

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.015

含水率波动状态下公明公路路基土劣化 微观机理与本构模型

李立宇¹, 陈远中¹, 徐思远^{2,3}

(1. 深圳市公明供水调蓄工程管理处, 广东 深圳 518107;

2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过固结排水三轴剪切试验、压汞试验和电镜扫描试验探究含水率波动对公明公路路基土力学特性的影响与其劣化微观机理, 基于邓肯-张模型提出了一个能够考虑含水率波动影响的路基土经验本构模型。结果表明: 含水率波动使得路基土中、大孔隙增多, 同时微裂隙得到发展引起试样结构被分割, 导致试样剪切应力-应变关系从应变软化向应变硬化型转变, 试样剪缩特性提升、剪切强度降低; 含水率波动程度越大, 试样剪缩特性越明显, 剪切强度则越弱; 提出的路基土本构模型的计算结果与试验结果吻合较好, 证明了模型的有效性和适用性。

关键词: 路基土; 含水率波动; 劣化机理; 力学特性; 微观结构; 本构模型; 公明公路

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)03-0114-07

Study on deterioration meso-mechanism and constitutive model of subgrade soil from Gongming road under the fluctuation of water content

LI Liyu¹, CHEN Yuanzhong¹, XU Siyuan^{2,3}

(1. Shenzhen Gongming Water Supply and Storage Engineering Management, Shenzhen 518107, China;

2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Consolidated drained triaxial shear tests, mercury injection tests and electron microscope scanning tests were conducted in this study to investigate the effects of the water content fluctuation on the mechanical properties of soil from the Gongming road and the meso-mechanism of deterioration. Based on the Duncan-Chang model, an empirical constitutive model of the subgrade soil was proposed to consider the effect of water content fluctuation. The results show that the development of pores, macropores and micro-cracks leads to the transformation of soil shear stress-strain relationship from the strain-softening to the strain-hardening, the improvement of soil shear shrinkage characteristics and the decrease of shear strength. With the increase of moisture content fluctuation, the shear shrinkage characteristics of the sample become more obvious, but the shear strength decreases. The calculation results of the proposed constitutive model for the subgrade soil are in good agreement with the test results, which proves the effectiveness and applicability of the model.

Key words: subgrade soil; moisture content fluctuation; deterioration mechanism; mechanical properties; microscopic structure; constitutive model; Gongming road

通常情况下道路工程中的土体会在其最优含水率附近进行压实, 并保证相对压实度不低于 95%。但研究表明, 路基土服役期间其含水率会逐渐上升至最优含水率湿侧, 且随着气候的变化其含水率在最优含水率

基金项目: 中国水力发电工程青年人才托举工程(水电学秘字[2013]15号); 南京水利科学研究院(青年)科学基金(Y323004); 江苏省卓越博士后计划(2022); 江西省水利科技项目重点课题(201921ZDKT13)

作者简介: 李立宇(1966—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事土力学研究。E-mail: 1172619300@qq.com

通信作者: 徐思远(1993—), 男, 工程师, 博士, 主要从事岩土原位测试研究。E-mail: i@siyuanxu.com

引用本文: 李立宇, 陈远中, 徐思远. 含水率波动状态下公明公路路基土劣化微观机理与本构模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 114-120.

LI Liyu, CHEN Yuanzhong, XU Siyuan. Study on deterioration meso-mechanism and constitutive model of subgrade soil from Gongming road under the fluctuation of water content [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 114-120.

湿侧某一区间内波动^[1-2]。含水率变化和波动往往会对路基土的物理力学性质造成影响,进而影响道路的正常使用。

国内外学者开展了大量试验研究含水率变化对土体力学特性的影响。研究表明,随着初始含水率的升高,土体黏聚力和内摩擦角均会急剧减小^[3-4],但有些学者得出黏聚力在最优含水率附近存在峰值,内摩擦角在最优含水率干侧随着含水率的增大而减小,在最优含水率湿侧变化不明显,说明含水率对土体强度参数的影响与土体自身的物理性质有关^[5];在应力-应变关系方面,随着含水率的增加,土体的应力-应变曲线由应变软化型向应变硬化型转变,试样的破坏形式逐渐由脆性破坏转为塑性破坏^[6]。含水率波动对土体力学特性影响的研究成果还相对较少。干湿循环作用对土体力学特性的影响,实际上可以看作是一种含水率波动的影响,但是干湿循环一般在极端的气候条件下发生,因此可以认为干湿循环是一种程度剧烈的含水率波动情况^[7]。但是,目前还没有关于含水率波动程度对路基土微观结构和力学特性劣化规律的研究。

本文设定 3 种不同程度的含水率波动,通过固结排水三轴剪切试验,研究含水率波动程度对深圳市公明公路路基土力学特性的影响,并结合微观试验结果探究含水率波动状态下路基土力学特性的劣化微观机理,最后基于邓肯-张模型,建立了考虑含水率波动影响的路基土经验本构模型。

1 试验方案

1.1 试样制备

对从深圳市公明水库 4 号坝体所在地区附近所取的公路路基土进行去除腐化植物和石块,然后将其风干、研磨过 2 mm 筛去除大颗粒,依据 GBT 50123—2019《土工试验方法标准》测得其塑限为 16.2%,液限为 30.9%,相对密度为 2.69,最优含水率为 14.3%,最大干密度为 1.86 g/cm³。颗粒分析试验测得土体试样中砂粒占 52.4%,粉粒占 23.7%,黏粒占 23.9%。试样在最优含水率及最大干密度下分 3 层采用重型静力压实成直径为 38 mm,高度为 76 mm 的圆柱形试样,每层压实后用土工刀在其表面拉毛,保证层间不会发生断层现象。试样制备完后立即从模具中推出,用保鲜膜包裹后放置于密封盒中静置 24 h 达到水分平衡再开展后续试验。

1.2 静三轴试验

杨树荣等^[1]通过对 137 处服务中的道路路基进行现场调查,指出全部 59 处黏性土的现场含水率皆位于最优含水率 w_{opt} 湿侧(其余 78 处为颗粒土),主要在 $w_{opt} \sim w_{opt}+7\%$ 之间波动;Uzan^[2]发现,黏性路基土在最优含水率下压实后,含水率会随着气候条件的波动,在最优含水率湿侧某一区间内波动。为了探究含水率波动程度对路基土力学特性的影响,本文拟定了 3 种不同程度的含水率波动状态:零波动状态(w_{opt} ,称为 OMC 状态)、弱波动状态($w_{opt} \sim w_{opt}+1.2\%$,称为 OMC-TMC 状态)和强波动状态($w_{opt} \sim w_{opt}+2.3\%$,称为 OMC-SMC 状态)。参考 Han 等^[8]提出的湿制试样方式,使用不同干湿程度的滤纸包裹 OMC 状态下的试样直至质量达到目标含水率下的质量,即认为试样增湿至目标含水率,随后在自然条件下脱湿至最优含水率,完成 1 次含水率波动。研究表明,在经历 5~7 次干湿循环后试样的基本力学特性会达到稳定^[9-10],因此本文中含水率波动次数设定为 10 次,以研究最终平衡下路基土试样的力学特性。

含水率波动处理之后的试样进行三轴固结排水试验前,先对试样进行真空抽气饱和,并在去离子水中浸泡 24 h,随后将试样转移到三轴压力室内进行反压饱和,当孔隙水压力系数超过 0.98 即认为试样达到饱和状态^[11]。围压为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 下的饱和试样固结完成后,以 0.076 mm/min 的速率对其进行剪切,在轴向应变达到 15% 时停止剪切。

1.3 微观试验

对经历 3 种不同程度含水率波动达到最终平衡状态下的试样开展压汞(MIP)试验和扫描电镜(SEM)试验,研究土体微观结构的演化机制。其中 MIP 试验用于测定试样的孔径分布曲线,SEM 试验用于捕捉试样的微观结构图像^[12-14]。在进行 MIP 和 SEM 试验之前采用冻干法^[15]对试样进行了干燥处理,具体过程为:将制备好的试样直接放入液氮中,使内部水分在-196℃ 的低温下快速冻结成冰,然后通过真空抽气的方法使土体内的冰晶直接升华为水蒸气,从而在去除土体内水分的同时最大程度地保留试样原始的微观结构。

2 三轴试验结果与分析

由图 1 可知,围压 σ_c 较低时试样的偏应力-轴向应变关系表现为应变软化型,随着围压的增加开始转变

为应变硬化型,应力峰值强度所对应的轴向应变随围压的增加而增大。围压较低时,试样的体应变随着轴向应变的发展先增加而后减小为负值,表明试样在剪切过程中先经历剪缩后发生剪胀,试样的剪胀特性随着围压的增加而减小,当围压较高时其体应变随轴向应变的发展逐渐增加并趋于稳定,试样仅表现为剪缩特性。

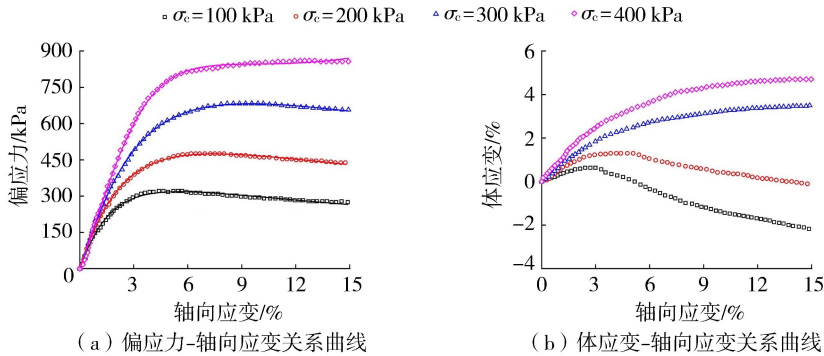


图 1 OMC 状态下三轴固结排水试验结果

Fig.1 Results of consolidation drained triaxial test at OMC state

对比图 2(a) 和图 3(a) 可以看出,OMC-TMC 状态下试样仅在 $\sigma_c = 100$ kPa 时表现出应变软化;试样经历含水率弱波动 (OMC-TMC) 后, $\sigma_c = 200$ kPa 和 $\sigma_c = 300$ kPa 条件下其应力-应变关系均转变成应变硬化型;试样在经历含水率强波动 (OMC-SMC) 后,所有围压下试样的应力-应变关系均表现出应变硬化型。对比图 2 (b) 和图 3(b) 可以看出,含水率波动使得试样在剪切过程中剪缩特性表现更为明显,且含水率波动程度越大,试样的剪缩特性越明显。

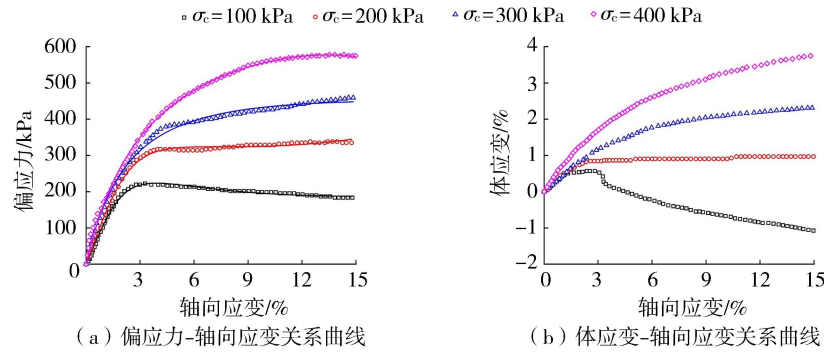


图 2 OMC-TMC 状态下三轴固结排水试验结果

Fig.2 Results of consolidation drained triaxial test at OMC-TMC state

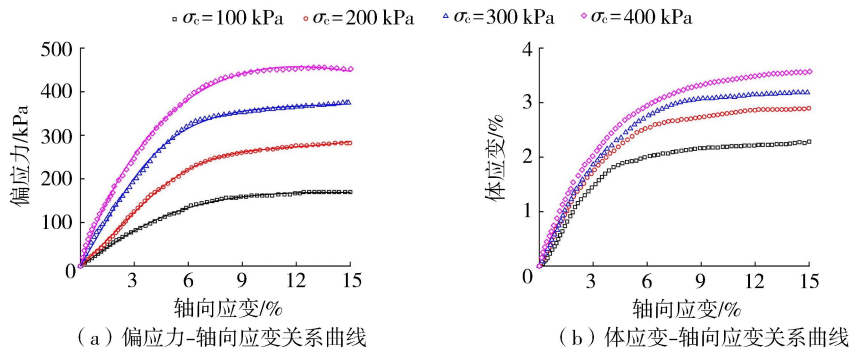


图 3 OMC-SMC 状态下三轴固结排水试验结果

Fig.3 Results of consolidation drained triaxial test at OMC-SMC state

取应变软化型的偏应力-轴向应变曲线峰值偏应力作为试样破坏时的偏应力,取应变硬化型的应力-应变曲线 15% 轴向应变处的偏应力作为试样破坏时的偏应力,对试样在固结排水三轴试验破坏时的应力进行分析,试样应力莫尔圆如图 4 所示。从图 4 可以看出,经历 3 种不同程度的含水率波动后,土体试样仍符合 Mohr-Coulomb 抗剪强度理论。由表 1 可知,含水率波动导致试样黏聚力和内摩擦角均有所减小,说明含水

率波动会降低试样的剪切强度,这与文献中干湿循环降低土体强度参数的结论一致^[7,16]。

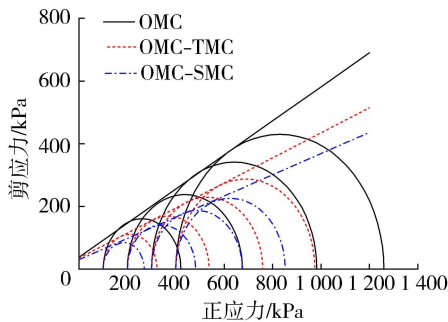


图 4 试样的应力摩尔圆

Fig. 4 Mohr's stress circle of the tested subgrade soil

3 微观试验结果与分析

3.1 MIP 试验

综合已有文献中的孔隙划分经验^[17-18],按孔径尺寸 d 将孔隙划分为:微孔隙($d \leq 0.1 \mu\text{m}$)、小孔隙($0.1 \mu\text{m} < d \leq 5.0 \mu\text{m}$)、中孔隙($5.0 \mu\text{m} < d \leq 30.0 \mu\text{m}$)和大孔隙($d > 30.0 \mu\text{m}$)。从图 5 可以看出,OMC 状态下试样的孔隙结构为单峰结构,峰值位于 $2 \mu\text{m}$ 左右,小孔隙占比较大,中孔隙占比较小。经历含水率波动后,孔径分布曲线逐渐由单峰模式向双峰模式转变, $2 \mu\text{m}$ 处孔径分布曲线的峰值逐渐下移并在中孔隙的孔径范围内出现了一个新的峰值孔径。

由表 2 可知,随着含水率波动范围的增大,试样的孔隙分布表现出不同的发展趋势:微孔隙基本保持不变,其数量和尺寸仅与试样内部的黏土矿物有关,因此不受含水率波动的影响;小孔隙数量逐渐减少,由于在波动过程中不断经历脱湿和增湿作用,小孔隙产生的塑性收缩变形会导致体积减小,波动范围越大这种塑性收缩越显著;中孔隙和大孔隙数量增多,表明水分的迁移会引发试样内部大、中孔隙的发育。土体中、大孔隙的产生,是引发土体剪缩特性明显的主要原因。根据孔隙均匀化原理^[19],试样受剪切后大孔隙优先改变,从而使得试样内部孔隙趋于均匀,这种大孔隙的均匀化在宏观上就表现为体缩。由于含水率波动程度越大,水分迁移过程中所产生的大孔隙比率越大,大孔隙的均匀化在整个剪切过程中就越显著,其剪缩特性就越明显。

从表 2 还可以看出,尽管含水率波动会促进试样内部各级孔隙占比的调整,但含水率波动范围对孔隙占比的调整影响不大,表中 OMC-TMC 与 OMC-SMC 状态下各级孔隙占比的变化幅度都不及 OMC 与 OMC-TMC 状态下的变化幅度明显。意味着只要发生含水率波动,不论波动范围的大小,试样的微观结构都会受到较大的影响,因此在实际工程中含水率波动对路基土力学特性的影响不可忽视。

3.2 SEM 试验

图 6(a)为 OMC 状态下试样 400 倍镜的 SEM 图像,可以看出试样观测断面平整细腻,整体结构均匀,视域内多见小孔隙,偶见细小裂缝,裂缝间贯通性差,试样内部存在微小缺陷。由图 6(b)(c)可以看出,含水率波动影响后试样观测断面参差不齐且菱角分明,整体结构差异性大。试样孔隙及土体结构变化明显,微裂隙在数量、宽度和长度上均有不同程度的增加。裂隙将试样分割为块,块体间接触多为“面-面”接触,块体内小孔隙数量大幅下降,与 MIP 试验所得含水率波动后试样小孔隙峰值下降的结果相一致。含水率波动过程

表 1 土体剪切强度指标

Table 1 Strength parameters of the subgrade soil

波动状态	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
OMC	38.2	28.5
OMC-TMC	34.1	21.8
OMC-SMC	30.2	18.7

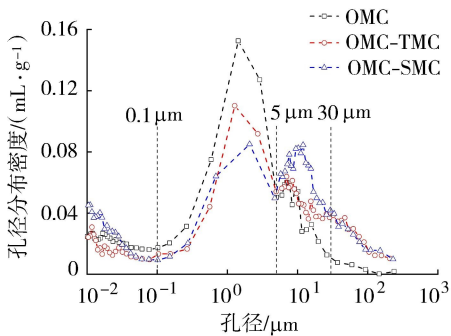


图 5 试样的孔径分布曲线

Fig. 5 Pore size distribution curves of the subgrade soil

表 2 各级孔隙占比

Table 2 Proportion of pores at each level

波动状态	孔隙占比/%			
	微孔隙	小孔隙	中孔隙	大孔隙
OMC	12.76	71.08	14.16	2.00
OMC-TMC	11.64	55.75	21.26	11.35
OMC-SMC	13.31	49.28	26.44	10.97

中微裂隙发展导致的土体结构变化,是导致土体试样抗剪强度减小的主要原因。

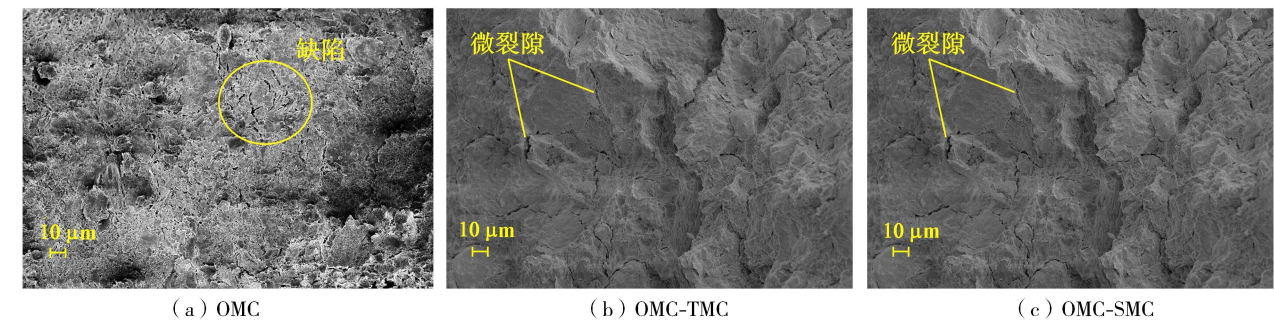


图 6 试样的 SEM 图像(放大 400 倍)

Fig. 6 SEM images of the subgrade soil at different state (enlarged by 400 times)

4 经验本构模型

对于较高围压下试样的应变稳定和硬化行为,可以采用邓肯-张模型进行描述^[20],表达式为

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_a}{a\varepsilon_a + b}$$

(1)

式中: σ_d 为偏应力; ε_a 为轴向应变; a 、 b 为模型拟合参数,其中 $1/a$ 为极限偏应力,其值等于试样的排水抗剪强度, $1/b$ 为应力-应变曲线的初始斜率,其值等于试样的初始弹性模量。

由于较低围压下试样的应力-应变关系表现为应变软化型(图 1、图 2),邓肯-张模型并不能很好地描述软化行为,因此在邓肯-张模型的基础上,提出了一个经验本构模型(式(2))用于对本文不同含水率波动状态后试样的应力-应变关系进行描述。

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_a}{a\varepsilon_a + b} [1 + (\varepsilon_a/m)^n]^{1-\frac{1}{n}}$$

(2)

式中 m 、 n 为模型拟合参数。 m 与应力-应变曲线出现软化的拐点相关,曲线越早表现出软化现象 m 越小; n 与试样的软化程度相关,试样的软化程度越高 n 越大,当 $n = 1$ 时,式(2)与邓肯-张模型的表达式一致。因此,式(2)既可以描述应变软化行为,也可以描述应变稳定和硬化行为。

式(2)对不同含水率波动状态后试样应力-应变曲线的拟合效果分别如图 1(a)、2(a)、3(a) 所示,模型参数见表 3,可以看到模型的拟合 R^2 均大于 0.99,说明了该模型拟合能力的稳定性与可靠性。

表 3 经验本构模型参数值

Table 3 Parameters of the empirical constitutive model

波动状态	σ_c/kPa	$a/10^{-4}$	$b/10^{-3}$	m	n	R^2
OMC	100	9.428	4.831	2.753	1.631	0.996
	200	7.275	4.292	4.205	1.617	0.999
	300	2.707	4.325	4.429	1.790	0.999
	400	-1.222	4.608	4.704	2.549	0.999
OMC-TMC	100	-1.780	8.571	2.575	2.475	0.995
	200	-2.011	7.512	2.964	2.389	0.996
	300	14.100	4.524	2.798	1.152	0.996
	400	13.157	4.652	24.438	4.716	0.997
OMC-SMC	100	4.094	33.732	8.314	2.132	0.999
	200	-8.674	25.981	7.613	2.938	0.999
	300	-2.152	14.086	18.491	2.378	0.998
	400	11.517	8.224	6.059	2.437	0.998

5 结 论

a. 含水率波动过程中水分迁移引发试样内部产生的大孔隙增多,导致路基土试样剪切应力-应变关系从应变软化向应变硬化型转变,试样剪缩特性提升,随着含水率波动程度的增大,试样的剪缩特性越明显。

b. 含水率波动过程中微裂隙得到发展,微裂隙的发展导致试样结构有所破坏,从而降低了试样黏聚力和内摩擦角,随着含水率波动程度的增大,试样剪切强度越小。

c. 基于邓肯-张模型提出了一个经验本构模型,既可以用来描述试样的应变软化行为,也可以用来描述应变稳定和硬化行为,较好的拟合结果证明了该模型的有效性和适用性。

参考文献:

- [1] 杨树荣,拱祥生,黄伟庆,等. 非饱和粘性路基土回弹模量之研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 225-229. (YANG Shurong, GONG Xiangsheng, HUANG Weiqing, et al. Resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 225-229. (in Chinese))
- [2] UZAN J. Characterization of clayey subgrade materials for mechanistic design of flexible pavements[J]. Transportation Research Record, 1998, 1629(1): 189-196.
- [3] 王闯,董金玉,王明龙,等. 含水率对残坡积土强度特性的影响[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 148(5): 88-92. (WANG Chuang, DONG Jinyu, WANG Minglong, et al. Influence of water content on residual soil strength property[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 148(5): 88-92. (in Chinese))
- [4] 朱伟,赵笛,范惜辉,等. 渣土改良为流动化回填土的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 134-139. (ZHU Wei, ZHAO Di, FAN Xihui, et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 134-139. (in Chinese))
- [5] 谈云志,喻波,刘晓玲,等. 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 369-375. (TAN Yunzhi, YU Bo, LIU Xiaoling, et al. Pore size evolution of compacted laterite under desiccation shrinkage process effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 369-375. (in Chinese))
- [6] 刘寒冰,张互助,王静. 冻融及含水率对压实黏质土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 158-164. (LIU Hanbing, ZHANG Huzhu, WANG Jing. Effect of freeze-thaw and water content on mechanical properties of compacted clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 158-164. (in Chinese))
- [7] 樊科伟,贾昊泽,蒯建国,等. 干湿循环历史对季冻区膨胀土体变特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 280-287. (FAN Kewei, JIA Haoze, LIN Jianguo, et al. Effect of the history of drying-wetting cycles on the deformation of expansive soils in seasonal frost region[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 280-287. (in Chinese))
- [8] HAN Z, VANAPALLI S. Stiffness and shear strength of unsaturated soils in relation to soil-water characteristic curve[J]. Géotechnique, 2016, 66(8): 627-647.
- [9] 杜泽丽. 干湿循环条件下膨胀土的力学性质与开裂行为[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 141-144. (DU Zeli. Mechanical properties and cracking behavior of expansive soil under dry and wet cycling conditions[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 141-144. (in Chinese))
- [10] 晏国顺,周明涛,高家祯,等. 干湿循环作用下植被混凝土结构演化[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 33-39. (YAN Guoshun, ZHOU Mingtao, GAO Jiazhen, et al. Evolution of vegetation concrete structures under action of drying-wetting cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 33-39. (in Chinese))
- [11] KAMRUZZAMAN A, CHEW S, LEE F. Structuration and destructuration behavior of cement-treated Singapore marine clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(4): 573-589.
- [12] 王怀义,杨桂权,李鑫,等. 机械磨细对新疆和田地区火山岩粉活性影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 334-339. (WANG Huaiyi, YANG Guiquan, LI Xin, et al. Experimental study on effect of machine grinding in activity of volcanic rock fine in Hotan area of Xinjiang[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 334-339. (in Chinese))
- [13] 王怀义,杨桂权,贺传卿,等. 高温煅烧对新疆和田地区火山岩活性影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 60-65. (WANG Huaiyi, YANG Guiquan, HE Chuanqing, et al. Experimental study on the effects of high-temperature calcination on volcanic rock activity in Hotan area of Xinjiang[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 60-65. (in Chinese))
- [14] 何俊,管家贤,张磊,等. 干湿循环对固化污泥微观结构及强度的影响[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 39-44. (HE Jun, GUAN Jiaxian, ZHANG Lei, et al. Effects of dry-wet cycles on microstructure and strength of solidified sludge[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 39-44. (in Chinese))

[15] 樊科伟,严俊,刘苓杰,等. 木质素纤维改性季冻区膨胀土强度特性与微观结构研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 326-334. (FAN Kewei, YAN Jun, LIU Lingjie, et al. Study on strength characteristics and microstructure of expansive soil treated with lignin fibers in seasonal frozen area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 326-334. (in Chinese))

[16] 方瑾瑾,杨小林,冯以鑫,等. 干湿循环后膨胀土力学特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 1043-1055. (FANG Jinjin, YANG Xiaolin, FENG Yixin, et al. True triaxial experimental study on mechanical properties of expansive soils after drying and wetting cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 1043-1055. (in Chinese))

[17] 王佩,宋新江,徐海波,等. 水泥改性膨胀土基本特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 56-60. (WANG Pei, SONG Xinjiang, XU Haibo, et al. Experiments on basic characteristics of cement-modified expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 56-60. (in Chinese))

[18] 叶万军,吴云涛,杨更社,等. 干湿循环作用下古土壤细微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2126-2137. (YE Wanjun, WU Yuntao, YANG Gengshe, et al. Study on microstructure and macro-mechanical properties of paleosol under dry-wet cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2126-2137. (in Chinese))

[19] 迟明杰,赵成刚,李小军. 砂土剪胀机理的研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 99-104. (CHI Mingjie, ZHAO Chenggang, LI Xiaojun. Stress-dilation mechanism of sands[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 99-104. (in Chinese))

[20] 袁俊平,邱豪磊,胡有方,等. 土石坝力学参数反演技术研究进展与展望[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 1-10. (YUAN Junping, QIU Haolei, XU Youfang, et al. Research progress and prospects on inversion technology of mechanical parameters for earth-rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 1-10. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-27 编辑:刘晓艳)

(上接第 83 页)

[35] BUSBY J, MARSHALL C. Design and construction of the øresund tunnel[J]. Civil Engineering, 2000, 138(4): 157-166.

[36] 刘晓东. 港珠澳大桥总体设计与技术挑战[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 太原: 中国海洋工程学会, 2011: 25-28.

[37] LIN M, WANG R, LIN W. Artificial island construction using large steel cylinders[J]. Structural Engineering International, 2020, 30(4): 484-492.

[38] 孙钧. 港珠澳大桥岛隧工程建设的科技创新和运营后应关注的若干问题[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1592-1602. (SUN Jun. Scientific and technological innovation and operation-related issues for island-tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Fixed Link Project[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1592-1602. (in Chinese))

[39] 刘健,董焱赫,刘迪. 深中通道东人工岛总体设计及关键技术[J]. 公路, 2021, 66(2): 234-238. (LIU Jian, DONG Yanhe, LIU Di. Overall design and key technology of the east artificial island of the Shenzhen-Zhongshan Link [J]. Highway, 2021, 66(2): 234-238. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-21 编辑:胡新宇)

(上接第 90 页)

[17] 牛岩,韩霁昌,雷光宇. 基于粒子群算法的圆形隧洞锚喷支护优化[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊1): 175-181. (NIU Yan, HAN Jichang, LEI Guangyu. Bolt-shotcrete support optimization of circular tunnel based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Sup1): 175-181. (in Chinese))

[18] 政府间气候变化专门委员会. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[R]. 神奈川: 日本全球环境战略研究所, 2006.

[19] 张鑫,靳春玲,贡力,等. 基于 PSO-RBF 神经网络模型的铁路隧道突水危险性评价[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 143-148. (ZHANG Xin, JIN Chunling, GONG Li, et al. Evaluation of water inrush danger in railway tunnel based on PSO-RBF neural network model[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 143-148. (in Chinese))

[20] 孔爱良,梁硕,李春来,等. 基于改进粒子群算法的微电网优化运行[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 550-555. (KONG Ailiang, LIANG Shuo, LI Chunlai, et al. Optimizing micro-grid operation based on improved PSO [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 550-555. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-29 编辑:胡新宇)