

文章编号: 1674—8247(2023)05—0034—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 05. 007

含水率及填充土含量对松散岩堆体抗剪强度的影响规律

张赓旺¹ 宋嘉杰²

(1. 兰州交通大学, 兰州 730070; 2. 宁夏宁东铁路有限公司, 银川 750001)

摘要:通过室内三轴试验,分析了不同含水率及填充土含量对岩堆体剪切特性的影响,结果表明:(1)随着填充土含量的增加,粘聚力表现出先略有减小后显著增加的变化趋势,在25%时可取得极值,而内摩擦角呈近似线性的减小关系;(2)当含水率从5%增加到12%时,粘聚力均呈现出增加趋势;然而含水率从12%增加到19%时,粘聚力逐渐降低;(3)随着含水率的增加,内摩擦角不断减小。当含水率为5%时,随着填充土含量的增加,抗剪强度先增加后减小;当含水率为12%时,填充土含量增加,抗剪强度先减小后增加,且围压越大,这种规律越明显;当含水率为19%时,随着填充土含量的变化,不同围压下的抗剪强度呈现出不同的变化趋势,但仍是围压越大,抗剪强度越大。

关键词:岩堆;三轴试验;剪切强度;含水率;填充土含量

中图分类号:U45 文献标志码:A

Impact of Moisture Content and Filling Soil Content on Shear Strength of Loose Rock Mass

ZHANG Gengwang¹ SONG Jiajie²

(1. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Ningxia Ningdong Railway Co., Ltd, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Through indoor triaxial tests, the impact of different moisture contents and filling soil contents on the shear characteristics of rock piles was analyzed. The results showed that: (1) With the increase of filling soil content, the cohesion initially slightly decreased and then increased significantly, reaching a maximum at 25%, while the internal friction angle showed an approximately linear decreasing relationship. (2) When the moisture content increased from 5% to 12%, the cohesion showed an increasing trend. From 12% to 19% moisture content, the cohesion gradually decreased with the increase in moisture content. (3) With the increase in moisture content, the internal friction angle decreased continuously. When the moisture content was 5%, the increase in filling soil content initially increased and then decreased the shear strength. When the moisture content was 12%, the increase in filling soil content initially decreased and then increased the shear strength, with the trend becoming more pronounced with higher confining pressure. When the moisture content was 19%, the variation in shear strength with the change in filling soil content showed different trends under different confining pressures, but with higher confining pressure, the shear strength was generally higher.

Key words: talus; triaxial test; shear strength; moisture content; filling soil content

收稿日期:2023-09-09

作者简介:张赓旺(1997-),男,硕士研究生。

引文格式:张赓旺,宋嘉杰. 含水率及填充土含量对松散岩堆体抗剪强度的影响规律[J]. 高速铁路技术,2023,14(5):34-39.

ZHANG Gengwang, SONG Jiajie. Impact of Moisture Content and Filling Soil Content on Shear Strength of Loose Rock Mass [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5):34-39.

岩堆是指在陡峻山坡上的岩体经过物理风化作用,坍塌堆积在坡脚形成松散的堆积体,其构造较为简单,主要由岩块和填充土构成,架空明显,强度来源主要是岩块间的咬合作用。

针对岩堆体的物理力学特性,国内外学者开展了一定的研究。文献[1]以西南地区某铁路为研究背景,从颗粒材料力学出发,对松散岩堆体的细-宏观强度关系进行了分析;陈建胜^[2]对堆石料进行了碾压试验,对其在碾压作用下的密实程度进行了分析;孙向军^[3]等开展了堆石料的大型试验,研究了堆石料的级配变化规律;文献[4-5]对岩堆体的动力响应特征进行了研究,得出了爆破开挖过程中岩堆体的位移情况;陈秀吉^[6]等利用大型压缩仪,对不同密度的堆石料进行了单轴蠕变试验,得出了堆石料的相对密度与轴向蠕变应变呈负相关关系;学者还通过室内试验以及含石量及块体大小分布的现场调查方法,对土石混合体的强度和变形特征进行了研究;季航宇^[7]根据岩堆体实际稳定性情况进行参数反演,并结合室内抗剪强度试验提出滑动面的抗剪强度计算方式; Pipatpongsa^[8]研究了重力作用下松散土楔体平面斜坡倾斜的休止角的静力容许应力解问题;Chen G^[9]等和 Ali^[10]以国外不同矿场爆破试验为基础分析了岩堆体爆破地震波衰减规律;汪彬^[11]等结合地质调查,对岩堆体滑坡的特征、形成机制进行了分析,并提出了具体的施工措施;庄严^[12]等结合地质调查,对岩堆体滑坡的特征、形成机制进行了分析,提出了具体的施工措施。综上所述,目前针对松散岩堆体物理力学特性的研究较少,研究结果不能完全描述岩堆体的特性,而现场试验由于条件限制,无法多次重复试验,得到同一影响因素下的试验结果有所差别,因此还需要更深入的分析。

基于上述研究,本文通过室内三轴试验与相似理论相结合的方法,对不同含水率及填充土含量下的试样进行剪切试验,并分析了不同含水率、填充土含量对强度参数的影响规律,以及松散岩堆体的应力应变关系。试验结果可为工程实践提供一定的借鉴。

1 岩堆体三轴试验过程

1.1 基于相似理论的材料选择

在地质历史进程中岩堆体不断受到物理风化等作用,崩解堆积后变成沉积类物质。因此,松散岩堆可以简化成岩块和土体的混合体,土的填充直接影响到单个岩块咬合作用大小,进而影响松散岩堆的强度。为了简化分析,将松散岩堆视为由岩块、土、水

3种基本的材料构成的复合体。根据前期的调研结果,得到岩堆体的基本性质如表1所示。

表1 岩堆体物理力学参数表

容重/(kN/m³)	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	泊松比
19.0~22.0	30.0~40.0	20.0~40.0	0.2~0.4

为符合岩堆岩块的形状特征,选取外形自然多样且具有棱角的石英砂作为岩堆的相似材料。石英砂的形成过程和物理特性与岩堆体岩块高度相似,且岩块中含有石英砂成分,在矿物成分方面也与岩堆体具有相似性。此外,石英砂的主要成分为二氧化硅,是一种廉价易得、坚硬耐磨的材料。填充土体选取粒径大小为0.075 mm以下的黏性土,黏性土粒径须小于岩块单元粒径的0.1倍,才能形成明显的粒径差异。考虑到松散岩堆中水的相似性,取自来水作为模拟水。根据相似基本定理,将石英砂作为基本岩块单元组成颗粒体系。在此基础上,通过不断增加填充土含量和含水量,对松散岩堆体的力学行为进行模拟试验。

1.2 相似比的确定

相似理论在实际应用中,要满足所有相似准则几乎是不可能的。因此,根据岩堆体的物理特性,使样本满足主要相似的判据,能够突出岩堆体的主要特点。由于岩堆体级配不良,粒径差异较大,最大粒径可达3~5 m,经过相似比缩小后依然较大,因此采用等量代替法,将超粒径颗粒等重量的用5 mm至允许最大粒径各级颗粒按照含量加权平均值代替。通常考虑的相似系数包括:几何相似系数、应力相似系数、应变相似系数、弹性模量相似系数和密度相似系数等。综合考虑试验精度、试验条件、试验工作量、经济指标、材料获取的难易程度等方面,确定试验相似比如表2所示。

表2 模型试验相似比表

分类	相似比	分类	相似比
几何相似比	$C_l = \frac{l_p}{l_m} = 200$	应力相似比	$C_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = 200$
弹性模量相似比	$C_E = \frac{E_p}{E_m} = 200$	应变相似比	$C_\epsilon = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_m} = 1$
容重相似比	$C_\gamma = \frac{\gamma_p}{\gamma_m} = 1$	泊松比相似比	$C_\mu = \frac{\mu_p}{\mu_m} = 1$
内摩擦角相似比	$C_\varphi = \frac{\varphi_p}{\varphi_m} = 1$	粘聚力相似比	$C_c = \frac{c_p}{c_m} = 200$

1.3 试验方案

采用常规三轴压缩的应力路径方式,首先在一定的围压 σ_1 下对试样进行各向等压固结。然后,在保持 σ_3 不变的情况下,增加轴向应力直至达到预先设定的

试验结果要求。试验破坏标准取松散岩堆相似材料的极限强度,应力-应变曲线达到峰值时的应力值即为极限强度或峰值强度,所对应的应变即为破坏应变。

参考试验规范和相关研究,同一种条件下每组试验进行 3 次,取其平均值作为代表结果。具体试验方案如表 3 所示。

表 3 试验方案表

填充土含量/%	含水率/%	围压/kPa
6	5	100、200、300、400
	12	
	19	
25	5	100、200、300、400
	12	
	19	
50	5	100、200、300、400
	12	
	19	
75	5	100、200、300、400
	12	
	19	

2 试验结果和分析

2.1 填充土含量对粘聚力及内摩擦角的影响规律

随着填充土含量的增加,不同含水率样本的粘聚力呈现先略有减小、后大幅增加的 trend,且可在填充土含量约为 25% 时取到极值。在极值点粘聚力分别为 24.1 kPa、35.3 kPa、17.0 kPa,如图 1、图 2 所示。当填充土含量低于 25% 时,随着填充土含量的增加,粘聚力减小,这是因为填充土含量较低时,试样粘聚力的来源主要是块石颗粒间的咬合嵌固程度的大小,少量的填充土会降低块石颗粒间的咬合力,但影响作用较小。当填充土含量低于 30% 时,粘聚力随着填充土含量的增加略微的降低。当填充土含量高于 30% 时,填充土逐渐包裹住块石,此时试样的粘聚力主要来源是填充土之间的接触粘结,且粘聚力因填充土含量增加而增大的部分大于因块石颗粒含量减小而减小的部分,粘聚力总体上增加,这也是填充土含量在 30% 以上时,粘聚力曲线斜率越来越大的原因。

内摩擦角随着填充土含量的增加而逐步减小,这是因为岩堆体填充土含量较少时,土颗粒虽不足以填充岩堆体块石颗粒间的孔隙,但依然有少量的细颗粒在块石之间起到润滑的作用,导致岩堆体摩擦角有所下降。随着填充土含量的不断增加,块石颗粒间的润滑作用越来越强,导致内摩擦角也不断减小。

在填充土含量较少的情况下,岩堆体的强度主要

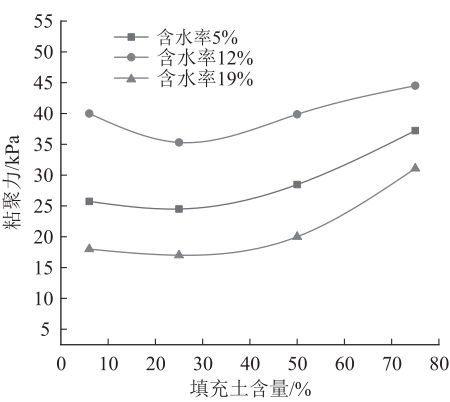


图 1 填充土含量与粘聚力关系曲线图

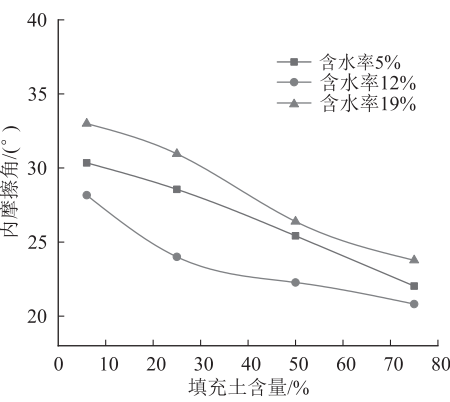


图 2 填充土含量与内摩擦角关系曲线图

来源于块石颗粒间的摩擦力。随着填充土含量的增加,摩擦作用逐渐减小,因此内摩擦角也越来越小。填充土含量较高的情况下,粘聚力主要来自于填充土间的粘结作用,而过多的填充土充满在块体颗粒之间,充当剪切过程中的润滑作用,导致内摩擦角较低。随着填充土含量的降低,填充土的粘结力逐渐被削弱,大颗粒间的摩擦、咬合作用开始占据主导地位,所以粘聚力较小,内摩擦角增大。总体上,随着岩堆体填充土含量的增加,粘聚力增大,内摩擦角减小。

2.2 含水率对粘聚力及内摩擦角的影响规律

随着含水率从 5% 增加到 12%,不同填充土含量试样的粘聚力均呈现增加趋势。其中,填充土含量为 6% 的试样粘聚力增加幅度最大,从 24.1 kPa 增加到 35.3 kPa,增加幅度 46.5%。其次是填充土含量为 6% 和 50% 的试样,其粘聚力增加幅度较小,而填充土含量为 75% 的试样的粘聚力增加幅度最小,仅从 37.2 kPa 增加到 44.5 kPa,增长幅度 19.6%,如图 3、图 4 所示。曲线在上升或下降阶段,填充土含量为 6% 的试样变化幅度最大,这是因为粘聚力主要由细颗粒填充土的含量决定。填充土较少时,较小的含

水率变化都会引起填充土性质的变化,因而曲线变化幅度较大。这表明填充土含量较小时,粘聚力对含水率的变化比较敏感。在含水率为12%时,各试样曲线可取到最大值,分别为40.3 kPa、35.3 kPa、39.8 kPa和44.50 kPa。含水率在12%到19%之间时,随着含水率的增加,粘聚力逐渐降低。在降低过程中,填充土含量为75%的试样的粘聚力均大于其他试样。通过分析所发现,含水率小于12%时,试样粘聚力主要来源于填充土的粘结作用。随着含水率的增加,试样达到最优含水率,此时的粘聚力达到最大。然而,当含水率大于12%后,随着含水率的不断增加,水分子在块石粗颗粒和填充土细颗粒之间形成一层水膜,起到润滑作用,并填充在空隙之间,挤压了土颗粒,降低了粘结性,从而使粘聚力下降。

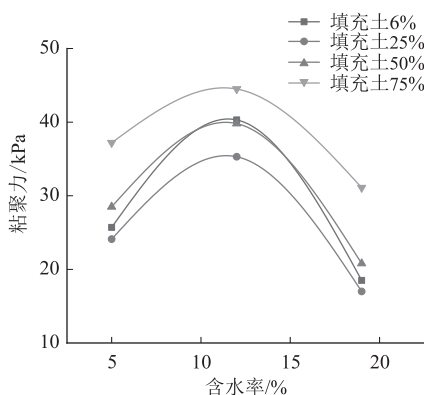


图3 含水率与粘聚力关系曲线图

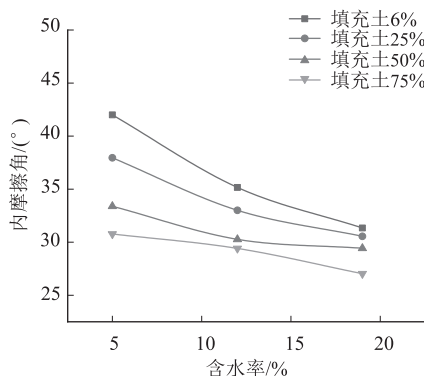


图4 含水率与内摩擦角关系曲线图

粘聚力是土颗粒间作用力的综合结果,主要由细颗粒土的含量决定。填充土颗粒间的水膜连接和胶结作用对粘聚力的大小具有重要作用。较低含水率的胶结作用较小,因此粘聚力较低,而过高的含水率充斥在颗粒之间,会给颗粒一个膨胀的支撑力,也会使粘聚力减小。

由图4可知,摩擦角的变化规律始终一致。随着

含水率的增大,内摩擦角不断减小。其中,填充土含量为6%的试样下降幅度最大,从41.9°降到31.3°,下降幅度为25.3%。填充土含量为25%和50%的试样次之,75%的下降幅度最小,仅从30.7°减小到27.0°,下降幅度为12.1%。4条曲线的斜率随着含水率的增加逐渐降低。含水率较小时,下降速率快;含水率较大时,下降速率慢。此外,填充土含量越低,曲线斜率的变化幅度越大,表明内摩擦角对含水率的敏感性越强。

2.3 岩堆体试样剪切强度的变化规律

当含水率为5%时,随着填充土含量的增加,4种围压下的抗剪强度曲线基本一致,总体呈现出先增加后减小的趋势。围压越大,抗剪强度越大,曲线为“凸”型曲线形状越明显,表明围压越大,抗剪强度随填充土含量变化的敏感性越大。填充土含量总体上在25%左右出现拐点,在拐点处可取到不同围压下抗剪强度的极大值,分别为88.1 kPa、135.3 kPa、200.6 kPa和278.6 kPa,这是因为此时的填充土充满块石颗粒的间隙,级配最为优良,因此抗剪强度也达到最大。填充土含量小于25%时,随着填充土的增加,抗剪强度随之增大。围压越高,增长幅度越大。围压为400 kPa时,抗剪强度增长幅度为11.8%。填充土含量大于25%时,随着填充土含量的增加,抗剪强度不断减小,说明太少或过多的填充土含量都会使岩堆体的抗剪强度减小,剪切强度与填充土含量关系曲线如图5所示。

当含水率为12%时,关系曲线随填充土含量的增加,且呈现出“凹”型变化,即随着填充土含量的增加,抗剪强度先减小后增加,且围压越大,这种规律越明显。填充土含量在35%附近出现拐点,曲线由减小变成增大。填充土含量小于35%时,随着填充土含量的增加,试样抗剪强度不断减小,在填充土含量为35%时,不同围压下抗剪强度的取值分别为80.01 kPa、129.4 kPa、176.79 kPa和216.50 kPa。围压为400 kPa时,下降幅度为34.3%,围压为100 kPa时,下降幅度为20%。填充土含量大于35%时,随着填充土含量的增加,试样抗剪强度随之增大,围压越高,增加幅度越明显,但总体上抗剪强度增加幅度小于其减小的幅度。

当含水率为19%时,随着填充土含量的变化,不同围压下的抗剪强度呈现出不同的变化趋势,但依然是围压越大,抗剪强度越大。围压为300 kPa、400 kPa时,曲线变化规律一致,呈现出填充土含量增加,抗剪强度减小的趋势,且曲线减小速率由急剧下降逐渐变平稳,斜率不断减小。围压为100 kPa、200 kPa时,抗

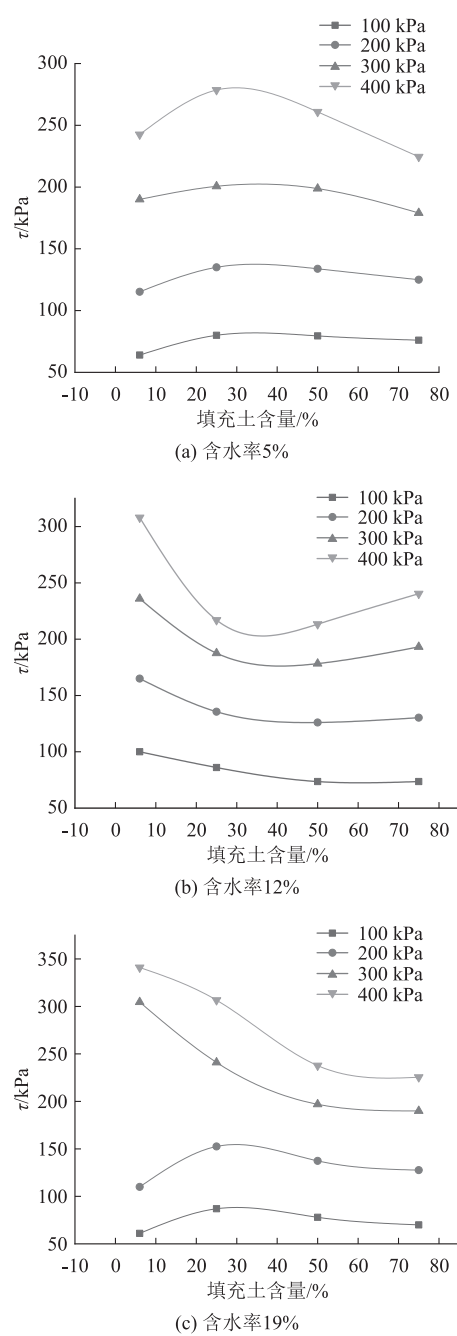


图 5 剪切强度与填充土含量关系曲线图

剪强度变化曲线随填充土含量的增加,表现出先增大后缓慢减小的规律,曲线在填充土含量小于 25% 时,填充土含量增加,抗剪强度随之增加,在 25% 附近可取到极大值,分别为 87.5 kPa、152.5 kPa。当填充土含量大于 25% 时,随着填充土含量的增加,抗剪强度逐渐减小,减小速率也逐渐变缓,最后趋于稳定。

填充土含量较小时,试样抗剪强度主要来源于粗颗粒之间的咬合、嵌固作用。随着填充土含量的增加,土颗粒充满块石间的空隙,使密实度变大,达到最优级配。在这种情况下,颗粒间充分挤密,颗粒间的摩

擦力增大,且块石颗粒在剪切带要发生滑移或滚动所需的能量也最大,因此抗剪强度达到最大。然而,随着填充土的不断增加,块石的含量不断减小,填充土细颗粒填充在粗颗粒之间。在剪切过程中,这些颗粒起到了润滑作用,减小了块石颗粒间的摩擦作用,从而导致抗剪强度逐渐减小,但同时填充土也会产生一定抗剪强度。

3 结论

通过运用相似理论进行室内三轴试验,同时根据试验结果分析了填充土含量和含水率对岩堆体剪切强度和强度参数的影响规律,得到主要结论如下:

(1) 根据松散岩堆的工程特性,可将岩堆体简化成由岩块、土、水 3 种基本的材料构成。石英砂的形成过程和物理特性与岩堆体岩块具有高度的相似性,且岩块中含有石英砂成分,在矿物成分方面也与岩堆体具有相似性,可模拟岩堆体岩块。而填充土体可选取粒径大小为 0.075 mm 以下的黏性土,使其表现出明显的粒径差异,以便更好地模拟岩堆体。

(2) 随着填充土含量的增加,不同含水率样本的粘聚力呈现出先略有减小后大幅度增加的趋势,填充土含量在 25% 左右可取到极值,极值点粘聚力分别为 24.1 kPa、35.3 kPa 和 17.0 kPa。此外,内摩擦角随着填充土含量的增加逐渐减小,呈近似线性减小关系。这可能是因为,在岩堆体中,填充土含量较少时,土颗粒无法完全填充岩堆体块石颗粒间的孔隙,但仍有少量细颗粒在块石之间起到润滑作用,使得摩擦角有所下降。

(3) 含水率从 5% 增加到 12% 时,不同填充土试样粘聚力呈增加趋势。其中,填充土含量为 25% 的试样的粘聚力增加幅度最大,从 24.1 kPa 增加到 35.3 kPa,增加幅度 46.5%,其次是填充土含量为 6% 和 50% 的试样,填充土含量为 75% 的试样粘聚力增加幅度最小,从 37.2 kPa 增加到 44.5 kPa,增长幅度 19.6%。在含水率为 12% 时,各试样曲线可取到最大值,分别为 40.3 kPa、35.3 kPa、39.8 kPa 和 44.5 kPa。含水率在 12% 到 19% 之间时,随着含水率的增加,粘聚力逐渐降低,在降低过程中填充土含量为 6% 的试样均大于其他试样,且较大粘聚力试样下降幅度较小。

(4) 含水率为 5% 时,随着填充土含量的增加,4 种围压下的抗剪强度曲线基本一致,总体上呈先增加后减小的趋势。围压越大,抗剪强度越大。含水率为 12% 时,关系曲线随填充土含量的增加呈现出“凹”

型变化,即随着填充土含量的增加,抗剪强度先减小后增加,且围压越大,这种规律越明显。当含水率为19%时,随着填充土含量的变化,不同围压下的抗剪强度变化趋势不同,但仍是围压越大,抗剪强度越大。

参考文献:

- [1] 陈志敏,刘耀辉,郭利民,等. 松散岩堆细-宏观强度关系与围岩压力[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 189-197.
CHEN Zhimin, LIU Yaohui, GUO Limin, et al. Relationship Between Fine-macro-strength of Loose Rock Pile and Surrounding Rock Pressure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 189-197.
- [2] 陈建胜,何瑞良,周湘,等. 条带状大理岩堆石料碾压试验特性研究[J]. 水力发电, 2022, 48(11): 80-83, 105.
CHEN Jiansheng, HE Ruiliang, ZHOU Xiang, et al. Research on Rolling Test Characteristics of Banded Marble Rockfill Material [J]. Water Power, 2022, 48(11): 80-83, 105.
- [3] 孙向军,潘家军,丁立鸿,等. 软岩堆石料试验前后级配变化规律[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(9): 133-138.
SUN Xiangjun, PAN Jiajun, DING Lihong, et al. Regularities of Particle, Gradation Change before and after Soft Rock Fill Tests [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(9): 133-138.
- [4] 朱大鹏,谢昌建,许红波. 隧道进口岩堆斜坡爆破振动动力响应研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1275-1283.
ZHU Dapeng, XIE Changjian, XU Hongbo. Dynamic Response of Talus Slope at Entrance of Tunnel Under Blasting Vibration [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1275-1283.
- [5] 朱大鹏,谢昌建,阿布拉铁,等. 大前石岭岩堆斜坡面爆破振动动力响应特征[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(8): 121-127.
ZHU Dapeng, XIE Changjian, A Bulatie, et al. Dynamic Response Characteristics of Blasting Vibration on Slope Surface of Daqianshiling Talus Slope [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(8): 121-127.
- [6] 陈秀吉,陈群,周承京,等. 不同相对密度含软岩堆石料的蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 118-122.
CHEN Xiuji, CHEN Qun, ZHOU Chengjing, et al. Creep Behavior of Rockfill with Soft Rock under Different Relative Densities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 118-122.
- [7] 季航宇. 两河口特大桥岩堆稳定分析及防护措施研究[J]. 路基工程, 2019(1): 203-206.
JI Hangyu. Stability Analysis of Rock Heap at Lianghekou Grand Bridge and the Protection Measures [J]. Subgrade Engineering, 2019(1): 203-206.
- [8] PIPATPONGSA T. Statically Admissible Stress Solutions in Gravitating Loose Earth of Wedge and Valley with Plane Slopes Inclined at Angle of Repose [J]. Granular Matter, 2013, 15(5): 645-659.
- [9] CHEN Gang, HUANG S L. Analysis of Ground Vibrations Caused by Open Pit Production Blasts-a Case Study [J]. Fragblast, 2001, 5(1/2): 91-107.
- [10] KAHRIMAN A. Evaluation of Ground Vibration Due to Surface Blasting at a Celestite Open-pit Mine [J]. Fragblast, 2001, 5(1/2): 21-34.
- [11] 汪彬,蒲增刚. 内江至六盘水铁路 K285 滑坡研究[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(4): 89-93, 98.
WANG Bin, PU Zenggang. Neijiang-Liupanshui Railway K285 Landslide Studying [J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5(4): 89-93, 98.
- [12] 庄严,任新红,蒋良文,等. 新都桥地区季节性冻土抗剪强度的影响试验研究[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(6): 24-28.
ZHUANG Yan, REN Xinhong, JIANG Liangwen, et al. Experimental Research on the Effect of Shear Strength of Seasonal Frozen Soil in Xinduqiao Area [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(6): 24-28.