

含软弱夹层边坡稳定性及抗滑桩支护效果研究

Study on the Stability of Slopes with Weak Interlayer and the Effect of Anti-slip Pile Support

何 君, 魏 平

(水发规划设计有限公司, 济南 250000)

摘 要: 为研究含软弱夹层的边坡稳定性, 依托某水利工程山体滑坡治理, 研究了影响边坡稳定性的因素及抗滑桩治理效果, 利用 Abaqus 软件建模计算, 分析抗滑桩参数改变对边坡稳定性的影响。结果表明: 边坡各级台阶中, 边坡上部的位移相对较大, 在边坡的纵深方向上, 各级台阶的位移存在一定波动, 纵深 20.2 m 处位移较大, 但累积位移始终在较小范围内 (± 10 mm 以内), 经过抗滑桩支护处理后, 边坡的位移逐渐趋于稳定; 降雨及工程活动都会对边坡造成扰动, 加速边坡失稳, 而抗滑桩加固边坡效果良好, 各项位移累计值均稳定在控制量范围内; 通过数值模拟对抗滑桩设计进行优化, 发现当抗滑桩位于第二级台阶处、桩长 23.4 m、桩间距 5 m 时, 方案最为经济合理。

关键词: 软弱夹层; 边坡位移监测; 边坡稳定性; 抗滑桩设计优化

中图分类号: TU457 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0085-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.015

HE Jun, WEI Ping

(Shuifa Planning & Design Co., Ltd., Ji'nan 250000, China)

Abstract: To study the stability of slopes containing weak interlayers, based on the treatment of a landslide in a certain water conservancy project, the factors affecting slope stability and the effectiveness of anti slip pile treatment were studied. Abaqus software was used to model and calculate the impact of changes in anti slip pile parameters on slope stability. The results show that the displacement of the upper part of the slope is relatively large among the various steps of the slope. In the depth direction of the slope, there is a certain fluctuation in the displacement of each step. The displacement at a depth of 20.2 m is relatively large, but the cumulative displacement is always within a small range (± 10 mm). After being supported by anti slip piles, the displacement of the slope gradually tends to stabilize; Rainfall and engineering activities can cause disturbance to the slope, accelerating its instability. However, anti slip piles have a good effect on reinforcing the slope, and the cumulative displacement values are stable within the control range; Through numerical simulation optimization of anti slip pile design, it was found that the most economical and reasonable solution is when the anti slip pile is located at the second step, with a pile length of 23.4 m and a pile spacing of 5 m.

Key words: soft interbedded strata; field monitoring; slope stability; slip-resistant pile design optimization

作者简介: 何 君 (1985—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水利工程规划设计。

通信作者: 魏 平 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 水利工程规划设计。

收稿日期: 2023-08-21

岩土力学

0 引言

我国幅员辽阔,地质构造具有显著的区域差异性,其中滑坡灾害作为最具破坏力的地质灾害类型之一,其突发性强、致灾链复杂的特点,往往伴随着重大人员伤亡、基础设施损毁和巨额经济损失,对社会经济发展构成严峻挑战^[1-2]。常用的边坡支护工程措施有挡土墙、锚索、锚杆、土钉墙、抗滑桩等^[3-5]。

目前对含软弱夹层的边坡稳定性及其支护措施已有较多的研究成果。宋洋等^[6]制备了一种隐伏非贯通软弱夹层缩尺模型,分析了各项因素影响下岩石的蠕变特性,建立了相应的剪切蠕变损伤本构模型,试验表明该模型可以很好拟合边坡蠕变滑移各阶段的情况;苏培东等^[7]基于软弱夹层的应变软化特性,推导开挖工况下含软弱夹层顺层岩质边坡渐进破坏的微分方程,利用数值软件与传统摩尔-库仑本构模型进行对比分析;胡斌等^[8]依托四川某含软弱夹层的矿山高边坡工程案例,提出一种基于工程地质分析法、空间解析几何法、极限平衡法及强度折减法的滑动面反演方法;许四法等^[9]采用数值模拟分析不同降雨强度时的双层软弱夹层边坡稳定性;刘杨等^[10]基于饱和-非饱和渗流理论,对降雨作用下的含缓倾软弱夹层矿山高边坡稳定性进行分析;陈权川等^[11]分析含软弱夹层缓倾顺层岩质边坡的破坏特性,提出采用抗滑桩-键组合结果进行支挡防护,并采用有限元软件进行模拟计算;王来贵等^[12]依托抚顺某露天矿山工程,利用DEM建立二维数值计算模型,研究重力作用下,含软弱夹层顺层岩质边坡的变形、破坏及滑动演化过程;陈云生等^[13]利用FLAC 3D软件对某含软弱夹层的基坑边坡稳定性进行分析,并采用了“上短中长、底部适中”的锚固加固方案;郭献章等^[14]利用Geo-slope软件确定满足安全系数要求时顺层边坡的关键软弱夹层,制定相应的锚索加固方案,并利用FLAC 3D软件确定了最佳锚固排距;李华勇等^[15]通过概化模型和强度分析法分析某含软弱夹层的深基坑边坡稳定性,并研究了抗滑桩桩位对边坡稳定性的影响。

在前人研究的基础上,为进一步分析含软弱夹层边坡的稳定性,依托某边坡实例,通过现场监测

与数值模拟对其稳定性进行分析,深入研究了抗滑桩的支护效果,并对加固方案进行优化设计。

1 工程概况

山东某水利工程山体滑坡治理段,路段内地质情况复杂。该边坡共9层地层,从上至下分别为黄土状粉土、粉质黏土、碎石土砂岩、断层角砾和断层泥、砂岩、泥岩、砂岩、泥岩、砂岩。底部基岩存在较陡的基岩层面和节理裂隙,极易出现崩塌等地质灾害。

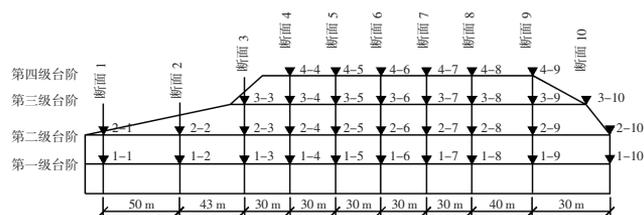
由于山体坡脚被大面积开挖,边坡原始地貌发生较大变化,在降雨等外界条件影响下,边坡应力平衡状态被破坏,导致顺向牵引式滑坡的形成。滑坡前缘、中部、后缘及两侧边界均出现破坏,前部土层薄,中后部厚,前后缘高差约为65 m,滑坡深度约80 m,总滑坡体积超过16 600 m³,属于大型深层滑坡。滑坡共存在4条明显裂缝,最宽处约30 cm,致使前缘道路起拱严重,左右边界山体断裂,支挡结构破坏。

为规避滑坡的进一步失稳破坏,保障工程的安全施工,故需要采取一定措施对其进行支护。鉴于滑坡深度大、裂缝宽度大、体积大滑坡内部岩土破碎等情况,传统挡土墙难以控制变形,锚杆和锚索的加固效果并不理想,因此选用抗滑桩对其进行治理。

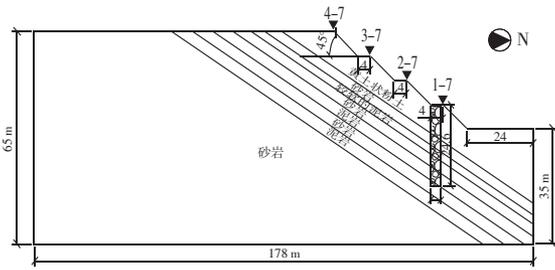
2 试验

2.1 试验方案

沿道路方向共设置10个滑坡监测断面,具体点位布置如图1所示。对每个监测点均进行沉降监测和水平位移监测,其编号第一个数字为边坡台阶级数,第二个数字为边坡监测断面,如1-2表示为边坡第一级台阶、第二个监测断面的表面位移监测点。位移监测项目控制值见表1。



(a) 边坡监测断面图



(b) 断面 7 边坡测点布置图

图 1 边坡位移监测测点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement points for slope displacement monitoring

表 1 位移监测项目控制值表

Table 1 Displacement monitoring program control values

序号	监测项目	监测仪器	变化速率/ (mm/d)	累积变化值 /mm	监测频率 /(d/次)	备注
1	沉降	电子水准仪	3~5	40	7	位移异常及施工关键节点需加密监测次数
2	水平位移	全站仪	5~10	50	7	

抗滑桩长为 26.4 m，现场选取 5 根抗滑桩进行内力监测，每根抗滑桩设置 19 个钢筋测力计，从上至下分为 5 层，每层相距 4.4 m。具体布置位置及编号如图 2 所示。

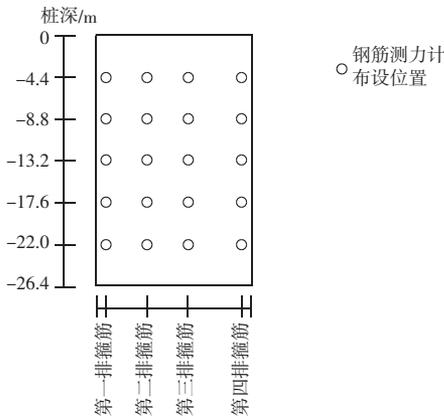


图 2 抗滑桩内力测点布置图

Fig. 2 Layout of internal force measurement points of anti-slip pile

2.2 试验结果分析

边坡表面位移监测共 3 个方向，X 方向以边坡内部至表面向外（即向北）为正，Y 方向以向外（即向东）为正，Z 方向以向上为正。分析各监测点各方向的累积位移值可知，边坡整体向东南方向移动；其各级台阶 Y 方向位移相对于 X、Z 方向均较小，存在一定波动，但其累积位移始终在 ±10 mm 以内；X、Z 方向累积位移最大值均位于边坡断面 7 和断面 8 处，其最终结果均能满足控制值要求；上述监测结果均与现场勘察结果保持一致。各级台阶各方向累

积位移最大值及其所处位置见表 2。

表 2 各级台阶各方向累积位移最大值
Table 2 Maximum values of cumulative displacement in each direction for each level of steps

台阶	X 方向		Y 方向		Z 方向	
	位移值 /mm	位置 编号	位移值 /mm	位置 编号	位移值 /mm	位置 编号
第一级	46.89	1-8	6.77	1-7	-9.16	1-8
第二级	43.96	2-7	6.81	2-6	-19.22	2-8
第三级	41.96	3-7	8.23	3-6	-27.21	3-7
第四级	37.88	4-7	9.79	4-7	-30.23	4-7

各级台阶 X 方向累积位移最大值处位移随时间的变化如图 3 所示。结合现场施工活动及降雨状况分析可知，各监测点 X 方向累积位移值随时间的变化趋势基本一致，第一级台阶位移最大；在监测的第 239~249 d 时间内，X 方向位移突增，究其原因是当地强降雨所致；在监测的前 346 d 内，边坡各测点 X 方向累积位移呈线性增大趋势，可认为边坡整体稳定性较差，有滑动风险，对边坡进行局部卸载和抗滑桩支护处理。由后续 X 方向累积位移监测数据趋于稳定可知，抗滑桩治理手段已充分发挥其效果。

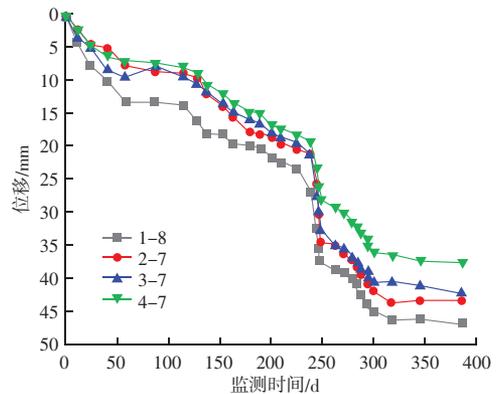


图 3 边坡 X 方向累积位移曲线图

Fig. 3 Cumulative displacement curve of the slope in X-direction

各级台阶 Z 方向累积位移最大值处位移随时间的变化如图 4 所示。结合现场施工活动及降雨状况分析可知，各监测点 Z 方向累积位移值随时间的变化趋势基本一致，第四级台阶位移累计值最大。各监测点在监测的第 239~249 d 时间内，Z 方向位移发生突增，究其原因是当地强降雨所致。监测点 3-7 和监测点 4-7 的 Z 方向累积位移值在监测第 115~138 d 突增，究其原因是此阶段坡顶施工较为频繁，对边坡造成较大扰动。在监测的前 346 d 内，边坡各测点 Z 方向累积位移呈线性增大趋势，随着抗滑桩施工完成，边坡各监测点 Z 方向累积位移值逐渐趋

岩土力学

于稳定。

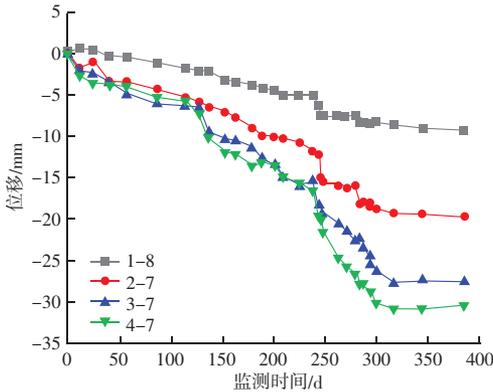


图4 边坡Z方向累积位移曲线图

Fig. 4 Cumulative displacement curve of the slope in Z-direction

各抗滑桩各截面弯矩累积值如图5所示。各抗滑桩在监测期间的弯矩最大累积值均出现于桩深17.6 m处,位于软弱夹层附近,与设计位置基本一致。由此可见,软弱夹层的存在是导致滑坡灾害发生的重要原因之一。各抗滑桩弯矩最大累积值结果均小于设计的桩弯矩最大值43 016.2 kN·m,各抗滑桩的安全可靠度分别为3.39、4.21、3.20、4.85和4.29。由此可知,各抗滑桩受力较小,安全冗余度较高,故采用抗滑桩治理该边坡的方案可行。

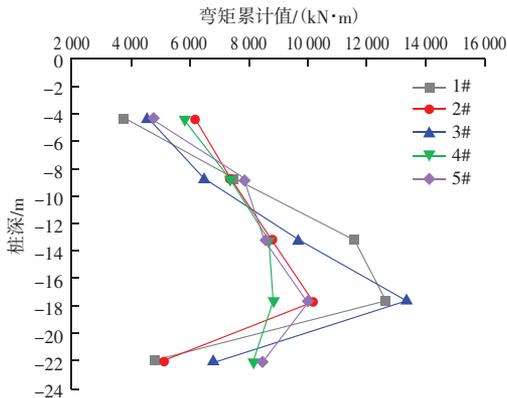


图5 各抗滑桩各截面弯矩累积值

Fig. 5 Cumulative value of bending moment in each section of each skid pile

3 数值分析

3.1 模型建立

为便于计算,适当简化含软弱夹层的边坡断面7,采用Abaqus软件建立三维模型,基于摩尔-库仑准则将土体视为均质连续且各向同性的弹塑性材料,将抗滑桩视为弹性材料,其参数见表3。设置模型两侧边界为水平约束,底部边界为全约束。模型网格采用CPE4单元。设置软弱夹层厚度为3 m,水平夹角为30°,假定夹层之上为滑体,夹层之下为滑床,抗滑桩截面尺寸为3.5 m×2.5 m,长为26.4 m,桩间距为5 m。根据断面7尺寸建立数值模型,如图6所示,Y方向长度取30 m。取模型中间断面进行监测,监测点位置及编号设置与现场试验保持一致。

表3 天然工况下土体参数表

材料	容重 / (kN/m ³)	泊松比	弹性模量 E/GPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 / (°)
黄土状粉土	19.5	0.30	0.20	25	25.00
较软的泥岩	23.4	0.23	0.39	120	18.75
泥岩	23.4	0.23	0.39	160	23.00
砂岩	24.6	0.18	3.31	680	33.00
抗滑桩	24.0	0.30	3.15		

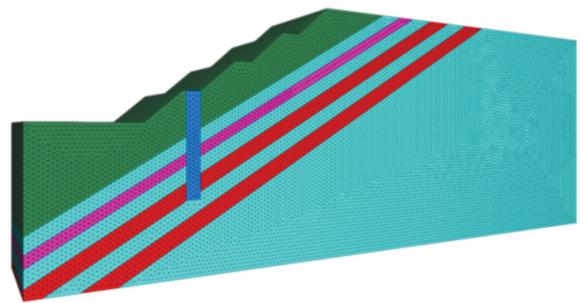


图6 三维数值计算模型

Fig. 6 Three-dimensional numerical calculation mode

3.2 结果对比

数值模拟与现场试验的边坡断面7各监测点表面X方向和Z方向位移累积值对比结果见表4。数值模

表4 数值模拟与现场试验监测点位移对比表

Table 4 Comparison of displacements between numerical simulation and field test monitoring points

监测点 编号	数值模拟位移累积值/mm		现场试验位移累积值/mm		X方向		Z方向	
	X方向	Z方向	X方向	Z方向	差值/mm	差值比/%	差值/mm	差值比/%
1-7	50.83	-6.81	46.79	-6.16	-4.04	7.9	0.65	-4.04
2-7	46.56	-19.52	43.96	-18.18	-2.60	5.5	1.34	-2.60
3-7	43.14	-29.82	41.96	-27.21	-1.18	2.7	2.61	-1.18
4-7	40.17	-33.25	37.88	-30.23	-2.29	5.7	3.02	-2.29

拟所得边坡各监测点位移累计值的变化规律与现场试验所得结果较为一致，两者差值在 10% 以内，故可认为数值模型参数选择较为合理，其结果具有可信度。

数值模拟与现场试验所得断面 7 的抗滑桩各截面弯矩最大值结果如图 7 所示。数值模拟所得弯矩值与现场实测弯矩值相差较小，其差值比最大为 9.6%，出现在桩深 4.4 m 处，其余各截面弯矩差值比均较小，故认为数值模型参数选择较为合理，其结果具有可信度。

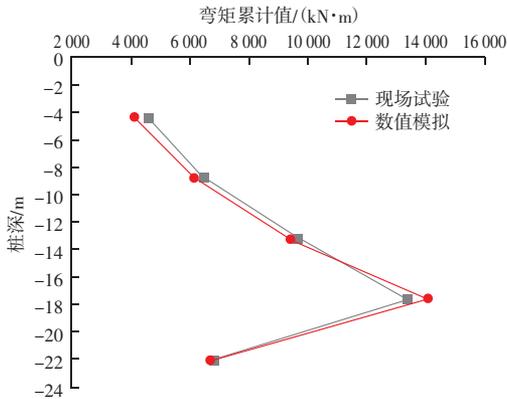


图 7 抗滑桩各截面弯矩累计值对比图

Fig. 7 Comparison of cumulative value of bending moment in each section of anti-slip pile

3.3 抗滑桩敏感性分析

为得到最合理的抗滑桩加固方案，以无抗滑桩模型为基础工况，以抗滑桩所处位置、桩长、桩间距为敏感性因素，通过数值模拟对其结果进行分析。

保持其他条件不变，设置抗滑桩分别位于第一至第四级台阶处。由数值模拟结果可知，当抗滑桩位于第四级台阶时，边坡水平位移最大值为 71.00 mm，竖向位移最大值为 95.00 mm，与无抗滑桩模型结果相似，此时边坡安全系数为 1.43，故认为抗滑桩并未发挥其阻滑作用；当其位于一、二、三级台阶时，边坡水平及竖向最大位移值均较无抗滑桩模型有明显降低，即抗滑桩发挥作用；当抗滑桩位于第二级台阶时，边坡水平位移最大值为 28.00 mm，竖向位移最大值为 21.00 mm，边坡安全系数为 1.90，抗滑桩支护效果最佳。

保持其他条件不变，设置抗滑桩位于第二级台阶处，设置 6 组抗滑桩桩长，分别为 17.4、20.4、23.4、26.4、29.4、32.4 m。由数值模拟结果可知，

当抗滑桩越长，则边坡位移越小，安全系数越大，即增加抗滑桩桩长有利于提高边坡稳定性；但当桩长超过 23.4 m 后，边坡位移的变化率相对较小，安全系数的增加率也相对较小，故综合安全性和经济性可知，23.4 m 为抗滑桩最佳桩长。

保持其他条件不变，设置抗滑桩位于第二级台阶处，设置抗滑桩桩长为 23.4 m，设置 5 组桩间距从 3 m 逐渐增大至 7 m。由数值模拟结果可知，当抗滑桩桩间距越大，则边坡位移越大，安全系数越小，即减小抗滑桩桩间距有利于提高边坡稳定性；当桩间距为 3~5 m 时，边坡位移安全系数的变化率均相对较小；当桩间距超过 5 m 时，边坡位移发生突变，整体稳定性出现明显降低。综合考虑抗滑桩最佳桩间距为 5 m。

4 结论

通过现场试验研究了含软弱夹层边坡的稳定性及增加抗滑桩进行支护后的治理效果，利用 Abaqus 软件进行建模计算，分析了不同抗滑桩位置、桩长、桩间距等因素对边坡稳定性的影响，得到如下结论：

(1) 边坡在各方向的位移变化值均严格控制在规范要求的范围内，边坡各级台阶中，边坡上部的位移相对较大，在边坡的纵深方向上，各级台阶的位移存在一定波动，纵深 20.2 m 处位移较大，反映了边坡在不同深度层次的位移特性。

(2) 施工活动和降雨都会对边坡产生一定的扰动，加速边坡失稳，位移累计值发生突增；抗滑桩加固后，边坡各项位移累计值均趋于稳定，抗滑桩最大弯矩值远小于设计弯矩值，安全冗余度高，故认为抗滑桩加固边坡效果较好，但存在设计保守问题，应当进行一定的优化。

(3) 数值模拟结果与现场试验结果差距较小，故认为模型参数选择合理，具有一定的可信度；该工程抗滑桩位于第二级台阶处、桩长 23.4 m、桩间距 5 m 为最佳加固方案。

参 考 文 献

- [1] 陶志刚, 孙滢滢, 席思达, 等. NPR 锚索对白云岩矿失稳边坡控制效应研究 [J]. 金属矿山: 2024 (7): 22-230.
- [2] 刘天笑. 风化页岩高边坡开挖稳定性分析与支护设计 [J]. 粉

岩土力学

煤灰综合利用, 2020, 34 (4): 10-13.

- [3] 孙志明. 杂填土边坡稳定性分析及其抗滑桩优化设计 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (2): 28-31.
- [4] 郝广杰. 考虑土层变形特征的边坡稳定性分析方法研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 62-67.
- [5] 张超, 魏松涛, 刘彬, 等. 山区高速公路灰岩质高陡边坡失稳与加固措施分析 [J]. 公路, 2023, 68 (7): 264-269.
- [6] 宋洋, 马旭琪, 赵常青, 等. 隐伏非贯通软弱夹层岩质边坡剪切蠕变特征及稳定性研究 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (4): 755-763.
- [7] 苏培东, 唐雨生, 马云长, 等. 基于应变软化的软弱夹层边坡渐进破坏 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39 (6): 69-75.
- [8] 胡斌, 刘杨, 常书祥, 等. 含缓倾软弱夹层矿山高边坡滑动面位置与空间形态反演 [J]. 金属矿山, 2021 (7): 40-49.
- [9] 许四法, 姜伙军, 孙昌一, 等. 降雨强度对双层软弱夹层边坡稳定性影响分析 [J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50 (5):

492-497.

- [10] 刘杨, 彭亮, 祝鑫, 等. 降雨条件下含缓倾软弱夹层矿山高边坡稳定性分析 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (7): 71-79.
- [11] 陈权川, 徐庆方, 谢配红, 等. 含软弱夹层缓倾顺层岩质边坡中抗滑桩-键组合结构的应用 [J]. 安全与环境工程, 2023, 30 (4): 131-140.
- [12] 王来贵, 马玮航, 赵娜, 等. 含软弱夹层顺层岩质边坡变形-滑动演化过程研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (2): 129-135.
- [13] 陈云生, 米德才. 天峨龙滩特大桥下老岸拱座基坑边坡稳定性分析及加固方案 [J]. 公路, 2023 (2): 54-60.
- [14] 郭献章, 杨治华, 李凤柱, 等. 含软弱夹层顺层岩质边坡锚固优化分析 [J]. 金属矿山, 2022 (11): 186-192.
- [15] 李华勇, 王志鹏. 软弱夹层边坡抗滑稳定分析与抗滑桩桩位选择 [J]. 水运工程, 2021 (9): 187-193.

(上接第 48 页)

骨料级配、骨料形状等; 最佳石粉掺量的控制应进一步结合工程环境和实际使用情况确定。

参 考 文 献

- [1] 宋少民, 王毅. 机制砂片状颗粒含量检测方法研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 32-37.
- [2] 杨彬, 张志萱, 王啸夫, 等. 石粉含量对混凝土工作性能和力学性能影响的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017 (2): 36-37, 41.
- [3] 于本田, 刘通, 王焕, 等. 花岗斑岩石粉含量对混凝土性能及微观结构的影响 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2022, 52 (5): 1052-1062.
- [4] 刘通, 于本田, 王焕, 等. 高吸附性石粉含量对水泥砂浆力学性能及微观结构的影响 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (8): 16-22.
- [5] CELIK T, MARAR K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26 (4): 1121-1130.
- [6] AHMED A E, EL - KOURD A A. Properties of concrete incorporating natural and crushed stone very fine sand [J]. ACI Materials Journal, 1989, 86 (4): 417-424.
- [7] 王雨利, 董颖, 杨玉辉, 等. 石粉对机制砂混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2006 (11): 44-45, 49.

- [8] 何世钦, 吕森, 马冬哲, 等. 高石粉含量机制砂自密实混凝土配制方法试验研究 [J]. 混凝土, 2019 (11): 132-135, 140.
- [9] 方国富, 游秋森, 张显羽, 等. 硅质机制砂对混凝土性能影响机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (4): 81-84, 144.
- [10] 杨奕菲, 刘嘉良, 巩璇, 等. 石粉对水泥净浆流变性能的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 105-109.
- [11] SOROKA I, STERN N. Calcareous fillers and the compressive strength of portland cement [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6 (3): 367-376.
- [12] 史才军, 王德辉, 贾煌飞, 等. 石灰石粉在水泥基材料中的作用及其耐久性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45 (11): 1582-1593.
- [13] WANG D H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. A review on use of limestone powder in cement - based materials: mechanism, hydration and micro - structures [J]. Construction and Building Materials, 2018, 181: 659-672.
- [14] 林基泳, 蒋勇, 吴兴颜, 等. 石粉对混凝土性能影响的研究现状 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (12): 3842-3848.
- [15] LIU T, ZHU L H, YU B T, et al. Experimental studies to investigate efficacies of granite porphyry powder as homologous manufactured sand substitute [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2023, 21 (4): 307-321.