

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250458

某抽水蓄能电站软硬岩掺合料碾压试验

郭传科¹, 李蒋金¹, 高昱芃²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:近年来,抽水蓄能电站快速发展,建设过程中经常面临软硬岩混合利用的问题。软岩岩性较差,在施工过程中存在明显破碎现象,软硬岩混合料是否能满足筑坝强度和渗透特性的要求值得进一步探究。对安徽某拟建抽水蓄能电站的软硬岩筑坝料开展现场碾压试验,研究其不同碾压参数条件下的物理力学和渗透特性。设计了全面的试验方案,比较了不同碾重(22、26 t)、加水量(5%、10%)、铺层厚度(0.6、0.8 m)和碾压遍数(6、8、10遍)组合条件下的碾压效果。采用新型张拉式直剪试验方法现场测定碾压后堆石料的抗剪强度指标,给出了满足设计要求的碾压参数,弥补了室内试验与现场工况的差异,为坝坡稳定性复核提供了直接依据。研究表明,相同碾压参数条件下,掺50%含碳质的绢云千枚岩混合料的干密度、渗透系数、抗剪强度均比绢云千枚岩混合料略小;混合料干密度随碾压遍数增加而增大,并呈现收敛趋势;提高碾重与减小铺层厚度均能显著提升压实质量。在颗粒破碎特性方面,碾压过程中颗粒破碎主要发生在铺层表层,而深层位置的堆石料由于细颗粒的包裹作用基本不发生破碎。绢云千枚岩混合料主要为大颗粒破碎,而含碳质绢云千枚岩混合料在碾压表层发生多次破碎,碾后呈粉质。在铺层厚度80 cm条件下,22 t振动碾碾压10遍得到的强度参数与26 t振动碾碾压8遍的强度参数基本相同。基于试验结果并综合考虑现场施工质量和效率,建议对绢云千枚岩混合料采用铺料层厚80 cm、加水量10%,各铺层采用22 t碾重振动碾压10遍,或采用26 t碾重振动碾压8遍的施工参数。

关键词: 软硬岩掺合料; 碾压试验; 碾压控制参数; 抽水蓄能电站

中图分类号: TV41

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0099-05

Rolling Compaction Test for Soft and Hard Rock Blended Fill Materials in a Certain Pumped Storage Power Station

GUO Chuan-ke¹, LI Jiang-jin¹, GAO Yu-peng²

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;

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

Abstract: In recent years, pumped storage power stations have developed rapidly, and their construction often faces the problem of mixed utilization of soft and hard rock. Soft rock has poor lithological properties, exhibiting significant breakage during construction. Whether mixtures of soft and hard rock can meet the requirements for dam strength and permeability characteristics requires further investigation. Field rolling compaction tests were conducted on soft and hard rockfill materials for a proposed pumped storage power station in Anhui Province, China, to investigate their physical, mechanical, and permeability characteristics under different compaction parameters. A comprehensive test scheme was designed to compare the compaction outcomes under combined conditions of roller weights (22 t and 26 t), water contents (5% and 10%), lift thicknesses (0.6 m and 0.8 m), and number of rolling passes (6, 8, and 10). A novel tensile direct shear test method was employed to measure the in-situ shear strength indices of the compacted rockfill and to identify the compaction parameters meeting the design requirements. This approach bridged the gap between laboratory tests and field conditions, offering a direct basis for reevaluating dam slope stability. The results showed that under identical compaction parameters, the dry density, permeability coefficient, and shear strength of the mixture containing 50% carbonaceous sericite phyllite were slightly lower than those of the sericite phyllite mixture. The dry density of the mixtures increased with the number of compaction passes, showing a convergent trend. Increasing the roller weight and reducing the lift

收稿日期: 2025-03-11, 修回日期: 2025-04-17, 接受日期: 2025-04-24

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0105000)

作者简介: 郭传科(1984-),男,硕士、高级工程师,研究方向为水工建筑设计、水工结构工程, E-mail: guo_ck@ecidi.com

thickness significantly improved the compaction quality. Regarding particle breakage characteristics, breakage occurred mainly in the surface layer of the lift during compaction, while the rockfill at deeper locations experienced minimal breakage due to the encapsulating effect of finer particles. The sericite phyllite mixture primarily experienced breakage of large particles, whereas the carbonaceous sericite phyllite mixture underwent repeated breakage in the surface layer during compaction, resulting in a powdery texture after compaction. Under a lift thickness of 80 cm, the strength parameters obtained using a 22 t vibratory roller with 10 compaction passes were essentially identical to those obtained using a 26 t vibratory roller with 8 passes. Based on the test results and considering both on-site construction quality and efficiency, it is recommended that for the sericite phyllite mixture, the construction parameters should be a lift thickness of 80 cm, a water content of 10%, and compaction with either a 22 t vibratory roller for 10 passes or a 26 t vibratory roller for 8 passes per lift.

Key words: soft and hard rock mixture; rolling compaction test; compaction control parameters; pumped storage power station

1 概况

安徽某抽水蓄能电站为日调节纯抽水蓄能电站,装机容量 1 200 MW。电站枢纽工程主要由上水库、下水库、输水系统、地下厂房和开关站等建筑物组成,按装机容量确定为一等大(1)型工程。上水库采用混凝土面板堆石坝,坝顶高程 641.00 m。趾板基础最低高程为 547.00 m,坝轴线处最大坝高 105 m,坝顶长 430.00 m,坝顶宽度 8 m。上水库大坝坝料主要取自库外石料场,以微风化绢云千枚岩和绢云石英千枚岩为主。室内试验结果测得微风化绢云千枚岩与绢云石英千枚岩平均饱和抗压强度分别为 29.7、44.7 MPa,平均软化系数分别为 0.71、0.75。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)^[1],绢云千枚岩和绢云石英千枚岩分别可归类为软岩和硬岩。此外,开采区存在少量含碳质绢云千枚岩,平均饱和强度为 13.7 MPa,属软岩。软硬岩混合料的压实质量和渗透性能直接影响大坝后期的沉降和变形特征,过量沉降可能导致面板脱空,并诱发一系列坝体安全问题^[2]。因此,有必要开展试验探究软硬岩掺合料的物理力学性质和渗透特性。目前,关于软硬岩混合料的试验研究较丰富^[3-6],但现有研究均为室内试验或数值模拟,可能与工程现场的实际工况存在差异。本文针对安徽某抽水蓄能电站上水库的绢云千枚岩与绢云石英千枚岩混合筑坝料,开展一系列现场碾压试验,并引入现场直剪试验方法验证了碾压后筑坝料的强度特征;在现有研究基础上,进一步明确了碾压参数与物理力学和渗透特性的相关性,并基于现场试验建议了筑坝碾压参数。

2 现场碾压试验

上游堆石料设计要求的干密度 ≥ 21.9

kN/m^3 ,孔隙率 $\leq 20.0\%$,渗透系数为 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-0} \text{ cm/s}$;下游堆石料设计要求的干密度 $\geq 21.8 \text{ kN/m}^3$,孔隙率 $\leq 22.0\%$ 。通过现场碾压试验,确定上水库大坝上游堆石区、下游堆石区达到设计要求干密度与孔隙率的碾重、加水量、铺料厚度及碾压遍数等碾压参数,论证绢云千枚岩作为坝体堆石料的合理性。现场碾压试验按照《土石筑坝材料碾压试验规程》(NB/T 35016-2013)^[7]进行,同时采用自主研发的现场直剪试验方法^[8-9]获取碾压后堆石料的强度指标,以便进一步复核坝坡稳定性。

2.1 试验材料

开展两种软硬岩掺合料的碾压试验,一种是微风化绢云千枚岩和绢云石英千枚岩按约 1:1 比例掺合的软硬岩混合料,记为绢云千枚岩混合料;另一种是在绢云千枚岩混合料中掺入 50% 的含碳质绢云千枚岩,记为掺碳质绢云千枚岩混合料。两种试验混合料的级配控制在设计的上、下包络线内,见图 1。

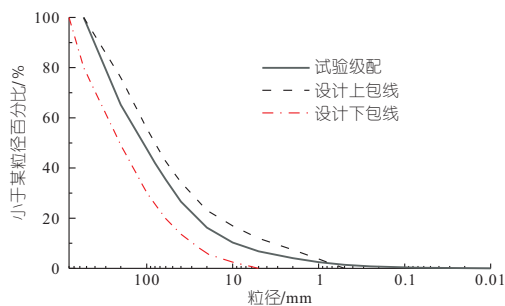


图 1 现场碾压试验软硬岩混合料级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of field rolling test materials

2.2 试验方案

对于每一种软硬岩混合料,比较了二个碾重(22、26 t)、二个加水量(5%、10%)、二个铺层厚度(0.6、0.8 m)、三个碾压遍数(6、8、10 遍)。现场碾压试验的场次大致如下:①在某一铺层厚度下,确定后续碾压试验的碾重、加水量;②确定了加水量、碾重后,比较碾压试验的铺层厚度及碾压遍数;③根据试验成果选取合适的碾重、加水量、

碾压遍数、铺层厚度,进行复核试验。总共开展 20 个场次的现场碾压试验。

每一场次的试验场地为 15 m×6 m(长×宽)的矩形区域,场地平均高差控制在 5 cm,在矩形区域设计了沉降监测点、原位渗透点、现场密度测试点和原位剪切强度测试点,各测试点布置见图 2。

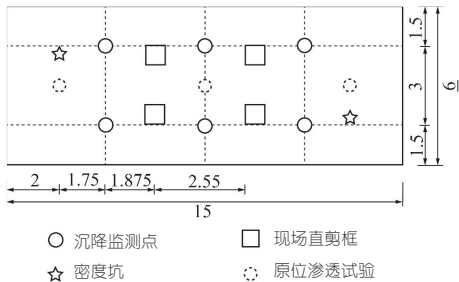


图 2 试验场地规划与测点布置(单位:m)

Fig. 2 Test site planning and measuring point arrangement

2.3 试验过程

根据试验级配曲线筛分、拌合加工填筑料,大于 200 mm 的颗粒采用量测法确定粒径。采用进占法铺料,松铺系数取 10%,即松铺层厚度为目标铺层厚度的 110%。松铺整平后按体积计算加水量,对松铺堆石料全仓面加水以提升碾压质量。根据试验方案选取相应碾重的振动平碾机械,采用进退错距法进行碾压,碾压行进速度控制在 2~3 km/h。同时,为保证碾压均匀程度,碾迹搭接宽度控制在 1/3 碾宽以内。碾压过程中铺层表面沉降采用水准仪进行观测、碾压后堆石料密度采用现场灌水试坑法检测、堆石料的渗透系数通过单环法原位渗透试验测定。在常规测试的基础上,采用现场直剪试验直接测得经现场碾压后堆石料的抗剪强度。

具体试验流程为场地平整碾压→基面测量→填筑料加工→铺料→整平→铺层厚度测量→埋设剪切框→整平→校核铺层厚度→洒水→静压→沉降测量→振动碾压→沉降测量→密度及孔隙率检测→级配检测→现场直剪测试,见图 3。

3 试验结果与分析

本文重点开展绢云千枚岩混合料的碾压试验,根据试验结果建议了满足设计要求的碾压参数。对于掺碳质绢云千枚岩的混合料,仅开展一场铺层 80 cm 厚、22 t 振动碾碾压 8 遍条件下的现场碾压试验,因此不再单独绘制数据图。

3.1 压实特性

压实特性反映了堆石料的碾压质量,工程中



图 3 现场碾压试验流程

Fig. 3 Field rolling test process

一般采用干密度和孔隙率进行描述。图 4 整理了

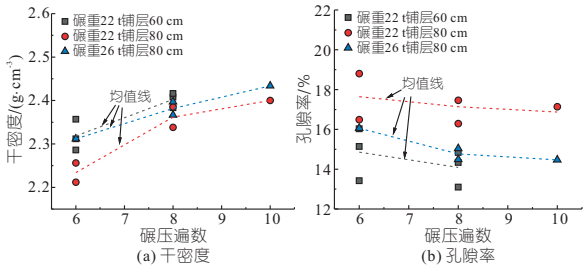


图 4 不同碾压参数下绢云千枚岩混合料的压实特性

Fig. 4 Compaction characteristics of mixture under different rolling parameters

不同碾压参数条件下绢云千枚岩混合料的干密度和孔隙率。图 4(a)显示混合料干密度随碾压遍数增加有所增大,且呈现收敛趋势,表明增加碾压遍数能促进混合料达到压实稳定状态。对比不同铺层厚度的结果可以看出,同样碾压遍数条件下,铺层厚度 60 cm 的混合料碾压后的干密度比铺层厚度 80 cm 的要大,说明碾压过程中适当减小铺层厚度能有效提升压实质量。掺碳质绢云千枚岩混合料 80 cm 厚、采用 22 t 振动碾、碾压 8 遍后的干密度为 2.21 g/cm³,明显低于该碾压参数条件下绢云千枚岩混合料,其主要原因是碳质绢云千枚岩母岩密度较低,且在碾压过程中颗粒破碎显著,破碎颗粒甚至滑移超出坑测法预设的半径区域,导致测量结果偏小。从图 4(a)中还可看出,混合料碾压后的干密度与碾重正相关,表明提高碾重能显著提升压实质量。

碾压过程实际就是压缩堆石料孔隙的过程,提高碾重和增加碾压遍数旨在降低混合料的孔隙率。从图 4(b)可以看出,孔隙率的变化随碾压遍

数增大持续减小并趋于稳定,碾重从 22 t 提升至 26 t 对减小孔隙率有一定的促进作用。整体上,铺层厚度 80 cm 条件下,碾重 26 t 碾压 8 遍与碾重 22 t 碾压 10 遍后的孔隙率基本一致,表明其碾压后达到了相似的压实程度。

3.2 渗透特性

现场碾压后,各场次在碾压仓面开展了多组原位渗透试验。试验得到的绢云千枚岩混合料在不同碾压参数条件下碾压后的渗透系数见图 5(a)。可见,各场次碾压后的渗透系数不存在数量级上的显著差异,随碾压遍数的变化也不大。对于绢云千枚岩混合料,相同碾重(22 t)条件下,铺层 80 cm 的渗透系数比铺层 60 cm 的略大;相同铺层厚度(80 cm)条件下,22 t 碾重碾压后的渗透系数较 26 t 碾重的略大,符合一般规律。试验得到的掺碳质绢云千枚岩 80 cm 厚、采用 22 t 振动碾、碾压 8 遍后的渗透系数为 4.04×10^{-3} cm/s,明显低于绢云千枚岩混合料,表明渗透系数与堆石料的岩性相关性较高。

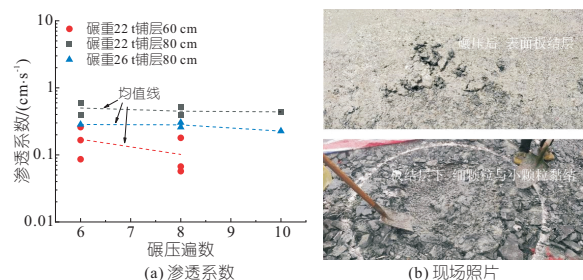


图 5 现场混合料渗透特性
Fig. 5 Field permeability characteristics of soft-hard rock mixes

如图 5(b),由于含碳质绢云千枚岩混合料在碾压过程中易破碎,破碎后呈粉质并与块石黏结形成板结层,细颗粒向下层滑动并阻塞渗流通道。在常规的现场渗透试验基础上针对含碳质绢云千枚岩混合料测试组沿深度方向加做两组试验。具体为:①表层渗透系数为 9.07×10^{-4} cm/s,基本达到黄土的渗透系数经验值,说明表层细颗粒相互黏结形成的板结层严重阻碍了渗流路径;挖除板结层后渗透系数为 4.04×10^{-3} cm/s,表明细颗粒向下层滑动与小颗粒黏结,表现出黏质砂的渗透特性;②挖除表面破碎细颗粒后渗透系数为 3.76×10^{-2} cm/s,渗透系数明显提高,但仍显著小于绢云千枚岩混合料组的渗透系数。因此,从渗透特性角度来看,含碳质的绢云千枚岩不满足主堆石区的筑坝料特性要求。

3.3 破碎特性

含碳质绢云千枚岩混合料的孔隙率与绢云千

枚岩混合料基本一致,而前者的渗透系数明显小于后者的渗透系数。这似乎是一个矛盾的结论,现场试验沿铺层厚度方向的颗粒破碎特性,能够很好解释这种现象。从坑测法密度试验中的现场照片来看,颗粒粒径分布呈“上小下大”特性分布,如图 6(a)。这表明碾压过程中颗粒破碎主要发生在铺层表层,而深层位置的堆石料基本不发生破碎。两种软硬岩混合料在碾压表层均发生不同程度的颗粒破碎,绢云千枚岩混合料主要为大颗粒破碎,破碎后呈多块小颗粒;含碳质绢云千枚岩混合料岩性较差,在碾压表层发生多次破碎,碾后破碎呈粉质。碾压过程中由于振动作用,细颗粒持续向下滑落,因此碾压后含碳质的混合料渗透系数较低,而两种混合料的孔隙率差异并不显著。

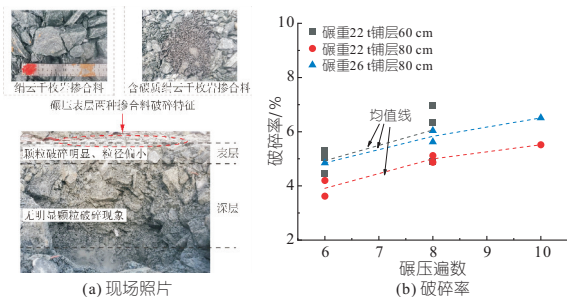


图 6 不同碾压参数下绢云千枚岩混合料的破碎特性
Fig. 6 Crushing characteristics of mixture under different rolling parameters

破碎率随碾压遍数和碾重的增加略有增大,由于颗粒破碎现象主要发生在碾压表层,整体上不同碾压参数条件下的破碎率差异不显著,如图 6(b)。这主要是由于碾压沉降过程中颗粒重排并压缩孔隙,深层堆石颗粒被周围细颗粒包裹并减弱了大颗粒的集中应力。因此,深层混合料颗粒破碎现象不显著。表层颗粒的重量占整个密度试坑颗粒重量的比例有限,整体上不同碾压参数条件下两种混合料的破碎率相差不大。

3.4 抗剪强度

为进一步探究软硬岩筑坝料碾压后的强度特性,在常规碾压试验基础上,还开展现场直剪试验。图 7 为不同碾压参数条件下绢云千枚岩混合

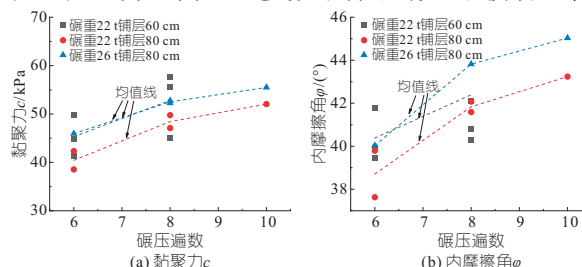


图 7 绢云千枚岩混合料抗剪强度与碾压参数关系图
Fig. 7 Relationship between shear strength and rolling parameters

料软硬岩混合料的抗剪强度指标随碾压遍数的变化。总体上,混合料的抗剪强度指标随碾压遍数的增加而提高。碾压 8 遍的内摩擦角比碾压 6 遍的内摩擦角大 $0.82^{\circ} \sim 4.36^{\circ}$, 平均为 2.53° ; 碾压 8 遍后, 继续碾压至 10 遍的内摩擦角提升幅度减小, 增量均值为 0.56° 。铺层厚度 60 cm 的黏聚力 c 略大于铺层 80 cm 的黏聚力 c 。碾重由 22 t 增加至 26 t 时, 堆石料的黏聚力有所提高。在相同铺层厚度(80 cm)条件下, 22 t 振动碾碾压 10 遍得到的强度参数($\varphi=43.24^{\circ}$, $c=52.05$ kPa)与 26 t 振动碾碾压 8 遍的强度参数($\varphi=43.82^{\circ}$, $c=52.50$ kPa)基本相同。换言之, 相同铺层厚度条件下, 适当增大碾重能减少施工碾压遍数。

含碳质的绢云千枚岩混合料 80 cm 厚、采用 22 t 振动碾、碾压 8 遍后的强度($\varphi=38.48^{\circ}$, $c=44.31$ kPa)与相同碾压参数条件下的绢云千枚岩混合料($\varphi=41.84^{\circ}$, $c=48.43$ kPa)相比略小。

在测试过程中发现, 不同加水量的试验结果差异不大。其主要原因是堆石料排水性能良好, 两种加水量条件下所加的水均可快速向下排出, 位于表层附近的堆石料基本不受影响。此外, 铺层较深部位的堆石料基本不发生破碎, 即加水量对深层堆石料的影响亦有限。

4 结论

a. 在相同碾压参数条件下, 掺 50% 含碳质的绢云千枚岩混合料, 抗剪强度特性与绢云千枚岩混合料略小, 且干密度和渗透系数偏小, 尤其是渗透特性不满足设计要求。综合考虑不建议采用掺 50% 含碳质的绢云千枚岩混合料作为主堆石区筑坝料。

b. 各碾压参数条件下的两种软硬岩混合堆石料, 碾压过程中破碎主要发生在铺层表面, 沿深度方向由于细颗粒的包裹作用, 颗粒破碎现象不明显。

c. 基于试验结果并综合考虑现场施工质量和效率, 建议对试验的绢云千枚岩混合料铺料层厚 80 cm、加水量 10%, 采用 22 t 碾重振动碾压 10 遍, 或采用 26 t 碾重振动碾压 8 遍。

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021-2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021-2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))

[2] 郇能惠, 王立安, 任强, 等. 高混凝土面板堆石坝接缝止水试验研究和应用[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(1): 30-37. (LI N H, WANG L A, REN Q, et al. Mechanical properties of new type of joint waterstop for high CFRDs and its application[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2025, 47(1): 30-37. (in Chinese))

[3] 张钧堂, 王俊杰, 姬雪竹, 等. 浸水时间对砂泥岩颗粒混合料抗剪强度的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(5): 157-159, 175. (ZHANG J T, WANG J J, JI X Z, et al. Influence of soaked time on shear strength of sandstone-mudstone particle mixture [J]. Water resources and power, 2016, 34(5): 157-159, 175. (in Chinese))

[4] 孙向军, 周跃峰, 潘家军, 等. 堆石混合料临界状态与颗粒破碎特性[J]. 土木工程学报, 2023, 56(增刊 2): 78-85. (SUN X J, ZHOU Y F, PAN J J, et al. Critical state and particle breakage characteristics of rockfill mixture[J]. China civil engineering journal, 2023, 56(S2): 78-85. (in Chinese))

[5] 张石, 吴世勇, 吴忠, 等. 超高沥青混凝土心墙坝砂板岩堆石料试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊 1): 191-196. (ZHANG S, WU S Y, WU Z, et al. Experimental study on sand slate rockfill materials for ultra-high asphalt concrete core dams [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(S1): 191-196. (in Chinese))

[6] 崔岚, 盛谦, 郑俊杰, 等. 硬岩与软岩峰后力学特性对比及细观颗粒流分析[J/OL]. 工程科学与技术, 2025: 1-15. (2025-02-26). [\(https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SCLH20250225003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ\)](https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SCLH20250225003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ). (CUI L, SHENG Q, ZHENG J J, et al. Comparison of post-peak mechanical characteristics and microscopic particle flow analysis of hard and soft rock[J/OL]. Advanced engineering sciences, 2025: 1-15. (2025-02-26). [\(https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SCLH20250225003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ\)](https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SCLH20250225003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ). (in Chinese))

[7] 国家能源局. 土石筑坝材料碾压试验规程: NB/T 35016-2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (National Energy Administration of the People's Republic of China. Testing specification on material compaction for earth and rock-fill dams: NB/T 35016-2013[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))

[8] LIU S H. Simulating a direct shear box test by DEM[J]. Canadian geotechnical journal, 2006, 43(2): 155-168.

[9] 刘斯宏, 肖贡元, 杨建州, 等. 宜兴抽水蓄能电站上库堆石料的新型现场直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 772-776. (LIU S H, XIAO G Y, YANG J Z, et al. New in situ direct shear tests on rockfill materials at Yixing Pumped Storage Power Station Project[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2004, 26(6): 772-776. (in Chinese))