

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.18

贵州贵定尖山营特大桥基础异常升降成因探讨

王金淑, 吴光, 赵志明, 饶鸿

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 尖山营特大桥桥墩每年均出现雨季抬升, 旱季沉降的异常现象。本文针对桥墩异常升降问题, 采用野外地质调绘、现场监测、钻探、物探以及室内试验等方法相结合, 分析造成尖山营特大桥墩体异常升降的主要原因。通过现场地质调绘和钻孔岩芯发育情况获取研究区地质构造分布, 分析构造作用对异常升降的影响; 基于天然音频大地电法勘探与对研究区地表水出露情况的勘察, 研究承压水的赋存情况; 将钻孔岩芯进行室内膨胀特性试验, 研究了桥址区地基岩土体的吸水膨胀特性对桥墩升降的潜在作用。结果表明: 排除地质构造和承压水原因, 引起桥墩异常升降的主要原因是膨胀岩土体与地下水物理化学反应带动上部结构抬升及沉降引起的。桥址区二叠系吴家坪组 (P_2w) 地层岩土体的膨胀力试验预估值在 3 ~ 59 MPa 之间, 上部总荷载 1.38 ~ 13.5 MPa, 膨胀力大于上部结构重力荷载; 原状膨胀岩试样在 1.05 MPa 的轴压作用下吸水, 存在 0.35% 的膨胀应变, 结合已有研究可确定 130 m 厚的膨胀性地层可造成上部结构抬升 45.5 mm。二叠系吴家坪组 (P_2w) 地层的吸水膨胀、失水收缩性能, 与地下水的补给与排泄相结合, 是引发桥墩异常升降的主要原因。

关键词: 异常升降; 现场监测; 天然音频大地电法勘探; 膨胀岩; 桩

中图分类号: TU433; TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0134-08

A study of the reasons of abnormal lifting characteristics of foundation near the Jianshanying Large Bridge in Guiding county of Guizhou Province

WANG Jinshu, WU Guang, ZHAO Zhiming, RAO Hong

(School of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: Jianshanying bridge is a control station on the newly-built high-speed railway line from Guiyang to Guangzhou. This paper combined the methods of field geological survey, field monitoring, drilling, geophysical exploration and laboratory test to analyze the main reasons for the abnormal lifting of the great bridge piers. The geological structure distribution in the study area was obtained by geological mapping and drilling core development. The developmental state of groundwater in the bridge site is deduced from the survey of surface water and audio magnetotelluric exploration (AMT). Indoor expansion tests of drill core were carried out to study the water-absorbing expansion characteristics of the foundation rock soil in the bridge site area. The results show that excluding the reasons of geological structure and groundwater in the confined aquifer, the superstructure rises and falls due to the physical and chemical reaction between expansive rock mass and groundwater. The Permian Wujiaping formation (P_2w) in the bridge site area has the potential swelling force estimated to be between 3 MPa and 59 MPa, which is much greater than the structural loads (ranging from 1.38 MPa to 13.5 MPa). Under the action of axial pressure of 1.05 MPa, the undisturbed

收稿日期: 2018-12-07; 修订日期: 2019-02-21

基金项目: 西南交通大学“新建铁路贵阳至南宁客运专线尖山营特大桥墩位异常升降专题研究”项目(勘-16-贵南-31(061))

第一作者: 王金淑(1990-), 女, 博士研究生, 主要从事工程地质和特殊岩土体工程研究。E-mail: jinshuwang@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 吴光(1958-), 男, 教授, 主要从事铁路工程地质选线及工程岩土体稳定性研究。E-mail: 962444613@qq.com

expansive rock sample absorbs water and has an expansion strain of 0.35%. Combined with the existing studies, it is found that the expansion formation 130 m thick can cause the uplift of the superstructure of 45.5 mm. Therefore, the Permian Wujiaping formation (P_2w) is mainly responsible for the abnormal rise and fall of the bridge piers due to its water absorption expansion and water loss shrinkage, combined with groundwater recharge and discharge.

Keywords: abnormal lifting; field monitoring; AMT; swelling rock; pile

山区高速铁路的工程问题主要是地基变形不能满足铁路正常运营要求而产生的安全隐患。尖山营特大桥作为新建贵阳至广州高速铁路线上的一个控制性工点,2008年10月开工建设,2012年8月17日完成桥梁基础及桥墩施工,2014年12月正式通车。自2010年9月,对桥墩台进行沉降观测,结果显示桥墩存在较大的异常升降。通过两年的测量观察发现,大桥墩体在雨季段抬升,且各桥墩抬升量存在较大差异;在少雨或无雨时,桥墩存在差异性沉降。该异常升降现象直接造成铁路减速通过,影响了铁路的正常运营。

岩土体的胀缩作用^[1]是引起上部结构异常升降的一个主要原因。El-Garhy 等^[2]用有限元法模拟膨胀土中筏基基础的动力响应,结果与现场工程测量结果基本一致,证实了膨胀土遇水的动力效应。范臻辉^[3]应用桩-膨胀土相互作用的室内物理模型试验验证了膨胀土吸水抬升摩擦桩的现象,深化膨胀土的本构模型理论研究。Alonso 等^[4]研究了某高速铁路大桥完工后桥基产生的持续异常起伏,分析发现起伏原因是桩底部一定深度处发育的硬石膏层遇水产生了水化反应,石膏晶体生长引起的桥墩起伏。此外,岩体中富存的黄铁矿和白铁矿的氧化反应产生硫酸盐造成膨胀,而硫酸盐会与岩体中的方解石和水发生化学反应产生二次膨胀^[5]。Gennaro 等^[6]结合野外调查、伸长计监测及地基含水率监测数据分析了膨胀岩体中群桩产生 58 mm 起伏运动的成因,并认为在较大的上部荷载作用下,风化黏土的膨胀潜力仍可导致地基的向上运动。针对膨胀土地基中桩土相互作用,有学者^[7]通过理论推导与数值模拟相结合验证桩体在膨胀土地基的异常升降情况,与物理模型试验结果相吻合。

工程中对于地基或桥墩的异常升降研究中以地基的差异沉降或地下水过度开采引起的地面沉降^[8-10]为主,而对于基础整体性的升降现象研究则比较少见。本文针对大桥墩(台)的异常升降现象,分析造成此现象的可能成因。针对造成异常升降的可能成因进行逐一排查。通过现场桥墩和地下水位监测以及天然音频大地电法勘探、钻孔揭露等方法,获得桥墩(台)的起

伏规律、区域地质构造以及地下水的发育情况,分析地质构造、承压水是否是造成异常升降的主要原因;结合室内对原状和压实地基土体的膨胀性试验,探究地基岩土体的膨胀特性能否造成桥墩体异常升降,综合探究桥墩(台)异常升降的主要成因。

1 桥址区域工程地质背景

尖山营特大桥位于黔南布依族苗族自治州贵定县境内,跨越两条县道及一条常年有水河沟。在地貌形态上桥位横跨平缓开阔的溶蚀谷地,属于岩溶谷地地貌。

桥址区褶皱断裂发育,褶皱以近 SN 向向斜为主,断层以 NE-SW 和 NW-SE 向 2 组共轭扭性断裂以及在向斜挤压断裂带中走向南北的逆冲断裂带为主。如图 1 所示,昌明向斜是南北向川黔经向构造体系^[11-12]内的一条紧密状向斜构造。根据现场调绘,区域性虎场正断层过桥址,断层破碎带及影响带宽 100 ~ 300 m。向斜轴向与线路方向的夹角约 70°,延伸长度大于 50 km。据区域地质资料^[13-14]及地震安全性评估结论,该断层不具活动性。

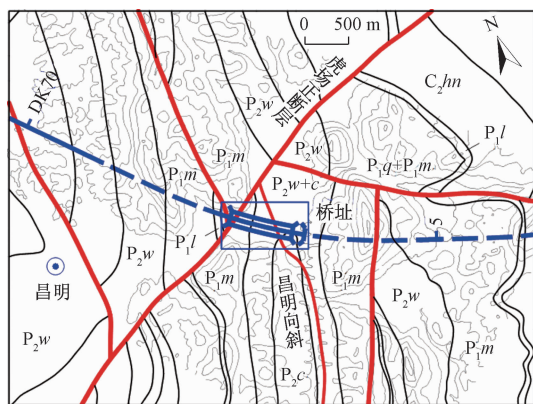


图1 尖山营特大桥区域工程地质平面图

Fig.1 Engineering geological map near the Jianshanying Bridge

研究区上覆地层为第四纪全新统冲洪积黏土和卵石土,下伏地层主要由二叠系下统茅口组(P_1m)的白云质灰岩、硅质岩以及吴家坪组(P_1w)的硅质岩、炭质页岩及泥

岩偶夹煤层的复杂岩层组成。硅质岩为火山成因,并伴有生物作用^[15]与海相石煤及多层火山黏土岩共生。有研究表明^[16],硅质岩具有硅碱活性,即遇水膨胀特性,说明吴家坪组地层很可能具备一定的膨胀潜势。

2 研究方法与内容

2.1 现场调绘及钻探

在桥址右侧 200 m 位置处出露灰白色岩层,质软有滑腻感,室内试验依据《土工试验标准》规范所得的自由膨胀率为 82,具备较高的膨胀性。

吴家坪组页岩、泥岩夹硅质岩、灰岩的组合岩层有明显的层理构造,由于研究区构造作用强烈,次级背斜褶皱发育;硅质岩和页岩、泥岩的强度不同,差异风化现象严重。虎场正断层经过桥址区的贵阳端(图 1),在 0#桥台附近的钻孔岩芯揭示出断层破碎带的压碎灰岩角砾,证实了断层构造的存在。18#与 19#桥墩中

间(钻孔位置如图 6 所示)的 KY-6 号科研钻孔,揭示出 35~70 m 之间被压裂的灰岩,说明在 18#桥墩位置也存在断层。

将区域地质构造及科研钻孔、水位观测孔、桥墩勘探孔等资料相结合绘制出大桥沿线工程地质剖面图(图 2),在 0#到 4#桥墩(台)区域地层主要是二叠系下统(P_1m)白云质灰岩偶夹页岩、硅质岩,同时处于虎场正断层影响带。5#桥墩以后上部卵石层较发育,下伏二叠系吴家坪组硅质岩、炭质页岩及泥岩偶夹煤层的岩层组合;在 18#桥墩位置处发育断层,考虑是虎场断层产生时的共轭扭性断裂构造^[9]。结合钻孔资料,断层面上盘稳定灰岩层埋深较浅,考虑为上盘向上运动,部分吴家坪组地层遭到风化剥蚀。18#~22#桥台区域主要发育地层:上部为二叠系上统长兴组硅质岩、灰岩与砂质页岩互层;下部为吴家坪组地层。根据现场调绘出露岩层的产状,确定桥址右侧为向斜核部位置。

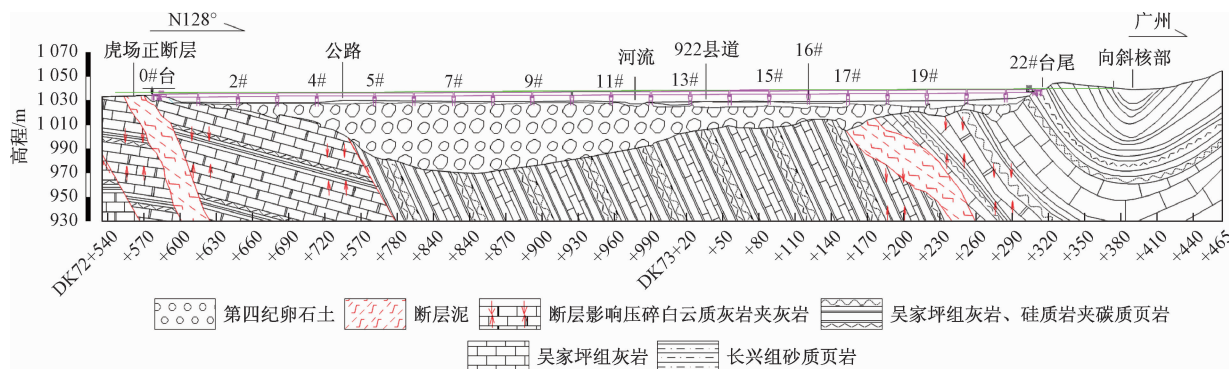


图 2 尖山营特大桥沿线工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile along the Jianshanying Bridge

2.2 沉降和水位监测

为了切实掌握尖山营特大桥的基础升降情况和分布特征,本研究对大桥的各个桥墩(台)升降情况展开原位水准测量工作。观测点分别布置在每个桥墩(台)对应位置及两桥墩(台)之间,且左右对称,工作基点与水准点共 140 个。以 2012 年 10 月 24 日作为初始监测时间,设定初始时刻各个桥墩(台)的竖向位移为 0,每隔 3~7 d 测试 1 次数据。2013 年 4 月、5 月和 6 月份每个桥墩(台)的相对位移如图 3 所示,正值表示相对沉降,负值表示相对抬升。从 2012 年 10 月到 2013 年 4 月所有桥墩都产生不同程度的沉降,4—5 月期间,各桥墩出现了迅速异常抬升现象。5—6 月基本稳定,14#~22#桥墩(台)依然存在部分抬升现象,表明桥墩的抬升主要发生在 4—5 月份期间。4—6 月份的净抬升量如图 4 所示,0#~4#桥墩台的净抬升量

在 5 mm 内,5#~22#桥墩(台)的净抬升量超过 15 mm,尤其 16#桥墩高达 28 mm。

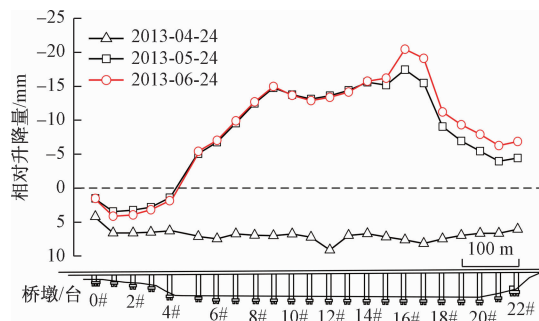


图 3 2013 年 4—6 月份各桥墩(台)相对升降量
(初始监测时间 2012 年 10 月 24 日)

Fig. 3 Relative heave and settlement of each pier (platform) in April, May and June in 2013
(Initial reading began in October, 2012)

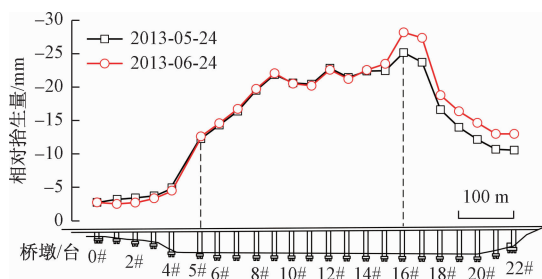


图 4 2013 年 5—6 月份各桥墩(台)相对 4 月份的净抬升量
Fig.4 Net growth of each pier (platform) in May and June, 2013 relative to that in April, 2013

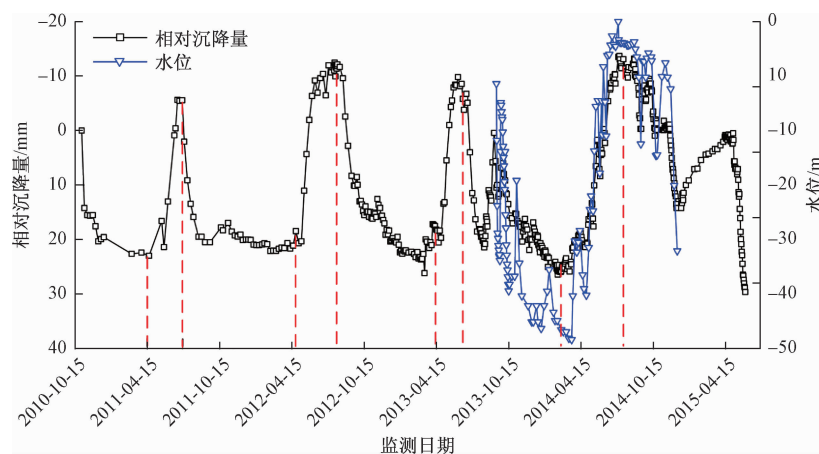


图 5 16#桥墩升降和桥址区水位监测数据图
Fig.5 No. 16 bridge pier elevation and water level monitoring data

水位观测孔深为 90.1 m(图 6),通过对桥址区地下水位为期一年半的记录,地下水位与桥墩沉降数据对比发现,桥墩的起伏规律与地下潜水位变化基本一致。从变化幅度上来看,水位变化较桥墩略提前一些,表明桥墩的起伏很可能是地下潜水位的变化诱发的。

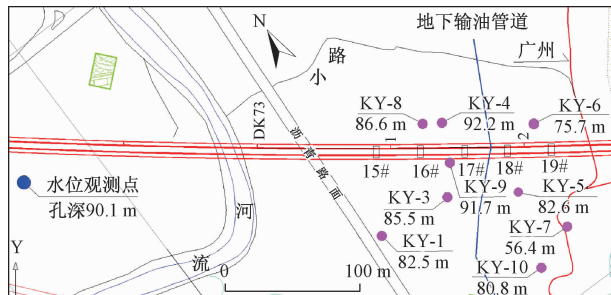


图 6 水位观测点及钻孔、桥墩相对位置平面图
Fig.6 Location of the water level observation point and relative position of borehole and pier

2.3 音频大地电磁勘探

前述水位监测研究对象是地下潜水位,而对于桥

取 16#桥墩自 2010 年 10 月—2015 年 6 月的升降监测数据以及对桥址区地下潜水位变化进行监测的数据(图 5),研究墩体的升降与地下水动态之间的关系,正值代表较初始值沉降,负值代表高出初始监测时的位移量。由图 5 可知,桥墩的升降特征存在周期性变化,每年 4—7 月出现异常抬升,8 月之后又异常沉降,升降总量基本在 40 mm 以内。同时,经过监测对比发现,桥墩沉降变化与周边地表、基岩标沉降变化一致,表明桥墩沉降从深层到浅层均呈现一致性沉降变化,沉降变化不只是发生在地表浅层,而是从基岩面就已经发生,即桥墩的沉降变化是属于区域性整体性的升降。

区深部地层及地下水的富存情况还需要进一步的研究。本文采用 EH-4 电磁测量系统进行天然音频大地电磁法(AMT)勘探,对尖山营特大桥进行物理勘探。依据《大地电磁测法技术规程(DZ/T0173-1997)》^[17]进行测量。如图 7 左上图所示,布设 2 条物探测线,即在线路左侧 5.6 m 沿线方向 WT-1 纵测线和与线路大角度相交并沿着沟谷地形的横测线 WT-2,测点点距均为 20 m,大地点磁勘探点共 115 个,物探结果如图 7 所示。

在图 7 右上图中,里程(DK72)+600 处测线断面图有明显的高低阻分界线,在分界线附近等值线变化剧烈,呈现近直立向下的走势,结合区域构造地质资料,推断此处为断层;在+1 000 m 历程位置电阻率极低,原因是此处常年有水河流经过。根据电阻率断面和钻孔资料综合分析,电阻率值从地表向深部逐渐变高,上部低阻区对应地表第四纪覆盖黏土、断层角砾、页岩、硅质岩夹炭质页岩等地层岩性;中下部中阻—高阻区域对应灰岩偶夹硅质岩等地层岩性。在地下

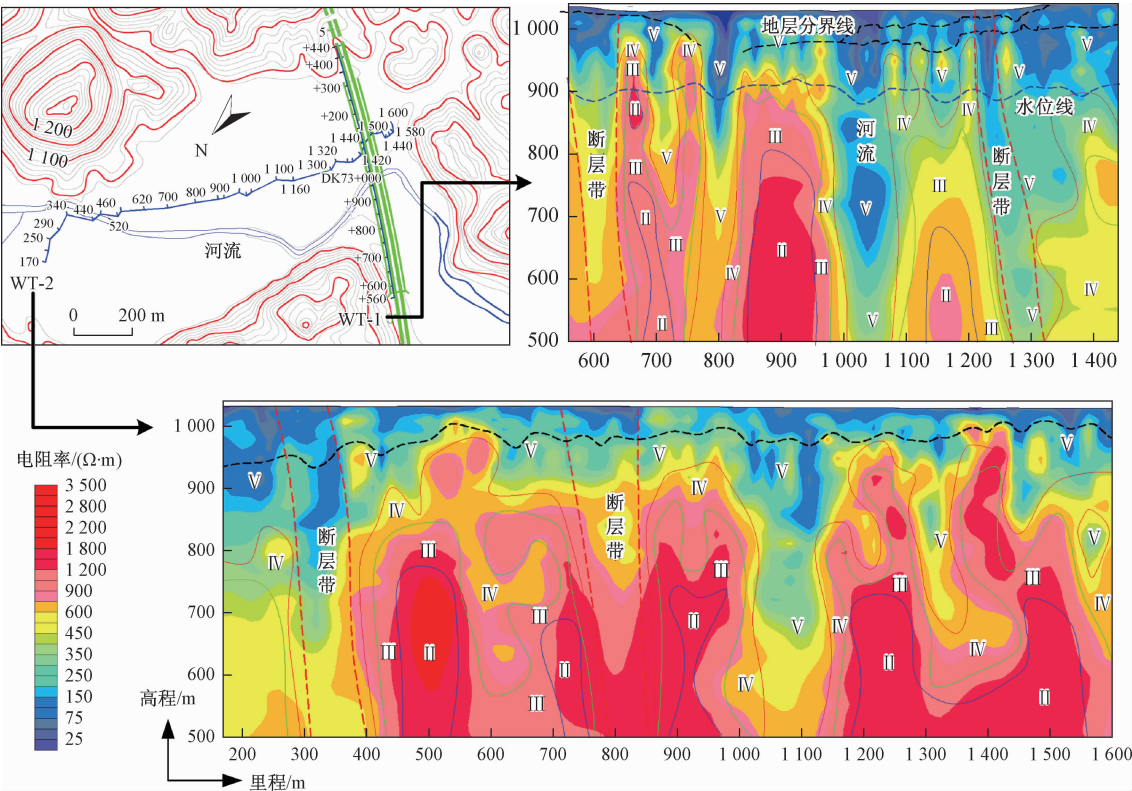


图7 天然音频大地电磁法 (AMT) 物探结果

Fig.7 Test results of AMT

900 m 高程位置出现 1 个基本稳定的高低阻分界线,推测为地下水的底界面,从 900 m 向上中阻(相对低阻)区为地下水赋存位置。小于 900 m 高程的地下层中未发现稳定的低阻区,推断无连续承压含水层位。另外,该区地处断层褶皱共生地带,深部地层中与潜水贯通的基岩裂隙水较发育。地下水受降水与地表沟水补给,通过孔隙、岩溶裂隙径流。结合钻孔资料,岩体破碎软弱,且在钻孔取芯过程中未见持续上升水位现象。同时,野外调查发现的岩溶泉水,均属于下降泉。综上所述,研究区无承压水富存,因此承压水影响不到桥基础的升降。

2.4 室内试验

2.4.1 自由膨胀率

为了探究桥址区不同深处地层岩土体的膨胀特性,对野外 16#桥墩附近进行钻孔取样,钻孔取样点位置如图 6 所示。选取每个钻孔岩芯不同深度进行自由膨胀率试验,共完成了 115 个试验工作,试验结果如图 8 所示,不同深度的岩土体自由膨胀率分布比较离散。

每个钻孔中自由膨胀率取值最大及其对应深度统计如表 1 所示,最大值为 80,位于 KY-8 号钻孔的 41 ~ 45 m 深度处。

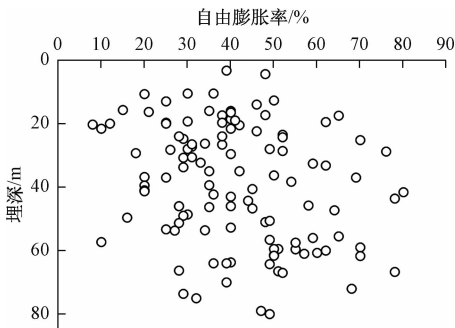


图8 不同深度处岩体的自由膨胀率

Fig.8 Free expansion rate of rock mass at different depths

表 1 各孔最大自由膨胀率汇总表

Table 1 Summary of the maximum free expansion rate of each hole

钻孔编号	最大自由膨胀率/%	埋深/m
KY-1	62	60.0
KY-3	40	21.6
KY-4	78	43.6
KY-5	78	66.7
KY-6	48	4.4
KY-7	42	35.0
KY-8	80	41.6
KY-9	65	17.5
KY-10	70	25.2

数据分析可知,测区岩体的自由膨胀率呈正态分布(图 9),概率最大的自由膨胀率为 42。工程中保守起见,根据现有关于膨胀岩膨胀程度研究^[18-19],桥址区岩体属于强膨胀性软岩。

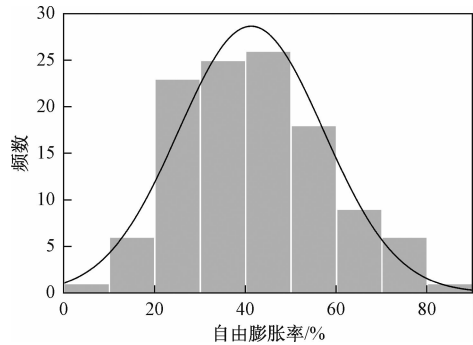


图 9 自由膨胀率统计分布直方图
Fig. 9 Statistical distribution histogram of free expansion rate

2.4.2 有荷载变形试验

选取较完整的钻孔岩芯,在机床上获得直径 5.2 cm、高 6.178 cm 的标准试样(图 10),在自行研制的 PZY-1 型膨胀仪^[20]上进行有荷载试验。试样围压由周围水压力提供,水不仅提供了围压,而且可允许岩体吸收;试样轴向压力由气压作用在活塞上,传递给试样而实现。试样在围压和轴向压力共同作用下吸水膨胀(图 11),推动顶部活塞运动,活塞的上升量即试样的轴向膨胀量,活塞运动由千分表示数表征。

先对有试样的装置在一定轴压下抽真空 17 h 之后,再施加轴压和围压到一定值(图 11),原状岩芯试样受到轴向压应力为 1.05 MPa,径向围压 0.375 MPa。其膨胀应变随着试样吸水逐渐增大。10 h 时出现 1 个应变趋于稳定的平台,这可能与膨胀土体的吸水膨胀机理有关。此后再次呈现增大情况,最终 50 h 后基本趋于稳定,试验最终的膨胀应变达到 0.35%。这说明原状岩层具有膨胀性。

2.4.3 平衡膨胀力试验

选取扰动的膨胀岩体,配置含水率分别 3.14%, 5.10%, 13.0%, 19.2% 及 25.1% 的 5 组土体,分别制取 $\phi 61.8$ mm、高 20 mm 的标准试样,每组含水率包含至少 9 个干密度为 1.3 ~ 1.75 g/cm³ 的标准试样。在常规固结仪上进行平衡膨胀力试验,限制试样遇水后的体积膨胀,获得了不同含水率、不同干密度条件下对应的平衡膨胀力(图 12)。膨胀力与试样的干密度呈指数函数关系,拟合函数如下:

$$P_e = a \cdot \exp^{(b \cdot \rho_d)}$$
 (1)

式中: P_e ——膨胀力;

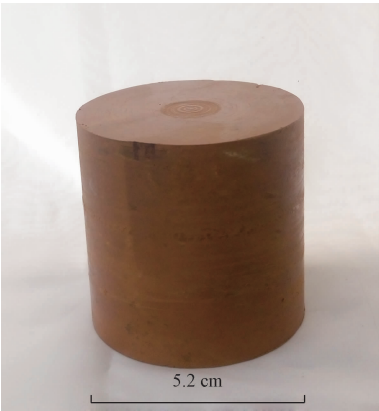


图 10 原状钻孔岩芯的标准试样
Fig. 10 Standard sample of the undisturbed core

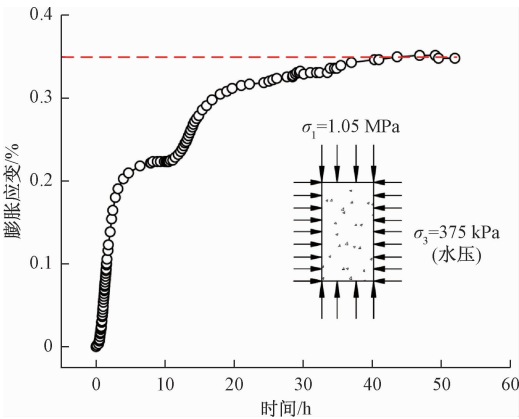


图 11 原状试样的膨胀应变-时间关系曲线
Fig. 11 Change in the expansion strain with time

ρ_d ——试样的干密度;
 a, b ——拟合参数,与初始含水率有关。

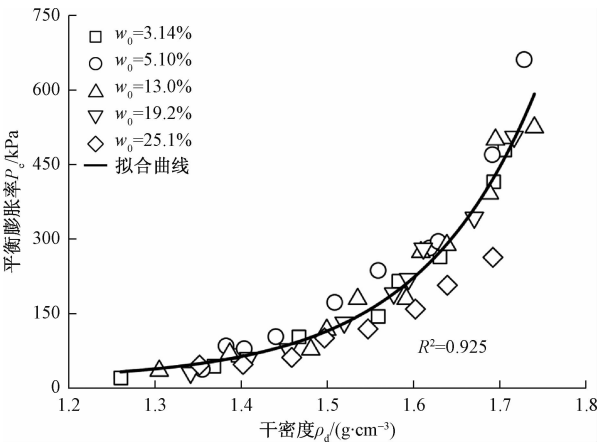


图 12 平衡膨胀力与含水率、干密度关系
Fig. 12 Relationship between the equilibrium expansion force and dry density with different moisture contents

不同初始含水率的拟合参数列于表 2 中。室内试

验获得原状岩石的干密度为 2.15 g/cm^3 , 则依据现有试验规律, 预测当干密度为 2.15 g/cm^3 时, 对应不同初始含水率的平衡膨胀力如表 2 所示, 初始含水率最大时 (25.1%), 膨胀力预估值最小, 依然可达到 3.39 MPa。膨胀力预测值在 3 ~ 59 MPa 之间, 根据设计资料, 上部结构荷载在 1.38 ~ 13.5 MPa 之间。岩体的膨胀力大于上部结构的重力载荷, 地基岩土体的膨胀特性能够使上部结构产生差异抬升现象。

表 2 拟合参数及岩体膨胀力预测汇总表

Table 2 Summary of the fitting parameters and the prediction of rock expansion force

$w_0/\%$	a	b	R^2	岩石干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	预测 膨胀力/MPa
3.14	0.001 48	7.41	0.99	2.15	12.27
5.10	0.001 05	7.68	0.983	2.15	15.55
13.00	0.012 21	6.25	0.987	2.15	8.37
19.20	2.51E-06	11.11	0.977	2.15	59.50
25.10	0.022 45	5.55	0.987	2.15	3.39
平均	0.001 7	7.32	0.925	2.15	11.55

3 研究结果与分析

根据桥墩(台)的监测数据和水位监测结果, 对比发现桥墩的异常升降与地下水位的变化一致。尖山营特大桥异常升降具有雨季异常抬升、旱季沉降的规律, 说明桥墩基础的异常升降与地下潜水位变化存在直接关系。

通过现有桥址区区域地质构造资料, 判断构造作用是否影响桥墩(台)的异常升降。调查发现桥址区位于扬子地台, 构造活动较为稳定, 不符合每年多雨季抬升、无雨季节桥墩(台)沉降的规律性活动。因此排除地质构造引发异常升降的这一因素。

根据天然音频大地电磁法勘探及钻孔过程中地下水的活动情况, 判断测区是否有承压水, 及多雨时承压水获得补给引起桥墩的抬升这一推测的正确性。结果表明, 研究区内岩性破碎, 岩溶发育。地处断层褶皱共生地带, 深部地层中与潜水贯通的基岩裂隙水较发育, 未发现深部稳定承压水层。故对于承压水在多雨季节获得补给而使得桥墩及区域地层抬升的推测并不成立。

对桥址区地下岩土体进行相关膨胀性试验, 判断地基岩土体的膨胀特性是否是引发桥墩(台)升降的主要原因。结果发现 KY-8 孔的地下 41 ~ 45 m 深度处, 自由膨胀率达 80%, 属于中等—强膨胀土, 强膨胀性软岩类别。

采取原状膨胀岩土样在 1.05 MPa 的轴压作用下吸水, 仍然存在 0.35% 的膨胀应变。按照这一膨胀应变来看, 假设稳定水位以上的岩层 (130 m 左右) 均具有此膨胀应变, 且保守估计呈线性^[21]变化, 则抬升量将达到 45.5 mm, 存在造成桥墩最大 38 mm 抬升量的可能性。

基于不同初始含水率、干密度的压实膨胀土的平衡膨胀性试验规律, 预测地基岩土体的膨胀力。结果发现膨胀力估计值在 3 ~ 59 MPa 之间, 上部总荷载 1.38 ~ 13.5 MPa, 向上的膨胀力大于上部结构重力载荷, 说明膨胀岩的吸水膨胀作用造成桥墩抬升的可能性是存在的。

从岩土体膨胀角度分析桥墩(台)的升降异常问题。结合各桥墩(台)的监测数据(图 4)和沿线地层剖面图(图 2), 对比得出, 桥墩在 0# ~ 4#桥墩(台)升降作用不明显, 主要原因是下伏白云质灰岩偶夹膨胀性硅质岩地层, 同时处在断层的影响范围内, 岩石膨胀潜势较小; 5#桥墩较 4#有明显抬升, 主要是从 5#桥墩开始, 下伏吴家坪组膨胀性岩层发育; 而 5# ~ 17#桥墩产生差异性升降现象, 这主要受上覆卵石层厚度不同影响, 在不同的上部荷载作用下, 膨胀变形量不同。卵石层越厚, 作用在下伏岩体上的荷载越大, 膨胀岩吸水造成的膨胀变形也越小。在 16#桥墩的上部荷载最小, 膨胀岩层最厚, 因此产生最大的升降量。监测数据表明 18#桥墩位置升降量明显减小, 这主要由于此处断层发育, 岩土体受到扰动, 膨胀变形部分释放, 地表测量表现为变形量较小的缘故。同理, 18#之后各桥墩(台)的升降受到不同程度的影响。

综上分析, 从膨胀岩和断层构造影响的角度解释桥墩(台)的异常抬升和差异性升降问题是合理的。膨胀岩是基础, 潜水位升高是条件, 二者结合使岩土体吸水膨胀至饱和、过饱和, 从而造成上部结构的异常抬升, 反之, 岩土体失水收缩引发桥墩的异常沉降问题。因此, 推测桥墩(台)的异常升降的主要因素考虑由地下二叠系吴家坪组、长兴组地层的吸水膨胀引起。

4 结论与建议

(1) 桥墩基础的异常升降与地下潜水位变化存在直接关系。

(2) 膨胀岩体地层分界造成 5#桥墩升降量较 4#剧增; 发育的断层使得 17#桥墩升降量较 16#减小。膨胀岩土体和断层构造解释了桥墩墩体的差异沉降现象。

(3)现场调绘及物探结果表明研究区区域构造活动稳定,且测区内无稳定承压水层,排除了其造成桥墩异常升降的可能原因。

(4)室内关于原状膨胀岩体和压实扰动土的膨胀性试验表明,吴家坪组地层具有较强的吸水膨胀特性,且存在使得上部结构抬升38 mm的可能性。

综上所述,引起桥墩异常升降的原因是膨胀岩与地下水物理化学反应带动上部结构抬升和沉降引起的。对于膨胀岩的胀缩特性引起基础异常升降的定量分析及膨胀岩土地基与桥墩体的升降相互作用机理还有待深入研究。这一工程案例可为后续类似工程提供一定参考。

致谢:感谢中国中铁二院工程集团有限公司提供资金及技术支持。

参考文献:

- [1] 石庆华. 试论膨胀土的地基效应[J]. 工程勘察, 1983(5): 16 - 19. [SHI Q H. Study on the foundation effect of expansive soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1983(5): 16 - 19. (in Chinese)]
- [2] EL-GARHY B M, WRAY W K, YOUSSEF A A. Using soil diffusion to design raft foundation on expansive soils [C]//Geotechnical Special Publication, 2000, 99: 586 - 601.
- [3] 范臻辉. 膨胀土地基胀缩特性及桩-土相互作用研究[D]. 长沙:中南大学. [FAN Z H. Research on swelling-shrinking characteristic and pile-soil interaction of expansive soil foundation [D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)]
- [4] ALONSO E E, RAMON A. Heave of a railway bridge induced by gypsum crystal growth: field observations [J]. Géotechnique, 2013, 63(9): 707 - 719.
- [5] EINSTEIN H H. Tunnelling in difficult ground- Swelling behaviour and identification of swelling rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1996, 29(3): 113 - 124.
- [6] GENNARO M, ABDOLREZA O, SIAVASH Z, *et al.* Performance of a pier group foundation in swelling rock [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2017, 35(1): 91 - 109.
- [7] XIAO H, ZHANG C, WANG Y, *et al.* Pile-Soil Interaction in expansive soil foundation: analytical solution and numerical simulation [J]. International Journal of Geomechanics, 2011, 11(3): 159 - 166.
- [8] 李国和, 荆志东, 许再良. 京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 90 - 94. [LI G H, JING Z D, XU Z L. A discussion of the correlation between land subsidence and groundwater level variation along the Jinghu high speed railway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 90 - 94. (in Chinese)]
- [9] 雷坤超, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于PS-InSAR技术的天津地面沉降研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 106 - 111. [LEI K C, CHEN B B, GONG H L, *et al.* Detection of land subsidence in Tianjin based on PS-InSAR technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 106 - 111. (in Chinese)]
- [10] 李莎, 成建梅, 宫辉力. 基于变渗透系数的地下水开采-地面沉降三维模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 14 - 21. [LI S, CHENG J M, GONG H L. Three dimensional simulation of groundwater exploitation and land subsidence based on variable permeability [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 14 - 21. (in Chinese)]
- [11] 贵州省地质局. 贵州主要构造体系[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1980. [Geological Bureau of Guizhou Province. Guizhou's main tectonic system [M]. Guiyang: Guizhou People Press, 1980. (in Chinese)]
- [12] 何邵麟, 陈智. 贵州地壳表层构造地球化学分区及其意义[J]. 贵州地质, 2002, 19(3): 148 - 154. [HE S L, CHEN Z. The zoning of surface tectonic geochemistry in Guizhou and its significance [J]. Guizhou Geology, 2002, 19(3): 148 - 154. (in Chinese)]
- [13] 郭金城. 贵州主要活动构造体系与地震[J]. 贵州科学, 1993, 11(3): 18 - 23. [GUO J C. The principal active tectonic systems in Guizhou and earthquakes [J]. Guizhou Science, 1993, 11(3): 18 - 23. (in Chinese)]
- [14] 肖东升. 贵州区域地壳稳定性及地震危险性分析[D]. 成都:西南交通大学, 2002. [XIAO D S. Analysis of regional crustal stability and seismic risk probability in Guizhou Province [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002. (in Chinese)]

- C, *et al.* Research on deformation failure mechanism and stability of slope rock mass containing multi-weak interlayers [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 34 (6): 1695 – 1702. (in Chinese)]
- [15] SAATY THOMAS L. Applications of analytical hierarchies [J]. *Mathematics and Computers inSimulation*, 1979, 21(1): 1 – 20.
- [16] PAWLAK ZDZISLAW. Rough classification [J]. *International Journal of Man-machine Studies*, 1984, 20(5): 469 – 483.
- [17] 王广月, 崔海丽, 李倩. 基于粗糙集理论的边坡稳定性评价中因素权重确定方法的研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2418 – 2422. [WANG G Y, CUI H L, LI Q. Study on the weight determination of factors in the evaluation of slopes stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2418 – 2422. (in Chinese)]
- [18] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 831 – 836. [ZHANG C, WANG Q, CHEN J P, *et al.* Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 831 – 836. (in Chinese)]
- [19] 穆成林, 黄润秋, 裴向军, 等. 基于组合赋权 – 未确知测度理论的围岩稳定性评价[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(6): 1057 – 1063. [MU C L, HUANG R Q, PEI X J, *et al.* Evaluation of rock stability based on combined weighting-unascertained measurement theory [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(6): 1057 – 1063. (in Chinese)]
- [20] 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验. 贵州黔西地区地质灾害发育特征及稳定性评价研究[R]. 成都: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验, 2016. [State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology. Study on the development characteristics and stability evaluation of geological hazards in Qianxi area, Guizhou [R]. Chengdu: State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, 2016. (in Chinese)]

编辑: 汪美华

~~~~~  
(上接第 141 页)

- [15] 田洋, 赵小明, 牛志军, 等. 鄂西南利川二叠纪吴家坪组硅质岩成因及沉积环境 [J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 590 – 599. [TIAN Y, ZHAO X M, NIU Z J, *et al.* Petrogenesis and sedimentary environment of Permian Wujiaping formation siliceous rocks in Lichuan, Southwestern Hubei [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 590 – 599. (in Chinese) ]
- [16] 李振嵩. 硅碱活性碳酸盐岩开挖骨料试验分析及应用 [J]. *人民珠江*, 2018, 39(4): 85 – 88. [LI Z S. Test analysis and application of carbonatite excavation aggregates with Alkali-Silica reactivity [J]. *Pearl River*, 2018, 39(4): 85 – 88. (in Chinese) ]
- [17] 中华人民共和国地质矿产部. 大地电磁测法技术规程: DZ/T0173-1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. [Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China. Technical specification for magnetotelluric survey: DZ/T0173-1997 [S]. Beijing: China Standard Press, 1997. (in Chinese) ]
- [18] 文江泉, 韩会增. 膨胀岩的判别与分类初探 [J]. *铁路工程学报*, 1996(2): 231 – 236. [WEN J Q, HAN H Z. Preliminary study of distinguishing and classifying on swell rock [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 1996(2): 231 – 236. (in Chinese) ]
- [19] 孙小明, 武雄, 何满朝, 等. 强膨胀性软岩的判别与分级标准 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(1): 128 – 132. [SUN X M, WU X, HE M C, *et al.* Differentiation and grade criterion of strong swelling soft rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 128 – 132. (in Chinese) ]
- [20] 吴光, 赵志明, 王金淑, 等. 一种岩体膨胀应力测试仪: 中国, ZL201720378268.8 [P]. 2017 – 04 – 12. [WU G, ZHAO Z M, WANG J S, *et al.* The utility model relates to a rock mass expansion stress testing instrument. China, ZL201720378268.8 [P]. 2017 – 04 – 12. (in Chinese) ]
- [21] 王炳忠, 王起才, 张戎令, 等. 上覆荷载和厚度对原状膨胀土膨胀量的影响分析 [J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(2): 72 – 75. [WANG B Z, WANG Q C, ZHANG R L, *et al.* The effect of upper load and thickness on the expansion of undisturbed expansive soil [J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(2): 72 – 75. (in Chinese) ]

编辑: 张明霞