

DOI:10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2018. 06. 18

砾石地层冻土热物理特性研究

李思齐, 杨 平, 赵方舟

(南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 地铁建设中时有穿越富含砾石的地层, 需使用冻结法施工, 而砾石地层的热物理性质是冻结法设计的重要依据。为研究人工冻结砾石土热物理特性, 通过自制试验仪器, 开展了砾石土冻结温度、导热系数和容积热容量测定方法及其特性研究, 并与黏土、粉土等典型土层进行对比分析。结果表明: 砾石土冻结温度曲线变化符合常规变化规律, 且冻结温度为 $-0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高于黏土、粉土等; 砾石土容积热容量与黏土、粉土等相近, 随颗粒粒径增大, 常温和冻结状态下土体容积热容量比值减小, 其中砾石土的比值为 1.19; 砾石土导热系数较大, 冻结状态下达 $3.89\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$, 是常温状态下的 1.65 倍, 符合颗粒粒径对导热系数的影响规律。砾石土导热系数可按各组成物质的导热系数及其相应的体积比推算。

关键词: 人工冻结砾石土; 冻结温度; 容积热容量; 导热系数

中图分类号: TU411.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)06-0122-05

A study of the thermal physical properties of frozen soil in gravel layers

LI Siqi, YANG Ping, ZHAO Fangzhou

(School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: Artificial freezing method is widely used in metro construction which goes through some gravel sections. The physical properties of gravel layers are the key basis for the design of the freezing method, and researches on thermal physical properties of artificial frozen gravel layers are lacking. To examine the thermal physical properties of artificial frozen gravel layers, a study of the freezing temperature, thermal conductivity and volumetric heat capacity of gravel layers was carried out with instrument developed at home. The physical properties of gravel layers were compared with those of clay, silt, etc. The results indicate that the freezing temperature change of gravel is in line with the typical change role and the freezing temperature of gravel is $-0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$, which is higher than that of clay and silt. The volumetric heat capacity of gravel is close to that of other soils. The ratio of volumetric heat capacity reduces with the increasing particle size in two situations (freezing and room temperature). The ratio of volumetric heat capacity of gravel is 1.19. The thermal conductivity of gravel is more than that of other soils titled in this paper. The thermal conductivity of gravel is $3.89\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ in the freezing situation, which is 1.65 times the room temperature. The thermal conductivity of gravel is in line with the role that a bigger particle size causes a bigger thermal conductivity and can be calculated by the thermal conductivity of materials.

Keywords: artificial frozen gravel; freezing temperature; volumetric heat capacity; thermal conductivity

人工冻结法作为一种常用的土体加固方法, 广泛应用于富含水砂层止水加固。应用人工冻结法对砾石地层进行加固, 可有效止水和提高地层强度。国内关于冻土物理力学特性的研究已经十分丰富。邴慧

收稿日期: 2018-06-13; 修订日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51478226); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 常州市轨道交通科研项目(DG-DC-16006)

第一作者: 李思齐(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事城市地下工程研究。E-mail: 997153982@qq.com

通讯作者: 杨平(1964-), 男, 教授, 博导, 主要从事岩土与地下工程的教学与研究工作。E-mail: yangping@njfu.edu.cn

等^[1]研究了不同含盐量和含水量对冻结温度的影响,发现冻结温度随含盐量增大而降低,随含水量增大而升高。张婷等^[2]探讨了不同因素对浅表土冻结温度和导热系数的影响,发现土质、干密度和含水率为影响土冻结温度和导热系数的主要因素。杨国清等^[3]研究了海相人工冻土热物理特性,分析了冻融对海相冻土的影响。王许诺等^[4]对水泥土冻结温度及热物理参数进行试验研究,总结了冻结水泥土冻结温度、导热系数与水泥掺入比的关系。姚兆明^[5]采用BP算法和遗传算法对冻结温度场进行研究,得出导热系数对温度场影响的敏感性。阮传侠等^[6]分析了天津地区各土层热物理特性,总结出不同区域土层热物理特性的变化规律。周家作等^[7]对土冻结温度与过冷温度进行了研究,总结了含水率和土中NaCl含量对冻结温度与最低过冷温度的影响规律。吴镇等^[8]对哈齐客运专线细圆砾土进行了冻结温度测试分析,分析得出细圆砾土导热系数随细颗粒含量的变化规律。

综上,有关人工冻土热物理特性研究已十分丰富,但主要是对细颗粒土的研究,有关粗砾石等粗颗粒土热物理力学特性研究尚未开展。本文通过自行研制砾石冻土模具与改进的试验方法,进行砾石地层冻土热物理试验,研究其热物理参数,并与常规土的相应参数进行对比,为工程应用提供依据

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样取自某建筑工地,取料深度为3.00~6.00 m,为天然流水冲刷形成的砾石,砾石表面光滑,磨圆度好,最大粒径20 mm。同时加入粗砂,模拟真实地层中砾石的级配,具体级配见图1。该级配下砾石土的不均匀系数和曲率系数分别为5.42和1.48,满足砾类土级配良好的要求。本文同时选用苏州轨道交通三号线地层中黏土、粉土、粉砂和淤泥质粉质黏土进行实验分析,并与砾石土的性质进行比较,具体土样参数见表1。

1.2 试验设备

冻结温度试验采用自行设计的装置进行,满足国家标准GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》^[9]。装置由恒温水浴槽、电脑、数据采集系统等组成。恒温水浴槽采用高低温恒温液浴循环两用槽XT5218-B8;常规细粒土采用Φ35 mm×50 mm试验杯,而砾石土采用试验杯为导热性较好的内径110 mm、壁厚2 mm的铝制金属杯,带杯盖;数据采集系统为DataTaker采集

器。试验采用热电偶测温法,以电势测量为基础,通过数据采集系统采集整个试验过程中的热电偶及温度信号,以获得土体降温的温度-时间(*C-T*)关系曲线和土体冻结温度值。冻结温度试验装置原理如图2所示。

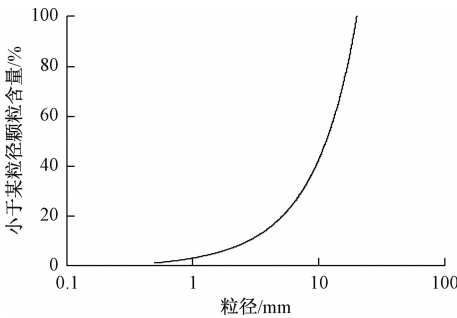


图1 实验用砾石土的级配曲线

Fig. 1 Grading curve of the shingle soil

表1 土样基本土质参数

Table 1 Physical parameters of different soils

土质	含水量/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	干密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙比	塑性 指数	液性 指数
砾石土	27.4	1.68	2.14	0.824		
黏土	23.9	1.60	1.98	0.821	13.8	0.71
粉土	35.2	1.37	1.86	0.829	8.33	1.35
粉砂	24.8	1.57	1.96	0.787		
淤泥质粉质黏土	33.6	1.40	1.94	0.862	12.4	0.99

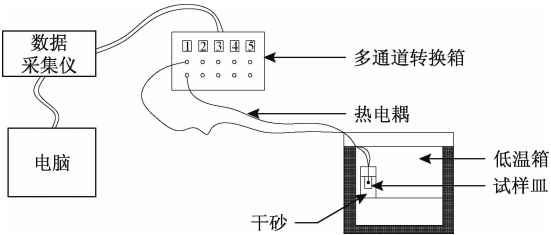


图2 冻结温度试验装置及原理图

Fig. 2 Text device of the freezing temperature

导热系数和容积热容量测定采用欧洲产 ISOMET 热特性分析仪。该仪器可应用动态测量方法,从而降低了导热系数的测量时间,只需10~15 min,根据材料中的温度变化,利用探头给土样升温,然后周期性测量土样热量的变化,计算出热传导率。前期曾预先采用针式探头进行导热系数和容积热容量测定,试验结果显示,两种状态下砾石土导热系数与水和冰导热系数几乎一致。分析认为,这是由于砾石土试样颗粒较大,采用针式探头无法确保探头和土体充分接触,探头完全浸没于水中,不能真实反映砾石土热物理特性,故采

用平板探头。平板探头接触面积大,且可通过自重平整试样,使探头和试样充分接触。试验中先预平整试样表面,后将探头置于试样表面,并使水稍稍没过探头底部。

1.3 试验方法

冻结温度试验,将砾石土分层填入试验杯中,压实并填满试验杯,随后加水至饱和,杯口加盖,测针通过杯盖开口插入砾石土试样中心处。将试验杯放入已预填标准砂的塑料杯内,并加标准砂至掩埋试验杯,然后将塑料杯放入水浴槽进行试验。

导热系数试验,用自制的半模中分层压实,加水至饱和试样,确保试样表面尽可能平整,增大其与探头接触的面积。放入探头静置 30 min 后测量。进行三个相同试样的平行试验,首先在常温时测定砾石土试样的导热系数,接着在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境箱中冻结,恒温 24 h 后再次测量。

2 冻结砾石土热物理参数比较与特性分析

2.1 冰结温度

土的冻结温度一般指土体中水的冻结温度,是判别土体是否处于冻结状态的一个基本物理指标,也是确定路基冻结深度和人工冻土冻结壁有效厚度的重要依据,在很大程度上影响冻土壁温度分布状况。因而,冻结温度的研究对确定土的冻结深度和冻结壁设计具有重要意义。标准大气压下纯水的冻结温度即冰点为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,而土质的影响使得土的冻结温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10]。土体冻结可分为以下几个过程:Ⅰ过冷、Ⅱ跳跃、Ⅲ恒定。当起始冻结温度较高时,冻结过程中会出现过冷。从图 3 可见,不同起始温度的砾石土样在冻结过程中温度下降速率基本相同,达到过冷时的温度也基本相同,且起始温度越高,达到过冷所需时间越长。跳跃后温度上升,稳定时的温度即为土样冻结温度,三个不同试样的冻结温度基本相同。

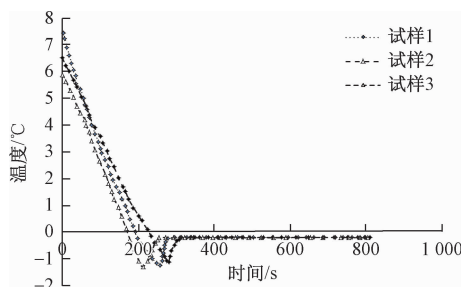


图3 饱和砾石试样冻结过程曲线

Fig.3 Freezing process of the shingle soil

由图 4 及表 2 可知:(1)不同类别土的冻结温度存在差异,这是由冻土中矿物成分差异引起的,其中某些矿物遇水后发生化学反应,改变了其自身性质,从而导致土中所含矿物浓度不同^[11]。不同类别的土冻结过程中温度随时间变化曲线的趋势基本相同。(2)由于水中矿物质的作用,各种土冻结温度均低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。且冻结温度从高到低依次为:砾石土 > 粉砂 > 淤泥质粉质黏土 > 粉土 > 黏土,即颗粒越粗冻结温度越高。这是因为,土体中的空隙水受土颗粒表面力场的约束,在土体冻结过程中空隙水必须克服这种表面力场作用才能形成冰骨架。土颗粒越小,其比表面积就越大,对水和矿物质成分的吸附作用越强,土颗粒外部形成较厚的水化膜,从而土体中水分发生相变所需要的冷量较多,因此冻结温度较低。

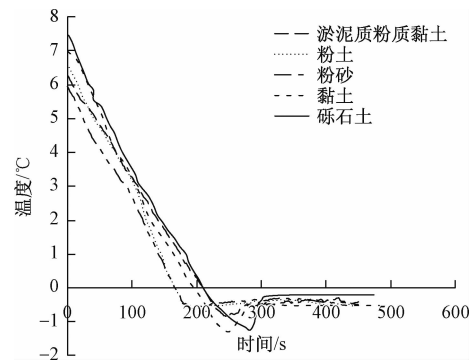


图4 不同土类冻结过程曲线

Fig.4 Freezing process of different soils

表2 不同土类冻结温度

Table 2 Freezing temperature of different soils

土类	含水率/ %	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	冻结温 度/ $^{\circ}\text{C}$
砾石土	27.4	1.68	2.14	-0.21
黏土	23.9	1.60	1.98	-0.50
粉土	35.2	1.37	1.86	-0.44
淤泥质粉质黏土	33.6	1.40	1.94	-0.36
粉砂	24.8	1.57	1.96	-0.26

砾石土中土颗粒直径与上述其他土体相比,有数量级上的差距,导致砾石土中水几乎全为自由水。当土体开始降温时,因土中自由水比热较大,降温需要大量冷量,故与其他土冻结过程曲线相比,在过冷段维持时间较长,且过冷段结束时的温度较低。过冷段温度下探较深,积蓄的潜热较多,当土中水发生相变时,潜热集中释放,导致砾石土跳跃段上升速率大于其他土体,且上升温度较大。当土中自由水完全冻结后,土体基本处于冻结完成的状态,所以砾石土的冻结温度基本不受颗粒表面力场的约束,近似于含少量矿物质水

的冻结温度。

2.2 容积热容量

容积热容量和导热系数分别反映了土体的蓄热能力和导热能力,是土的重要热交换系数,也是岩土工程温度场分析及建筑热工计算中的重要参数。土容积热容量和导热系数的确定,对全面了解冻土的冻融作用具有重要意义,并可以为人工冻结法温度场计算提供参数依据。通过试验,得到砾石土在常温和冻结情况下的容积热容量和导热系数,并与其它常见土进行对比,结果如表3。

表3 不同土类容积热容量及导热系数结果
Table 3 Volumetric heat capacity and thermal conductivity of different soils

土类	容积热容量/ (10 ⁶ J·(m ³ ·K) ⁻¹)		导热系数/ (W·(m·k) ⁻¹)	
	20℃	-10℃	20℃	-10℃
砾石土	2.08	1.75	2.36	3.89
黏土	2.12	1.75	1.69	2.27
粉土	2.23	1.83	1.72	2.13
粉砂	2.18	1.81	2.06	3.11
淤泥质粉质黏土	2.34	1.85	1.80	2.22

容积热容量为单位体积的土体温度改变1℃所需要的热量,是表示土体蓄热能力的指标。由表3可知:

(1)不同土体的容积热容量差距不大,这是因为土体的容积热容量具有按各物质成分的质量加权平均的性质。在含水量差距不大时,不同土体虽然颗粒粒径差距较大,但组成颗粒的矿物成分基本相同,因此容积热容量也相近;

(2)不同土体冻结状态的容积热容量均小于常温状态的,这是因为冰的容积热容量比水小;

(3)常温和冻结状态下不同土体的容积热容量比值均在1.2左右,但有随颗粒粒径变小而增大的趋势,其中砾石土的比值最小,仅为1.19。因为水和冰的储热能力远大于土骨架,主导土体容积热容量。土体颗粒粒径较小时,土颗粒比表面积较大,从常温到低温,土中结合水冻结析出,从而容积热容量变化较大。

试验表明,冻土的容积热容量可以按各物质成分的含量进行加权计算^[12],即:

$$C_{df} = \frac{C_{sf} + (W - W_u) C_i + W_u C_w}{1 + W} \quad (1)$$

式中: C_{df} 、 C_{sf} 、 C_i 、 C_w ——冻土、土骨架、冰和水的容积热容量/(10⁶J·(m³·K)⁻¹);

W 、 W_u ——总含水量和未冻结水含量。

表4 不同冻结土类容积热容量理论值与试验值比较

Table 4 Comparison of the volumetric heat capacity between theoretical and tested values

土类	容积热容量/(10 ⁶ J·(m ³ ·K) ⁻¹)		误差
	实测值	理论值	
黏土	1.75	1.89	8.00%
粉土	1.83	2.00	9.31%
粉砂	1.81	1.93	6.37%
淤泥质粉质黏土	1.85	2.10	13.50%
砾石土	1.75	1.85	5.71%

由表4可知:(1)除淤泥质粉质黏土外,不同土类容积热容量的试验值和理论值误差均在10%以内,说明式(1)基本符合土的容积热容量变化规律。(2)土颗粒越大,误差越小,其中砾石土的误差仅为5.71%,可直接用于实际工程砾石地层容积热容量估计。这是因为砾石土颗粒粒径较大,其土骨架容积热容量的离散程度较小,土体成分确定较为明确,因此计算值与实测值误差最小。

2.3 导热系数

土的导热系数是干密度、含水(冰)量和温度的函数,并与土的矿物成分和结构有关。由表3可知:

(1)常温下不同土质导热系数相差较大,砾石土>粉砂>淤泥质粉质黏土>粉土>黏土;砾石土的导热系数值最大,这是由于粗颗粒土总孔隙度小于细颗粒土,砾石的粗颗粒较多,土颗粒之间接触更好,而空气和水的导热系数远小于固体颗粒(空气和水的导热系数分别为0.024 W/(m·k)、0.465~0.582 W/(m·k),构成土颗粒的一般矿物导热系数为1.256~7.536 W/(m·k)^[12],所以粗颗粒含量较多的冻结砾石土导热系数最大。

(2)不论哪种土质,冻土的导热系数均大于常温土,且颗粒粒径越大差异性越大,细颗粒时两者比值为1.2~1.3,而冻结砾石土的导热系数是常温的1.65倍。这是因为冰的导热系数大约为水的4倍,相对于常温土,冻土中冰对导热系数起主导作用,因此冻土的导热系数普遍大于常温土。同时,总孔隙率较小的粗粒土,在冻结后,密实度进一步变大,且幅度大于细粒土,提高了热传导效率,所以颗粒越粗,冻结与融化两种状态下导热系数的差距越大。

(3)颗粒粒径对导热系数提高的影响随颗粒粒径变大而减弱。粉砂和粉土颗粒粒径平均为0.075 mm(通过粒径0.075 mm粒组含量区分两种土质),两种土体导热系数差距为16.5%,而从粉砂到砾石土(粒径范围20~60 mm),导热系数仅增长12.7%。原因

是当土体颗粒粒径较大且级配良好时,细颗粒填充空隙,热量主要通过细颗粒传递,颗粒粒径对导热系数增长的影响减缓。

表 5 不同冻结土类导热系数理论值与试验值比较

Table 5 Comparison of the thermal conductivity between theoretical and test values

土类	导热系数 / (W·(m·k) ⁻¹)		误差
	实测值	理论值	
黏土	2.27	2.44	6.87%
粉土	2.13	2.39	10.70%
粉砂	3.11	2.90	7.24%
淤泥质粉质黏土	2.22	1.95	13.77%
砾石土	3.89	3.68	5.76%

冻土的导热系数可根据各组成物质的导热系数及其相应的体积比,按下式计算^[12]:

$$\lambda = \lambda_s^{\Phi_1} \lambda_w^{\Phi_2} \lambda_i^{\Phi_3} \quad (2)$$

式中: λ_s 、 λ_w 、 λ_i ——矿物成分、水、冰的导热系数/(W·(m·k)⁻¹);

Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 ——矿物成分、水、冰在冻土中所占体积比。

由表 5 可知:(1)各种土导热系数实测值和理论值较为接近,说明式(2)基本符合土导热系数变化规律;(2)随颗粒粒径增大,导热系数实测值和理论值误差减小,且砾石土误差仅为 5.76%,可用于砾石土导热系数的初步估计。

3 结论

(1)针式探头接触面积较小,不适用于颗粒粒径较大的砾石土热物理参数测定,砾石土热物理参数应采用平板探头测定。

(2)砾石土的冻结温度为 -0.21℃,高于其他典型土,接近水的冻结温度,但其冻结过程曲线趋势与典型土一致。冻结过程可分为过冷、跳跃和恒定三个阶段;砾石土冻结过程中过冷段达到的温度较低,恒定期较长。

(3)常温和冻结两种状态下,不同颗粒粒径的土体容积热容量相近,且随颗粒粒径变小两种状态容积热容量比值增大,砾石土比值最小,为 1.19。砾石土容积热容量较小,常温和冻结状态下分别为 2.08×10^6 J/(m³·K) 和 1.75×10^6 J/(m³·K),实际工程中可通过公式计算冻结砾石土容积热容量,用于初步分析。

(4)两种温度条件下,砾石土导热系数符合颗粒粒径对导热系数影响的一般规律,较大的颗粒粒径导

致其导热系数明显大于其他典型土体,常温和冻结状态下导热系数分别为 2.36 W/(m·k) 和 3.89 W/(m·k),冻结砾石土导热系数是常温的 1.65 倍。

参考文献:

- [1] 邴慧,马巍. 盐渍土冻结温度的试验研究[J]. 冰川冻土,2011, 33(5): 1106 - 1113. [BING H, MA W. Experimental study on freezing point of saline soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1106 - 1113. (in Chinese)]
- [2] 张婷,杨平. 不同因素对浅层土导热系数的影响[J]. 地下空间与工程学报,2012, 8(6): 1233 - 1238. [ZHANG T, YANG P. Effect of different factors on the heat conduction coefficient of shallow top soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6): 1233 - 1238. (in Chinese)]
- [3] 杨国清,杨平,何文龙,等. 海相人工冻土热物理特性试验研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2017, 41(1): 170 - 176. [YANG G Q, YANG P, HE W L, et al. Experiment study of thermal physical properties of marine artificial frozen soil [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(1): 170 - 176. (in Chinese)]
- [4] 王许诺,杨平,彭玉龙. 水泥土冻结温度及热物理参数试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2012, 34(6): 96 - 100. [WANG X N, YANG P, PENG Y L. Test research to freezing point and the thermal physical parameters of freezing cement soil [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(6): 96 - 100. (in Chinese)]
- [5] 姚兆明. 人工冻土温度场影响因素灵敏度分析[J]. 水文地质工程地质,2006, 33(3): 38 - 40. [YAO Z M. The sensitivity analysis of factors affecting the temperature field developed in artificial freezing soils [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(3): 38 - 40. (in Chinese)]
- [6] 阮传侠,冯树友,牟双喜,等. 天津地区地层热物性特征及影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 158 - 163. [RUAN C X, FENG S Y, MOU S X, et al. An analysis of the characteristics of thermal physical properties and their influencing factors in the Tianjin area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 158 - 163. (in Chinese)]

(下转第 149 页)

- (4):406-421.
- [16] 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 277-286. [ZHANG Y S, GUO C B, YAO X, *et al.* Study on the effect of active fault Geological hazards on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(3): 277-286. (in Chinese)]
- [17] Zhang Y, Guo C, Lan H, *et al.* Reactivation mechanism of ancient giant landslides in the tectonically active zone: a case study in Southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2):1719-1729.
- [18] 郭长宝, 张永双, 王涛, 等. 南北活动构造带中段地质灾害与重大工程地质问题概论[J]. 地质力学学报, 2017, 23(5): 707-722. [GUO C B, ZHANG Y S, WANG T, *et al.* An Introduction to geological disasters and major engineering geology problems in the middle section of the North-South active tectonic belt [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(5): 707-722. (in Chinese)]
- [19] 钱海涛, 张力方, 修立伟, 等. 中国地震地质灾害的主要类型与分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 119-127. [QIAN H T, ZHANG L F, XIU L W, *et al.* The main types and distribution characteristics of geohazard by earthquake in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 119-127. (in Chinese)]
- [20] 徐永强, 殷志强, 撒兰鹏. 鲁甸 8·03 地震区甘家寨特大型滑坡发育特征及演化过程研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 550-558. [XU Y Q, YIN Z Q, SA L P. The developing characteristics and evolution process of Ganjiazhai large scale landslide in Ludian 8·03 earthquake area of Northeast Yunnan [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(4): 550-558. (in Chinese)]
- [21] 刘云鹏, 邓辉, 黄润秋, 等. 反倾软硬互层岩体边坡地震响应的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(3): 30-37. [LIU Y P, DENG H, HUANG R Q, *et al.* Numerical simulation of seismic response of anti-dumping rock slope interbedded by hard and soft layers[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(3): 30-37. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华

(上接第 126 页)

- [7] 周家作, 谭龙, 韦昌富, 等. 土的冻结温度与过冷温度试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 777-785. [ZHOU J Z, TAN L, WEI C F, *et al.* Experimental research on freezing temperature and super-cooling temperature of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 777-785. (in Chinese)]
- [8] 吴镇, 岳祖润, 王天亮. 哈齐客专细圆砾土冻结温度测试分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(1): 37-40. [WU Z, YUE Z R, WANG T L. Test analysis on freezing temperature of fine round gravel soil in Harbin-Qiqihaer railway[J]. Journal of Shijiazhaung Tiedao University (Natural Science), 2013, 26(1): 37-40. (in Chinese)]
- [9] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Plans Publishing House, 1999. (in Chinese)]
- [10] 贺俊, 杨平, 何文龙. 苏州地铁典型土层冻土力学特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 39(5): 72-76. [HE J, YANG P, HE W L. Mechanical behavior research of typical frozen soil clay in Suzhou subway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 39(5): 72-76. (in Chinese)]
- [11] 孙谷雨, 杨平, 刘贯荣. 南京地区冻结粉质粘土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 2990-2995. [SUN G Y, YANG P, LIU G R. Experimental test on constitutive relationship of Nanjing frozen silty clay considering Duncan-chang model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 2990-2995. (in Chinese)]
- [12] 徐学祖, 王佳澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 82-84. [XU X Z, WANG J C, ZHANG L X. Physics of frozen soil [M]. Beijing: Science Press, 2001: 82-84. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华