 $\varphi > 22^\circ$ 时, 应取 $k = 0.778$, 但是可能带来较大误差。

式(1)中偏应力参数 t 可表示为:

$$t = \frac{q}{2} \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (4)$$

式中: q 为偏应力; r 为第三应力不变量, 表示为3个主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 的代数积。

线性DP模型的屈服面如图3所示。DP模型不仅在屈服准则中引入了中间主应力对材料屈服面的影响, 同时考虑了静水压力对材料屈服面的影响。在主应空间中, DP屈服面是一个以空间对角线为轴的圆锥面, 不同的 k 值在 π 平面上形状不同, 当 $k=1$ 时, π 平面为圆形(图3中点划线)。不同的中主应力对屈服面的影响不同, 硬化规律反映了屈服面大小的变化。

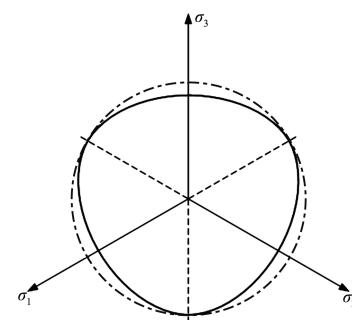


图3 线性DP模型的屈服面

DP屈服准则克服了Mohr-Coulomb模型(简称MC模型)应用于数值计算时收敛困难的缺陷, 并且通过选择适当的材料参数可以与MC模型相匹配, 因此使用DP模型对天津港原状土进行材料分析。

2.3 材料损伤准则

有限元方法中对材料的断裂损伤的模拟是通

过单元失效删除功能实现的，材料损伤失效过程就是由材料刚度逐渐减弱而引起的材料承担荷载能力完全丧失的过程。

材料刚度减弱的过程采用损伤力学建模。材料变形的初始阶段是线弹性变形，之后进入塑性屈服阶段，到达某塑性点后，材料的承载能力显著下降直到断裂。初始定义状态变量 ω_s 和损伤因子 D ，当材料处于弹塑性变形阶段，达到强度极限后，由单元积分点的等效塑性应变建立初始损伤准则(即损伤开始的标准)，当 ω_s 达到 1 时，损伤开始，即达到初始破坏点。材料达到初始破坏点后刚度开始衰减直至丧失承载能力，损伤演变规律描述了材料刚度衰减规律。当 $D=1$ 时，材料完全失去承载能力。硬质黏土损伤开始后任意时刻的实际应力张量 σ 与不考虑损伤下的应力张量 $\bar{\sigma}$ 的关系为：

$$\sigma = (1-D)\bar{\sigma} \quad (5)$$

在硬质黏土的切削过程中，土体经历了弹性变形、塑性屈服以及断裂损伤 3 个阶段。土体从屈服到断裂损伤破坏是一个连续的过程，传统的数值模拟研究中对土体损伤破坏的处理一般认为达到屈服即损伤破坏，而忽略了切屑形成到分离这一过程。本次模拟采用包含单元删除功能的损伤失效模型描述材料从屈服发展到破坏的响应过程，从而完整地模拟切削过程。

3 数值模拟结果

刀齿的切削厚度为 50、100 和 150 mm，切削角为 45°，切削速度为 0.03 m/s，共进行 40 s 计算，然后确定刀齿与硬质黏土的边界条件，进行切削计算。

硬质黏土切削中期如图 4 所示。刀齿的齿刃部分进入土体内部，逐渐形成黏土切槽，切槽上方的硬质黏土被逐步抬高，进而形成黏土碎块。在切槽上部的黏土被切除而离开本体，被切除的土块呈粘连状态，和实验室内试验状态一致。在切槽的两侧能够看到明显的应力过渡区域，这部分土体已经被刀齿的切削过程所影响，其内部结

构也产生细微的裂纹或损伤。最终切槽基本呈较为平直的棱槽结构，这种现象和实验室的试验结果基本一致。

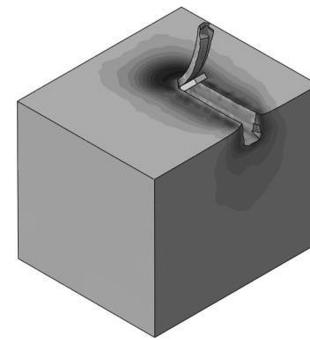


图 4 硬质黏土切削中期

切削层厚度为 50 mm 时，计算结果如图 5 所示。在试验开始阶段，切削荷载急剧增大，约 1 kN，到达 8 s 左右时刀齿完全切入土中，荷载趋于稳定。到第 28 s 时，荷载达到一个峰值，其原因是刀齿靠近平台后端而减速直到切削停止所致。在数值模拟的 0~5 s，荷载增大，随后进入到稳定切削阶段，大约持续 30 s，然后荷载逐步降低。在切削的中期，计算波动趋于稳定，土的本构参数稳定，而试验黏土具有较大的不均匀性所致。经过计算，10~20 s 内切削试验的水平荷载平均值为 0.611 kN，仿真试验的水平荷载的平均值为 0.776 kN。仿真计算值稍大，约是试验值的 1.27 倍。对于硬质黏土的不均匀性来讲，这种误差基本满足生产实践的需求。

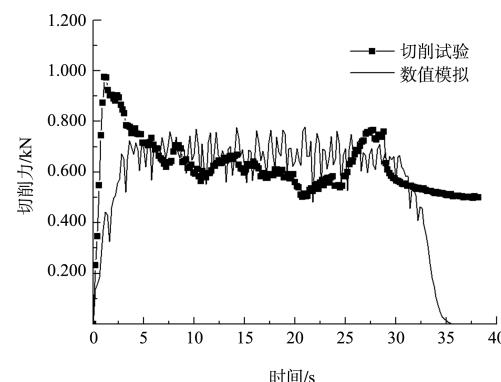


图 5 切削厚度 50 mm 时计算结果对比

切削层厚度为 100 mm 时，计算结果如图 6 所示。在开始阶段，切削荷载急剧增大，约 2.3 kN。

当刀齿完全切入土中, 荷载趋于稳定。但是在接近25 s时, 刀齿荷载又突然增加, 猜测其与土质的不均匀性有关, 例如土体裂隙和软硬不均匀等。到第25 s时, 荷载达到一个峰值, 然后突然降低, 其原因是刀齿靠近平台后端而减速直到切削停止所致。在数值模拟的0~5 s, 切削荷载增大, 随后进入到稳定切削阶段, 大约持续10 s后, 荷载逐步降低。经过计算, 在10~20 s, 切削试验的水平荷载的平均值为1.898 kN, 仿真试验的水平荷载的平均值为1.735 kN。从图中的数据对比可看出, 仿真数据的峰值和试验数值十分接近, 仿真计算的值稍偏小, 误差约为9%。

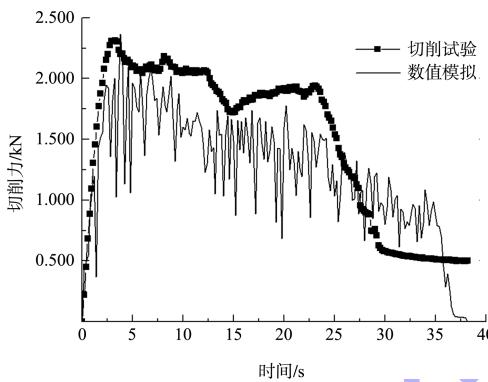


图6 切削厚度100 mm时计算结果对比

仿真数据基于一个绝对均匀的土质参数, 而试验土仅是一个相对均匀的土质参数。从试验过程中可以发现, 土质粗细不均, 裂隙十分随机。其次, 选择计算的数据来自于试件的土工试验, 试件和切削的土质本身也具有一定的偏差。综上所述, 在切削厚度100 mm时, 仿真数据和试验数据比较吻合。

切削层厚度为150 mm时, 计算结果如图7所示。在开始阶段, 切削荷载急剧增大, 约2.7 kN。当刀齿完全切入土中, 荷载趋于稳定。到第20 s时, 荷载达到一个峰值, 该峰值是刀齿遇到比较硬的土块所致。然后切削荷载逐渐降低, 其原因是刀齿靠近平台后端而减速直到切削停止所致。在数值模拟的0~5 s, 荷载增大, 10 s后进入稳定切削阶段, 大约持续30 s, 切削荷载逐步降低, 在第37 s时, 切削荷载为0 kN, 此时完成了整个切削过程。以10~20 s的数据来看, 切削试验的

平均值为2.984 kN, 数值模拟的峰值为2.834 kN。仿真计算值偏小, 误差约为5%。

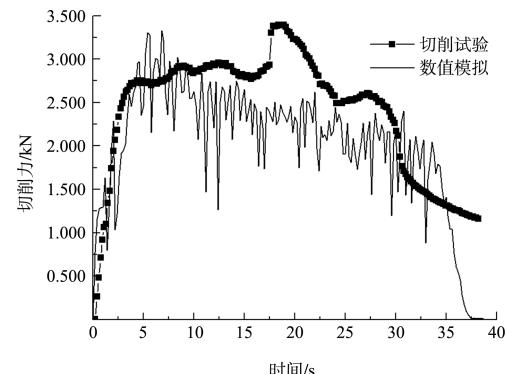


图7 切削厚度150 mm时计算结果对比

4 结论

1) 本文采用单元损伤失效方法模拟硬质黏土的切屑形成和分离, 描述土体与刀齿开始接触到被完全切削下来的连续过程, 实现了天津港地区的硬质黏土刀齿切削的数值模拟。

2) 刀齿在切削硬质黏土的过程中, 切削初期切削力增长迅速, 到达切削前期或中期时, 切削力维持一个比较平稳的阶段, 到达切削后期时, 切削力急剧下降到0, 能够分辨出切削过程的各个时期的力学状态。

3) 数值模拟结果和室内试验的数据比较接近, 验证了数值模拟方法研究硬质黏土切削的可行性, 考虑到土体的不均匀性, 建议用数值模拟结果的切削力峰值表达切削荷载。切削深度越大, 数值模拟与切削试验的误差越小。

4) 刀齿对硬质黏土的切削是一个复杂的过程, 在数值仿真方面还有许多问题亟待解决。本文采用的损伤失效模型初步实现了刀齿切削硬质黏土的过程, 同时得到一系列有效的信息, 下一步将在现有的基础上对模型细化, 分析更多参数对刀齿切削的影响。

参考文献:

- [1] 吴超, 郑祥民, 王辉, 等. 长江三角洲第一硬质黏土层粒度多元统计分析及沉积环境判别[J]. 沉积学报, 2019, 37(1): 115-123.
- [2] 刘锐, 郑洪波. 杭州湾地区末次冰盛期第一硬质黏土层

- 粒度特征及其环境意义[J].海洋地质与第四纪地质, 2006(6): 27-34.
- [3] 赵梅.黄海中部海岸末次冰盛期第1硬质黏土层的粒度分维特征及其环境意义[J].海洋地质动态, 2008(10): 8-13, 28.
- [4] 刘东义, 韩鎏, 郑骥飞, 等.淄博盆地 A 层硬质黏土-铝土矿床地质特征及分布规律[J].山东国土资源, 2020, 36(10): 22-27.
- [5] 建设部综合勘察研究设计院.岩土工程勘察规范: GB 50021—2001(2009 年版)[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [6] 天津航道局.疏浚工程技术规范: JTJ 319—1999[S].北京: 人民交通出版社, 1999.
- [7] MIEDEMA S A. Calculation of the cutting forces when cutting water saturated sand [D]. Delft: Delft University of Technology, 1987.
- [8] MIEDEMA S A. The cutting forces in saturated sand of a seagoing cutter suction dredger [C]//The Western Dredging Association . Proceeding of WODCON XII. Orlando: WEDA, 1989: 1-35.
- [9] MIEDEMA S A. The cutting mechanisms of water saturated sand at small and large cutting angles [C]//The Central Dredging Association. International Conference on Coastal Infrastructure Development- Challenges in the 21st Century. Delft: CEDA, 2004: 1-13.
- [10] NISHIMATSU Y. The mechanics of rock cutting[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1972, 9(2): 261-270.
- [11] YILMAZ N G, YURDAKUL M, GOKTAN R M. Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2007, 44 (6): 962-970.
- [12] 唐立志.适用于硬质黏土的淹没射流物理模型[J].油气储运, 2016, 35(4): 432-438.
- [13] 李章超, 张更生, 肖博.单耙齿切削黏土机理试验研究[J].水运工程, 2020(S1): 85-90.
- [14] 杨桢毅, 朱汉华, 范世东, 等.基于二维切削理论的绞刀刀臂载荷分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 36(5): 1040-1043.
- [15] 沈建奇, 金先龙, 杨建刚, 等.盾构机刀盘掘削动态数值模拟[J].上海交通大学学报, 2009, 43 (6): 1017-1020.
- [16] 苏翠侠, 王燕群, 蔡宗熙, 等.盾构刀盘掘进载荷的数值模拟[J].天津大学学报, 2011, 44(6): 522-528.
- [17] 韩美东, 曲传咏, 蔡宗熙, 等.刀盘掘进过程动态仿真[J].哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(8): 1098-1102.
- [18] 田蓝, 蔡宗熙, 张凌博, 等.挖泥船绞刀挖岩的离散单元法数值模拟[J].机械科学与技术, 2019, 38 (12): 1805-1811.
- [19] 张凌博, 蔡宗熙, 李瑞祥, 等.挖泥船绞刀挖岩过程的数值模拟[J].哈尔滨工程大学学报, 2018, 39 (2): 371-376.
- [20] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M].北京: 中国水利水电出版社, 2013.

(本文编辑 王璁)

(上接第 172 页)

- [5] 戴振华, 黄可璠.三角闸门设计与改进[J].中国水运(下半月), 2017, 17(4): 89-90.
- [6] 徐泽中, 魏震木, 王炳华, 等.关于三角闸门结构设计的商榷[J].水运工程, 1986(5): 18-23.
- [7] 李玲君, 陈璐.BIM 技术在船闸三角闸门设计中的应用[J].水运工程, 2019(6): 147-151.
- [8] 武婕, 吴国松.关于 BIM 对促进水运行业发展的进一步思考[J].中国水运(下半月), 2014, 14(6): 80-81.
- [9] 张建平.BIM 技术的研究与应用[J].施工技术, 2011(1): 15-18.
- [10] 王占芳.谈 BIM 技术的发展和应用[J].山西建筑,

2013, 39(15): 8-9.

- [11] 任国辛, 王福成, 范健雄, 等.BIM 技术在土木工程中的应用[J].山东工业技术, 2016(23): 94-95.
- [12] 何关培, 李刚.那个叫 BIM 的东西究竟是什么[M].北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] 张江波.BIM 的应用现状与发展趋势[J].创新科技, 2016(1): 83-86.
- [14] 陶书东, 李树海, 刘成鑫, 等.大型船闸金属结构 BIM 技术的应用[J].水运工程, 2018(1): 123-128.

(本文编辑 郭雪珍)