



引文格式: 李祥, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 川西泸定昔格达地层黏土岩工程地质特性研究[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 262–274. DOI: 10.12401/j.nwg.2023164

Citation: LI Xiang, WU Ruian, GUO Changbao, et al. Engineering Geological Characteristics of Xigeda Formation Claystone in Luding County, Western Sichuan[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 262–274. DOI: 10.12401/j.nwg.2023164

川西泸定昔格达地层黏土岩工程地质特性研究

李祥^{1,2}, 吴瑞安^{1,3,*}, 郭长宝^{1,3}, 倪嘉伟¹, 王炆^{1,3}, 李彩虹¹, 宋德光¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081)

摘要: 昔格达地层作为一类特殊的半成岩, 具有“见风成粉, 遇水成泥”的特性, 是工程地质问题与地质灾害的良好孳生载体。以川西泸定海子坪昔格达地层黏土岩为研究对象, 通过 X 射线衍射、电镜扫描、现场与室内岩土测试, 分析了其物质组成、微观结构及力学特性, 重点研究水作用下其物理力学性质的变化规律, 并与其他地区昔格达地层工程地质特性进行比较分析。研究表明: ①海子坪昔格达地层黏土岩主要成分为粉细砂、黏土等细粒物质, 由薄层黄色和灰色的黏土岩互层产出, 具有近水平层理构造。②黄色和灰色黏土岩的物质组成相同, 但占比不同, 黄色黏土岩的黏粒含量比灰色黏土岩高约 12%, 方解石含量少约 10%, 黄色黏土岩的结构更为致密, 黏粒间胶结作用更强。③海子坪昔格达地层黏土岩现场实测渗透系数为 $3.62 \times 10^{-4} \sim 7.34 \times 10^{-4}$ cm/s, 介于其他地区昔格达地层的黏土岩类-砂岩类之间, 这与其天然节理发育、受扰动极易开裂的特性密切相关。④黄、灰色黏土岩的黏聚力均随含水率增加而降低, 且含水率越高, 降幅越大, 内摩擦角与含水率的关系则表现有所不同。⑤不同地区昔格达地层的力学特性对含水率变化的敏感性具有明显差异, 其中泸定海子坪昔格达地层黏土岩的水敏性最为显著。

关键词: 昔格达地层; 黏土岩; 微观结构; 工程地质特性; 川西地区

中图分类号: P588

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0262-13

Engineering Geological Characteristics of Xigeda Formation Claystone in Luding County, Western Sichuan

LI Xiang^{1,2}, WU Ruian^{1,3,*}, GUO Changbao^{1,3}, NI Jiawei¹, WANG Yang^{1,3}, LI Caihong¹, SONG Deguang¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Engineering College, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: The Xigeda Formation is a special semi-diagenetic, which has the characteristics of "wind-induced powder, water-induced mud", and is a good carrier for engineering geological problems and geological hazards.

收稿日期: 2023-04-24; 修回日期: 2023-08-25; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目“构造缝合带蚀变软岩强度劣化效应及其对巨型滑坡的控滑机理”(42207233), 中国地质调查局项目“全国重大工程地质安全风险区划与综合评价”(DD20221816), 国家重点研发计划项目课题“地质灾害云-端协同智能预警系统构建与示范应用”(2021YFC3000505)联合资助。

作者简介: 李祥(1997-), 男, 硕士研究生, 从事工程地质与地质灾害方面的研究。E-mail: 1841357868@qq.com。

* 通讯作者: 吴瑞安(1991-), 男, 博士, 副研究员, 从事工程地质与地质灾害方面的研究。E-mail: wuruan1991@126.com。

In this study, the yellow and gray claystone of the Xigeda Formation in Haiziping Village, Luding County, western Sichuan was investigated. Its material composition, microstructure, and mechanical properties were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), field and laboratory geotechnical tests. The variation law of its physical and mechanical properties under the action of water is emphasized, and the engineering geological characteristics of the Xigeda Formation are compared and analyzed with those in other regions. Based on the above research, some conclusions are as follows. ①The Xigeda Formation claystone in Haiziping Village is mainly composed of fine sand, clay, and additional fine-grained materials. It is produced by yellow and gray thin layers interbedding and has a horizontal lamination structure. ②Yellow and gray claystone have the same material composition, but material proportions are different. The clay content of yellow claystone is 12% higher than that of gray claystone, and the calcite content is 10% inferior. The microstructure of yellow claystone is denser and cemented with clay particles more strongly. ③The permeability coefficient measured on the site of Xigeda Formation claystone in Haiziping Village is $3.62 \sim 7.34 \times 10^{-4}$ cm/s, which is between claystones and sandstones in Xigeda Formation in other regions. The characteristic of its permeability is closely related to the development of natural joints and the characteristic of cracks that is susceptible to disturbance. ④The cohesion of yellow and gray claystone decreased with the increase of moisture content, and the higher the moisture content, the greater the decline, but the relationship between internal friction angle and moisture content was different. ⑤The mechanical properties of the Xigeda Formation in different regions and lithology have obvious differences in sensitivity to moisture content changes, among which the mechanical property weakening by the water of the Xigeda Formation claystone in Haiziping Village, Luding County is the most significant.

Keywords: Xigeda Formation; claystone; microstructure; engineering geological characteristics; Western Sichuan

昔格达地层(NQ_x)是出露于中国西南地区的典型晚新生代地层,以四川省盐边县红格乡昔格达村命名,主要分布在金沙江、大渡河、安宁河等干流和支流河谷、断裂谷以及侵蚀洼地中(蒋复初等, 1999; Kong et al., 2009; Deng et al., 2020; 施云云, 2020)(图1)。昔格达地层主要由黏土、粉砂和细砂等细粒组分构成,具有水平层理构造,是一种介于土体与岩体之间的特殊地质体,大多数学者将其归为半成岩(刘惠军等, 2004; 徐则民等, 2011; Du et al., 2020)。该套地层具有不良的工程地质特性,是工程地质问题和地质灾害的有利孕生载体(陈林等, 2015; Ding et al., 2017; Xue et al., 2018; 周平等, 2020)。例如,成昆铁路在隧道施工穿越昔格达地层时,隧道发生拱顶沉降、基地下沉、局部浸湿失稳、边坡滑塌等问题(Zhou et al., 2021);四川汉源中海村昔格达地层滑坡中断了S360省道,造成7人死亡2人失联和8栋民房被毁(徐奕梓等, 2022)。

目前,已有不少学者对中国四川渡口、攀枝花、西昌、冕宁、汉源、云南寨子村等西南地区的昔格达地层的物质组成、微观结构、物理力学特性等方面开展了大量研究,研究结果表明:①不同地区昔格达地层矿物组成与成分差异性较大,反映出不同地区昔格达地层沉积环境、物源及形成时代等存在差异(王思

敬等, 1990; 李小泉, 1996; 孟庆会, 2011)。②昔格达地层黏土岩具有较强胶结结构特征,遇水强度陡然下降的原因之一是土体内黏土矿物结构被破坏(Du et al.,

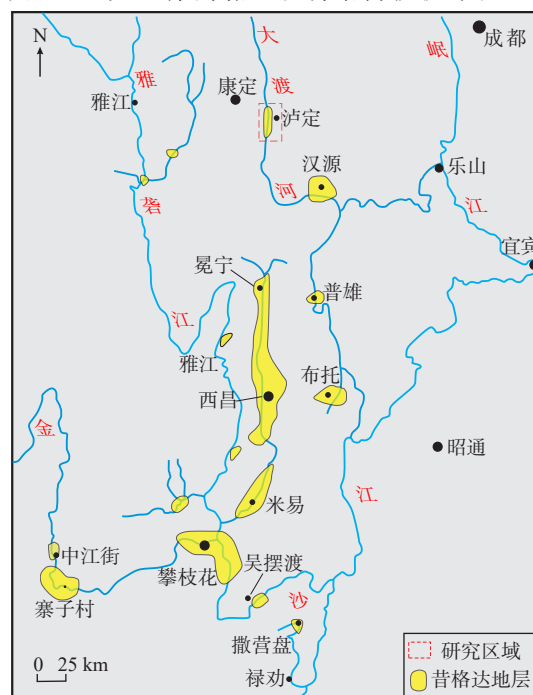


图1 昔格达地层分布示意图

Fig. 1 Distribution of Xigeda Formation

2020; Yang, 2021; Fu et al., 2022; 卢志鹏等, 2022)。
③昔格达地层水理特性与其黏粒含量有着密切关系,黏粒含量越高,其液限越大,抗渗性越好(彭盛恩, 1986; 孟庆会, 2011)。
④天然条件下昔格达地层具有良好的自稳性,受水影响显著,当含水率超过敏感界线时,强度陡然衰减(彭盛恩, 1986; 文丽娜等, 2005; 张威等, 2011; 安少鹏等, 2013; 周罕等, 2014; Du et al., 2020)。相比川南、攀西等地区的昔格达地层而言,关于川西泸定地区昔格达地层工程地质特性的研究鲜有报道。

笔者以四川省泸定县海子坪昔格达地层黏土岩为研究对象,基于 XRD 测试、电镜扫描等测试,分析其物质组成和微观结构特征;通过现场渗透试验、室

内力学试验,研究其水理特性与力学特性,并与国内其他地区昔格达地层对比分析,对深化川西地区昔格达地层研究与支撑当地防灾减灾具有一定参考价值。

1 川西泸定昔格达地层发育特征

四川省泸定县海子坪地处大渡河右岸,共发育七级阶地,昔格达地层发育于 T3 阶地以上,出露厚度约 440 m,为国内现今发现的昔格达地层沉积最厚的剖面(图 2、图 3)。以昔格达地层为基座的 T4~T7 阶地,拔河高度分别为 770 m、820 m、880 m、930 m。在大渡河河谷处发现 T1~T3 阶地,拔河高度分别为 10 m、50 m、100 m,其中 T4 与 T3 阶地相对高差达 670 m。

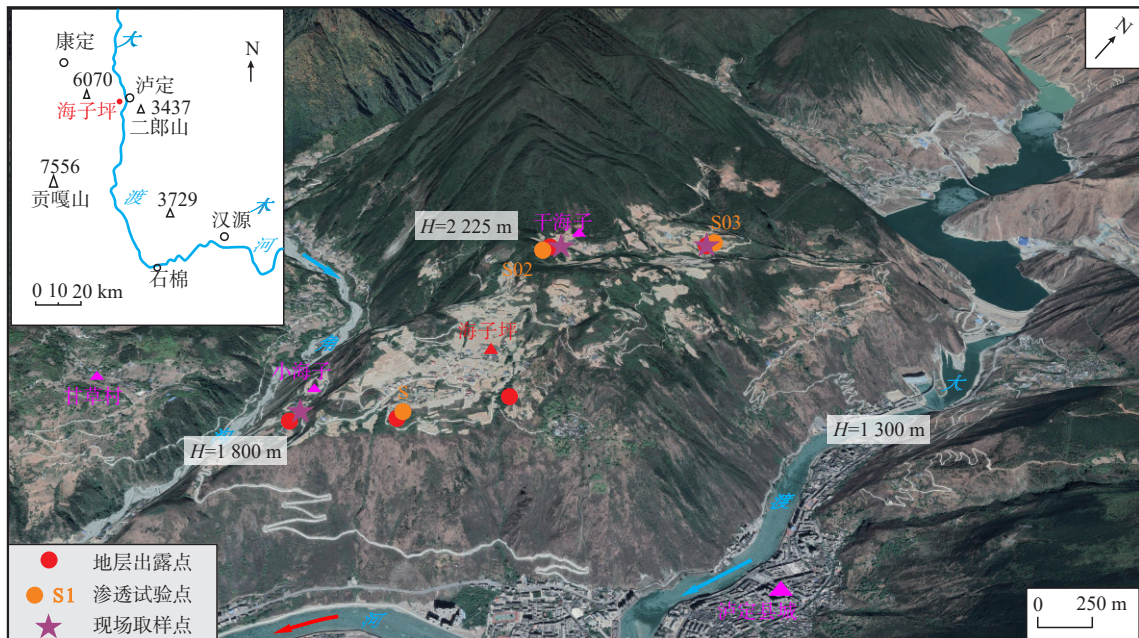


图2 泸定海子坪昔格达地层分布图(影像据 Google Earth)

Fig. 2 Distribution of Xigeda formation in Haiziping village, Luding county (Image from Google Earth)

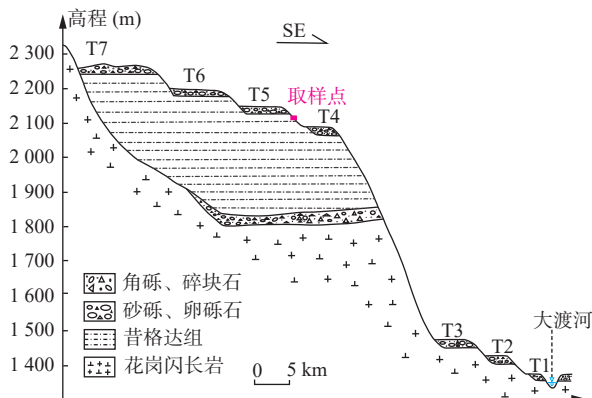


图3 大渡河海子坪河流阶地剖面图

Fig. 3 Terrace profile of Dadu River in Haiziping Village

海子坪昔格达地层由黄色和灰色两种黏土岩互层产出(图 4),该套地层底部发育一定厚度的角砾与碎块石层,与下伏基岩呈角度不整合接触。受构造运动影响,昔格达地层整体向西倾斜,倾角约为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$,局部可达 30° 左右(蒋复初等, 1999)。受植被、风化剥蚀、人类工程活动等因素影响,海子坪昔格达地层露头条件连续性较差,仅在小海子、干海子等多处零星出露。现场调查发现,该套地层中发育较多的浅层滑坡和坡面泥流。在强降雨条件下,部分滑坡失稳后可能顺着沟道运动,并迅速转化为泥石流,对沟口造成一定危害(宋德光等, 2023)。



a. 昔格达组地层取样剖面; b. 黄色土样; c. 灰色土样

图4 昔格达地层出露及取样剖面

Fig. 4 Xigeda Formation development characteristics and sampling profile

在昔格达地层的成因机制方面, 目前已提出的主要有冰湖沉积、断陷湖泊沉积、堰塞湖沉积、泛湖期大湖沉积、山间盆地等(蒋复初等, 1999; 陈智梁等, 2004; 王书兵等, 2006; 王萍等, 2011; 施云云, 2020; 罗璐, 2021), 泸定海子坪昔格达地层的成因机制主要有断陷盆地成因和堰塞湖成因两种认识(蒋复初等, 1999; 陈智梁等, 2004)。野外调查表明, 大渡河流域泸定-得妥段大型-巨型古滑坡较为发育, 且多具有历史堵江特征(吴俊峰等, 2011; Wu et al., 2019), 因而认为泸定海子坪昔格达地层极有可能是古滑坡堰塞湖沉积物。在其形成年代学研究方面, 不同学者采用古地磁、光释光、ESR、宇生核素等多种测年技术测得的年龄跨度较大(蒋复初等, 1999; 王书兵等, 2006; 王萍等, 2011; 施云云, 2020; 罗璐, 2021)(表1)。

表1 泸定海子坪昔格达地层测年方法及结果统计

Tab. 1 The dating methods and statistical results of the Xigeda formation in Haiziping village, Luding county

测年方法	测试年龄 (Ma)	数据来源
古地磁	4.20~2.60	蒋复初等(1999)、王书兵等(2006)
光释光	1.78~1.13	罗璐(2021)
ESR	0.70~0.40	王萍等(2011)
宇生核素	1.04~0.53	施云云(2020)

2 矿物成分与微观结构

2.1 矿物成分分析

在泸定海子坪 T4~T6 阶地出露的昔格达地层中

分别采集黄色和灰色黏土岩样品(图4), 并开展 X 衍射测试(XRD)和电镜扫描(SEM)等测试, 分析其矿物成分和微观结构。结果表明, 两种土样的矿物成分相同, 均以石英和黏土矿物为主, 含少量斜长石、方解石、钾长石、菱铁矿和角闪石等矿物(图5, 图6)。各矿物占比明显不同, 黄色黏土岩中的黏土矿物含量比灰色黏土岩高 12%, 方解石含量少 10%, 表明黄色黏土岩沉积时期风化作用更强烈, 处于暖湿气候环境(罗运利等, 1998)。此外, 黄色和灰色黏土岩中黏土矿物成分均以伊利石为主, 占比分别高达 93% 和 89%, 蒙脱石和绿泥石含量较少(表2)。

2.2 微观结构特征与分析

根据黄、灰色黏土岩天然状态下的 SEM 图像可知, 黄色黏土岩结构较致密, 成分主要为碎屑岩颗粒和填充物。碎屑岩颗粒以石英为主, 粒径 10~25 μm , 沿碎屑岩颗粒边缘分布自生黏土矿物集粒。填充物以伊利石和胶结物为主, 含少量绿泥石。伊利石呈片状镶嵌于碎屑粒间孔隙, 粒径 3~6 μm , 绿泥石呈叶片状附着于碎屑岩颗粒边缘。胶结物为黏土矿物黏结, 主要表现为填充于粒间孔隙的绒状、针状结构(图7)。灰色黏土岩结构松散, 孔隙和微小裂隙较发育, 成分主要为粉砂粒碎屑和片状黏土矿物, 粉砂粒碎屑以石英为主, 粒径 5~15 μm 。片状黏土矿物主要为伊利石, 粒径 5~8 μm , 黏土矿物颗粒间胶结作用较弱, 主要呈片状填充于粒间孔隙(图8)。

基于 Image-Pro Plus(IPP)图像分析软件, 对黄、灰色黏土岩的微观结构进行定量研究。考虑到 SEM 图

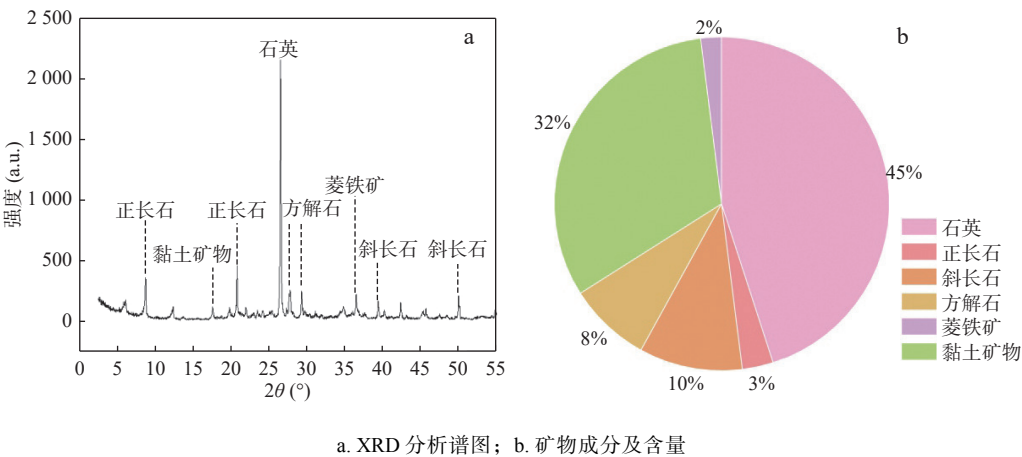


图5 黄色黏土岩 XRD 测试分析

Fig. 5 XRD analysis of yellow claystone sample

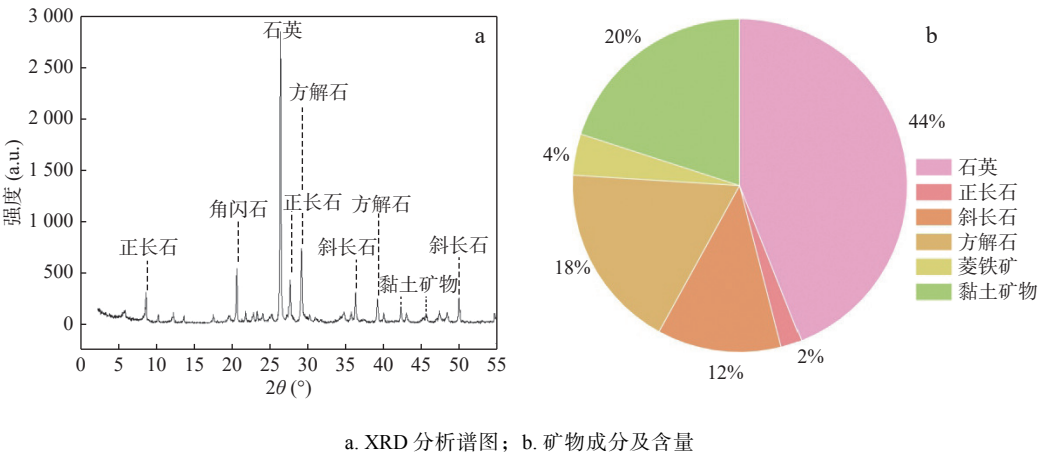


图6 灰色黏土岩 XRD 测试分析

Fig. 6 XRD analysis of gray claystone sample

表 2 黄色和灰色黏土岩黏土矿物分析结果

Tab. 2 Test results of clay minerals of yellow and gray claystone samples

序号	样品类型	黏土矿物检测结果 (%)					I/S 混层比 (%)
		蒙脱石 S	伊蒙混层 I/S	伊利石 It	高岭石 K	绿泥石 C	
1	黄色黏土岩	3	—	93	—	4	—
2	灰色黏土岩	5	—	89	—	6	—

像超过一定放大倍数后存在“失真”现象(梁坤, 2021), 选取放大 1500 倍的 SEM 图像进行分析(图 9、图 10)。根据测量等效孔径(d)范围, 将土样的微观孔隙分成 4 种孔隙类型: 大型孔隙($d > 4 \mu\text{m}$); 中型孔隙($1 \mu\text{m} < d < 4 \mu\text{m}$); 小型孔隙($0.4 \mu\text{m} < d < 1 \mu\text{m}$); 微型孔隙($d < 0.4 \mu\text{m}$)。结果表明, 黄、灰色土样中微观孔隙随机独立分布, 连通率较低, 灰色黏土岩微观孔隙更为发育(图 9b, 图 10b)。黄、灰色黏土岩微观孔隙均以微、小型孔隙为主, 中型孔隙次

之, 大型孔隙并不发育(表 3), 反映出泸定海子坪普格达地层静水沉积环境良好, 后期受环境动力的扰动影响较小。

黄、灰色黏土岩的微观结构孔隙丰度(C)分布范围具有较高相似度, 孔隙丰度(C)在各个区间都有分布, 但主要集中在 0.2~0.5 与 0.8~0.9 这两个区间内(图 11)。可见泸定海子坪普格达地层黄、灰色黏土岩的微观孔隙结构均以扁圆状居多, 等轴型次之, 长条型最少。

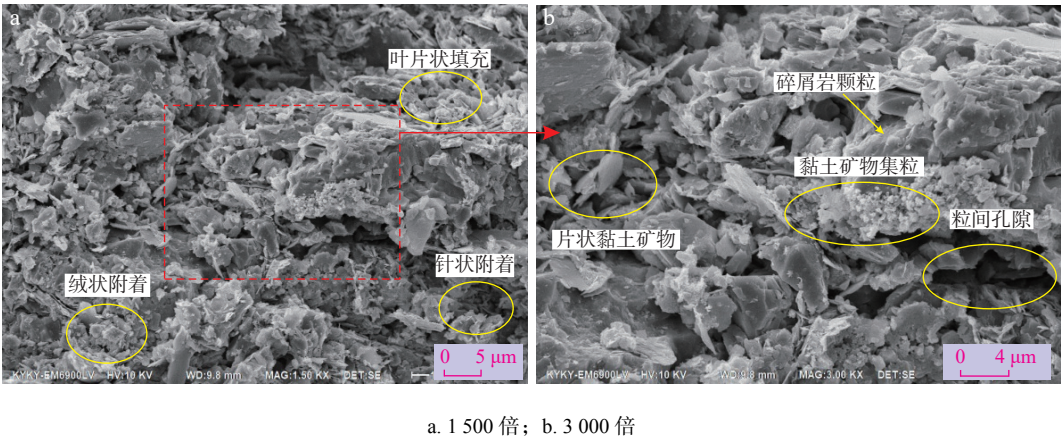


图7 黄色黏土岩 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of yellow claystone sample

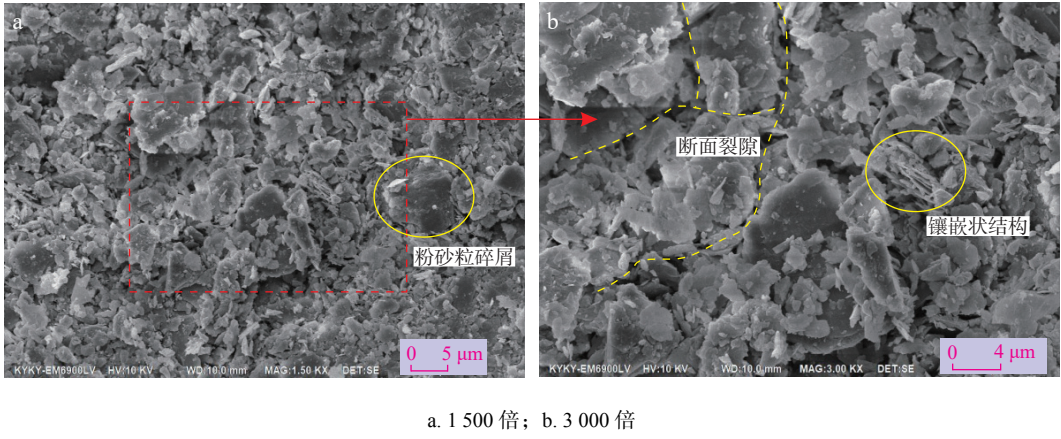


图8 灰色黏土岩 SEM 图像

Fig. 8 SEM image of gray claystone sample

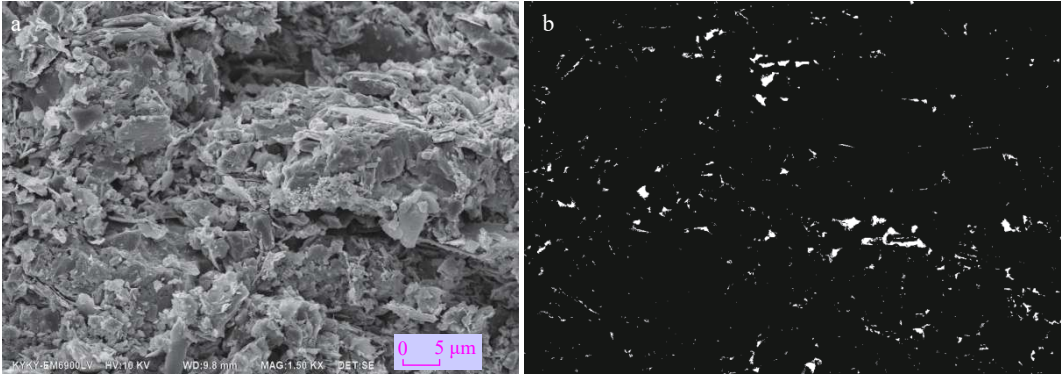


图9 黄色黏土岩 SEM 图像和二值图像

Fig. 9 SEM image and binary image of yellow claystone sample

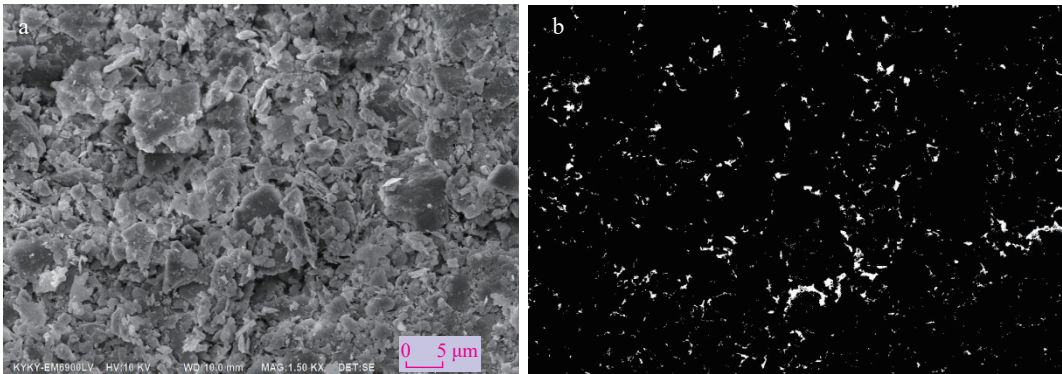
3 昔格达地层工程地质特性研究

3.1 基本物性

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019), 对

黄、灰色黏土岩进行了一系列岩土体物理性质测试。结果表明, 黄、灰色黏土岩基本物性指标较为接近(表 4), 其中黄色黏土岩塑性指数为 7.8~14.2, 灰色黏土岩塑性指数为 8.4~12.9, 均属粉土-亚黏土。

依照《水利水电工程注水试验规程》(SL 345-



a. SEM 图像(1 500 倍); b. 二值化图像(白色为孔隙)

图10 灰色黏土岩 SEM 图像和二值图像

Fig. 10 SEM image and binary image of gray claystone sample

表 3 黄色和灰色黏土岩各孔径级别对应的微观孔隙测量结果

Tab. 3 Measurement results of different pore sizes of yellow and gray claystone samples

孔径级别 (μm)	黄色黏土岩				灰色黏土岩			
	数量 N (个)	孔径 d (μm)	面积 A (μm^2)	丰度 (C)	数量 N (个)	孔径 d (μm)	面积 A (μm^2)	丰度 (C)
< 0.4	356	0.23	0.04	0.53	512	0.24	0.05	0.53
0.4~1	137	0.59	0.24	0.46	178	0.57	0.26	0.51
1~4	22	1.5	1.64	0.45	30	1.24	1.06	0.44
> 4	0	0	0	0	1	4.11	5.99	0.52

注: C 为 B 与 L 的比值, B 表示孔隙的短轴长度, L 表示孔隙长轴长度, A 为平均孔隙面积。

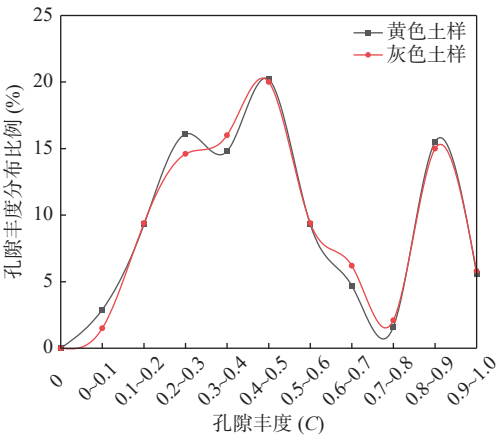


图11 黄色和灰色黏土岩微观孔隙丰度分布比例

Fig. 11 Distribution ratio of microscopic porosity of yellow and gray claystone samples

2007),在海子坪上多处昔格达地层出露点开展试坑原位双环注水渗透试验(图 2),测得的渗透系数为 $3.62\times 10^{-4}\sim 7.34\times 10^{-4}$ cm/s,平均渗透系数为 5.11×10^{-4} cm/s,表明该处昔格达黏土岩为中等透水介质(表 5)。本次试验结果与其他地区昔格达地层黏土岩渗透特性相比偏大(李小泉,1996;宋为广等,2017)。现场调查发现,泸定海子坪昔格达地层完整性好、无微裂纹或裂缝土块的渗透性较差,但土体内节理裂隙发育,且受扰动后极易形成大量的微小裂隙,导致现场测得的渗透系数偏大。

3.2 力学特性

现场调查发现,泸定海子坪昔格达地层黄、灰色黏土岩成岩程度较低,取样过程中对土体扰动较大,

表 4 黄色和灰色黏土岩基本物性指标

Tab. 4 Basic physical property indexes of yellow and gray claystone samples

土样 编号	样品 类型	含水率 (%)	土粒 比重	天然密度 (g/cm^3)	干密度 (g/cm^3)	孔隙比	液限 (%)	塑限 (%)	塑性 指数	饱和含水 率(%)
XGD-01	灰色黏土岩	3.7	2.69	1.86	1.76	0.569	36.4	25.9	10.5	30.93
XGD-02	黄色黏土岩	4.5	2.70	1.80	1.73	0.550	36.3	24.9	11.4	31.91

表 5 双环注水试验结果

Tab. 5 Results of double-ring water injection tests

试验点序号	渗透系数 (cm/s)	平均渗透系数 (cm/s)	透水性等级
S01	3.62×10^{-4}		
S02	7.34×10^{-4}	5.11×10^{-4}	中等透水
S03	4.36×10^{-4}		

本研究采用重塑样开展了黄、灰色黏土岩在不同含水率条件下的三轴固结不排水剪切试验。结果表明: 在相同围压条件下, 土样的峰值强度均随含水率的增加而减小, 在试验含水率范围内, 土样峰值强度与含水

率呈较好的线性关系(图 12)。

两种土样的黏聚力均随含水率的增加而降低, 且含水率越高, 降幅越大(图 13)。当黄色黏土岩含水率由 20% 增至饱和含水率 30.93% 时, 黏聚力从 121.12 kPa 降至 18.54 kPa, 降幅为 84.7%; 灰色黏土岩含水率由 15% 增至饱和含水率 31.91% 时, 黏聚力从 50.98 kPa 降至 0.4 kPa, 降幅为 99.2%。此外, 黄色黏土岩黏聚力远高于灰色黏土岩, 这也进一步说明了黄色黏土岩黏土矿物间胶结作用更强, 结构更为致密; 而随着含水率不断增加, 黏土矿物间胶结结构被破坏, 黏聚力显著降低。

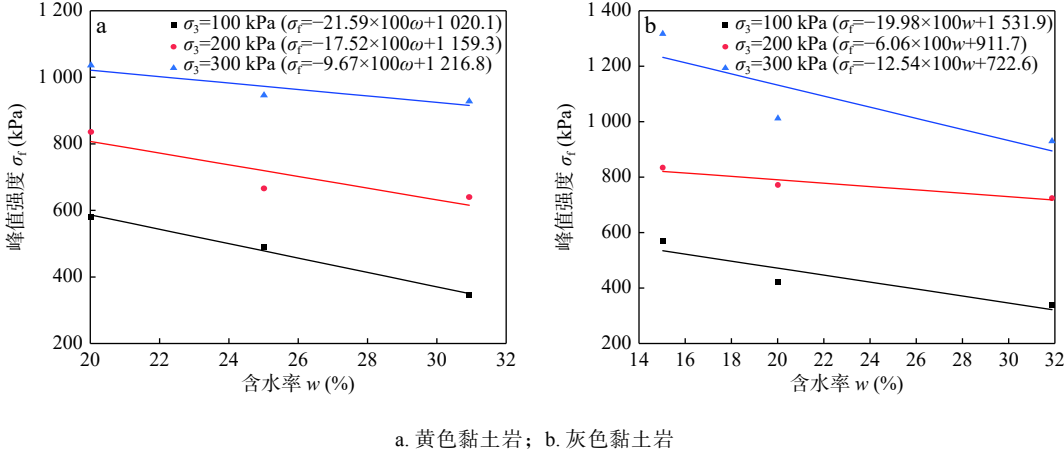


图 12 不同围压下峰值强度与含水率关系图

Fig. 12 Relationship between peak strength and moisture content under different confining pressures

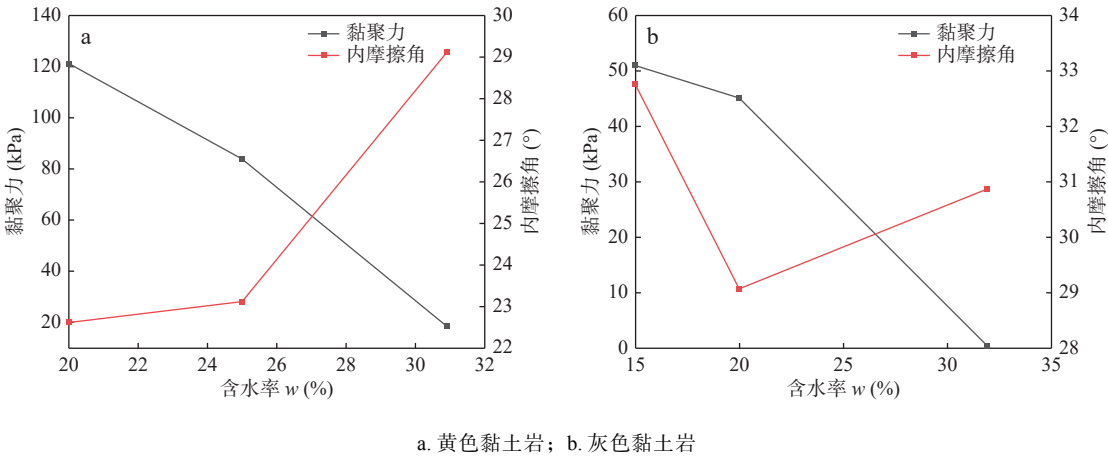


图 13 黏聚力、内摩擦角与含水率关系

Fig. 13 Relationship between cohesion, internal friction angle and moisture content

当含水率增加时, 黄色黏土岩内摩擦角逐渐增大, 含水率由 20% 增至饱和含水率 30.93% 时, 内摩擦角由 22.62° 增大至 29.12°, 增幅为 28.7%。而灰色黏土岩内摩擦角表现为先降低后增大, 但变化幅度不大, 不同含水率土样之间内摩擦角的差值在 ±4° 范围内波动。

4 讨论

4.1 水理特性差异性分析

根据已有研究(王思敬等, 1990; 孟庆会, 2011)

和本次试验结果可知, 泸定海子坪昔格达地层黏土岩界限含水率总体低于攀西地区, 而塑性指数均远小于攀西地区(图 14)。由于土体界限含水率(液限)

与土体中的黏土矿物含量呈正相关, 推断泸定海子坪昔格达地层黏土岩中的黏土矿物含量比攀西地区的低。

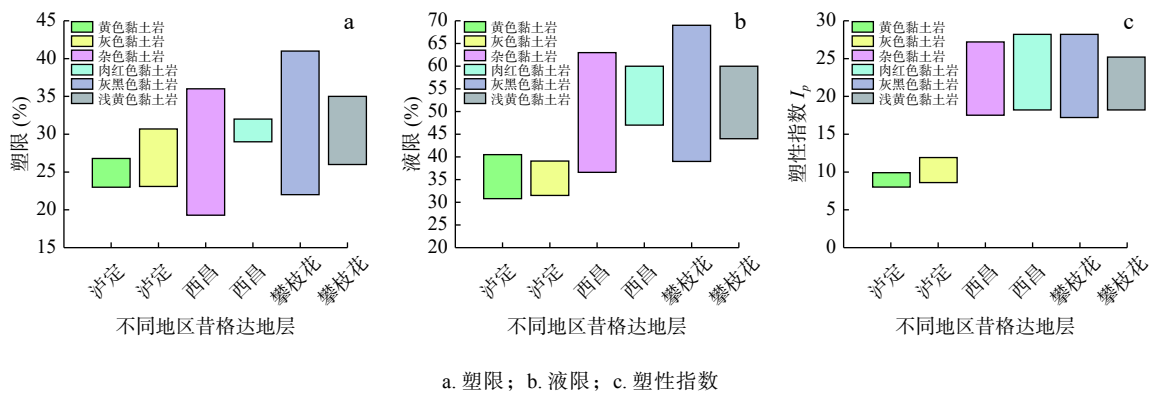


图14 不同地区昔格达地层界限含水率对比图

Fig. 14 Correlation of moisture content of Xigeda Formation boundary in different regions

对比分析不同地区昔格达地层的渗透特性可知, 泸定海子坪昔格达地层黏土岩渗透系数的数量级与其他地区粉砂岩类相当(均为 10^{-4} cm/s), 而明显大于其他地区黏土岩类的渗透系数(主要为 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/s)(表 6)。由此可知, 泸定海子坪昔格达地层黏土岩的

渗透特性与其他地区昔格达地层的粉砂岩类大致相当, 而大于黏土岩类。昔格达地层在不同地区与不同岩性上的渗透特性差异较大, 这可能与试验手段、区域地质条件、成岩条件及后期扰动程度等因素密切相关。

表 6 不同地区昔格达地层渗透特性比较

Tab. 6 Comparison of permeability characteristics of Xigeda Formation in different regions

地区	试验对象	试验条件	渗透系数 (cm/s)	透水性等级	数据来源
泸定海子坪	粉土-亚黏土	现场双环注水	$3.62 \times 10^{-4} \sim 7.34 \times 10^{-4}$	中等透水	本研究
攀枝花格里坪	亚黏土	室内渗透	$3.7 \times 10^{-5} \sim 7.2 \times 10^{-4}$	弱透水	宋为广等 (2017)
	粉砂岩	室内渗透	$2.0 \times 10^{-5} \sim 2.78 \times 10^{-5}$	弱透水	左永振等 (2016)
攀枝花栗子坪	亚黏土	室内渗透	$2.8 \times 10^{-7} \sim 3.3 \times 10^{-7}$	极弱透水	李小泉 (1996)
云南龙开口镇	黏土岩	室内渗透	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	极弱透水	张德强等 (2021)
川南地区	泥岩	现场、室内渗透	$1.7 \times 10^{-5} \sim 5.25 \times 10^{-5}$	弱透水	钟成等 (2012)
	砂岩		1.6×10^{-4}	中等透水	
西昌经久乡	黏土岩	室内渗透、钻孔压水	$1.95 \times 10^{-7} \sim 4.61 \times 10^{-5}$	弱透水	杨碧 (2010)
	粉砂岩		$1.47 \times 10^{-4} \sim 6.54 \times 10^{-4}$	中等透水	

4.2 强度指标差异性分析

对比分析不同地区昔格达地层力学强度指标(张 文举, 2003; 黄绍槟等, 2005; 文丽娜等, 2005; 安少鹏 等, 2013; 周罕等, 2014; Du et al., 2020)可知, 泸定海子坪粉土-亚黏土类黏聚力低于云南寨子村半成岩和攀西地区黏土岩类, 而高于攀西地区粉砂岩类; 内摩擦角略低于攀枝花新九乡砂岩类, 而高于其他地区半成岩、黏土岩及粉砂岩类(图 15)。

不同地区的昔格达地层黏聚力均随含水率的增

加而降低, 但对含水率的敏感性有所不同。随着含水率的增加, 泸定海子坪粉土-亚黏土黏聚力的水敏特性最为显著, 云南寨子村半成岩次之, 攀西地区砂岩类水敏特性最弱(图 15a)。此外, 其他地区昔格达地层内摩擦角均随含水率的增加而降低, 而泸定地区粉土-亚黏土内摩擦角随含水率的增加而增大。随着含水率的增加, 泸定海子坪粉土-亚黏土内摩擦角增幅越大, 云南寨子村半成岩及攀西地区砂岩类内摩擦角降幅最大, 攀西地区黏土岩类内摩擦角降幅最小(图 15b)。

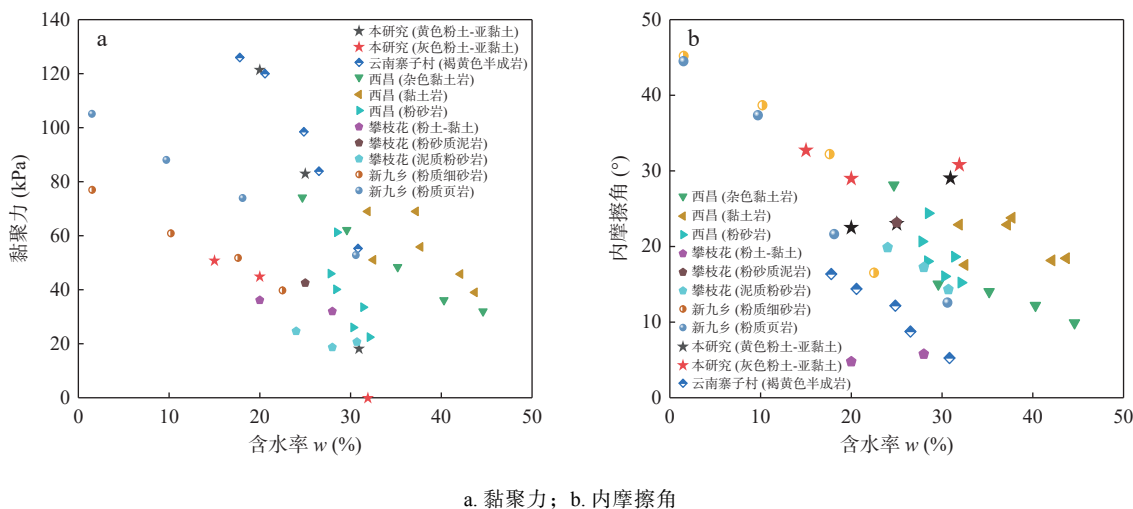


图15 不同地区昔格达地层强度指标与含水率的关系图

Fig. 15 Relationship between strength index and moisture content of Xigeda Formation in different regions

由上分析可知,不同地区昔格达地层对含水率敏感性存在区域性及岩性上的差异;其中泸定海子坪地区粉土-亚黏土力学特性的水敏特性最为显著,攀西地区黏土岩及云南寨子村半成岩次之,攀西地区砂岩类最小。

4.3 昔格达地层灾害效应与防灾减灾对策

中国西南地区的昔格达地层成岩程度较低,属于一类特殊的硬土软岩,其工程地质特性主要表现为:①昔格达地层的物理力学特性与其黏粒含量有着密切关系,其物理力学性质介于土体和岩体之间。②不同地区昔格达地层水理特性差异较大,这与不同地区昔格达地层成岩程度、赋存环境、物质组成、风化程度及后期受扰动等因素密切相关。③水对昔格达地层强度特性具有显著的弱化效应,这归因于较高的含水率破坏了土体内部黏粒的胶结结构,不同地区昔格达地层的水敏特性有所区别,这与其黏粒含量差异性有关。由此可知,昔格达地层具有良好的孕灾条件,其内部微裂隙较为发育,后期受地震、降雨和工程扰动等因素影响,这些节理裂隙逐渐演化形成地表水入渗的优势通道和控制岩土体稳定性的软弱结构面,易形成崩塌、滑坡和泥石流地质灾害,甚至形成灾害链(铁永波等, 2022)。

针对昔格达地层遇水软化、易滑致灾的特点,在进行人类工程活动时,须引起足够的重视,针对其控灾因子与致灾模式采取相应的防范措施(冯立等, 2014; 李绵绵等, 2019),如对公路开挖形成的高陡边坡,建议采取挡土墙、排水沟等工程措施;对极端工况诱发下可能形成高位滑坡泥石流的斜坡区段,建议开展

详细工程地质调查,对不稳定斜坡开展综合监测,必要时可进行工程加固,设置截排水沟,并在下游沟道设置排导槽与谷坊坝,避免形成高位启动-沟道泥石流的灾害链。

5 结论

(1)泸定海子坪昔格达地层黏土岩主要成分为粉细砂与黏土等细粒物质,由黄色和灰色两种黏土岩互层产出,物质组成均以石英与黏土矿物为主,黏土矿物均以伊利石为主。黄色黏土岩的黏土矿物间胶结结构特征明显,而灰色黏土岩的黏土矿物呈薄片散体状,前者比后者结构致密、黏土矿物间胶结作用强。

(2)黄、灰色黏土岩黏聚力均随含水率的增大而逐渐降低,内摩擦角随含水率的增加而增大。水与黏土矿物作用破坏了黏土矿物间胶结结构,导致黏聚力逐渐丧失,而岩碎屑颗粒相互作用导致内摩擦角增大,且在高含水率条件下增幅更大。

(3)泸定海子坪昔格达地层黏土岩成岩程度较低,节理裂隙发育,扰动后极易开裂,平均渗透系数为 5.11×10^{-4} cm/s,属中等透水介质,其渗透特性介于攀西地区黏土岩类-砂岩类之间。

(4)不同地区昔格达地层力学特性均随含水率增加而逐渐减小,其水敏特性存在区域与岩性上的差异,泸定昔格达地层黏土岩遇水强度弱化特性最为显著。泸定海子坪昔格达地层黏土岩黏聚力介于其他地区昔格达地层砂岩类-半成岩及黏土岩之间,而内摩擦角与砂岩类相当。

参考文献(References):

- 安少鹏, 韦立德, 刘文连, 等. 昔格达组粉砂岩与结构接触面力学特性试验研究[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(05): 702–708.
- AN Shaopeng, WEI Lide, LIU Wenlian, et al. Experimental study on mechanical behavior of Xigeda Formation siltstone and structure interface[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(05): 702–708.
- 陈林, 朱剑. 昔格达滑坡破坏模式及稳定性评价[J]. *地质灾害与环境保护*, 2015, 26(03): 11–16.
- CHEN Lin, ZHU Jian. Deformation mechanism and stability assessment of Xigeda landslide[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2015, 26(03): 11–16.
- 陈智梁, 孙志明, L. H. Royden, 等. 四川泸定昔格达组的堰塞湖成因及其意义[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(06): 614–620.
- CHEN Zhiliang, SUN Zhiming, L. H. Royden, et al. Landslide blocked lake: origin of the Xigeda Formation in Luding, Sichuan and its significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(06): 614–620.
- 冯立, 张茂省, 张成航, 等. 四川虹口黑泥湾滑坡风险性评估[J]. *西北地质*, 2014, 47(03): 165–176.
- FENG Li, ZHANG Maosheng, ZHANG Chenghang, et al. Risk Assessment of Landslide in Heiniwan, Hongkou County, Sichuan Province[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(03): 165–176.
- GB/T 50123-2019, 土工试验方法标准[S].
- GB/T 50123-2019, Standard for Geotechnical Test Methods[S].
- 蒋复初, 吴锡浩, 肖华国. 四川泸定昔格达组时代及其新构造意义[J]. *地质学报*, 1999, 73(1): 1–6.
- JIANG Fuchu, WU Xihao, XIAO Huaguo. The age of Xigeda Formation in Luding, Sichuan and its neotectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(1): 1–6.
- 黄绍槟, 吉随旺, 朱学雷, 等. 西攀路昔格达地层滑坡分析[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(6): 41–44.
- HUANG Shaobin, JI Suiwang, ZHU Xuelei, et al. Analysis on Xigeda landslide in Xipan expressway[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(6): 41–44.
- 李绵绵, 赵法锁, 宋飞, 等. 双排抗滑桩的受力特性研究—以柳家坡 2 号滑坡治理工程为例[J]. *西北地质*, 2019, 52(02): 181–189.
- LI Mianmian, ZHAO Fasuo, SONG Fei, et al. Force Characteristics of Double-row Anti-slide Pile in Liujiapo Landslide[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(02): 181–189.
- 李小泉. 栗子坪水电站厂基昔格达土的工程特性[J]. *广西水利水电*, 1996, (01): 18–22+45.
- LI Xiaoquan. Engineering characteristics of Xigeda foundation soil in Suziping Hydropower plant[J]. *Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering*, 1996, (01): 18–22+45.
- 梁坤. 基于昔格达混合填料中砂泥配比变化的工程力学效应研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- LIANG Kun. Research on engineering mechanics effect based on the variation of sand and mud ratio in Xigeda mixed filling[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- 刘惠军, 聂德新. 昔格达地层研究综述[J]. *地球科学进展*, 2004, (S1): 80–82.
- LIU Huijun, NIE Dexin. The overview of the Xigeda Strata study[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, (S1): 80–82.
- 卢志鹏, 孔玉侠, 王慧娟, 等. 昔格达土的压缩特性和微观结构[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(1): 114–122.
- LU Zhipeng, KONG Yuxia, WANG Huijuan, et al. Compressive characteristics and microstructure of Xigeda soil[J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 44(1): 114–122.
- 罗璐. 四川泸定晚新生代昔格达组沉积记录及大渡河水系演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- LUO Lu. Sedimentary records of the Xigeda Formation in the late eozoic and evolution of the Dadu river system in Luding, Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- 罗运利, 刘东生. 昔格达组沉积环境演化与旋回地层学研究[J]. *第四纪研究*, 1998, (04): 373.
- LUO Yunli, LIU Dongsheng. Study on sedimentary environment evolution and cyclostratigraphy of Xigeda Formation[J]. *Quaternary Sciences*, 1998, (04): 373.
- 孟庆会. 西昌昔格达地层粘土塑性指数形成机制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- MENG Qinghui. Formation mechanism of clay plasticity index of Xigeda Clay in Xichang[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- 彭盛恩. 昔格达组粘土的工程地质特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 1986, 2: 16–18.
- PENG Shengen. Study on the engineering geological characteristics of the clay in the Xigeda Group[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1986, 2: 16–18.
- SL 345-2007, 水利水电工程注水试验规程[S].
- SL 345-2007, Code of Water Injection Test for Water Resources and Hydropower Engineering[S].
- 施云云. 大渡河泸定段海子坪昔格达组的宇生核素等时线埋藏测年及地貌意义[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- SHI Yunyun. Cosmogenic nuclides Isochronal burial dating and geomorphological significance of the Haiziping Xigeda Formation in Luding section of Dadu River[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020.

- 宋德光, 吴瑞安, 马德芹, 等. 四川泸定昔格达组滑坡灾害运动过程模拟分析[J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2185–2197.
- SONG Deguang, WU Ruian, MA Deqin, et al. Simulation analysis of landslide disaster movement process in Xigeda Formation, Luding County, Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(12): 2185–2197.
- 宋为广, 杜妍平. 昔格达土用于坝体防渗料试验研究[J]. 山西建筑, 2017, 43(01): 228–229.
- SONG Weiguang, DU Yanping. On dam anti-seepage material test with Xigeda soil[J]. Shaanxi Architecture, 2017, 43(01): 228–229.
- 铁永波, 张宪政, 龚凌枫, 等. 西南山区典型地质灾害链成灾模式研究[J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1071–1080.
- TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, GONG Lingfeng, et al. Research on the pattern of typical geohazard chains in the southwest mountainous region, China[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1071–1080.
- 王萍, 李建平, 王建存, 等. 四川昔格达组地层的石英 Ti 心 ESR 测年及与磁性地层剖面的对比[J]. 核技术, 2011, 34(02): 111–115.
- WANG Ping, LI Jianping, WANG Jiancun, et al. Quartz Ti-center in ESR dating of Xigeda Formation in Sichuan and contrast with magnetic stratigraphic profiles[J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(02): 111–115.
- 王书兵, 赵志中, 乔彦松, 等. 泸定昔格达组时代认定与古环境[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 257–264.
- WANG Shubing, ZHAO Zhizhong, QIAO Yansong, et al. Age and paleoenvironment of Xigeda Formation in Luding[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(2): 257–264.
- 王思敬, 黄鼎成. 攀西地区环境工程地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- WANG Sijing, HUANG Dingcheng. Environmental engineering geology in west of Sichuan[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990.
- 文丽娜, 朱学雷, 白志勇, 等. 西攀高速公路新九地区昔格达地层岩土特性[J]. 公路, 2005, (07): 145–148.
- WEN Lina, ZHU Xuelei, BAI Zhiyong, et al. Characteristics rock and soil of Xigeda Strata in Xinjiu district of Xi-Pan Expressway[J]. Highway, 2005, (07): 145–148.
- 吴俊峰, 王运生, 张桥, 等. 大渡河加郡-得妥河段大型滑坡地质灾害遥感调查[J]. 水土保持通报, 2011, 31(03): 113–116.
- WU Junfeng, WANG Yunsheng, ZHANG Qiao, et al. Investigation on Large-scale Landslides in Daduhe River Between Jiajun County and Detuo County Based on Remote Sensing[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(03): 113–116.
- 徐奕梓, 樊晓一, 张友谊, 等. 四川省汉源县中海村滑坡动力学特征数值分析[J]. 中国地质调查, 2022, 9(4): 102–111.
- XU Yizi, FAN Xiaoyi, ZHANG Youyi, et al. Numerical analysis on dynamic characteristics of Zhonghai Village landslide in Hanyuan County of Sichuan Province[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(4): 102–111.
- 徐则民, 刘文连. 昔格达地层研究中需要注意的若干关键问题[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 256–270.
- XU Zemin, LIU Wenlian. Some problems in the study of the genesis of Xigeda Formation[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 256–270.
- 杨碧, 范柱国, 刘文连, 等. 攀钢钒钛钢铁新基地昔格达地层岩土工程特性研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(4): 973–976.
- YANG Bi, FAN Zhuguo, LIU Wenlian, et al. Engineering property of Xigeda strata of Panzhihua new steel V-Ti base[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(4): 973–976.
- 张德强, 孙兴伟, 魏尚朝, 等. 金沙江中游龙开口水电站昔格达黏土物理特性研究[J]. 人民长江, 2021, 52(S1): 104–107.
- ZHANG Deqiang, SUN Xingwei, WEI Shangchao, et al. Study on physical properties of Xigeda clay at Longkaikou Hydropower Station in the middle reaches of Jinsha River[J]. Yangtze River, 2021, 52(S1): 104–107.
- 张威, 徐则民, 刘文连, 等. 含水率对西昌昔格达组粘土岩抗剪强度的影响研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(5): 1–5.
- ZHANG Wei, XU Zemin, LIU Wenlian, et al. Study on the influence of water content to shear strength of Xigeda-strata clay rock in Xichang[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(5): 1–5.
- 张文举. 攀西地区昔格达土工程力学特性试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- ZHANG Wenju. Study on engineering dynamic properties of Xigeda soil in Panxi area[D]. Chengdu: Sichuan University, 2003.
- 钟成, 范德平. 川南昔格达岩组工程地质特性研究[J]. 四川水力发电, 2012, 31(01): 97–99.
- ZHONG Cheng, FAN Deping. Study on engineering geological characteristics of Xigeda Formation in south Sichuan[J]. Sichuan Water Power, 2012, 31(01): 97–99.
- 周罕, 曹平, 张科. 昔格达组黏土岩和粉砂岩现场直剪试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3544–3550.
- ZHOU Han, CAO Ping, ZHANG Ke. In-situ direct shear test on Xigeda Formation clay stone and siltstone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(10): 3544–3550.
- 周平, 王志杰, 侯伟名, 等. 昔格达地层隧道局部浸湿失稳特征及突变预测研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 503–512.
- ZHOU Ping, WANG Zhijie, HOU Weiming, et al. Local slaking instability characteristics and catastrophic prediction of deep tunnels in Xigeda strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 503–512.
- 左永振, 张伟, 张晓川, 等. 昔格达组粉砂岩作为筑坝土料的工程特性研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(3): 84–88.

- ZUO Yongzhen, ZHANG Wei, ZHANG Xiaochuan, et al. Engineering properties of Xigeda strata siltstone as the filling material of earth-rock dam[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(3): 84–88.
- Deng Bin, David Chew, Chris Mark, et al. Late Cenozoic drainage reorganization of the paleo-Yangtze river constrained by multiproxy provenance analysis of the Paleo-lake Xigeda[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2020, 133(1-2): 199–211.
- Ding Wenfu, Zhang Guangzhe, Song Zhang. Research on the engineering geological characteristics and engineering countermeasures of Xigeda Strata of Chengdu-Kunming Railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(4): 1–5.
- Du Yuxiang, Sheng Qian, Wang Shuai, et al. Study of microstructure and mechanical properties of semi-diagenetic rock of Xigeda Formation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1247–1269.
- Fu Xiaodong, Du Yuxiang, Sheng Qian, et al. Influences of water on the microstructure and mechanical behavior of the Xigeda Formation[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(01): 72.
- Kong Ping, Granger Darryl E, Wu Fuyuan, et al. Cosmogenic nucleide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: Implications for evolution of the Middle Yangtze River[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 278: 131–141.
- Wu Lizhou, Deng Hui, Huang Runqiu, et al. Evolution of lakes created by landslide dams and the role of dam erosion: A case study of the Jiajun landslide on the Dadu River, China[J]. *Quaternary International*, 2019, 503: 41–50.
- Xue Xinhua, Fan Xu, Jiang Chusheng, et al. Research on the deformation properties of Xigeda Layer high fill embankment[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2018, 35(2): 41–45.
- Yang Zheng, Guo Ning, Zhang Heng. Study on microstructure characteristics of clay rock of Xigeda Formation in Xichang City based on softening test and image recognition[J]. *Hydraulic and Civil Engineering Technology VI*, 2021, 19: 73–78.
- Zhou Ping, Zhou Feicong, Lin Jiayong, et al. Decoupling analysis of interaction between tunnel surrounding rock and support in Xigeda formation strata[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(2): 1–16.