

砒砂岩遇水失稳对公路影响试验研究

缙振国

(甘肃恒通路桥工程有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要:在甘肃陇东地区G327线镇原至王咀子段部分区段存在典型的砒砂岩-黄土二元地质结构,遇水后会产生失稳变形。为研究该变形对公路的影响,利用室内模型,测量了不同上覆荷载和不同含水率下的砒砂岩位移,并进行了砒砂岩崩解试验。结果发现:砒砂岩在自然状态下强度较高,遇水后变形量逐渐增加,达到一定值后迅速失稳破坏,从而引起上部黄土失稳变形;由此引起的路基变形、路面残留堆积物,对整个公路施工及后期运行均会产生严重影响。因此在此类公路修建过程中,应通过采用封堵顶部黄土层中发育的落水洞、支护黄土-砒砂岩二元结构的坡面并在底部设置截排水沟的工程措施,来防止砒砂岩-黄土二元结构的变形失稳,确保公路安全运行。

关键词:公路工程;黄土;砒砂岩;模型试验;路基变形

中图分类号: U416.1+6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)07-0224-05

0 引言

砒砂岩是一种相对松散的岩层,形成于古生代二叠纪和中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的厚层砂岩、砂页岩和泥质砂岩组成的岩石互层。由于其隶属于陆相碎屑岩系,上覆压力较小,致使其成岩程度低、岩石内部胶结性差、结构强度低^[1]。此类岩层主要分布于黄土高原北部,以鄂尔多斯、陕北和甘肃庆阳部分地区等为主。陇东地区又是黄土集中分布区之一,故形成了独特的黄土-砒砂岩二元结构。该二元结构下部地层为红褐色的砒砂岩,胶结性较差,干燥,较为坚硬;上部为马兰黄土,颜色呈黄褐色,大孔隙和垂直节理较为发育,虫孔和植物根系相对较少,内含少量的钙质结核。

黄土-砒砂岩二元结构的稳定性主要受控于底部砒砂岩的稳定性。砒砂岩稳定时,上部黄土整体较为稳定,在振动和雨水冲刷作用下仅发生小型的崩塌和局部边坡失稳,造成的危害相对较小。但底部砒砂岩遇水失稳后会引发上部黄土整体下沉并向侧向挤出,使旁边的路基产生变形、路面变形直至彻底损毁,危害极大。同时,上部黄土下沉遇水后会产生湿陷变形,饱和黄土变软形成软弱层,加剧道路的损毁程度。

对于砒砂岩的已有研究,主要集中于冻融循环作用和干湿循环作用等对砒砂岩物理力学性质的影

响方面。在冻融循环作用下,砒砂岩重塑样周围压力增大,引起其抗剪强度峰值线性增大;冻融循环次数相同时,含水率较高的砒砂岩黏聚力较小,内摩擦角则出现波动情况,表明冻融作用对砒砂岩黏聚力的影响较为明显,弹性模量在饱和含水率之前基本保持不变^[2]。由于砒砂岩土壤的结构连接和排列方式在冻融过程中被改变,宏观上即表现为砒砂岩物理力学性质的变化^[3-4]。物理力学性质的变化会引起整体变形特征变化,致使工程结构的安全性受到威胁^[5-6]。在多因素耦合作用下,砒砂岩的冻融特性也会发生变化,当其含水率在11%以下时,几乎不发生冻胀,含水率为12%~16%时,冻胀率会随着含水率的增加而增大;干密度增加也会引起其冻胀率增大^[7]。此外,干湿循环作用对于砒砂岩的性质也存在影响,原状砒砂岩试样在干湿循环作用下的收缩变化最大,表明原状样级配良好,颗粒之间存在大孔隙;经过干湿循环后的试样收缩性较小,强度变化较小,表明干湿循环对其强度影响有限^[8]。基于土水特征曲线测试发现,由于砒砂岩具有独特的粒组,其风化物的持水特性较好,可以提高土壤持水能力^[9],但其抗侵蚀性能较差^[10-11],改性后可以提高其力学能力和抗侵蚀特性^[12-14]。

但是,有关砒砂岩在上覆荷载作用下,遇水后的变形及失稳状况鲜有学者进行研究。由于砒砂岩形成时间相对较早,上部均有覆盖层,在上覆压力作用下,砒砂岩遇水后极易变形失稳,其遇水失稳变形的内在机制对于揭示陇东地区黄土-砒砂岩二元结构剖面的稳定性至关重要,对于确保公路的安全运行发挥着举足轻重的作用。因此,砒砂岩遇水失稳变形对

收稿日期: 2022-09-08

作者简介: 缙振国(1977—),男,本科,工程师,主要从事道路施工工作。

公路的影响模式及致灾机制的研究亟待开展。

1 工程概况

拟建项目区域地处内陆,属于半干旱大陆性气候。主要气候特征是:冬季寒冷,夏季酷热;干旱少雨,降水少而集中,蒸发量大,日温差大,多西北风,空气较干燥,春季气温增速多变。年降雨量 400~600 mm,降水在时间上分布极不均匀,降水主要在 6~9 月份,占全年降水量的 70% 以上。多年平均蒸发量 1 083.77~1 497.21 mm,潮湿系数 0.25~0.75,标准冻深 60 cm,7 月最高平均地温 36~38 ℃。该区覆盖层深厚,主要位于塬边沟谷(见图 1)。区内地形支离破碎,沟壑纵横,沟谷交错,水土流失严重,发育有主体走向为东北至东南向主沟道,较大沟道内有常年流水,两侧发育众多次级冲沟。天然沟道密度大,沟谷狭窄,多为“V”型沟谷,沟坡陡峻,常形成黄土陡壁、蝶形洼地、天生桥及黄土柱等特殊地貌景观。地层岩性以第四系黄土为主,厚度多大于 50 m,局部沟谷多切割嵌入至基岩,电字塬沟底可见白垩系砂岩出露。



图 1 塬边地貌特征

白垩系砂岩在研究区分布比较广泛。由于测区大面积被黄土覆盖,因而出露比较有限,仅在河谷谷底两侧或河谷谷底部呈树枝状出露。岩层的胶结物多为泥质,遇水易分解,以孔隙式胶结为主,泥质胶结矿物均有蒙脱石、伊利石及高岭石存在,呈现出黄棕、棕红色粗-细砂岩与紫红色泥岩互层,与下伏地层呈整合接触。岩层上部为马兰黄土,较疏松,无黏性,构成黄土梁、峁的表面,按岩性为浅黄色、灰黄色、灰白色粉砂质黄土,含大量云母片和少量钙质结核层,疏松多孔,透水性强,垂直节理发育。区内全新统地层分布较广泛,包括冲积、洪积、坡积、崩积及风积堆沉积物,除沿茹河及一级较大沟谷中分布的冲积层、洪积层外,其他类型分布十分零星,厚度也小。沿河谷分布的全新统冲积物组成河床、河漫滩及 I

级阶地,在河床内分布较连续,但由于该层厚度相对较薄,在部分沟底或坎边往往基岩出露,分布呈断续零星状。岩性主要为黄土状堆积物,混有砂石、砾石,局部为砾石层,厚度一般为数米至十几米。底部岩层与上部黄土组成了二元结构(见图 2)。开挖后的砭砂岩可发现有明显的互层存在。



图 2 黄土-砭砂岩二元结构

研究区地处祁吕贺兰山字型构造的伊陕盾地西南部与陇西系旋转构造体系的六盘山旋回褶带的复合部位,西邻贺兰山褶皱带。区域二级构造位于鄂尔多斯台地西南部,属中生代内陆拗陷盆地,呈近南北向矩形轮廓。盆地因基底相对稳定,构造活动弱。

2 室内模型试验

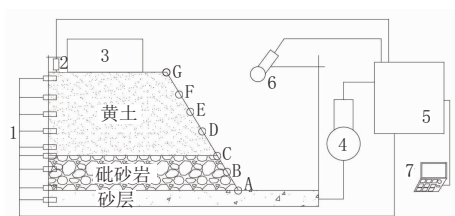
2.1 砭砂岩遇水失稳模型设定

由图 2 可知,黄土-砭砂岩二元结构整合接触,具有明显的分层界面。砭砂岩呈现出典型的红褐色,且有明显的互层情况,上覆黄土在砭砂岩上部沉积,黄土表面风化程度较为严重。现场调查发现,黄土内部接近砭砂岩位置植物根系较少,较为均匀,根孔和虫孔不发育;上部黄土的厚度一般为 12~35 m,砭砂岩一直延伸至其底部。根据土工试验规程^[15]测试可知,黄土的密度、含水率、相对密度、液限、塑限分别为 1.52~1.55 g/cm³、6.52%~7.64%、2.70~2.71、24%~26%、16%~18%;黄土试样的抗剪强度指标黏聚力为 0~50 kPa,内摩擦角为 30°~40°;砭砂岩的含水率为 3.22%~4.05%,胶结状况一般,孔隙较为发育。

2.2 模型试验

黄土-砭砂岩二元结构的稳定性受到底部砭砂岩的影响较大,为模拟砭砂岩遇水失稳后对侧面道路的影响,根据工程项目道路选线设计,设置成边坡模型,道路在边坡一侧,利用底部水位升高的方式模拟降雨及河流水位升高引起的地下水位升高,以及由此引起的砭砂岩失稳过程。模型按照图 3 所示方式进行设置,整个装置密封性通过防水胶进行了预处理,经检测试验中无漏水情况发生。

图中 A、B、C、D、E、F、G 为模型上面参考点,根



1- 含水率测试传感器; 2- 垂向位移传感器; 3- 荷载; 4- 自动控制水泵; 5- 数据采集控制器; 6- 摄像机; 7- 计算机

图3 模型试验装置示意图

据点的变形情况可确定模型各点的位移变化。试验开始前,首先在模型试验槽底部铺设一层砂层,用于补给水,然后将现场采取的砒砂岩和黄土依次削制成模型中设定的尺寸,根据砒砂岩的埋深计算上覆黄土质量,按1:100的比例将上覆荷载施加在黄土上,确保砒砂岩处于有上覆压力受荷状态。在模型箱侧面插入含水率测试传感器,检测传感器工作状态,在模型的临空面设置参照点用于变形分析比对参考点,打开摄像机和自动控制水泵,通过蠕动动力提供水源,模拟地下水位升高过程。A点右侧为道路,测试时观测砒砂岩失稳对道路的影响。试验中砒砂岩需处于加载状态。零荷载情况下,砒砂岩遇水并未产生

破坏,笔者进行砒砂岩崩解试验时发现零荷载情况下砒砂岩较为稳定。

2.3 模型试验结果

试验中,随着自动蠕动水泵出水量的增加,含水率传感器监测到的数据中,从下至上含水率处于持续增大状态,但水并非均匀上升,近模型箱侧壁的位置上升较快,与侧壁表面张力吸附有一定关系。砒砂岩的含水率由3.80%增至20.24%后,蠕动泵供水中含水率数值持续增加,但增幅相对变缓;随着时间的推移,黄土底部的含水率开始变化,逐渐增大,而顶部的含水率传感器尚未采集到数据;8 h后上部黄土层中近顶部的含水率传感器均开始出现数值增加现象,表明水在实际土层中的迁移速率相对较缓慢。

蠕动泵供水过程中,观测点A、B、C、D、E、F、G各个参照点也发生了位移,包括水平位移和垂向位移。其中D、E、F、G点的位移以垂向位移为主,A、B、C点既有水平位移,又有垂向位移。为便于比较分析,假定每个点发生的向下位移为正值,向上位移为负值;水平位移中向临空面前方运动为正值,向含水率传感器方向运动为负值。模型试验结果见图4。

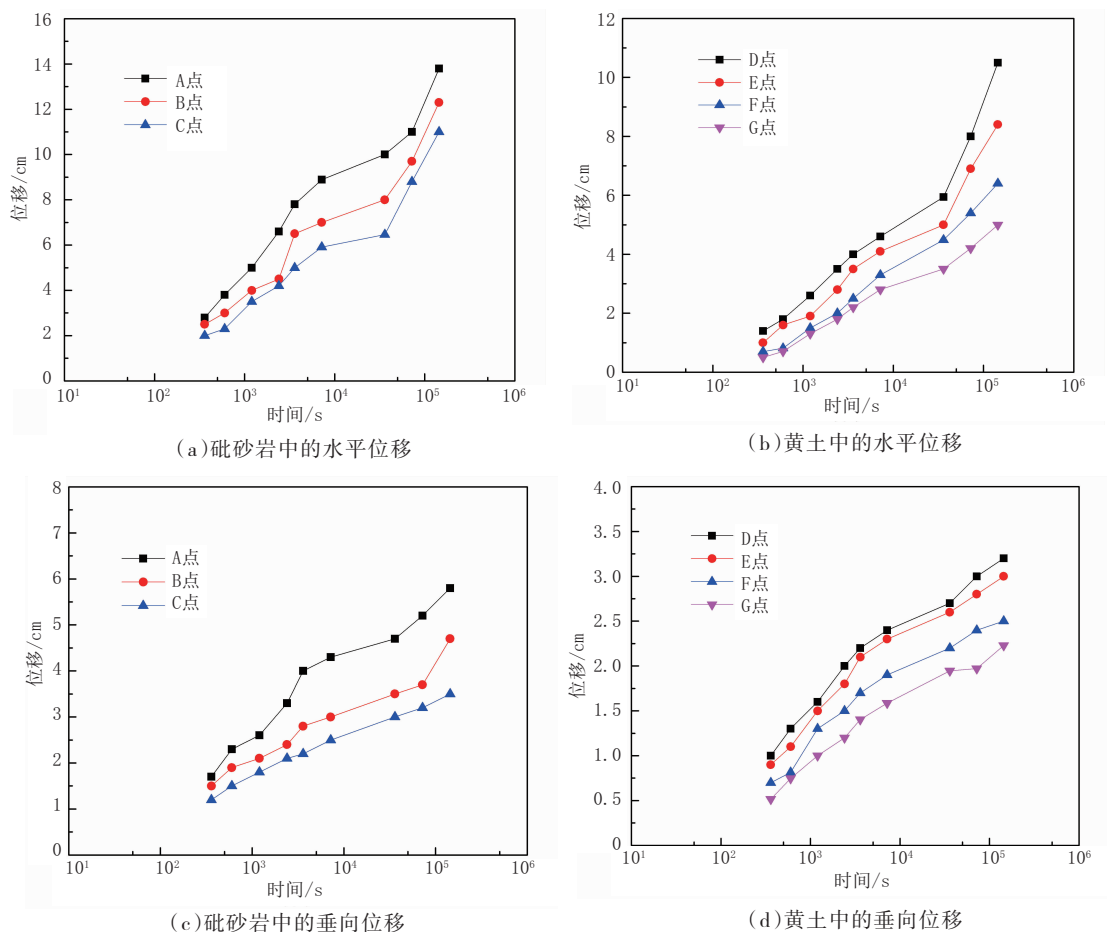


图4 模型试验结果

由图 4 可知,在地下水位升高过程中,底部砒砂岩刚开始处于缓慢变形状态,砒砂岩内部由局部饱和向整体饱和发展,整个模型的垂直方向位移开始持续增加;底部砒砂岩在垂直方向上的位移增加引起其水平位移增大,与砒砂岩遇水后产生的侧向挤出密切相关。含水率增加过程中,底部砒砂岩区的水平位移达到 2.1~13.8 cm,垂直方向位移达到 1.2~5.8 cm;水平位移计算中测量了砒砂岩侧向挤出后扩散的最大边缘位置,故水平位移远大于垂向位移。底部砒砂岩层的遇水失稳引起上部黄土层变形,黄土层水平向变形量最大值达到 10.5 cm,包括黄土遇水软化后产生的侧向挤出和底部失稳引起的滑移。黄土层垂直方向的沉降包括底部砒砂岩失稳引起的垂直下错及黄土遇水湿陷产生的变形。

由此可知,砒砂岩在天然干燥状态下处于稳定状态,遇水后极易产生失稳破坏,失稳破坏后产生侧向挤出,引起上部岩土体发生变形甚至失稳,对临空面前方的道路安全运行构成严重的威胁。故砒砂岩层位置处的排水措施需要处理好,有利于消除该方面的安全隐患。

2.4 崩解试验

为进一步研究砒砂岩的水稳定性,进行了砒砂岩崩解试验。在没有荷载的情况下,砒砂岩试样崩解过程相对缓慢,6 h 后仅有试样的顶部出现脱落现象(见图 5)。



(a)崩解试验前

(b)崩解试验后

图 5 崩解试验

砒砂岩试样刚浸入水中时,产生密集气泡,随着气泡的产生,表面少数砒砂岩以颗粒状崩离块体。随着时间的推移,试样顶部的 4 个边角附近开始产生小的裂缝,裂缝扩大后开裂,整个小块体崩解进入水中。随后进入软化阶段,砒砂岩顶部 4 个棱角缓慢崩解后,试样顶部的 4 条边逐渐开始失稳,最终也以小块体的形式进入水中。试验中发现,零荷载条件下,

砒砂岩崩解速率较慢,且不会发生整个块体失稳现象,但是崩解后的试样表面产生了大量的裂隙和空洞,原因是崩解过程中部分弱胶结物迅速溶于水中,使表面的空洞裸露于外侧。试验后,将崩解后的样品从水中取出时发现样品性质变差,取出过程中不断有小碎块剥离现象产生,力学性质极差。

3 防止砒砂岩遇水失稳的工程措施

砒砂岩遇水后不仅会自身失稳,同时还会引起上覆黄土层产生失稳破坏,诱发诸如崩塌、滑坡等地质灾害,给临空面位置处的公路路基及路面造成较为严重的损害。干燥状态的砒砂岩力学稳定性较好,这就要求工程建设中尽量减少对砒砂岩的扰动,避免让砒砂岩遇水。G327 线镇原至王咀子段项目段现场调查中发现,上覆黄土层中有部分落水洞发育,落水洞深度较大,表面有泛霜现象(见图 6),地表水汇集后容易通过落水洞进入底部砒砂岩层位。因此工程施工中利用改性黄土及混凝土进行了落水洞封堵,以减少地表水的渗漏。同时在削坡后对黄土-砒砂岩二元结构面进行加固和护坡处理,在砒砂岩与路基临近位置做好截排水沟,避免路面积水排向砒砂岩。

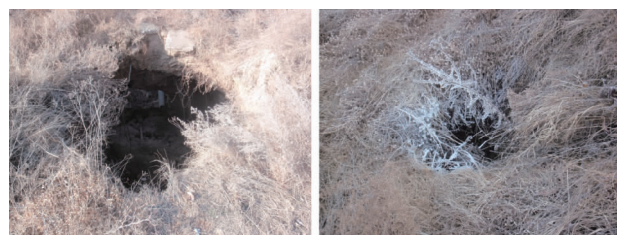


图 6 黄土层中落水洞

通过落水洞封堵、黄土-砒砂岩二元结构临空面支护、底部截排水沟布设的综合措施,可避免砒砂岩与水接触,进而防止砒砂岩遇水失稳。现场工程中已经完成了落水洞封堵和坡面支护,路基修筑后再进行截排水沟统一设置。同时项目组根据实际情况在该段设置了监测站,观测黄土-砒砂岩二元结构坡面路段的气象、路基变形和实际路况等,为公路养护部门提供智能化反馈。

4 结 语

(1)黄土-砒砂岩二元结构的稳定性受控于底部砒砂岩的稳定性。砒砂岩遇水后会产生软化-变形-失稳破坏,引起上覆黄土层失稳,形成崩塌和滑坡等地质灾害,对道路安全运营构成严重威胁。

(2)崩解试验结果表明,砒砂岩在零荷载状态下

相对稳定,结合模型试验可知,在上覆荷载作用下,砒砂岩将迅速产生水平位移和垂直位移,形成失稳破坏。

(3)采用封堵黄土层中发育的落水洞、支护黄土-砒砂岩二元结构的坡面和底部设置截排水沟的工程措施,可避免砒砂岩接触水,减少砒砂岩遇水失稳的可能性,确保公路安全运行。

参考文献:

- [1] 赵羽,金争平,史培军,等.内蒙古土壤侵蚀研究[M].北京:科学出版社,1989.
- [2] 李明玉,李晓丽,陈溯航,等.冻融循环对鄂尔多斯砒砂岩重塑土样力学性能影响[J].排灌机械工程学报,2016,34(10):897-903.
- [3] 赵国际.内蒙古砒砂岩地区水土流失规律研究[J].水土保持研究,2001,8(4):159-161.
- [4] KONRAD J M. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts [J].Cold Regions Science and Technology,1989,16(3):291-303.
- [5] ZHANG S J, LAI Y M, ZHANG X F, et al. Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition [J].Tunnelling and Underground Space Technology,2004,19(3):295-302.
- [6] 马玲,齐吉琳,余帆,等.冻结砂土三轴试验中颗粒破碎研究[J].岩土工程学报,2014,37(3):544-550.
- [7] 刘李杰,白英,李晓丽,等.多因素耦合作用下砒砂岩冻胀性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(11):169-173.
- [8] 郭尚赞,李晓丽,常平,等.鄂尔多斯红色砒砂岩干湿循环作用下力学性能试验研究[J].排灌机械工程学报,2018,36(7):625-631.
- [9] 张磊,齐瑞鹏,张应龙,等.砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响[J].土壤学报,2015,52(1):77-86.
- [10] 叶浩,石建省,李向全,等.砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析[J].地球学报,2006,27(2):145-150.
- [11] 苏涛,张兴昌,赵怀玉.砒砂岩地区坡面径流水动力学特性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(8):203-209.
- [12] 朱彦鹏,马滔,杨校辉,等.基于正交设计的红砂岩改良土抗剪强度试验和回归分析[J].岩土工程学报,2018,40(增刊1):87-92.
- [13] 赵宣,韩霖昌,王欢元.砒砂岩与沙复配土生地、熟地中土壤有机碳及水稳定性团聚体含量的变化特征[J].安徽农业科学,2015,43(11):75-77.
- [14] 张露,韩霖昌,王欢元,等.砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J].中国水土保持科学,2015,13(2):48-53.
- [15] 中华人民共和国水利部. SL237—1999,土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社 1999.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com