

含水率与干密度对压实粉质壤土贯入阻力影响的试验研究

廖茂权, 孟运庭

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要:通常,利用贯入阻力与干密度的统计关系可以将贯入法用于土体压实度的快速检测。然而,针对土体的力学强度特性,受含水率影响较大的土体单纯依靠贯入阻力难以准确评价其土体压实度。为研究含水率与干密度对压实后的中重粉质壤土贯入阻力的影响,配制了不同含水率和干密度的试样开展了静力贯入试验。试验结果表明:贯入阻力随含水率的增大呈线性减小,且两个线性拟合参数随干密度的增大呈幂函数增长。在此基础上,给出了考虑含水率和干密度共同影响的压实粉质壤土贯入阻力计算模型。之后,将模型计算值与所得到的试验结果以及相关文献中压实黄土的贯入试验结果进行了对比,验证了该模型能够较好地预测中重粉质壤土的贯入阻力,且对其它类型的土体也具有较好的适用性。

关键词:静力贯入法;贯入阻力;影响;压实度检测;含水率;粉质壤土;预测模型

中图分类号:TV7;TV32+3;TU411.3

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2024)05-0012-05

Experimental Study of the Influence of the Water Content and Dry Density on the Penetration Resistance of Compacted Silty Loam

LIAO Maoquan, MENG Yunting

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd, Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: Usually, by using the statistical relationship between penetration resistance and dry density, the static penetration method has been used for the rapid detection of soil compactness. However, for soils whose mechanical properties are greatly affected by water content, it is difficult to evaluate soil compaction accurately by using penetration resistance only. To study the effect of water content and dry density on the penetration resistance of compacted medium-heavy silty loam, samples with different water content and dry density were prepared, and static penetration test was conducted. The results show that the penetration resistance decreases linearly with the increase of water content, and the two fitting parameters increase as a power function with increasing dry density. On this basis, the calculation model of penetration resistance is proposed, which could consider the both influence of water content and dry density. Finally, the model predictions were compared with the penetration test results in this paper and from other relevant literature. The result shows that the proposed calculation model can predict the penetration resistance of medium-heavy silty loam well. In addition, this model can be used for other types of soil as well.

Key words: Static penetration method; Penetration resistance; Influence; Compactness detection; Water content; Silty loam; Prediction model

1 概述

贯入法是一种利用贯入设备进行土体压实度快速检测的方法,其测试原理是将锥形探头压入被测土层内、依靠机械或电子器件测定土层的贯入阻力,并利用所建立的贯入阻力与干密度之间的统计关系式来确定土层的密实程度^[1]。由于该方法具有设备简单、操作方便、效率高等优点,在

大面积填方工程压实度和均匀性跟踪检测方面具有优势,已在水利、岩土以及农业等工程中得到广泛应用^[2]。

近年来,在利用贯入法快速测定土体压实度的理论模型及现场试验方面,国内外学者开展了不少研究。国内方面,曹文贵等^[3-4]建立了贯入变形与路基初始孔隙率的分析模型,并根据初始孔隙率与压实度的关系提出了基于静力贯入的土

收稿日期:2023-06-30

石混填路基压实度的新型确定方法;徐世法等^[5]设计出一种聚氨酯混凝土的贯入阻力测试系统,提出了以聚氨酯混凝土贯入阻力量化聚氨酯混凝土固化反应程度的方法,建立了以催化剂用量为唯一可控因素的施工可压实时间预测模型;王峰和程培峰^[6]利用普式贯入仪在齐泰高速公路粉砂土路基上进行了现场贯入试验,并将其结果与传统的灌砂法试验进行了对比分析,得到粉砂土贯入阻力值与灌砂法检测干密度之间的线性拟合关系。国外方面,Herrick和Jones^[7]研发出一种新的动力圆锥贯入仪用来测定土体贯入阻力并评价土体的压实质量;Benevenute等^[8]将贯入阻力作为牧场土壤密实度评价的有效指标用于指导牧场管理。然而,使用现有的静力贯入法检测压实度时,基本不考虑含水率对贯入阻力的影响。为此,李云金等^[9]引入了简易贯入试验作为判断压实度的指标,通过实测压实度、贯入次数和含水率,对压实度与简易贯入次数及含水率的关系进行了回归分析,并将该关系式应用于工程实际;王德银等^[10]提出了一种基于超微型贯入试验的土体内部力学特性的研究方法,在干湿循环条件下对重塑膨胀土开展了一系列贯入试验,获得了3次干燥过程中试样贯入阻力随深度和含水率的变化曲线;于永堂等^[11]研究了含水率和干密度对贯入阻力的影响,建立了考虑含水率影响的贯入阻力修正模型,提出了基于普氏贯入仪-土壤水分传感器联合测试的压实度检测方法,但该方法的模型为二元分段函数,工程适用性较差。

中重粉质壤土是一种介于黏土和粉土之间的低液限黏土,其级配良好,适用于坝体填筑,在引江济淮工程菜巢段堤防工程中被广泛采用。然而,由于该土体具有内部保水性好、表层失水快的特点,其压实后的力学强度特性不仅受干密度影响,而且受含水率的影响也比较大,故单纯依靠贯入阻力难以准确评价其压实干密度。为此,笔者针对中重粉质壤土开展了静力贯入试验,研究了贯入阻力与土体含水率、干密度之间的关系,建立了考虑含水率和干密度影响的贯入阻力计算模型,并对该模型的适用性进行了验证。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

本次试验所用的土料取自引江济淮菜巢线

C003-1 河渠标段,为中重粉质壤土,其物理力学性质指标见表 1。试验土料击实曲线见图 1,试验土料级配曲线见图 2。由图 1 可知:最大干密度为 1.67 g/cm³,最优含水率为 18.1%。由图 2 可知:其不均匀系数 $C_u=16.39$,曲率系数 $C_c=2.44$,平均粒径 $D_{50}=0.015$ mm,土料粒径分布范围较广,级配良好。试验前,先将试验用土料放置于 105 ℃ 的烘箱中烘干,然后均匀喷洒一定质量的水,将其配置成目标含水率的试验用土并保存于真空密封袋中使其水汽平衡,再通过控制初始干密度的方式、采用分层击实的方法将土体击实成型为直径 100 mm、高度 150 mm 的圆柱样。制样后,对试样不做脱模处理,采用保鲜膜覆盖以防止水分蒸发。

表 1 试验土料基本物理力学性质指标表

比重	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数	最优含水率 /%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)
2.68	19.2	41.7	22.5	18.1	1.67

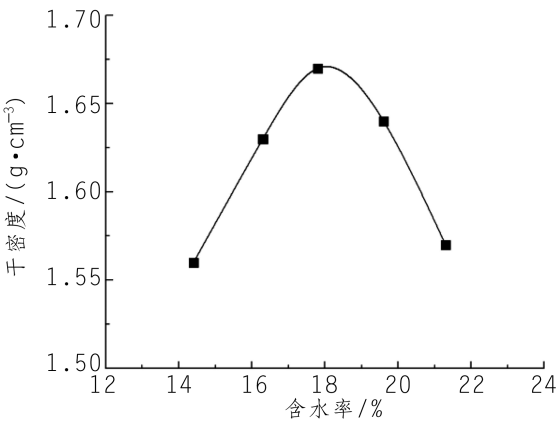


图 1 试验土料击实曲线示意图

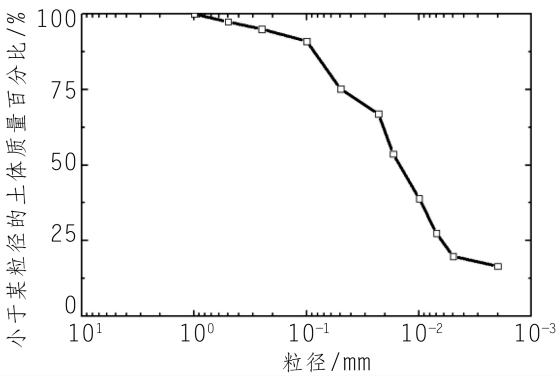


图 2 试验土料级配曲线示意图

2.2 试验装置

本次试验采用的微型贯入仪(MCPT)由南京

土壤仪器厂生产。微型贯入试验装置见图 3。该装置主要由荷载传感器、位移计、步进式电机、底座、探杆及数据采集系统组成。荷载传感器的最大量程为 200 N,精度为 0.1 N,位移计测量的最大长度为 150 mm,数字显示器可精确至 0.1 mm,贯入速度为 0.1~4.0 mm/min。本次试验采用的微型探针总长度为 66 mm,探头呈圆锥形,锥形夹角为 90°。锥形探头的上端直径为 3.4 mm,探杆直径为 3.0 mm,略小于探头,其可消除贯入过程中探杆与土体的摩擦作用。

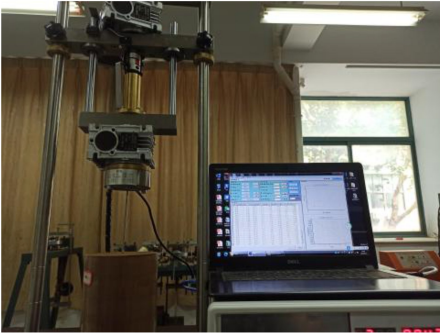


图 3 微型贯入试验装置图

2.3 试验方案及方法

为研究含水率和干密度对中重粉质壤土贯入阻力的影响,将试验用土的目标含水率分别设为 14%、16%、18%、20%,试样目标干密度设为 1.3、1.4、1.5、1.6 g/cm³,每个目标含水率对应 4 个目标干密度,共制备了 16 个试样。由于中重粉质壤土的表面失水速率快,在土料配制过程中受水分蒸发影响,所配置的土样含水率与目标含水率有所偏差。因此,当贯入试验结束后,在试样中的 3 个不同部位取土样,采用烘干法测定其质量含水率并取其平均值以确定其实际含水率。在此基础上,根据试样的实际湿密度,即可计算出试样的实际干密度。

进行贯入试验时,先将制备好的压实土样连同模具一起放置于贯入仪的底座上,然后启动电机快进按钮,使探针往下移动,当探针锥头与土样表面接近时,调节控制面板上的电机转速旋钮,使探针以 1 mm/min 的恒定速率贯入。在探针贯入过程中,荷载传感器和位移传感器分别记录下相应时刻的贯入阻力和贯入位移。当贯入深度达到 15 mm 后,基本已达到贯入阻力的峰值,此时停止贯入,启动电机快退按钮使探针从土样中拔

出,即完成第 1 次贯入。为减小数据的离散性,对同一试样进行了 3 次微型贯入试验,得到 3 组平行试验结果。贯入过程中,同样在试样表面覆盖了一层塑料薄膜以防其水分蒸发。

3 试验结果与分析

3.1 贯入阻力与含水率、干密度相关性分析

表 2 为不同含水率和干密度试样对应的贯入阻力测试结果。基于该测试结果给出了不同干密度试样的贯入阻力与含水率的拟合关系。不同干密度下粉质壤土贯入阻力与含水率拟合关系情况见图 4。试验结果表明:在相同含水率条件下,试样干密度越大,贯入阻力越大;且当含水率较低时,干密度对贯入阻力的影响十分明显。但随着含水率的增大,不同干密度试样的贯入阻力差异减小。由此可以看出:随着含水率的增加,不同干密度试样的贯入阻力均呈线性减小,其可以表示为:

$$P_s = -Aw + B \tag{1}$$

式中: P_s 为贯入阻力; w 为含水率; A, B 为拟合参数。

表 2 不同含水率与干密度的贯入阻力测试结果表

试样 编号	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	贯入阻力 /MPa
1	15.60	1.47	39.30
2	14.05	1.58	80.10
3	13.49	1.30	36.65
4	13.41	1.41	38.50
5	15.82	1.49	40.95
6	15.15	1.60	61.10
7	15.24	1.33	23.80
8	12.78	1.44	51.35
9	17.32	1.50	28.30
10	17.53	1.60	39.90
11	16.87	1.32	18.00
12	17.18	1.41	21.90
13	18.86	1.51	19.80
14	18.79	1.61	34.00
15	18.75	1.31	12.80
16	19.13	1.41	17.90

图 5 为参数 A, B 与干密度的拟合关系。由图 5 可以看出:参数 A 和 B 均随试样干密度的增大而增大且满足幂函数关系:

$$\begin{cases} A = a_1 \gamma_d^{c_1} \\ B = a_2 \gamma_d^{c_2} \end{cases} \tag{2}$$

式中: γ_d 为干密度; a_1, c_1, a_2, c_2 为拟合参数。根

据所取得的试验结果,参数 A 、 B 采用幂函数拟合的决定系数 R^2 高达 0.932 和 0.953,其对应的拟合参数为: $a_1=0.118,a_2=2.468,c_1=4.598,c_2=4.715$ 。

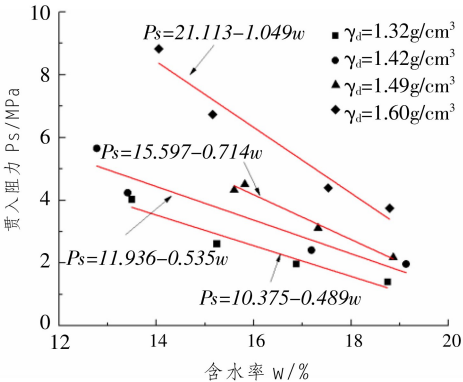
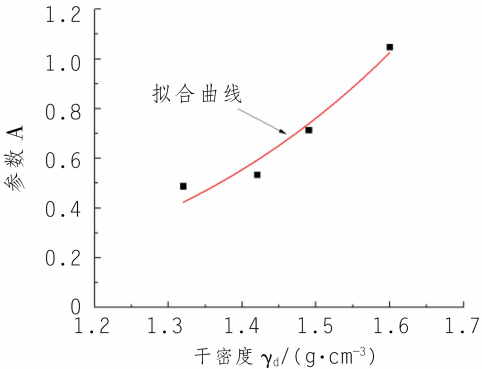


图4 不同干密度下粉质壤土贯入阻力与含水率拟合关系示意图

入阻力的计算模型。基于上述相关性分析,将式(2)代入式(1),即可得到同时考虑含水率和干密度影响的贯入阻力模型,其表达式为:

$$P_s = -a_1 w \gamma_d^{c_1} + a_2 \gamma_d^{c_2} \tag{3}$$

为验证文中所提出的贯入阻力计算模型的适用性,笔者分别采用所取得的试验结果以及于永堂等针对压实黄土开展的贯入试验结果整理模型参数,并将模型计算值与实测值进行对比。图6为利用于永堂等贯入试验结果整理的不同干密度试样贯入阻力与含水率拟合关系曲线,所得到的拟合参数 A 和 B 与干密度的关系见图7。由图6、7可以看出:压实黄土的拟合参数 A 和 B 与干密度同样满足幂函数关系,通过回归分析后得到的模型参数为: $a_1=0.068,a_2=1.260,c_1=5.515,c_2=5.781$ 。文献[11]的压实黄土贯入阻力与含水率关系见图6,文献[11]的试验结果拟合参数 A 、 B 与干密度关系见图7。



(a)参数 A

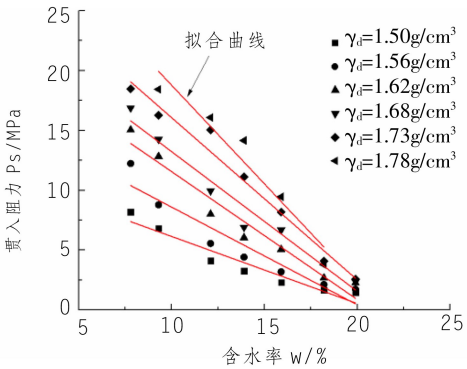


图6 文献[11]的压实黄土贯入阻力与含水率关系示意图

图8为模型计算值与实测值的对比情况。由图8可以看出:模型计算值与实测值吻合较好,计算值与实测值的对应点基本分布在45°对角线附近,相对误差在±25%以内。相比较而言,该模型对中重粉质壤土贯入阻力的计算结果较好。对于压实黄土,当含水率大于18.2%时,模型计算得到的贯入阻力小于实测值;而当干密度大于1.75 g/cm³时,模型计算值较实测值又偏大,说明对于含水率小于18.2%、干密度小于1.75 g/cm³的压实黄土该模型的预测精度较高。总体而言,所提出的计算模型可定量描述含水率和干密度对压实土体贯入阻力的影响,具有一定的工程适用性。

需要说明的是:时域反射法(TDR)和频域反射法(FDR)是目前工程中常用的土体含水率

3.2 贯入阻力计算模型

为建立考虑含水率和干密度共同影响的压实土体贯入阻力计算方程,基于上述贯入阻力与干密度和含水率的回归性分析,将贯入阻力作为因变量,土体含水率和干密度作为自变量建立了贯

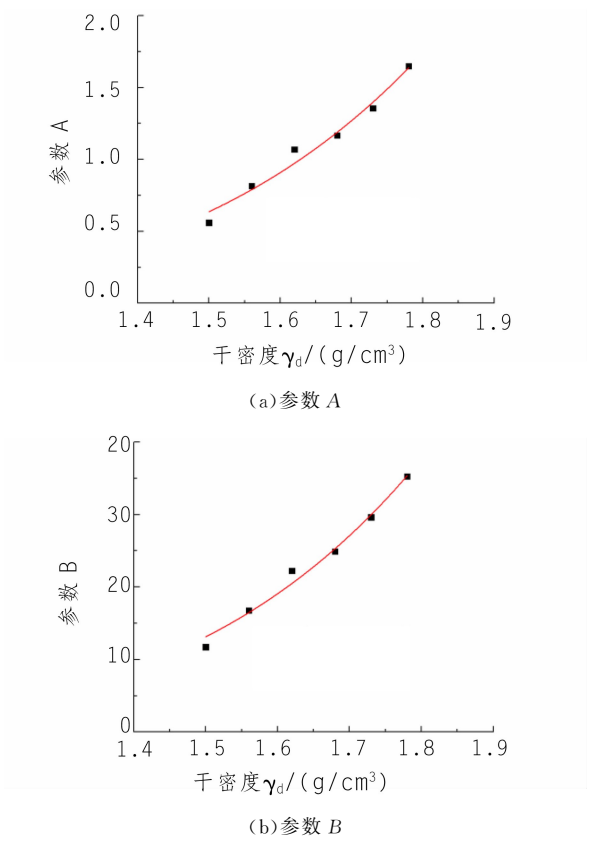


图 7 文献[11]的试验结果拟合参数 A、B 与干密度关系示意图

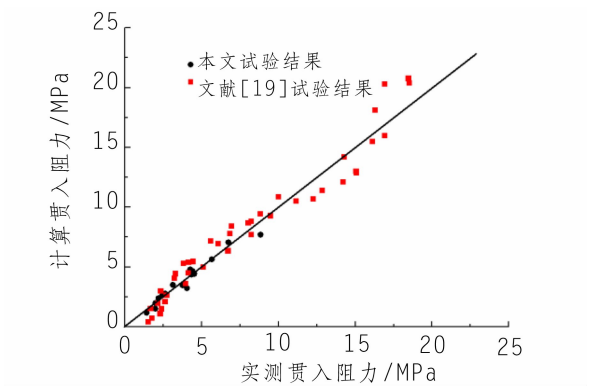


图 8 模型计算值与实测值对比情况示意图

原位测试方法, 将其 TDR 或 FDR 水分传感器的探针插入土体, 能够快速测得土体体积含水率, 且其测量精度可以达到 $\pm 1\%$ 。若将式(3)中的质量含水率替换为体积含水率, 计算模型可以变换为以下形式:

$$P_s = \gamma_d^{c_2} - \frac{a\gamma_w\theta_v}{b}\gamma_d^{c_1-1} \tag{4}$$

式中: θ_v 为土体体积含水率; γ_w 为水的密度。

当土体体积含水率已知时, 贯入阻力计算公式(4)可退化为以土体干密度作为自变量的函数。

目前, 静力贯入法是一种常见的原位测试方法, 其能快速、较准确地获得压实土体的贯入阻力。利用静力贯入法和 TDR 或 FDR 法能够快速测得压实土体的贯入阻力和体积含水率, 然后将其代入式(4), 利用数值迭代求解算法即可反演确定压实土体的干密度和质量含水率, 进而得到土体压实度。

4 结 语

笔者针对不同含水率和干密度下的中重粉质壤土开展了静力贯入试验, 并对试验结果进行了分析, 得到了贯入阻力与含水率以及干密度之间的关系式, 研究结果表明:

- (1) 压实粉质壤土贯入阻力随含水率的增加而减小, 且其初始干密度越大, 贯入阻力降低幅度越明显;
- (2) 对于贯入阻力与含水率可以采用线性拟合, 且两个拟合参数随干密度的增大呈幂函数增长;
- (3) 文中给出的贯入阻力计算公式具有预测准确且针对不同类型土体适用性强的特点;
- (4) 后续可进一步研究所提出的贯入阻力计算模型与静力贯入法以及土体体积含水率原位测试方法, 联合提出一种快速确定土体干密度和质量含水率的检测方法。

参考文献:

[1] 范云. 填土压实质量检测技术的发展与评析[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 524-529.

[2] 杨奇, 张健. 填土密实度检测技术在土坝工程中的应用[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2002, 14(4): 23-24.

[3] 曹文贵, 伍丹, 赵明华, 等. 基于静力贯入的土石混填路基压实度确定方法[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 8-15.

[4] 曹文贵, 罗宏, 张峻淞, 等. 基于 Duncan—Chang 模型的静力贯入路基压实度的确定方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5): 1-8.

[5] 徐世法, 张业兴, 郭昱涛, 等. 基于贯入阻力测试系统的聚氨酯混凝土压实时机确定方法[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 226-235.

[6] 王峰, 程培峰. 密实度检测仪在粉砂土路基压实度检测中的应用[J]. 中外公路, 2015, 35(6): 18-22.

[7] Herrick J. E., Jones T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(4): 1320-1324.

[8] Benevenuto, P. A. N., Morais, E. G. D. E., Souza, A. A., et al. Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures[J]. Ecological Indicators, 2020, 117(20): 1-9.

(下转第 54 页)

止浆阀或木塞将注浆孔口堵塞以保持孔内压力、直至浆液完全凝固,保证径向注浆的实施效果。

(6)更换拱架。待变形数据稳定后逐步清除回填的石渣,石渣清除完成后,采用 I22b 型钢拱架从掌子面方向往初支段方向依次更换靠近掌子面的三榀钢拱架,每次换拱的数量不能超过 1 榀,在上台阶与下台阶连接处分别设置两组 4 m 长的 $\Phi 42$ 锁脚锚管进行加强。钢架更换完成后,补打 $\Phi 25$ 低预应力树脂卷中空注浆锚杆,其环纵间距为 $1.2\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,其中拱部锚杆长 4 m,边墙锚杆长 5 m。

(7)掌子面掘进。换拱完成后,在掌子面上设置了一个 30 m 深的超前水平钻孔,在上台阶掌子面顶部左右各增加了两组 5 m 长的探孔,角度为斜向上 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$,其搭接长度不低于 1.5 m,待无异常情况时方可采用机械开挖进行掌子面掘进,期间安排专职安全员进行盯控,若有涌水、溜塌迹象,立即疏散掌子面附近的施工作业人员。

5 结 语

根据隧道开挖揭示的情况:富水、高地应力软岩、砂化、差异性风化等多种不良地质条件并存甚

(上接第 11 页)

速度也慢。总的来说,在整个振冲碎石桩施工过程中,孔隙水应力产生消散的也较快,对整个施工过程几乎不产生较快影响,且其冲击造成的土体位移为厘米级并均在合理范围内,符合工程的实际情况。

参考文献:

[1] 关万彬. 基于二维有限元法的土坝渗流分析研究[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(8): 1-3, 12.
[2] 黄伟, 贾铭. 基于 ABAQUS 的地铁深基坑开挖渗流场变化的三维有限元分析[J]. 南通职业大学学报, 2022, 36(3): 100-104.
[3] 陈玉茹. 基于土石坝渗流和坝坡稳定的二维有限元分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2014, 26(4): 13-15.

(上接第 16 页)

[9] 李金云, 张爱卿, 单炜. 基于简易贯入低液限黏土路基压实度确定方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2732-2737.
[10] 王德银, 唐朝生, 李建, 骆晓伟, 施斌. 干湿循环作用下膨胀土的贯入特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 57-65, 75.
[11] 于永堂, 郑建国, 刘争宏, 等. 基于贯入阻力与含水率联测

至叠加,同时还存在常规手段难以准确预测、突破传统经验认知等特点。该隧道突涌水灾害发生后,项目部工程技术人员基于现场调研、技术资料收集、对涌水灾害地质勘察报告进行综合分析^[5],对突涌水等级进行了判识并采取了适当的整治措施,通过反压回填、掌子面及时封闭、超前支护及径向注浆等多种措施联合实施,消除了突涌水灾害的威胁。

参考文献:

[1] 何均云. 岩溶地层下穿采空区段隧道施工涌水及变形整治技术[J]. 路基工程, 2024, 30(2): 1-6.
[2] 罗玉虎, 李丹, 刘亮. 摩天岭隧道涌水原因分析及处治措施[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 38(2): 408-412.
[3] 杜义欣. 断层溶蚀带突水涌泥治理施工技术[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 10-14.
[4] 卿三惠. 高压富水地层超深埋特长隧道施工技术研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 9(1): 86-91.
[5] 姚云晓. 青山隧道渗涌水原因分析及治理措施[J]. 岩土工程界, 2004, 31(10): 66-70.

作者简介:

罗世刚(1987-),男,重庆市人,分局副总工程师,副高级工程师,学士,从事建设工程施工技术与管理工

(编辑:李燕辉)

[4] 宋子亨, 杨强, 刘耀儒. 考虑孔隙水应力作用的岩土体弹塑性模型及其有限元实现[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 500-508.
[5] 俞伟, 苏枋, 唐新军. 碎石桩加固软土地基处理的有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(5): 114-117, 168.

作者简介:

何英建(1994-),男,重庆荣昌人,项目工程部主任,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工;
喻 健(1990-),男,四川眉山人,项目经理助理,助理工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工;
何 鑫(1998-),男,四川绵阳人,项目工程部主任,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工;
王 盛(1999-),男,江苏常州人,在读硕士研究生,研究方向:水工结构。

(责任编辑:李燕辉)

的黄土填方压实度检测方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 129-134, 143.

作者简介:

廖茂权(1975-),男,四川眉山人,项目总工程师,副高级工程师,从事水利水电及市政工程施工技术与管理工;
孟运庭(1990-),男,湖南长沙人,项目副总工程师,工程师,从事水利水电及市政工程施工技术与管理工。

(责任编辑:李燕辉)