



泥岩颗粒含量对砂泥岩混合料剪切特性的影响

李顺¹, 吴晓^{1,2}

(1. 安徽省城建设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230051; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 砂泥岩混合料抗剪特性是影响山区港口工程地基处理的因素。采用直剪仪对不同泥岩颗粒含量、法向应力和含水状态的48组试样进行固结排水慢剪试验, 分析泥岩颗粒含量对剪应力-位移曲线形态的影响, 揭示其与变形、强度间的关系, 并建立抗剪强度的经验计算方法。结果表明, 颗粒间接触分为同质颗粒接触和异质颗粒接触两类, 在应力集中效应下泥岩颗粒破碎是影响砂泥岩混合料强度及变形的重要因素。砂泥岩混合料应力-应变曲线呈应变硬化, 其抗剪强度随泥岩颗粒含量增大而减小。

关键词: 泥岩颗粒含量; 砂泥岩混合料; 剪切特性; 颗粒接触

中图分类号: TV 41; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0192-06

Influence of mudstone particle content on shear characteristics of sandstone-mudstone particle mixture

LI Shun¹, WU Xiao^{1,2}

(1. Anhui Urban Construction Design Institute Co., Ltd., Hefei 230051, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The shear resistance of sandstone-mudstone particle mixture is an influence factor for the foundation treatment of port engineering in mountainous areas. We carry out the direct shearing tests of consolidation drainage to 48 groups of samples with different mudstone particle contents, normal stresses and water bearing states by the direct shear apparatus, analyze the effect of different mudstone particle contents on the form of shear stress displacement-curves, reveal the relationship between deformation and strength, and establish the empirical calculation method of shear strength. The results show that the particle contact can be divided into homogeneous particle contact and heterogeneous particle contact. Under the effect of stress concentration, mudstone particle breakage is an important factor affecting strength and deformation of sandstone-mudstone particle mixture. The stress-strain curve of sandstone-mudstone particle mixture is mainly strain hardening, and its shear strength decreases with the increase of mudstone particle content.

Keywords: mudstone particle content; sandstone-mudstone particle mixture; shear characteristics; particle contact

三峡水利枢纽的建成进一步推进西南水运行业的发展, 山区内河港口码头建设成为提升长江上游黄金水道航运能力的重要环节。受水文与地质条件的限制, 许多内河码头面临场址空间狭长、

堆场使用面积不足与岸坡地形陡峭等难题, 陆侧岸坡开挖与临水侧回填相结合是港口、道路与城镇等山区涉河工程建设的重要措施, 如重庆港、果园港、水富港、万州港等^[1]。三峡库区地层大

多为三叠系互层状砂岩与泥岩，砂岩破碎料中难免混有泥岩颗粒，若将其完全筛出，将增加施工难度与建设成本；属软岩类的泥岩颗粒物理力学性质较差，泥岩颗粒含量 C_{MP} 是影响港区回填料工程性质的重要因素。

回填料强度往往是港口工程地基设计中最为重要且直观的指标，研究人员针对含软岩料土体强度的规律、机理与计算理论进行了大量研究，如刘明维等^[2]指出高桩码头港口桩基弯矩与变形分布规律受回填土强度影响显著，须提高深厚回填区填料的抗剪强度。不同性质颗粒组成的混合土物理力学性质往往不同于单一颗粒土体，存在变异性，如 Fakharian 等^[3]根橡胶与砂颗粒混合土剪切试验发现橡胶颗粒降低了土体剪切模量与强度，回填区应合理使用这类材料；冯德銮等^[4]认为采用直剪试验进行多相复合土体抗剪强度试验时可能存在相间界面主次作用力问题，黏聚效应和摩擦效应对其宏观强度与变形存在重要影响。软岩填料与硬岩料在力学性质存在显著差别，但混合后的工程力学性质因两者相对含量不同而存在差异性，Wang 等^[5]研究颗粒级配对砂泥岩混合料剪切强度影响，指出细粒含量是控制因素；梁越等^[6]利用压缩固结仪进行砂泥岩混合料单向压缩与渗流耦合分析，认为土体压缩性随 C_{MP} 增加而增大；王俊杰等^[7]指出同级配砂泥岩混合料的压缩与回弹指标随 C_{MP} 而呈相反的变化趋势，凌华等^[8]指出细粒含量影响粗粒土强度特性，含泥与不含泥时的内摩擦角呈相反的变化规律。因区域性地质构造和工程面临实际问题不同，当前针对软硬岩相对含量的研究角度还有待深入。Mohr-Coulomb 强度准则因原理简单、参数物理意义明确而被广泛应用于岩土工程科研与设计领域，室内直剪试验是一种简便有效地测定土体强度及其指标的手段。因此，采用直剪试验研究不同 C_{MP} 条件下砂泥岩混合料变形与强度的变化规律，提出微观颗粒间接触模型解析软硬岩混合填料变形与强度演化机制，为拓展砂泥岩混合料在山区港口建设中的广泛使用提供参考，以保障涉河工程建设

的安全性。

1 室内试验设计

重庆某港口岸坡互层的砂岩与泥岩地层为三叠系上统须家河组，钻取微风化岩芯并通过岩石室内试验测定，其力学参数见表 1^[9]。取大块开挖料进行室内机械破碎、初次筛分、恒温 110 °C 烘干与二次振动筛分，得到不同粒组的砂岩和泥岩颗粒。按同一年级配曲线配制不同 C_{MP} 的砂泥岩混合料土样，其级配曲线见图 1，经计算，分布曲线中累计分布 10%、20%、…、60% 时最大颗粒的等效直径 d_{10} 、 d_{20} 、…、 d_{60} 分别为 0.14、0.30、0.43、0.74、0.95 mm；土体不均匀系数 C_u 为 6.71、曲率系数 C_c 为 1.40，为级配连续且均匀的砂。

表 1 砂岩与泥岩参数

名称	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
砂岩	11.79	0.28	67.61	16.70	43.52
泥岩	3.72	0.31	22.19	5.17	39.96

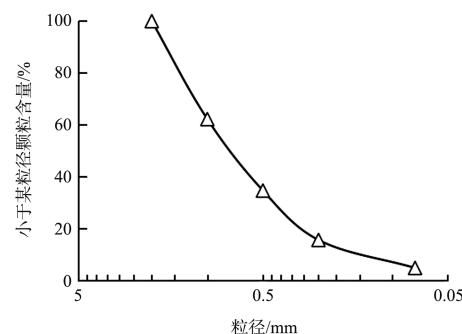


图 1 粒径级配曲线

结合砂泥岩混合料现场填筑高度与应力状态，采用 DZ-4 型应变控制式直剪仪进行固结排水慢剪试验，剪切速率为 0.8 mm/min，以剪切位移达到 6.0 mm 作为单次试验结束的控制标准。砂泥岩混合料初始干密度为 1.80 t/m³，采用直径 61.80 mm、高 20 mm 的环刀在模具内切样来制备试样；设定法向荷载 σ_n 为 100、200、300 及 400 kPa 共 4 种应力水平， C_{MP} 为 0、20%、40%、60%、80% 及 100% 共 5 种工况，8%（最优含水率）与 17%（饱和含水率）2 种含水量状态，共计 48 组试验，试验方案见表 2。

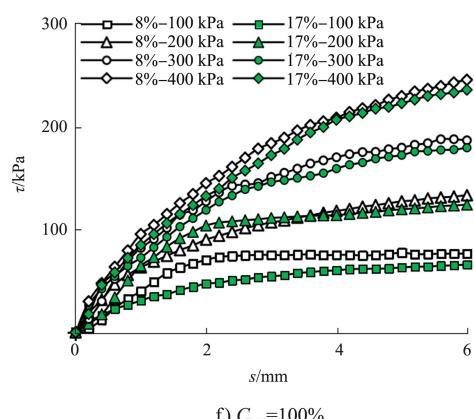
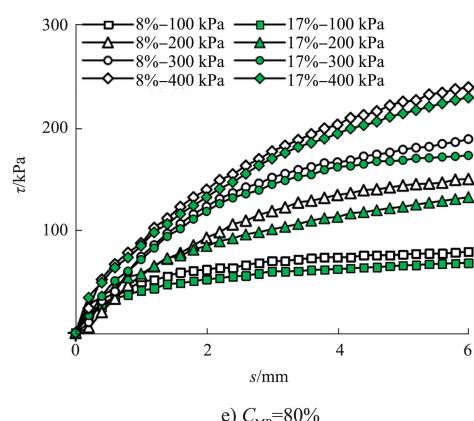
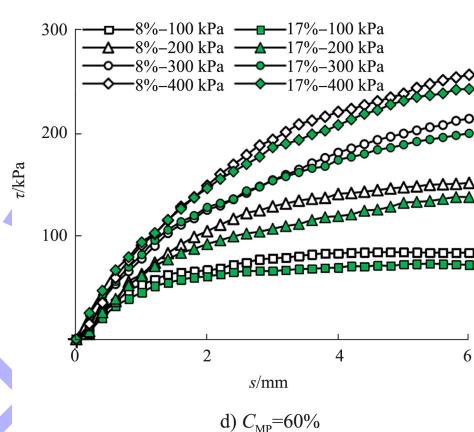
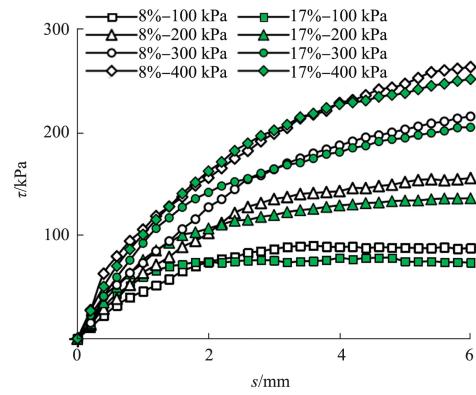
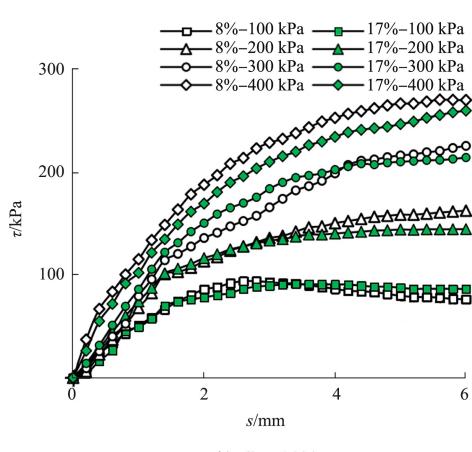
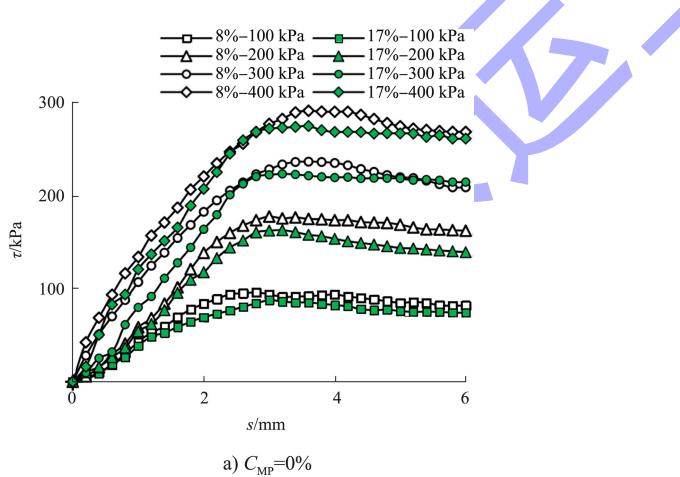
表 2 直剪试验方案

编号	C_{MP} / %	σ_n / kPa	成分
1	0	100、200、300、400	砂岩颗粒料
2	20	100、200、300、400	
3	40	100、200、300、400	砂泥岩
4	60	100、200、300、400	混合料
5	80	100、200、300、400	
6	100	100、200、300、400	泥岩颗粒料

2 试验结果分析

2.1 应力位移曲线

在同一坐标系绘制不同 C_{MP} 时砂泥岩混合料剪应力 τ 随剪切位移 s 的变化曲线, 见图 2。在图 2a) 与 f) 中, 砂岩颗粒料 $\tau-s$ 曲线以应变软化为主, 泥岩颗粒料 $\tau-s$ 曲线以应变硬化为主; 除图 2a) 与 f) 外, 不同 C_{MP} 时, 砂泥岩混合料 $\tau-s$ 曲线多数以应变硬化为主, 部分曲线在较低应力状态下存在应变软化状态, 如 $\sigma_n = 100$ kPa、 C_{MP} 为 20% 或 40% 时。

图 2 不同 C_{MP} 时 $\tau-s$ 曲线

由图 2 可知, 是否含有泥岩颗粒对砂岩颗粒料 τ - s 曲线形态影响显著, 砂泥岩混合料曲线形态与泥岩颗粒料存在相似性; 另外, 含水率越高, τ - s 曲线越平滑, 应力跳跃现象的频次越低; σ_n 越大, 砂泥岩混合料剪应力越大, 初始段 τ - s 曲线斜率越陡。

2.2 抗剪强度特性

2.2.1 抗剪强度分析

根据室内试验成果, 工程应用时更为关注的是回填料强度及其指标的变化规律。根据规范, 土体 τ - s 曲线为应变软化时取峰值应力作为抗剪强度 τ_f , 取应变硬化时 s 为 6.0 mm 处的剪应力作为 τ_{fo} 。

结合图 2 的试验数据, 在同一坐标系绘制砂岩、泥岩与砂泥岩混合料的 τ_f 随 C_{MP} 变化曲线, 见图 3。可以看出, 当含水率为 8% 时, 相同 σ_n 的砂泥岩混合料 τ_f 随 C_{MP} 增大而减小, 但小于砂岩颗粒料, 且大于泥岩颗粒料; 在含水率为 17% 时, 相同 σ_n 的砂泥岩混合料 τ_f 随泥岩含量增加而减小, 但泥岩含量为 80% 时小于或接近纯泥岩颗粒料的 τ_{fo} 。

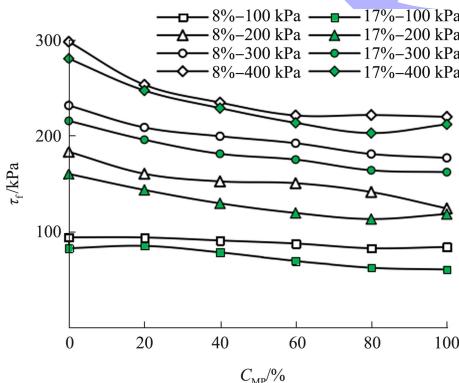


图 3 不同 σ_n 时 τ_f 随 C_{MP} 分布

2.2.2 抗剪强度指标分析

采用 Mohr-Coulomb 强度准则的式(1)整理图 3 的试验数据, 得到砂泥岩混合料抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随 C_{MP} 分布, 见图 4。可以看出, 在含水率为 8% 及 17% 条件下, 砂泥岩混合料 c 随 C_{MP} 增加呈先增大后减小的变化规律, 且含水率 8% 的 c 比 17% 时的更大; φ 随 C_{MP} 增加呈先减

小后稍增大的变化趋势, 当 $C_{MP} \geq 80\%$ 时, 含水率 17% 的 φ 比 8% 时的更大。采用二次函数分别拟合, 相关程度在 0.8 以上, 见式(2) (其中 $0 \leq C_{MP} \leq 100\%$)。将式(2)代入式(1)即可得到含水率为 8% 或 17% 条件下考虑泥岩颗粒含量影响的砂泥岩混合料抗剪强度计算方法。式(2)是在最大粒径为 2 mm 条件下的研究结果, 工程使用时应注意进行缩尺效应分析, 以便进一步明确式(2)的适用范围。

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

$$\begin{cases} c_1 = -59.60C_{MP}^2 + 57.55C_{MP} + 36.97 \quad (R^2 = 0.94) \\ c_2 = -33.06C_{MP}^2 + 19.10C_{MP} + 25.38 \quad (R^2 = 0.80) \\ \varphi_1 = 14.43C_{MP}^2 - 21.98C_{MP} + 32.68 \quad (R^2 = 0.93) \\ \varphi_2 = 18.15C_{MP}^2 - 24.57C_{MP} + 32.85 \quad (R^2 = 0.97) \end{cases} \quad (2)$$

式中: c_1 、 φ_1 分别为含水率 8% 时的黏聚力和内摩擦角; c_2 、 φ_2 分别为含水率 17% 时的黏聚力和内摩擦角。

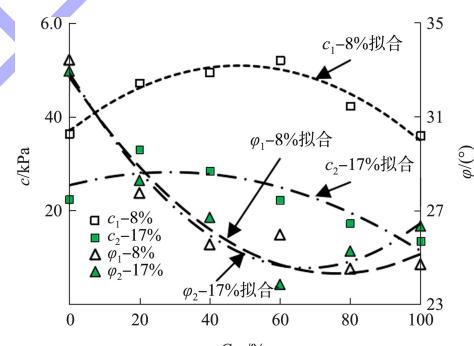


图 4 c 与 φ 随 C_{MP} 分布

3 讨论与分析

3.1 颗粒接触力学响应

从几何形态上点-点、点-面与面-面接触是大粒径颗粒间 3 种常见的接触形式^[10], 根据力的相互作用关系, 接触力学响应对颗粒的应力-应变影响相同, 如纯砂岩颗粒料与纯泥岩颗粒料。与砂岩颗粒相比, 泥岩颗粒强度刚度较低; 从接触颗粒岩性角度而言, 砂泥岩混合料颗粒间接触类型还可分为砂-砂、泥-泥和砂-泥这 3 类颗粒接触; 前两者合并概化同质颗粒接触, 后者为异质颗粒接触, 其力学机制响应见图 5, 其中①→②→③为同质颗粒接触力学响应(I型), ④→⑤→⑥为异质颗粒接触力学响应(II型)。

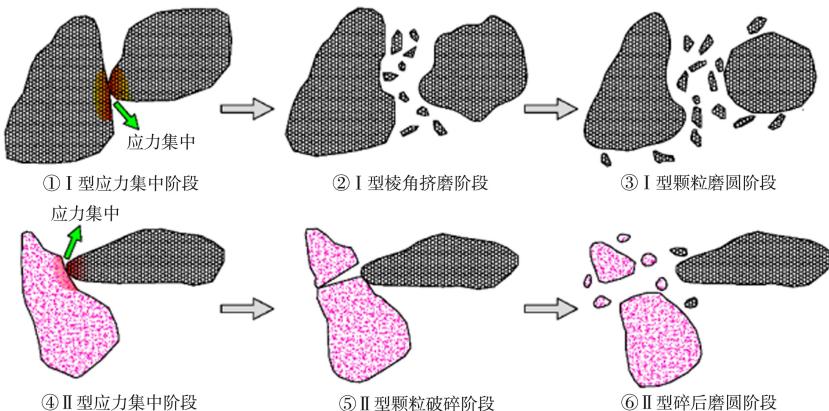


图 5 颗粒接触力学机制响应

在图 5 中, 同一外荷载作用下, 颗粒间接触部位存在应力集中现象, 即①与④阶段; 随着位移等边界条件的变化, 同质颗粒的粒间作用体现为以镶嵌等空间位置调整、粗面磨蚀或棱角挤碎等力学响应, 即②阶段; 因泥岩颗粒强度低于砂岩颗粒, 此时异质颗粒的粒间作用主要体现为泥岩颗粒的破碎效应, 即⑤阶段。若外部条件再次变化, 同质与异质颗粒棱角进一步磨灭, 周围产生更多细小颗粒, 土颗粒浑圆度减小, 即③和⑥阶段。

异质颗粒接触是影响砂泥岩混合料强度刚度变形的重要因素。除了颗粒间接触力学响应机制以外, 镶嵌、咬合、平移、旋转、翻越等颗粒间空间相对位置调整也是影响土体宏观强度与变形的重要因素。

3.2 土体剪切变形机制

用相同直径圆概化砂泥岩混合料, 阐释直剪试验条件下土体的剪切变形与强度的机制, 见图 6。对于同质颗粒构成的颗粒料, 根据孔隙均匀化理论, 在受荷初期颗粒以平移、转动等相对位置调整为主, 土体宏观变形主要源自孔隙变化, 法向应力越大, 位置调整难度越大, 在相同剪切位移时剪应力愈大; 当孔隙减小至临界状态时, 剪切位移主要是源自剪切面颗粒间翻滚、跨越等颗粒行为^[11]。由于砂岩颗粒强度显著大于泥岩颗粒, 且后者表面黏性大于前者, 在受同等大小的作用力时, 前者破碎效应显著小于后者, 这也是纯砂岩颗粒料表现为应变软化、泥岩颗粒表现为

应变硬化的根本原因(图 2)。

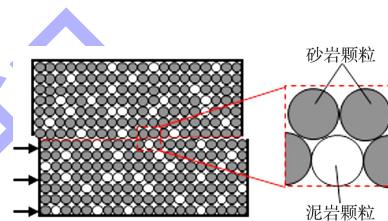


图 6 直剪试验中土体变形

对于砂泥岩颗粒混合料而言, 由于异质颗粒接触力学机制的原因, 在荷载作用下泥岩颗粒易发生周围应力集中效应, 导致宏观应力-变形曲线、强度特征有别于纯砂岩颗粒, 这与文献[8]的结论相似。泥岩颗粒含量较大时, 荷载主要由泥岩颗粒作为骨架来承担, 异质颗粒接触效应被弱化; 因此, 泥岩含量为 80% 时的抗剪强度小于或接近纯泥岩颗粒料。含水率较小时, 因砂岩颗粒强度大, 在相同荷载作用下砂泥岩混合料强度高于纯泥岩颗粒料; 含水量较大时, 因表面黏土矿物黏性而使得泥岩颗粒料在荷载作用下黏滑效应增大, 变形曲线平滑性增加(图 2), 少量的砂岩颗粒反而降低了宏观强度(图 3)。

4 结论

1)是否含有泥岩颗粒影响回填料应力-变形曲线的形态。砂岩颗粒料应力-变形曲线以应变软化为主, 砂泥岩混合料与泥岩颗粒料相似, 以应变硬化为主; 因表面黏土矿物黏性而使泥岩颗粒料在荷载作用下黏滑效应增大, 增加曲线平滑性。

2)砂泥岩混合料抗剪强度随泥岩颗粒含量的

增大而减小, 泥岩含量为 80% 时的抗剪强度小于或接近纯泥岩颗粒料; 据此建立了考虑泥岩颗粒含量影响的砂泥岩混合料抗剪强度计算方法, 即式(2)。

3)按岩性不同将砂泥岩混合料颗粒间接触概化同质颗粒接触和异质颗粒接触两类, 主要区别为后者在应力集中效应下低强度颗粒破碎效应。颗粒间空间相对位置调整和异质颗粒接触力学机制响应是影响砂泥岩混合料强度刚度变形的重要因素。

参考文献:

- [1] 王多垠, 兰超, 何光春, 等. 内河港口大直径嵌岩灌注桩横向承载性能室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1307-1313.
- [2] 刘明维, 李辉, 阿比尔的, 等. 深填斜坡中基桩受力变形规律[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 40-47.
- [3] FAKHARIAN K, AHMAD A. Effect of anisotropic consolidation and rubber content on dynamic parameters of granulated rubber-sand mixtures [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2020, 141: 1-14.

(上接第 126 页)

2) 增大沉石质量、增大沉石的几何尺寸、增加锚的辅助抓力、改变锚链的质量、减少浮标水线面面积等措施均可直接加强锚泊系统的稳定性。

3) 在锚链长度及锚泊系统稳定性分析中, 需要计算浮标所受的外力。目前风、流荷载的研究已经成熟, 但浮标在波浪作用下的运动不同于固定物体, 无法较为准确地用计算模型表达, 是一个有待研究和探讨的学术问题。

参考文献:

- [1] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司.“十四五”规划前期上海港辖区航标效能评估[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2019.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

- [4] 冯德銮, 房营光. 土体介质直剪力学特性颗粒尺度效应的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4307-4319.
- [5] WANG J J, GUO J J, BAI J P, et al. Shear strength of sandstone-mudstone particle mixture from direct shear test[J]. Environmental earth sciences, 2018, 77(12): 442-453.
- [6] 梁越, 卢孝志, 郝建云. 内河码头回填料压缩-渗流耦合特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 70-75, 81.
- [7] 王俊杰, 马伟, 梁越, 等. 钢板与砂泥岩混合填土接触面力学特性试验研究[J]. 水运工程, 2014(1): 182-187.
- [8] 凌华, 傅华, 韩华强. 粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 12-16.
- [9] 简富献, 张宏伟, 张钧堂, 等. 浸水时间对砂泥岩填料压缩特性影响试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 111-117.
- [10] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野: 宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 195-254.
- [11] 陆勇, 周国庆, 赖泽金. 砂土剪切特性的荷载与粒径效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 195-202.

(本文编辑 王璁)

- [3] The International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. The design of floating aid to navigation moorings: IALA recommendation 1066 [R]. Paris: IALA, 2010.
- [4] 张志江, 张蓓敏, 乐奇博, 等. 不同环境下灯浮标锚链的布放长度计算[J]. 水运管理, 2016, 38(3): 25-27.
- [5] 程鑫. 航标设标锚链长度的优化方法研究[J]. 水道港口, 2019, 40(2): 226-230.
- [6] 刘志强, 何家骏, 郭世健, 等. 深海工程船锚泊仿真系统[J]. 船舶工程, 2020, 42(2): 115-120.
- [7] 陈麒龙. 长江口深水航道灯浮标位置推算[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2020, 25(4): 272-278.
- [8] 杨玉祥, 赵智帮. 介绍悬链计算新方法及港口单锚泊稳定性分析[J]. 水运工程, 2005(1): 33-37.
- [9] 黄蕙, 白辅中. 水中浮体锚碇力比较研究[J]. 河海大学学报, 1998(2): 84-89.

(本文编辑 王璁)