

· 西部陆海新通道——平陆运河工程建设专栏 (11) ·



平陆运河炭质泥岩工程特性及保护处理措施*

万中喜, 梁杨飞

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 炭质泥岩属于一种特殊软岩, 其分布广泛、工程性质差, 对运河工程影响较大; 研究炭质泥岩工程特性和防治规律是当务之急。平陆运河马道枢纽座落在炭质泥岩地基上, 勘察阶段采用钻孔取样、矿物分析、原位剪切试验、室内抗压试验等方法, 施工阶段采用现场观察、地质测绘、地质素描、安全监测等方法, 系统揭示了炭质泥岩工程特性和防治规律。主要研究结论: 炭质泥岩成分以黏土矿物为主, 炭质含量 6%~40%; 炭质泥岩的强度受其埋藏深度、结构构造和地下水环境影响, 差异变化很大, 需采取取样、原位测试、室内试验等勘察方法获得可靠数据; 炭质泥岩在开挖暴露后具有易风化软化特性, 其软化是内外因综合作用的结果, 内因是其黏土矿物成分和水理特性, 外因是开挖卸荷和干湿循环环境; 炭质泥岩地基需预留保护层、严格清基验收, 必要时进行承载力检测和地基处理; 炭质泥岩边坡需在开挖削坡后及时进行封闭, 并根据其分布和影响程度, 采取适宜的加固和排水措施。

关键词: 平陆运河; 炭质泥岩; 工程特性; 炭质泥岩地基; 炭质泥岩边坡

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0001-09

Engineering characteristics and protection treatment measures of carbonaceous mudstone in Pinglu Canal project

WAN Zhongxi, LIANG Yangfei

CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Carbonaceous mudstone belongs to a special type of soft rock, which is widely distributed and has poor engineering properties, and has a significant impact on canal projects. Therefore, it is urgent to study the engineering characteristics and prevention mechanisms of carbonaceous mudstone. The Madao Hub of the Pinglu Canal is located on a carbonaceous mudstone foundation. During the investigation phase, methods such as drilling sampling, mineral analysis, in-situ shear tests, and laboratory compression tests are employed. During the construction phase, techniques including on-site observation, geological mapping, geological sketching, and safety monitoring are utilized to systematically reveal the engineering characteristics and prevention mechanisms of carbonaceous mudstone. The main research conclusion: the composition of carbonaceous mudstone is primarily clay minerals, with a carbonaceous content of 6% to 40%. The strength of carbonaceous mudstone is influenced by its burial depth, structural features and groundwater environment, leading to significant variability. Reliable data must be obtained through investigation methods such as sampling, in-situ testing, and laboratory experiments. Carbonaceous mudstone is prone to weathering and softening after excavation exposure, with softening resulting from a combination of internal and external factors. Internal factors include its clay mineral composition and hydrogeological properties, while external factors involve excavation unloading and wet-dry cycling. For carbonaceous mudstone foundations, a protective layer must be reserved, and strict foundation cleaning and acceptance procedures should be followed. If necessary,

收稿日期: 2024-09-26

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604704); 广西科技重大专项资助项目(桂科 AA23023018)

作者简介: 万中喜(1971—), 男, 注册岩土工程师, 正高级工程师, 从事水运工程岩土勘察工作。

bearing capacity testing and foundation treatment should be conducted. For carbonaceous mudstone slopes, timely sealing should be performed after excavation and slope cutting, and appropriate reinforcement and drainage measures should be implemented based on their distribution and impact extent.

Keywords: Pinglu Canal; carbonaceous mudstone; engineering characteristics; carbonaceous mudstone foundation; carbonaceous mudstone slope

“十四五”以来,中共中央和国务院相继发布《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》,确定“四纵四横两网”国家高等级航道新格局^[1],国家运河建设进入高潮期。运河工程跨度大,其选址选线、投资规模和工程安全与沿线地质条件紧密相关。泥岩作为最为常见的软岩之一,在我国分布极为广泛,是在运河工程建设中无法避免的一种岩土体^[2],而炭质泥岩是一种特殊泥岩,相较于砂质、钙质、铁质、硅质泥岩,其遇水易软化崩解、强度低、变形大的工程性质更显著,对工程危害更大,因此,研究炭质泥岩工程特性及其防治规律,对运河建设是十分必要和迫切的。

近年国内外专家学者对炭质泥岩进行了研究。刘林杰等^[3]以填方边坡为研究对象,对炭质泥岩泡水饱和后的抗剪强度变化规律进行研究;叶朝良等^[4]结合铁路路基工程,研究炭质泥岩浸水前后力学特性的变化;阳个小等^[5]结合高速工程工程,研究炭质泥岩 TOC 含量与强度的关系;曹恒亮等^[6]结合露天矿边坡项目,研究干湿循环作用下炭质泥岩软弱夹层抗剪强度和渗透性的演化规律;Yang 等^[7]基于室内试验,研究干湿循环作用下炭质泥岩强度弱化机理;刘新喜等^[8]结合道路边坡工程,进行了干湿循环作用下炭质泥岩孔隙演化及本构模型研究;米德才等^[9]、韦世贵^[10]和朱卫国等^[11]结合广西航运枢纽工程,对第三系泥岩工程特性和软弱夹层加固处理方案进行了研究。这些文献主要基于路基和边坡工程相关的炭质泥岩环境敏感性研究和少量枢纽工程相关的泥岩工程性质研究,而基于枢纽或运河工程炭质泥岩工程特性方面的研究文献寥寥。

平陆运河是西部陆海新通道的骨干工程,起点为南宁横州市西津库区平塘江口,经钦州灵山县陆屋镇沿钦江进入北部湾,全长 134.2 km。按内河 I 级航道标准建设,可通航 5 000 吨级船舶,依次建设马道、企石和青年 3 个梯级枢纽,各枢纽同步建设双线 5 000 吨级船闸,工程等别均为一等,船闸有效尺度均为 300 m×34 m×8 m(有效长度×有效宽度×最小门槛水深)^[12-14]。其中马道枢纽工程因跨越郁江流域和钦江流域分水岭,地形起伏变化大,岩性以炭质泥岩为主,断层褶皱等地质构造发育。其上下游水头差 29.6 m,船闸结构按 8 度设防,地基应力 1 600 kPa;枢纽基坑深 60 m,面积 14 万 m²,枢纽周边开挖建设 11 段高边坡,边坡高度 32~188 m^[15]。与平陆运河沿线其他枢纽相比,马道枢纽工程规模较大、地质条件较复杂,炭质泥岩相关的工程地质问题较突出。文章基于马道枢纽泥岩地基勘察研究成果和工程建设实践,系统分析炭质泥岩工程地质特性,以及泥岩地基处理和边坡防治成功经验。

1 炭质泥岩工程特性

炭质泥岩即碳质泥岩(carbonaceous mudstone)。泥岩亦称黏土岩,主要由粒径小于 3.9 μm 的细颗粒组成,主要成分为黏土矿物,其次为石英、白云母及少量长石。常见的黏土矿物有高岭石、水云母、蒙脱石等。泥岩中的层理均为水平层理。炭质泥岩指含有碳质成分的泥岩,有机碳含量一般为 6%~40%。因富含碳呈灰黑色,由固结较弱的黏土在地壳运动中经过挤压、脱水、重结晶以及胶结等作用形成,属于软岩的范畴。

马道枢纽场区炭质泥岩为晚古生代地台形沉积岩、中生代陆缘活动带盆地形沉积岩,构造上处于华南板块南华活动带右江褶皱系十万大山断陷(II_2^6)北端。地质构造运动由百越运动时期开始,华力西第一亚构造层(II_1)形成中泥盆统-下二叠统时期的地层单位,属于滨海浅海相-半深海相,碳酸盐含锰硅质岩砂泥岩建造。东吴运动时期发育华力西第二亚构造层(II_2),形成上二叠统时期地层,属于海陆交互相,碎屑岩、硅质岩建造。华力西构造层的二叠系上统第二、三、第四组(P_2^{b+c+d})泥岩、砂岩、砾岩和泥盆系下统钦州群(D_{1qn})泥岩、砂岩组成场区的主要基岩地质层^[16]。

马道枢纽炭质泥岩成分呈现空间不均匀性,据32件钻孔岩样矿物鉴定结果,其中12件泥质占比50%~80%,炭质占比10%~40%,为炭质泥岩,其余为泥质灰岩、砂质泥岩、硅质岩和绢云千枚岩,鉴定为炭质泥岩的样品在空间上呈分散分布,无明显规律性。炭质泥岩层理发育呈0.3~10.0 cm厚薄层状或10.0~50.0 cm厚中层状,总体倾向西南,倾角 $35^\circ \sim 70^\circ$,局部发育褶皱和断裂。枢纽基坑西北侧炭质泥岩照片见图1,呈薄层状、发育褶皱。

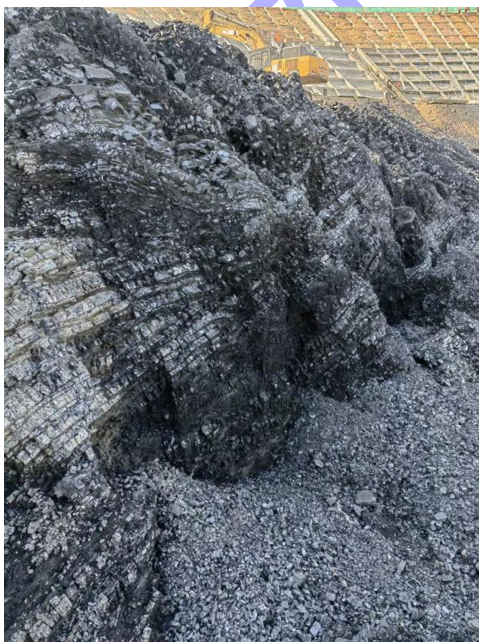


图1 炭质泥岩层理和褶皱

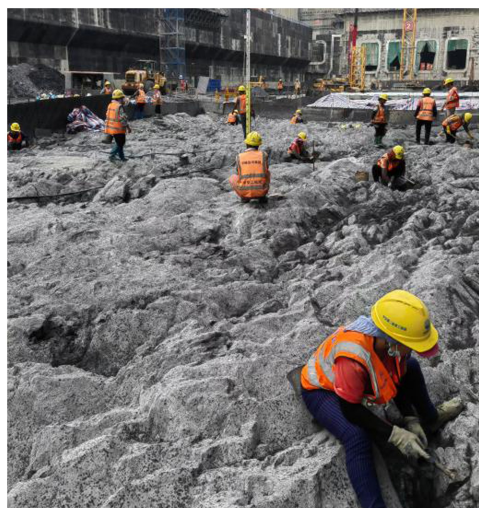
Fig. 1 Bedding and folds in carbonaceous mudstone

2 炭质泥岩强度及影响因素

炭质泥岩强度关联枢纽地基和边坡稳定性。枢纽地基为中风化炭质泥岩,其饱和抗压强度为1.50~52.00 MPa,其强度变化主要与埋深、结构构造有关,中风化岩上部埋深10~30 m,其抗压强度均值11.20 MPa;中风化岩下部埋深30~70 m,其抗压强度均值15.80 MPa。局部岩体呈薄层状、节理裂隙发育,岩体破碎,见图2a),其抗压强度1.50~8.81 MPa,均值5.24 MPa;而呈中层状的岩体,节理裂隙较少,岩体较完整,见图2b),其抗压强度9.10~52.00 MPa,均值22.92 MPa。



a) 薄层破碎炭质泥岩



b) 中厚层炭质泥岩

图2 建基面炭质泥岩

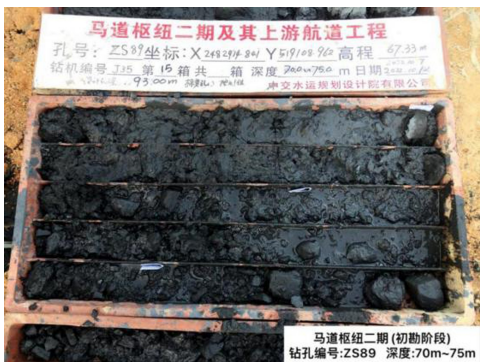
Fig. 2 Carbonaceous mudstone on foundation surface

马道枢纽上游人工边坡稳定控制岩性为全~强风化泥岩和炭质泥岩,炭质泥岩呈薄夹层或透镜体状局部分布,构成影响边坡稳定的软弱层,其抗剪强度是边坡设计的关键。炭质泥岩抗剪强度受埋藏条件、含水状态和构造状态影响较大,Ⅰ号边坡分布的炭质泥岩,其位于坡脚和两山之间低洼冲沟位置,埋深 2~3 m,长期受地下水浸泡,呈灰黑色淤泥质土状,见图 3a),抗剪强度 $f=0.28$ 、 $C=14$ kPa;Ⅱ号边坡分布的炭质泥岩,位于坡腰,埋深 20~30 m,炭质泥岩呈灰黑色软可塑黏性土混砂状,见图 3b),长期处于潮湿状态,其抗剪强度 $f=0.40$ 、 $C=40$ kPa;Ⅴ号边坡分布的炭质泥岩,位于坡腰位置,埋深 3~5 m,处于构造挤压带,岩体破碎,呈灰黑色破碎散体状,见图 3c),长期处于半潮湿状态,其抗剪强度 $f=0.30$ 、 $C=25$ kPa。

综上,炭质泥岩受地质环境和自然环境影响,其强度变化大,需要结合工程实际具体问题具体分析,并采取必要的取样和测试手段,才能获得可靠的强度参数。



a) Ⅰ号边坡冲沟位置



b) Ⅱ号边坡坡腰位置



c) Ⅴ号边坡构造挤压带

图 3 不同位置炭质泥岩

Fig. 3 Carbonaceous mudstone at different locations

3 炭质泥岩风化软化特性

泥岩因含亲水性矿物,具有失水干裂和遇水软化特性^[17-18],因有机炭吸水性,炭质泥岩较普通泥岩更易软化。马道枢纽地基以炭质泥岩为主,在边坡和基坑开挖后发现炭质泥岩软化现象明显,无论强风化炭质泥岩和中风化炭质泥岩均在开挖暴露后发生软化,暴露时间越长,软化程度越严重。

3.1 边坡坡面炭质泥岩软化现象

枢纽周边Ⅴ-2号边坡强风化炭质泥岩和枢纽基坑边坡在开挖暴露后,并在降雨作用下,坡面岩体软化明显。刚开挖揭露的炭质泥岩层理明显,岩屑呈碎石角砾状,开挖暴露并经历降雨后,炭质泥岩层理变得模糊,原强风化炭质泥岩风化软化后呈黏性土混角砾状,原中风化炭质泥岩风化软化后呈碎石角砾混黏性土状,状态差异较大。Ⅴ-2号边坡坡面强风化炭质泥岩软化前后对比状态见图 4,基坑中风化炭质泥岩风化软化前后状态对比见图 5。

观察发现,软化程度、软化深度与炭质泥岩

结构、破碎程度、降雨影响程度以及开挖暴露时间有关。薄层状较中层状更易软化, 层理越薄, 软化越快; 节理裂隙发育的破碎岩体较完整岩体更易软化, 岩体越破碎, 软化越快; 受降雨影响程度明显, 降雨次数和降雨量越大, 软化程度越深; 开挖暴露时间越长, 软化程度越深。



a) 刚开挖未软化



b) 风化软化后

图4 V-2号边坡强风化炭质泥岩风化软化前后状态
Fig. 4 State before and after weathering and softening of strongly weathered carbonaceous mudstone on slope V-2



a) 刚开挖未软化



b) 风化软化后

图5 基坑中风化炭质泥岩风化软化前后状态
Fig. 5 State of moderately weathered carbonaceous mudstone before and after weathering and softening in foundation pit

3.2 软化机理分析

从内外因两个方面分析其软化原因。马道枢纽炭质泥岩矿物成分中, 泥质(黏土矿物)占比50%~80%, 炭质占10%~40%。黏土矿物为小颗粒亲水性矿物, 遇水后颗粒周围水膜增厚导致体

积膨胀,产生楔劈作用,导致裂隙扩展;同时,可溶性胶结物被溶解,颗粒间的胶结减弱,产生溶蚀作用^[17]。因有机炭吸水性强,炭质泥岩较普通泥岩更易软化。

地下水位以下的泥岩一直浸泡在水中却未迅速软化,这主要由于泥岩软化还与外部环境因素有关。原位岩体埋藏于一定深度的岩体环境中,免于日光照射和雨淋,承受三维压力,处于相对稳定的环境中。而开挖后的泥岩处于日光照射和降雨的大气环境中,日光照射下泥岩产生干裂收缩裂缝,降雨时雨水和地表水沿裂缝进入泥岩岩体中,发生楔劈和溶蚀作用,因日光照射和降雨的交替作用,使泥岩处于干、湿循环环境中,加速泥岩软化^[19-20]。同时,开挖后泥岩不再三维受压,产生卸荷裂隙,更利于地表水浸入。因此,泥岩开挖后的卸荷和干湿循环环境是导致泥岩软化的外部环境因素。

综上,炭质泥岩软化是内外因素综合作用的结果,其内因为黏土矿物成分和水理特性,外因为开挖卸荷和干湿循环环境。其软化速度和程度具有一定规律性:按风化程度,全风化泥岩>强风化泥岩>中风化泥岩;按成分,炭质泥岩>泥岩>粉砂质泥岩;按地质年代,第三系泥岩>白垩系泥岩>三叠系泥岩>二叠系泥岩>泥盆系泥岩;按外部环境,雨季>旱季。

4 炭质泥岩地基保护处理措施

马道枢纽水工结构荷载大、结构复杂、设计使用寿命 100 a,对中风化炭质泥岩地基要求很高,而炭质泥岩地基层部分布裂隙密集带、软弱夹层、风化槽等不良地质,局部地段为呈薄层状且岩体破碎,以及具有开挖暴露后风化软化特性,这些均不利于地基稳定。为了克服这些不利地质条件,采取预留地基保护层、清基验收、地基处理和承载力检测 4 项措施,取得了较好的效果。

4.1 地基保护层

马道枢纽地基为中风化炭质泥岩,按照设计要求,枢纽主体基坑需先整体开挖至建基面,而

后分若干个结构块进行基槽验收和打设混凝土垫层,建基面炭质泥岩开挖暴露和打设垫层保护存在几个月的较长时间差,为了避免开挖后的长期暴露而导致的炭质泥岩软化,马道枢纽基坑施工时,在中风化炭质泥岩建基面以上预留了 1.5~2.0 m 保护层,确保在基槽分块验收环节炭质泥岩开挖暴露时间控制在 6 h 以内。

4.2 清基验收、承载力检测和地基处理

炭质泥岩基槽采用严格的清基验收标准和验收程序,炭质泥岩建基面验收标准:无松动岩屑、无软化层、无积水。基槽清理满足标准要求后,由建设、监理、勘察、设计和施工单位代表进行现场检查和确认,通过后方可打设混凝土垫层。若基槽分布软弱夹层、软弱风化槽或裂隙密集带,应加以清除并采取换填素混凝土方式进行处理,对分布较深、难以进行换填处理的软弱夹层、裂隙密集带,进行注浆加固处理。对于薄层状的破碎岩体进行承载力检测,见图 6,必要时进行注浆加固。

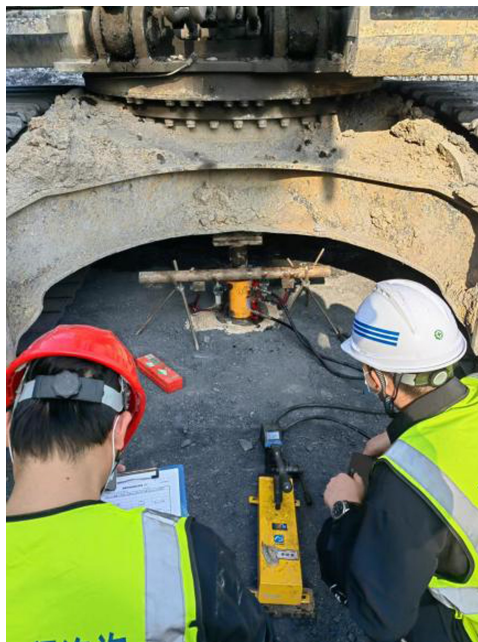


图 6 地基原位载荷板试验

Fig. 6 In-situ plate load test on foundation

5 炭质泥岩边坡保护处理措施

马道枢纽周边永久边坡局部分布的炭质泥岩强度较低,构成影响边坡稳定的软弱夹层。炭质

泥岩自然边坡在开挖前,表面覆盖 2.0~5.0 m 第四系残坡积黏性土层和茂密植被,与外部干湿交替大气环境相对隔离,而在开挖暴露后即处于干湿交替环境中,从而发生崩解软化现象,导致坡体强度降低、甚至边坡失稳。通过采取及时封闭、局部加固和截排水措施,有效克服了炭质泥岩对边坡稳定的不利影响。

5.1 边坡坡面及时封闭

炭质泥岩边坡防护技术主要有两种,一种是喷射混凝土封闭,另一种是植草护坡防护^[21]。业内专家对两种方式存在不同意见,在国家生态文明和绿色护坡理念下,植草护坡占主流。然而,边坡开挖施工发现,植草护坡需要在边坡削坡和格构锚索施工完成后才能实施,自开挖暴露至植草护坡防护需要经历 1~2 个月施工周期,炭质泥岩会长时间暴露在干湿循环环境中;尤其在雨季施工时,炭质泥岩边坡会快速崩解软化并达到一定软化厚度,从而导致边坡失稳。喷射混凝土封闭是在边坡开挖后即可实施的,因此,更适宜炭质泥岩边坡防护。马道枢纽炭质泥岩边坡均采取了喷射混凝土封闭方式,并在封闭的基础上进行了喷播植草,目前一期边坡已建成 2 a,边坡稳定且绿化效果良好,见图 7。



图 7 已建成 2 a 后的一期边坡

Fig. 7 Phase I slope two years after completion

5.2 炭质泥岩边坡加固措施

炭质泥岩强度较低,往往构成影响边坡稳定的软弱夹层,根据其分布、强度和影响程度选用换填、加长加密锚杆锚索,以及抗滑桩的方式进行加固,同时加强排水措施,设置仰斜排水孔,避免地下水的不利影响。已建成 2 a 的一期 I 号边坡对坡脚冲沟分布的炭质泥岩采取清除换填加固

方式,Ⅱ号边坡对坡腰分布的炭质泥岩软弱夹层采取锚拉抗滑桩的加固方式,Ⅲ号和Ⅴ号边坡对坡腰分布的炭质泥岩软弱带采取长锚索+格构梁的加固方式,均取得良好效果。

6 结论

1) 炭质泥岩属于一种特殊软岩,其分布广泛、工程性质差,对运河工程枢纽地基和边坡影响较大。平陆运河马道枢纽座落在炭质泥岩地基上,其对炭质泥岩工程特性调查和工程处理是典型的成功案例。

2) 炭质泥岩成分以黏土矿物为主,炭质含量 6%~40%,具有明显的层理结构,局部发育褶皱和断层。

3) 炭质泥岩的强度受埋藏深度、结构构造和地下水环境影响,差异变化较大,需采取取样、原位测试、室内试验的勘察方法获得可靠数据。

4) 炭质泥岩在开挖暴露后具有易风化软化特性,其软化是内外因综合作用的结果,内因是其黏土矿物成分和水理特性,外因是开挖卸荷和干湿循环环境。

5) 炭质泥岩地基需预留保护层,严格清基验收,必要时进行承载力检测和地基处理。

6) 炭质泥岩边坡需在开挖削坡后及时进行封闭,并根据其分布和影响程度,采取适宜的加固和排水措施。

参考文献:

- [1] 邢佩旭,潘海涛.新时期运河战略及平陆运河规划建设实践[J].水运工程,2024(9):1-6.
XING P X, PAN H T. New era canal strategy and practice of Pinglu Canal planning and construction [J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 1-6.
- [2] 刘杰.矿物组分对泥岩物理力学性质影响研究及工程应用[D].重庆:重庆大学,2022.
LIU J. Effect of mineral composition on physical and mechanical properties of mudstone and its engineering application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [3] 刘林洁,向喜琼,喻兴,等.炭质泥岩抗剪强度的饱水软

- 化特性及工程应用研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(8): 244-247.
- LIU L J, XIANG X Q, YU X, et al. Characteristics of softening shear strength of carbonaceous mudstone and its engineering application [J]. Science technology and engineering, 2017, 17(8): 244-247.
- [4] 叶朝良, 薛飞招, 谢玉芳, 等. 炭质泥岩工程力学特性试验研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(11): 1-6.
- YE C L, XUE F Z, XIE Y F, et al. Experimental research on the engineering mechanical properties of carbon mudstone [J]. Journal of railway engineering society, 2019, 36(11): 1-6.
- [5] 阳个小, 张黎明, 莫鹏, 等. 炭质泥岩风化浸水软化效应试验研究[J]. 西部交通科技, 2021(12): 42-44.
- YANG G X, ZHANG L M, MO P, et al. Experimental study on weathering and water immersion softening effect of carbonaceous mudstone [J]. Western transportation science and technology, 2021(12): 42-44.
- [6] 曹恒亮, 王光进, 李耀基, 等. 干湿循环下炭质泥岩软弱夹层剪切强度及渗透性演化规律研究[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(1): 76-82.
- CAO H L, WANG G J, LI Y J, et al. Study on the evolution law of shear strength and permeability of soft and weak interlayers of carbonaceous mudstone under dry and wet cycles [J]. Industrial minerals & processing, 2024, 53(1): 76-82.
- [7] YANG Y L, ZHANG T, LIU S Y, et al. Mechanical properties and deterioration mechanism of remolded carbonaceous mudstone exposed to wetting-drying cycles[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2022, 55 (6): 3769-3780.
- [8] 刘新喜, 肖俊, 李盛南, 等. 干湿循环作用下炭质泥岩孔隙演化及本构模型研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(3): 51-60.
- LIU X X, XIAO J, LI S N, et al. Study on pore evolution and constitutive model of carbonaceous mudstone under dry-wet cycles [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (natural science), 2024, 21(3): 51-60.
- [9] 米德才, 陈宏明, 罗继勇, 等. 广西航运枢纽工程建设中的极软岩研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 200-205.
- MI D C, CHEN H M, LUO J Y, et al. Treatment of extremely soft mudstone encountered during construction of navigation control junction on Yujiang River, Guangxi [J]. Journal of engineering geology, 2006, 14(2): 200-205.
- [10] 韦世贵. 广西航运枢纽工程新近系泥岩岩土参数取值[J]. 水运工程, 2023(11): 198-203.
- WEI S G. Parameter values of Neogene mudstone rock in Guangxi shipping hub project [J]. Port & waterway engineering, 2023(11): 198-203.
- [11] 朱卫国, 曾尚洁. 鱼梁航运枢纽工程闸坝泥岩基础剪切软弱带加固处理[J]. 水运工程, 2016(8): 145-150.
- ZHU W G, ZENG S J. The reinforcement treatment to shear weakness zone in the mudstone foundation of gate dam in Yuliang navigation junction project [J]. Port & waterway engineering, 2016(8): 145-150.
- [12] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6): 1-11.
- LIU N. Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal Project [J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 1-11.
- [13] 潘海涛, 吴澎, 袁和平, 等. 西部陆海新通道(平陆)运河工程规划设计方案综述[J]. 水运工程, 2024(11): 1-7.
- PAN H T, WU P, YUAN H P, et al. Overview of planning and design scheme for western land-sea new corridor (Pinglu) canal project [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 1-7.
- [14] 中交水运规划设计院有限公司. 平陆运河工程可行性研究报告 [R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Feasibility study report on the Pinglu Canal project [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.
- [15] 中交水运规划设计院有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河马道枢纽及上游航道工程初步设计 [R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design for the Madao Hub and upstream waterway project of the Western Land-Sea Corridor (Pinglu) Canal [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.

- [16] 中交水运规划设计院有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河马道枢纽及上游航道工程(初步设计阶段)岩土工程勘察报告 [R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Geotechnical investigation report for theMadao Hub and upstream waterway project of the Western Land-Sea Corridor (Pinglu) Canal (preliminary design stage) [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.
- [17] 韩文喜, 文静, 严明, 等. 西南某机场三叠系泥岩软化规律研究[J]. 人民长江, 2018, 49(20): 87-94.
- HAN W X, WEN J, YAN M, et al. Softening rule of Triassic mudstone in an airport of southwest China [J]. Yangtze River, 2018, 49(20): 87-94.
- [18] 王振, 沈明荣, 刘昂. 钙质泥岩水岩作用特征及遇水软化机理[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 1061-1066.
- WANG Z, SHEN M R, LIU A. Water-rock interaction characteristics and softening mechanism of calcareous mudstone [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 1061-1066.
- [19] 刘新喜, 肖俊, 李盛南, 等. 干湿循环作用下炭质泥岩孔隙演化及本构模型研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(3): 51-60.
- LIU X X, XIAO J, LI S N, et al. Study on pore evolution and constitutive model of carbonaceous mudstone under dry-wet cycles [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (natural science), 2024, 21(3): 51-60.
- [20] YANG Y L, ZHANG T, LIU S Y, et al. Mechanical properties and deterioration mechanism of remolded carbonaceous mudstone exposed to wetting-drying cycles[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2022, 55(6): 3769-3780.
- [21] 王万昌. 广西炭质泥岩边坡防治技术研究: 以六寨至水任二级公路为例[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- WANG W C. Guangxi charcoal mudstone side slope preventing and controlling engineering research by Liuzhai to Shuiren what the second-class road is an example[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.

(本文编辑 赵娟)

· 消 息 ·

中交集团亮相第十七届国际交通技术与设备展览会

2025 年 7 月 1—3 日, 以“新质生产力 交通新动力”为主题的第十七届国际交通技术与设备展览会在京举办。中交集团副总经理陈重出席交通展开幕式, 陪同交通运输部领导及参展嘉宾参观了中交集团展位, 并介绍了中交集团在智能装备、绿色低碳、数字化施工等领域的实践成果。

本届交通展特别设置“智能综合交通协同发展”“交通数智化转型”“低碳交通与资源循环”“人工智能与安全韧性交通”和“智能化引领交通物流降本提质增效”五大展区。国内外众多知名企业和机构聚焦大数据、云计算、区块链、人工智能等新技术, 全方位展示了无人驾驶、低空经济、交能融合等新兴产业的新产品、新场景、新应用, 集中宣介了多项交通运输科技创新成果应用实践案例。

中交集团展位通过“图文+沙盘+交互式体验”等形式, 展出了哥伦比亚波哥大地铁一号线 BIM 技术实践应用、刚果(布)布拉柴维尔沿河大道斜拉桥模型、上海洋山港自动化码头模型、太湖之星模型、三维激光路面检测车、桥梁智能检测机器人、新型道路养护材料等技术成果, 受到行业专家和主流媒体的重点关注, 迎来观众密集打卡。

https://www.ccccltd.cn/news/gsyw/202507/t20250707_221121.html (2025-07-07)