

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201910051

# 乌鲁木齐机场戈壁砾石土填料的工程特性 试验研究\*

张 煌, 邓 松, 万 星, 丁建文

(东南大学交通学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:**以新疆乌鲁木齐机场改扩建工程中道基填筑拟采用的戈壁砾石土填料为研究对象,开展了戈壁砾石土的颗粒分析、表面振动压实、点荷载强度等物理力学试验,对其颗粒特征、压实特性以及大粒径砾石强度展开了探讨。结果表明:该地区戈壁砾石土不均匀系数 $C_u$ 为37.9,曲率系数 $C_c$ 为2.12,属于级配良好的砾类土,且填料在1~2 mm粒组处存在一定程度的缺失;不同粗颗粒含量戈壁土均存在明显的最优含水率与最大干密度,最大干密度随含水率变化呈现抛物线形式,且随着填料粗颗粒含量的增加而增加;天然级配的戈壁砾石土粗颗粒含量超过70%,最大干密度可达 $2.41\text{ g/cm}^3$ ;另外,戈壁砾石土中大块砾石的强度较高,自然风干状态下单轴抗压强度的平均值约为60 MPa。试验得出乌鲁木齐机场建设采用的天然级配的戈壁砾石土是一种非常好的道基填筑材料,研究结果亦可为类似工程提供参考。

**关键词:**戈壁砾石土;室内试验;颗粒分析;压实特性;点荷载强度

**中图分类号:** TU443   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1301-07

## Experimental Study on Engineering Properties of Gobi Gravel Soil in Urumqi Airport Foundation

ZHANG Huang, DENG Song, WAN Xing, DING Jianwen

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Gobi gravel soil was adopted as fillings in the expansion construction of Urumqi International Airport. A series of physical and mechanical tests including particle gradation, surface vibration compaction and point load strength tests were conducted to analyze particle features, compaction characteristics and particle strength of Gobi gravel soil. The results indicate that Gobi gravel soil is well graded with a non-uniform coefficient  $C_u$  of 37.9 and a curvature coefficient  $C_c$  of 2.12, and there exists an extent of missing in the grain group from 1mm to 2mm. The optimum moisture content and maximum dry density of Gobi gravel soil change with coarse particle content predominantly. The maximum dry density varies with moisture content in a parabolic form, and increases with coarse particle content constantly. The maximum dry density of natural Gobi gravel soil reaches  $2.41\text{ g/cm}^3$  with more than 70% of coarse particle content. The large particle of Gobi gravel soil is featured by high strength, and the average uniaxial compressive strength in natural air-dried state is about 60 MPa. The

\* 收稿日期:2019-10-27;修回日期:2020-03-06

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划项目(No.SJCX18\_0045)资助

作者简介:张煌(1994—),男,硕士研究生。主要从事填土地基工程研究。E-mail:zhoyyx99@163.com

tests show that natural graded Gobi gravel soil is a kind of well-performed subgrade filling material for the construction of Urumqi Airport. The conclusions can also provide suggestions for similar projects.

**Keywords:** Gobi gravel soil; laboratory tests; particle analysis; compaction characteristics; point load strength

## 引言

随着国家西部大开发和“一带一路”战略的实施,我国西部地区经济发展遇到千载难逢的机遇,山区机场的建设也因此进入高速发展阶段。新疆乌鲁木齐机场作为国家门户枢纽机场,为适应新的发展需要,拟增建一条跑道与一座航站区,场区填方最大高度约为40 m,为高填方道基。一方面,由于机场扩建场地地势起伏较大,因而工程建设中需要大量的填筑材料;另一方面,新疆地区由于远离海洋,终年少雨,气温、地温的日差和年差大,日晒时间长,风沙活动频繁等因素形成了一种特殊的粗粒土——戈壁砾石土。因而是不是可以就地取材,将戈壁砾石土大规模用于路基特别是高填方路基填筑,已成为西部工程建设中一个亟待解决的实际问题。

已有不少学者对戈壁砾石土进行了相关的物理力学特性的研究<sup>[1-5]</sup>,分析得出新疆戈壁砾石土含水率低、孔隙比适中、渗透系数大、抗剪强度高、灵敏度低、不具有流变性等特点,是很好的工程填料。但众多研究表明<sup>[6-7]</sup>,地理位置由东向西,粗颗粒含量会增加,戈壁砾石土的级配特征、压实特征及其它各项性能均会有所不同。因此有必要针对本工程中拟采用的乌鲁木齐八钢料场的戈壁砾石土开展试验研究。本文通过一系列物理力学试验,分析了戈壁砾石土的级配特征、压实特性与粗颗粒强度特性,以期乌鲁木齐机场扩建和类似工程的建设提供参考。

## 1 试验材料

新疆乌鲁木齐机场作为国家门户枢纽机场,是面向中亚和西亚的重要综合交通枢纽。该机场为适应目前运量增加趋势和满足F类飞机运行需要,拟增建一条飞行区跑道和一座航站区。拟建场区位于天山山脉北麓沙漠冲积带的边缘,地势为由西南向东北倾斜,地形总体上较平坦,其中跑道与站坪间场地东西两端地势较高,中间地势低洼。场地

地层主要为第四纪冲积形成的戈壁砾石土层,厚度大于200 m;场区填方最大高度约为40 m,为高填方道基。填方填料拟选用新疆地区广泛分布的戈壁砾石土。

试验所用戈壁砾石土取自乌鲁木齐八钢料场,为乌鲁木齐机场扩建工程道基的主要填料来源之一。现场取样如图1所示,该地区是由古老的洪积、冲积形成的戈壁滩,主要有大粒径灰白色的卵石和灰棕色的砂土颗粒组成。卵石沉积于土中,粒径差别较大,除少量破碎外,没有明显棱角,磨圆度较高。卵石较均匀分布于砂土中,没有明显分层现象。戈壁砾石土中粒径差距较大,最大粒径有200 mm以上,其中以粒径为20~40 mm的卵石居多。土料受人类活动影响较小,是典型的天然戈壁滩。



图1 现场取样

Fig.1 In situ sampling

## 2 戈壁土级配特征

鉴于新疆戈壁砾石土主要为粗颗粒,故采用筛分法进行级配试验。筛分试验采用四分法<sup>[8]</sup>测定,共计3组,分别为A1、A2、A3,取计算平均值作为代表级配,记作A4。本次筛分选用孔径分别为60、40、20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 mm的标准筛系。

对戈壁砾石土进行初步过筛可以看出:颗粒粒径分布很广,存在少量粒径 $>200$  mm的岩块,其中主要粒径为0~1 mm、1~2 mm、2~5 mm、5~10 mm、10~20 mm、20~40 mm和40~60 mm。大粒径颗粒表面光滑,没有明显棱角,多呈灰褐色,颗粒组成如图2所示。

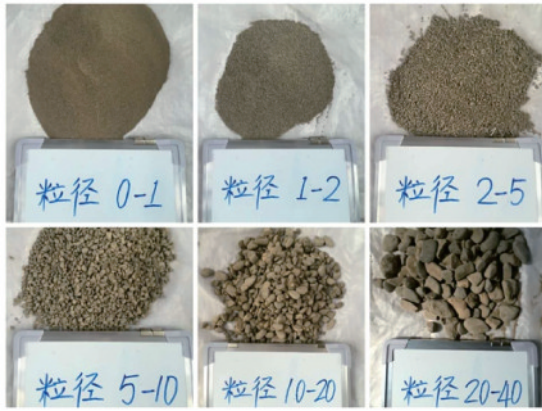


图2 颗粒组成

Fig.2 Particle composition

筛分试验结果表明,虽然戈壁砾石土采取于同一地点,但筛分结果存在一定的差异,粗颗粒含量 $P_5$ (粒径 $d>5\text{ mm}$ )并不完全一致。颗粒级配曲线如图3所示,由图3可知:

(1)级配曲线整体较为平缓,但曲线在1~2 mm粒径范围内存在较为明显的“平台”段,表明戈壁砾石土填料缺失1~2 mm的粒组,该结论与众多有关

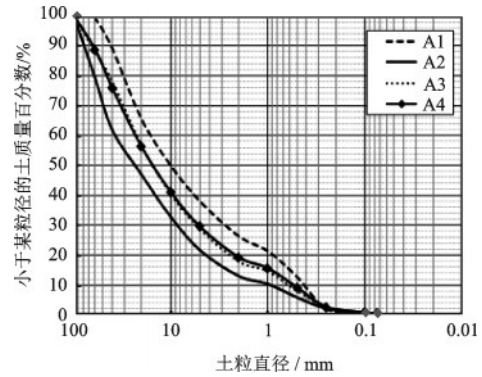


图3 颗粒级配曲线

Fig.3 Particle grading curve

戈壁砾石土的研究结论相同<sup>[3,9-10]</sup>。

(2)戈壁砾石土中粗粒土( $d>5\text{ mm}$ )含量 $P_5$ 约为70%,所以天然戈壁砾石土是骨架-密实结构<sup>[11]</sup>,即戈壁砾石土的力学性质主要取决于粗粒土。

(3)由级配曲线计算得到戈壁砾石土各项级配指标见表1,根据三组试验结果,戈壁砾石土的不均匀系数 $C_u$ 介于37.7~38.9,曲率系数 $C_c$ 为1.08~2.26,满足 $C_u>5$ 与 $C_c=1\sim3$ 的要求,为级配良好土。

表1 戈壁土填料级配参数

Table 1 Grading parameters of Gobi soil

粒组	细颗粒含量/ %	粗颗粒含量/ %	$d_{10}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
A1	0.71	61.92	0.43	2.75	16.22	37.7	1.08
A2	0.62	78.55	0.98	8.65	38.12	38.9	2.00
A3	0.87	71.35	0.59	5.47	22.44	38.0	2.26
A4(平均值)	0.74	70.66	0.58	5.20	22.00	37.9	2.12

(4)取三次试验平均值作为代表级配,则不均匀系数为37.9,曲率系数为2.12。根据《公路土工试验规程》<sup>[12]</sup>分类,判定其属于级配良好的砾类土(GW),是很好的填筑材料。

### 3 戈壁土压实试验

#### 3.1 试验方法与设备

根据《公路土工试验规程》<sup>[12]</sup>使用表面振动压实仪进行粗粒土的压实试验。其主要特点是振动

力和静压力联合作用在无黏性粗粒土上。由于振动力使土颗粒处于运动状态,颗粒间的摩阻力减小甚至消失,静压力使土体内产生压应力和剪应力,克服颗粒间的摩阻力,因此在联合作用下,土体中颗粒易处于运动状态且发生相对位移,从而使土体密实。所以,表面振动压实法是测定无黏性粗粒土最大干密度非常有效的室内试验方法之一<sup>[13]</sup>。本次试验使用的仪器为南京宁曦土壤仪器有限公司生产的YSY-1型表面振动压实仪,如图4所示,仪器具体参数见表2。

表2 YSY-1型表面振动压实仪参数

Table 2 Parameters of YSY-1

电源电压/V	耗电功率/W	振动频率/Hz	激振力/kN	表面静压力/kPa	试筒规格(内径)/mm
380	1 100	47.5	10~80	18	280



图4 表面振动压实试验设备

Fig.4 Tests equipment for surface vibrating compaction

### 3.2 试验方案

为探讨颗粒级配对施工压实的影响,进行了四组不同粗颗粒级配下的压实试验,分别是: $P_5=30\%$ 、 $P_5=50\%$ 、 $P_5=70\%$ 、天然级配( $P_5$ 指粒径大于5 mm 颗粒含量)。在进行级配设计时,将戈壁砾石土分成6个粒组:1~2 mm、2~5 mm、5~10 mm、10~20 mm、20~40 mm、40~60 mm。根据级配设计,制备三种粗颗粒级配的试样和天然级配试样,每组试样质量30 kg。各组试样级配见表3。

具体试验过程如下:

(1) 搅拌试样,使土水充分混合。然后将制备好的试样分三等份,测定并记录空试筒的质量。

(2) 用小铲依次将试样加入试筒中,并注意使试样颗粒离散程度最小。

(3) 抹平试样表面后,用橡皮锤敲击试筒壁,使试料下沉。

(4) 将戈壁砾石土分三次添加到击实筒内,每层试样激振时间为6 min。

(5) 压实完成后,用钢尺测量试样表面到试筒上缘的距离,计算试样的体积,具体计算如式(1)、式(2)。

$$\rho_d = \frac{M}{V} \quad (1)$$

$$V = A_c(H_0 - H) \quad (2)$$

式中, $\rho_d$ 为试样干密度; $M$ 为试样质量; $V$ 为振毕密实试样体积; $A_c$ 为标定的试筒横截面积; $H_0$ 为试筒高度; $H$ 为振毕试样表面到试筒上缘高。

### 3.3 试验结果分析

不同级配下粗粒土击实试验曲线如图5所示。试验表明,当粗粒土级配组成一定时,由于压实过程中戈壁土克服颗粒间阻力作用,干密度与含水率近似呈抛物线关系,填料的干密度随含水率呈现先增大后减小的趋势,峰值对应当前级配下戈壁砾石土的最优含水率与最大干密度。当含水率较低时,包裹土颗粒的结合水膜厚度较薄,润滑作用较弱,因此土颗粒的相对位移阻力较大,且颗粒易破碎,如图6(a)所示;而当含水率高于最优含水率时,土体中将产生较多的自由水,虽然戈壁砾石土能自由排水,但由于实验套筒不能透水,所以富余自由水不能被排出,易产生砂石分离,如图6(c)所示,从而导致试样干密度减小。郭庆国<sup>[14]</sup>通过试验表明含

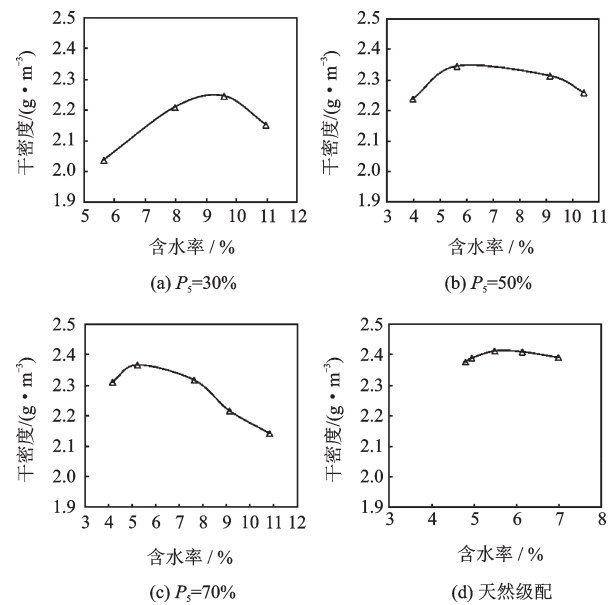


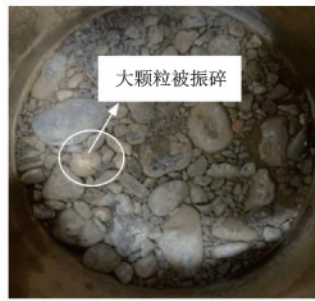
图5 不同级配粗粒土压实曲线

表3 颗粒级配设计

Table 3 Design of particle grading

单位:mm

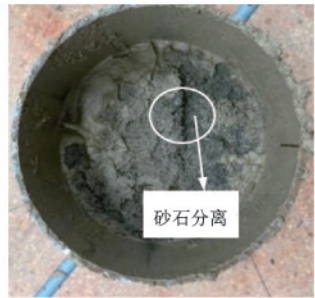
粗颗粒含量/%	通过百分率/%						
	60	40	20	10	5	2	1
30	100	94.37	85.41	77.32	70.00	61.37	55.57
50	100	89.31	73.61	60.67	50.00	38.72	31.92
70	100	82.16	58.73	41.97	30.00	19.24	13.76



(a) 低含水率



(b) 中等含水率



(c) 高含水率

图6 不同含水率戈壁土压实效果

Fig.6 Compaction effect of Gobi soil at different water contents

水率增加到一定程度不会影响粗粒土的压实质量,因而在实际工程中可以保持填料的含水率略高于最佳含水率,同样能够得到较好的压实质量。

从图7中可以看出:粗颗粒含量在30%~70%时,最大干密度随着粗颗粒含量增加而增大,而最优含水率随粗颗粒含量增加而减小;当 $P_s=70\%$ 时,最大干密度达到最大值 $2.37\text{ g/cm}^3$ ,而最优含水率则为最小值。分析原因认为:相同体积的细颗粒数量比粗颗粒的数量多,比表面积大、孔隙大、重量小。所以当粗颗粒含量增大时,单位体积土的重量增加,导致干密度随粗颗粒含量增加而增大。而最优含水率相当于全部孔隙被水填充时的饱和含水率,和比表面积密切相关,当粗颗粒含量增加,比表面积减小时,颗粒之间的摩阻力减

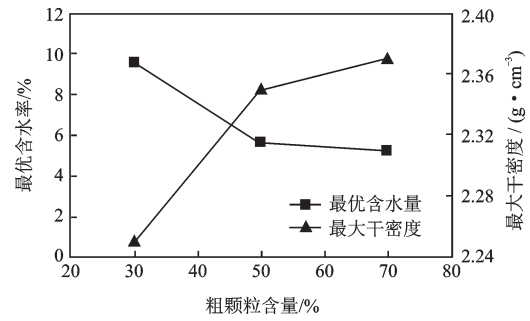


图7 不同级配粗颗粒土最大干密度和最优含水率

Fig.7 Maximum dry density and optimum water content of Gobi soil with different particle gradings

小,最优含水率自然会下降。所得结论与文献[15-16]研究结果相符。综上分析认为含水率和粗颗粒含量是影响戈壁砾石土压实性能的两个重要因素。含水率通过改变颗粒间的摩擦作用而影响压实效果,而粗颗粒含量通过改变试样内部结构特征影响压实效果。

由上可知,对于戈壁砾石土的工程应用,应该选取干密度大的填料。而试验表明,天然级配戈壁砾石土的粗颗粒含量略大于70%,最大干密度可达 $2.41\text{ g/cm}^3$ 。所以,工程中使用天然级配的戈壁砾石土能够满足较大干密度且较低含水率的要求。

## 4 戈壁土点荷载试验

### 4.1 试验设备与方案

如上所述,根据戈壁砾石土的级配特征,可以判定其力学性能主要取决于粗粒料,因此有必要对戈壁砾石土中的大颗粒进行点荷载试验。

本试验使用STDZ-2型点荷载试验仪,如图8所示。仪器最大压100 kN,试样高度10~100 mm,通过千斤顶加载,能自动记录岩石破坏峰值压力。按照规范要求,挑选满足要求的大粒径砾石,共16块,采样和制备过程中尽量避免人为裂缝。

### 4.2 试验结果分析

点荷载试验结束后,观察破坏试样可以发现:试样破坏后,多数分裂成三瓣,且破坏面参差不齐,没有明显节理,表现为不规则破坏,如图9所示。这是由于砾石局部含有非贯通的微裂隙,在受到单向荷载时,微裂隙端部会出现较大的应力集中现象,致使微裂隙逐渐扩展,最后多个微裂隙面贯通,导



图8 点荷载试验仪

Fig.8 Testing equipment for point loading



图9 点荷载试样破坏特征

Fig.9 Crack characteristics of samples

致石块发生破坏。图10为试样点荷载强度分布图，从中可得结论：戈壁砾石土中大粒径砾石在风干状态下的单轴抗压强度大于40 MPa的试样数占总数的87.5%，其中最大强度达到99.30 MPa，最小强度为38.32 MPa，平均值为60.90 MPa，试验单轴抗压强度主要集中于40~80 MPa。

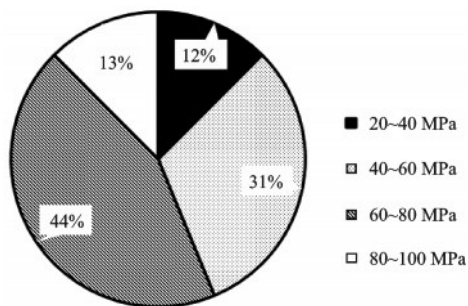


图10 试样单轴抗压强度分布

Fig.10 The pie chart of uniaxial compressive strength distribution

## 5 结 论

本文依托新疆乌鲁木齐机场改扩建工程,对拟采用的新疆戈壁砾石土填料的基本物理力学特性展开了室内试验研究,主要结论如下:

(1)该地区戈壁砾石土不均匀系数  $C_u$  为 37.9, 曲率系数  $C_c$  为 2.12, 属于级配良好的砾类土, 是一种很好的道基填筑材料。

(2)当粗粒土级配组成一定时,干密度与含水率呈抛物线关系,且填料最大干密度随着填料中粗颗粒含量的增加而增加。天然级配的戈壁砾石土粗颗粒含量超过 70%,最大干密度可达  $2.41 \text{ g/cm}^3$ , 施工中可以通过适当洒水调剂含水率的方式提高压实质量和效率。

(3)戈壁砾石土中的大粒径砾石抗压强度较高。自然风干状态下,粗颗粒的单轴抗压强度为 60 MPa 左右,强度主要集中于 40~80 MPa。

### 参考文献:

- [1] 张立刚,刘重庆,杨有海.戈壁地区高速铁路路基施工工艺研究[J].路基工程,2011(4):123-125.  
Zhang L G, Liu Ch Q, Yang Y H. Study on high-speed railway subgrade construction technology in Gobi Region[J]. Subgrade Engineering, 2011(4): 123-125. (in Chinese)
- [2] 杨有海,赖国泉.戈壁地区高速铁路路基填筑试验研究[J].铁道学报,2011,33(3):77-83.  
Yang Y H, Lai G Q. Research on filling test of high-speed railway subgrade in the Gobi Desert[J]. Journal of The China Railway Society, 2011, 33(3): 77-83. (in Chinese)
- [3] 夏琼,杨有海.兰新第2双线铁路路基戈壁土填料试验研究[J].中国铁道科学,2010,31(6):1-6.  
Xia Q, Yang Y H. Experimental study on the gobi soil filling for the subgrade of the second double-track in Lanzhou-Xinjiang railway[J]. China Railway Science, 2010,31(6): 1-6. (in Chinese)
- [4] 苗学云,屈耀辉.兰新二线新疆段戈壁土地基沉降预测分析[J].路基工程,2015(4):27-31.  
Miao X Y, Qu Y H. Prediction analysis of gobi soil foundation settlement of Xinjiang section of Lanzhou-Xinjiang railway line 2[J]. Subgrade Engineering, 2015(4):27-31. (in Chinese)
- [5] Mokwa R L, Trimble N R. Permeability of coarse-

- grain soil from void space and pore distribution [C]// Geocongress. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 2008.
- [6] 冯善恒. 戈壁土地基加固方法及其沉降预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- Feng Sh H. Study on reinforcement method and settlement prediction of gobi soil foundation [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- [7] 李鲲. 戈壁地区高速铁路地基处理与填筑技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- Li K. Research on ground treatment and filling technology of high speed railway in gobi area [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [8] 李晓柱, 刘洋, 吴顺川. 堆石坝现场碾压试验与离散元数值分析[J]. 岩石力学与工程报, 2013, 32(增2): 3123-3133.
- Li X Zh, Liu Y, Wu Sh Ch. Field roller compaction test and discrete element analysis of rockfill dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 2): 3123-3133. (in Chinese)
- [9] Huang D, Yue P, Liu C, et al. Discussion about analysis method for particle composition of coarse-grained soil and its compaction test [C]// Twelfth Cota International Conference of Transportation Professionals. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 2012.
- [10] 李鲲. 高速铁路路基戈壁土填料工程特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2013(6): 91-96.
- Li K. Experimental study on engineering characteristics of Gobi soil packing for high-speed railway subgrade [J]. Railway Engineering, 2013(6): 91-96. (in Chinese)
- [11] 周志军. 土石混填路基压实质量控制方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- Zhou Zh J. Study on controlling methods of compactive quality of subgrade filled with earth-rock mixtures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [12] 公路土工试验规程: JTG E40—2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Test methods of soils for highway engineering: JTGE40—2007 [S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [13] 包卫星, 郭小龙, 杨万精. 干旱荒漠区天然砂砾路基填料压实特性分析[J]. 中国公路报, 2017, 30(2): 19-24.
- Bao W X, Guo X L, Yang W J. Analysis on compaction characteristics of natural gravel for subgrade filling in arid desert region [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 19-24. (in Chinese)
- [14] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用 [M]. 南京: 黄河水利出版社, 1998.
- Guo Q G. Engineering characteristics and application of coarse-grained soil [M]. Nanjing: The Yellow River Water Conservancy Press, 1998. (in Chinese)
- [15] 刘鹏, 康馨, 陈卓, 等. 高铁路基粗颗粒土非饱和水力学及微观特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增1): 141-144.
- Liu P, Kang X, Chen Zh, et al. Microstructural and hydraulic properties of compacted high-speed Rail Subgrade Coarse Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 1): 141-144. (in Chinese)
- [16] 熊毅. 最优含水率与粗粒含量关系探究[J]. 土工基础, 2019, 33(2): 220-224.
- Xiong Y. Relationship between optimal moisture content and coarse grain content in granular soils [J]. Soil Engineering and Foundation, 2019, 33(2): 220-224. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)