

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022021224041979

文章编号:1674-599X(2024)02-0062-09

引用格式:陈遼,陈贝贝,王海,等.浅埋大跨度隧道大变形演化特征与防治方法[J].交通科学与工程,2024,40(2):62-70,107.

Citation: CHEN Kui, CHEN Beibei, WANG Hai, et al. Research on reaction spring stiffness of underground masonry drainage arch culvert[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 62-70, 107.

地下砌体排水拱涵反力弹簧刚度研究

陈遼¹, 陈贝贝¹, 王海², 姚君³

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙市住房和城乡建设局, 湖南 长沙 410075;

3. 长沙市公共工程建设中心, 湖南 长沙 410023)

摘 要:在设计地下砌体排水拱涵的全结构加固时,为了简化计算过程,将原拱涵结构与周围土体整体等效为反力弹簧。为了确定拱涵反力弹簧刚度参数正确性,探究影响拱涵反力弹簧刚度的因素,依托红旗渠项目的试验段,通过有限元法,分析砌体拱涵的材料强度、地基土层的承载力和泊松比,同时考虑了外侧土层与素填土层的含水率和泊松比对砌体拱涵反力弹簧刚度的影响。研究表明:侧墙反力弹簧系数随着原有浆砌片石侧墙砂浆强度的增加而增大;拱圈的反力弹簧系数随着原有砖砌拱圈砂浆与砖砌块强度的增强而增大;侧墙与拱圈反力弹簧系数随着地基土层承载力的提升而增大;侧墙反力弹簧系数随着地基土层、外侧土层、素填土层泊松比增大而增大;拱圈反力弹簧系数随着地基土层、外侧土层、素填土层泊松比的增大而减小;侧墙与拱圈反力弹簧系数随外侧土层、素填土层含水率的增大而减小;在对砌体拱涵进行计算时,将原砌体拱涵与周围土体等效为有限元法计算出的反力弹簧边界条件,并将计算结果与监测数据进行对比,发现有限元法计算的拱涵等效反力弹簧刚度具有较高的可靠性。

关键词:有限元;反力弹簧系数;砌体拱涵;土体含水率;泊松比

中图分类号:TU992

文献标志码:A

Research on reaction spring stiffness of underground masonry drainage arch culvert

CHEN Kui¹, CHEN Beibei¹, WANG Hai², YAO Jun³

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Changsha Municipal Housing and Urban-Rural Development Bureau, Changsha 410075, China;

3. Changsha Public Engineering Construction Center, Changsha 410023, China)

Abstract: In the structure reinforcement design of underground masonry drainage arch culvert, to simplify the calculation, the original arch culvert structure and the surrounding soil are equivalent to the reaction spring. In order to determine the correctness of the arch culvert reaction spring stiffness parameters and explore the factors that affect the stiffness of the arch culvert reaction spring, the finite element method was used based on the test section of Hongqiqu project. The material strength of masonry arch culvert, and the bearing capacity and Poisson's ratio of foundation soil layer were

收稿日期:2022-02-12

基金项目:长沙市政府“红旗渠主渠结构加固试验段工法研究及实施”项目(2000382-21)

通信作者:陈遼(1979—),男,讲师,主要从事结构检测鉴定、既有建筑物构筑物加固、建筑抗震方面的研究工作。

E-mail: chenkuiclsldx@csust.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

analyzed. The influence of moisture content of outer soil layer and plain fill soil layer and Poisson's ratio on the reaction spring stiffness of masonry arch culvert was considered. The results show that, the reaction spring coefficient of side wall increases with the increase of mortar strength of original mortar rubble side wall. The reaction spring coefficient of arch ring increases with the increase of the strength of the original brick arch ring mortar and brick block. The reaction spring coefficient of side wall and arch ring increases with the increase of foundation soil bearing capacity. The reaction spring coefficient of side wall increases with the increase of Poisson's ratio of foundation soil layer, outer soil layer and plain fill layer. The spring coefficient of arch ring reaction decreases with the increase of Poisson's ratio of foundation soil layer, outer soil layer and plain fill layer. The reaction spring coefficient of side wall and arch ring decreases with the increase of water content of outer soil layer and plain fill layer. The original masonry arch culvert and the surrounding soil are equivalent to the reaction spring boundary conditions calculated from the finite element method, then the whole structure reinforcement was calculated. The calculation results are compared with the monitoring data. The results show that the equivalent reaction spring stiffness of the arch culvert calculated by the finite element method is reliable.

Key words: finite element; reaction spring coefficient; masonry arch culvert; soil moisture content; Poisson's ratio

20世纪中期,中国修建的地下排水拱涵结构主要以砖砌拱涵、预制混凝土圆拱、预制混凝土盖板涵以及浆砌片石侧墙等形式为主。由于这些地下排水拱涵结构的使用年限较长,缺乏必要的日常维护,并且长期受地面荷载的影响,导致事故频发。因此,加固修复现有的地下排水拱涵迫在眉睫。在进行地下排水拱涵全结构加固设计时,为简化计算过程,可将原结构及周围土体整体等效为反力弹簧。若能确定地下排水拱涵反力弹簧刚度的影响因素及相应的计算方法,有助于确定新建拱涵边界条件,为砌体拱涵结构的加固设计提供参考。

许多学者深入研究了地基土层承载力与含水率对土体性质的影响。如,单炜等^[1]通过试验研究表明,随着土含水率的增加,其弹性模量逐渐减小;杨光华等^[2]从提出的地基承载力计算方法得知,随着地基土层弹性模量增大,地基承载力提高。在弹簧系数的计算方面,国内外学者提出了多种方法。如,丁德云等^[3]采用反应位移法,研究了地基弹簧系数的取值,发现地基弹簧系数的取值对结构内力影响显著;邱滢佳等^[4]基于双参数地基模型的原理,提出了修正反应位移法,修正土体法向弹簧系数;李英民等^[5]建立地基弹簧系数的经验计算公式,通过有限元结果对该公式的系数进行了拟合;董正方

等^[6]采用平面弹性理论的复变函数方法,推导了反应位移法中浅埋盾构隧道地基弹簧刚度的解析公式。杨飞等^[7]基于有限元法,综合考虑多种影响因素,提出了地基反力弹簧刚度的综合建议公式。尽管目前对土体弹簧刚度的研究较为深入,但对在砌体拱涵与土体共同作用下反力弹簧刚度的研究仍不足。本文以长沙市红旗渠项目试验段为研究背景,将开挖回填后的拱涵土层分为地基土层、外侧土层、素填土层,并采用有限元法分析在原结构拱涵与土体的共同作用下,拱涵材料强度、地基土层的承载力和泊松比、外侧土层的含水率和泊松比、素填土层的含水率和泊松比对砌体拱涵结构反力弹簧刚度的影响。

通过有限元法,计算出侧墙、拱圈与底板的反力弹簧系数。再将原结构拱涵与周围土层等效为新加固拱涵的边界反力弹簧^[8],并进行有限元模拟。最后,将有限元模拟结果与实际工程监测得到的新加固拱涵内力与位移进行对比,验证有限元法计算得到的侧墙与拱圈弹簧反力系数的可靠性,从而为砌体拱涵结构的加固设计提供参考依据。本文计算模型中的拱涵结构周围土层分布如图1所示。

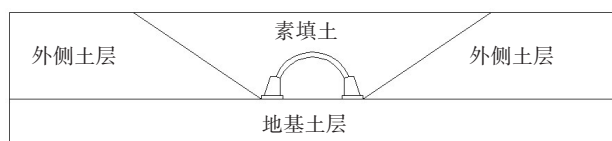


图1 结构周围土层分布

Fig. 1 Distribution of soil layers around the structure

1 工程概况与计算方法

1.1 拱涵结构概况

红旗渠试验段始建于20世纪50年代,其渠体结构主要以砖砌拱涵和浆砌片石侧墙为主。根据现场检测结果,该试验段拱涵净高3.0 m,拱矢高1.6 m,侧墙高1.4 m,两侧墙之间净宽5.0 m,基础高度0.3 m,宽度1.7 m。由回弹法检测结果可知,砖砌拱圈砂浆的强度等级为M5.0,砖砌块的强度等级为 $M_u10.0$,而片石侧墙砂浆的强度等级为M5.0。

1.2 地质条件

地勘报告显示,该场地内分布的土层主要由素填土、粉质黏土、中粗砂及卵石构成,而基岩则为白垩泥质粉砂岩的风化带。针对试验段的拱涵结构,其周围的土层可分为三层:地基土层(中粗砂或卵石)、外侧土层(粉质黏土)、覆土层(素填土)。试验段拱涵的各土层参数见表1。

表1 土层参数表

Table 1 Table of soil parameters

参数	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^\circ$)	泊松比
覆土层	19.9	15.0	10	10	0.4
外侧土层	20.0	18.0	27	14	0.4
地基土层	20.0	16.7	33	16	0.3

1.3 计算方法

本文采用有限元法计算原拱涵反力弹簧系数,计算模型如图2~3所示。其中,土体的宽度取结构宽度的7倍。利用有限元法计算结构反力弹簧系数时,分别计算各部分反力弹簧系数。具体步骤如下:计算原拱涵侧墙反力弹簧系数,在侧墙的垂直方向上施加单位均布力 δ ;再采用有限元法计算出侧墙所有节点沿水平方向的位移 w_i ;然后通过公式

$k_i=\delta/w_i$ 计算每个节点对应的反力弹簧系数;最后求出各个节点反力弹簧系数均值作为侧墙反力弹簧系数。同样地,当求拱圈反力弹簧系数时,在拱圈上施加环向单位力 δ ,测量拱圈各节点的位移 w_i ,同理求出各节点的反力弹簧系数,并将其均值作为拱圈的反力弹簧系数。

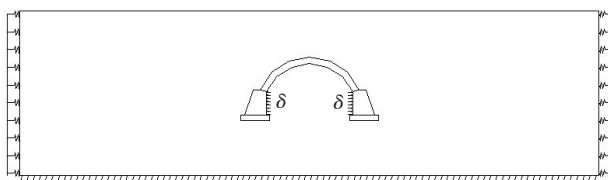


图2 侧墙反力弹簧系数计算模型

Fig. 2 Calculation model of side wall reaction spring coefficient

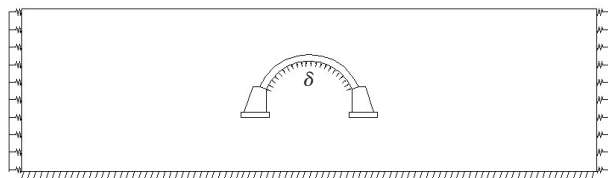


图3 拱圈反力弹簧系数计算模型

Fig. 3 Calculation model of arch ring reaction spring coefficient

1.4 模型建立

本文采用Midas/GTS有限元软件进行建模分析^[9]。在建模过程中,土层采用实体单元的莫尔-库伦模型,拱圈与侧墙采用实体单元的弹性模型。为了模拟拱圈与侧墙的砂浆与砌块强度的变化,通过调整实体单元的弹性模量来实现^[10]。在设定模型边界时,水平方向的土体宽度为结构宽度的7倍,而垂直方向的土层边界则根据地勘报告中的土层厚度来确定。构建的有限元分析模型及网格划分如图4所示。

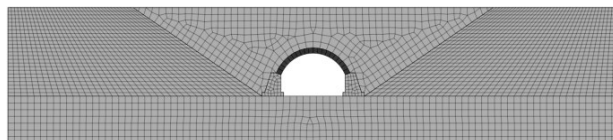


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

1.5 参数选取

在有限元模拟中,除计算变化参数外,其他土层参数见表1。同时,根据现场检测的结构强度,并

参考文献[10]的相关规定,确定了拱涵结构的参数,见表2。

表2 拱涵结构参数表

Table 2 Arch culvert structure parameter table

结构	材料	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
拱圈	砖及砂浆	21	2 704	0.15
侧墙	片石及砂浆	26	4 000	0.20

2 拱涵结构参数影响分析

2.1 浆砌片石侧墙砂浆强度对侧墙反力弹簧系数的影响

根据文献[10]可知,浆砌片石侧墙的弹性模量受浆砌片石侧墙的砂浆强度影响。为了研究在砂浆不同强度等级下侧墙反力弹簧系数的变化规律,通过调整侧墙的弹性模量进行模拟计算,其结果如图5所示。

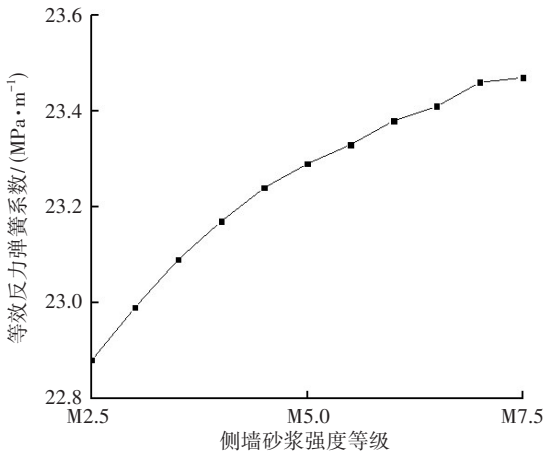


图5 侧墙反力弹簧系数-侧墙砂浆强度等级曲线

Fig. 5 Side wall reaction spring coefficient-side wall mortar strength grade curve

从图5可以看出,随着浆砌片石侧墙砂浆强度等级的提升,侧墙反力弹簧系数呈增大趋势。当侧墙砂浆强度等级为[M2.5, M5.0]时,侧墙反力弹簧系数的增长较为迅速;当侧墙砂浆强度等级为(M5.0, M7.5]时,侧墙反力弹簧系数的增速逐渐减缓;当侧墙砂浆强度等级大于M7.5时,侧墙反力弹簧系数趋于平稳。当侧墙砂浆强度等级由M2.5提

升至M5.0时,侧墙反力弹簧系数提高0.41 MPa/m;当侧墙砂浆强度等级由M5.0提升至M7.5时,侧墙反力弹簧系数仅提高0.18 MPa/m。这表明侧墙反力弹簧系数会随着侧墙砂浆强度等级的提升而增大,并且当侧墙砂浆强度等级小于M5.0时,对侧墙反力弹簧系数的影响更明显。

2.2 砖砌拱圈砂浆强度对拱圈反力弹簧系数的影响

通过改变拱圈的弹性模量,模拟在不同砂浆强度等级下拱圈反力弹簧系数的变化规律,其计算结果如图6所示。

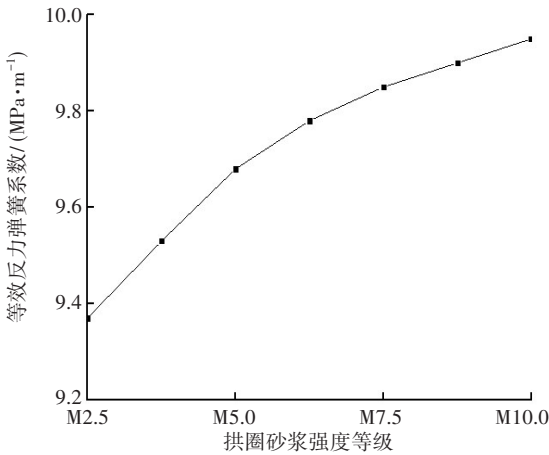


图6 拱圈反力弹簧系数-拱圈砂浆强度等级曲线

Fig. 6 Arch ring reaction spring coefficient-arch ring mortar strength grade curve

从图6可以看出,随着砖砌拱圈砂浆强度等级的提升,拱圈反力弹簧系数呈明显的增大趋势。当拱圈砂浆强度等级在[M2.5, M5.0]时,拱圈反力弹簧系数的增长较快;当拱圈砂浆强度等级大于M5.0之后,拱圈反力弹簧系数的增速逐渐减缓。当拱圈砂浆强度等级由M2.5提升至M5.0时,拱圈反力弹簧系数提高了0.31 MPa/m;当拱圈砂浆强度等级由M5.0提升至M7.5时,拱圈反力弹簧系数又提高0.17 MPa/m;当拱圈砂浆强度等级由M7.5提升至M10.0时,拱圈反力弹簧系数仅提高0.1 MPa/m。这表明,拱圈反力弹簧系数随着拱圈砂浆强度等级的提升而增大,且当拱圈砂浆强度等级小于M5.0时,对拱圈反力弹簧系数的影响更明显。

2.3 砖砌拱圈砖砌块强度对拱圈反力弹簧系数的影响

通过改变拱圈的弹性模量,模拟在不同拱圈砖砌块强度等级下拱圈反力弹簧系数的变化规律,其计算结果如图7所示。

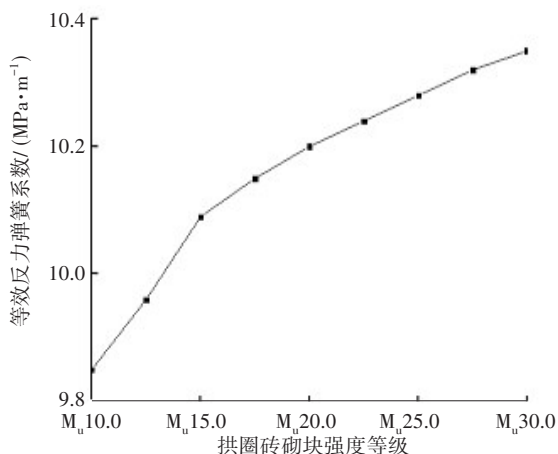


图7 拱圈反力弹簧系数-拱圈砖砌块强度等级曲线

Fig. 7 Arch ring reaction spring coefficient-strength grade curve of arch ring brick block

从图7可以看出,随着砖砌拱圈砖砌块强度等级的提升,拱圈反力弹簧系数呈增大趋势。当拱圈砖砌块强度等级为 $[M_u 10.0, M_u 15.0]$ 时,拱圈反力弹簧系数的增长较快。当拱圈砖砌块强度等级大于 $M_u 15.0$ 后,拱圈反力弹簧系数的增长速率开始减缓,与拱圈砖砌块强度等级基本呈线性关系。当拱圈砖砌块强度等级由 $M_u 10.0$ 提升至 $M_u 15.0$ 时,拱圈反力弹簧系数提高 0.25 MPa/m 。当拱圈砖砌块强度等级由 $M_u 15.0$ 提升至 $M_u 30.0$ 时,拱圈反力弹簧系数同样提高了 0.25 MPa/m 。这表明,拱圈反力弹簧系数随着拱圈砖砌块强度等级的提升而增大。尤其在拱圈砖砌块强度等级低于 $M_u 15.0$ 时,砖砌块强度的变化对拱圈反力弹簧系数的影响更大。

3 各土层参数影响分析

3.1 地基土层承载力的影响

为了模拟地基土层承载力的变化,通过改变地基土层的弹性模量,其取值范围为 $[5.00, 50.00] \text{ MPa}$,将其均分为10级。在不同地基土层承载力下,拱圈和侧墙的反力弹簧系数的变化规律如图8所示。

从图8可以看出,当地基土层弹性模量为 $[5.00, 45.00] \text{ MPa}$ 时,侧墙反力弹簧系数的增大速率逐渐降低。当地基土层弹性模量大于 45.00 MPa 后,侧墙反力弹簧系数则趋于稳定。这表明,随着地基土层承载力的增大,侧墙反力弹簧系数随之增

大,但当地基土层承载力增加到一定程度后,地基土层承载力对侧墙反力弹簧系数的影响逐渐变小。

当地基土层弹性模量由 5.00 MPa 增大至 50.00 MPa 时,拱圈反力弹簧系数由 4.74 MPa/m 增大至 19.05 MPa/m ,增加了3.02倍。这表明,地基土层承载力与拱圈反力弹簧系数之间呈线性关系,拱圈反力弹簧系数随地基土层承载力的提升而增大。

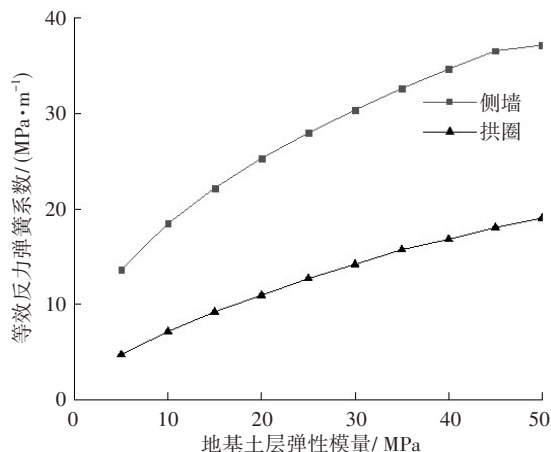


图8 反力弹簧系数-地基土层弹性模量曲线

Fig. 8 Reaction spring coefficient-elastic modulus curve of foundation soil layer

3.2 地基土层泊松比的影响

仅改变地基土层泊松比,变化范围为 $[0.17, 0.47]$,并将其均分为10级。在地基土层不同泊松比下,拱圈和侧墙的反力弹簧系数的变化规律如图9所示。

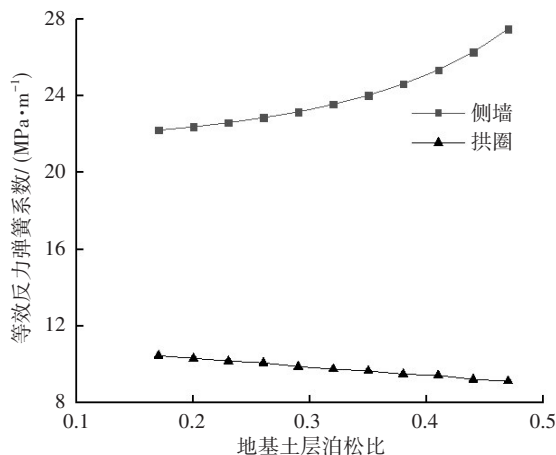


图9 反力弹簧系数-地基土层泊松比曲线

Fig. 9 Reaction spring coefficient-Poisson's ratio curve of foundation soil layer

从图9可以看出,当地基土层泊松比为 $[0.17, 0.32]$ 时,侧墙反力弹簧系数的增大速度较为缓慢;当地基土层泊松比为 $(0.32, 0.47]$ 时,侧墙反力弹簧系数的增大速度明显加快;当地基土层泊松比由0.17提升至0.32时,侧墙反力弹簧系数仅增加1.35 MPa/m;当地基土层泊松比由0.32提升至0.47时,侧墙反力弹簧系数增加了3.93 MPa/m。这表明,侧墙反力弹簧系数随地基土层泊松比的增大而增大,并且当地基土层泊松比大于0.32后,地基土层泊松比对侧墙反力弹簧系数的影响逐渐增强。而拱圈反力弹簧系数与地基土层泊松比之间呈线性关系,拱圈反力弹簧系数随地基土层泊松比的增大而减小。

3.3 外侧土层含水率的影响

通过改变外侧土层的弹性模量,模拟结构外侧土层含水率的变化。结构外侧土层弹性模量的变化范围为 $[5.00, 50.00]$ MPa,将其均分为10级。在外侧土层不同含水率下,拱圈和侧墙的反力弹簧系数的变化规律如图10所示。

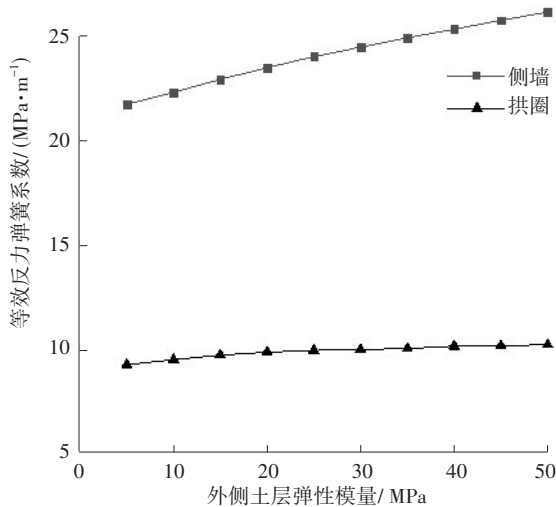


图10 反力弹簧系数-外侧土层弹性模量曲线

Fig. 10 Reaction spring coefficient-elastic modulus curve of outer soil layer

从图10可以看出,侧墙与拱圈的反力弹簧系数均随外侧土层弹性模量的增大而增大。但随着外侧土层含水率的增加,侧墙与拱圈的反力弹簧系数会相应减小,侧墙反力弹簧系数与外侧土层含水率之间呈线性关系^[2,11]。当外侧土的弹性模量由5.00 MPa增大至50.00 MPa时,侧墙反力弹簧系数增加20.2%,而拱圈反力弹簧系数增加了10.2%。这表明,随着外侧土层含水率的增加会导致侧墙与拱圈的反力弹簧系数减小,并且对侧墙反力弹簧系数的

影响更明显。

3.4 外侧土层泊松比的影响

仅改变外侧土层的泊松比,其变化范围为 $[0.17, 0.47]$,并将其均分为10级。在外侧土层不同泊松比下,拱圈和侧墙反力弹簧系数的变化规律,如图11所示。

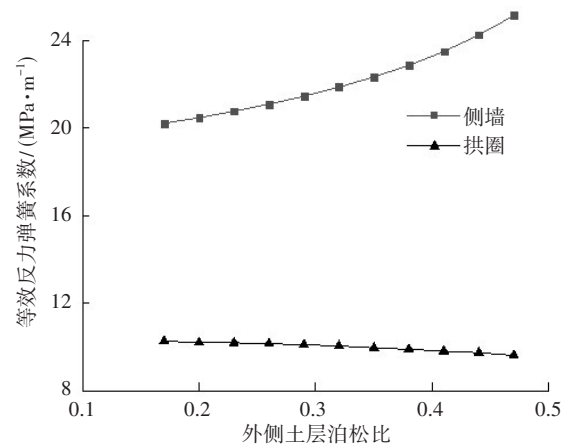


图11 反力弹簧系数-外侧土层泊松比曲线

Fig. 11 Reaction spring coefficient-Poisson's ratio curve of outer soil layer

从图11可以看出,在泊松比为 $[0.17, 0.29]$ 时,侧墙反力弹簧系数增大速度相对缓慢;在泊松比为 $(0.29, 0.47]$ 时,侧墙反力弹簧系数的增大速度明显加快;当外侧土层泊松比由0.17提升至0.29时,侧墙反力弹簧系数仅增加了1.23 MPa/m;当外侧土层泊松比由0.29提升至0.47时,侧墙反力弹簧系数增加了3.69 MPa/m。在泊松比为 $[0.17, 0.32]$ 时,拱圈反力弹簧系数减小0.21 MPa/m;在泊松比为 $(0.32, 0.47]$ 时,拱圈反力弹簧系数减小0.44 MPa/m。这表明,侧墙反力弹簧系数随外侧土层泊松比的增大而增大,且当外侧土层泊松比大于0.29后,外侧土层泊松比的变化对侧墙反力弹簧系数的影响逐渐变强。拱圈反力弹簧系数随外侧土泊松比的增大而减小,减小速率随外侧土层泊松比的增大而增大。

3.5 素填土层含水率的影响

通过改变素填土层的弹性模量,模拟素填土层含水率的变化,素填土层弹性模量变化范围为 $[5.00, 50.00]$ MPa,并将其均分为10级。在素填土层不同含水率下,拱圈和侧墙的反力弹簧系数的变化规律如图12所示。

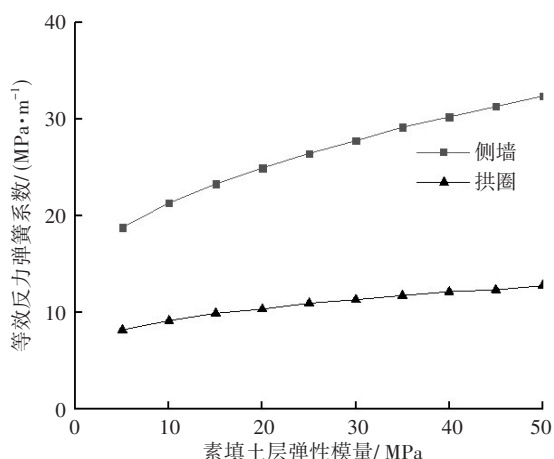


图12 反力弹簧系数-素填土层弹性模量曲线

Fig. 12 Reaction spring coefficient-elastic modulus curve of plain fill layer

从图12可以看出,侧墙与拱圈的反力弹簧系数随素填土弹性模量的增大而增大。但随着素填土层含水率的增加,侧墙与拱圈的反力弹簧系数减小,且侧墙反力弹簧系数与素填土层含水率基本呈线性关系。当素填土弹性模量由5.00 MPa增大至50.00 MPa,侧墙反力弹簧系数增加72.3%,而拱圈反力弹簧系数增加了55.7%。这表明,素填土层含水率的增加会导致侧墙与拱圈的反力弹簧系数的减小,并且对侧墙反力弹簧系数的影响更明显。

3.6 素填土层泊松比的影响

仅改变素填土层泊松比,变化范围为0.17~0.47,并将其均分为10级。在素填土层不同泊松比下,拱圈和侧墙的反力弹簧系数的变化规律如图13所示。

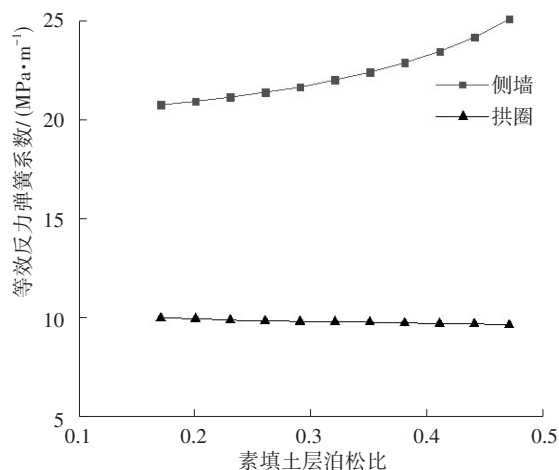


图13 反力弹簧系数-素填土层泊松比曲线

Fig. 13 Reaction spring coefficient-plain fill layer Poisson's ratio curve

从图13可以看出,侧墙反力弹簧系数随素填土层泊松比的增大而增大。在素填土层泊松比为[0.17,0.29]时,侧墙反力弹簧系数的增大速度较为缓慢,在素填土层泊松比为(0.29,0.47]时,侧墙反力弹簧系数的增大速度较快。素填土层泊松比由0.17提升至0.29时,侧墙反力弹簧系数仅增加0.89 MPa/m;素填土层泊松比由0.29提升至0.47时,侧墙反力弹簧系数增加了3.41 MPa/m。拱圈反力弹簧系数随素填土层泊松比的增大而减小,且与素填土层泊松比基本呈线性关系。这表明,素填土层泊松比超过0.29后,素填土层泊松比的变化对侧墙反力弹簧系数的影响逐渐增强,而拱圈反力弹簧系数随着素填土层泊松比的增大而减小。

4 工程实际验证

按实际检测得到的原有拱涵的结构参数以及外侧土层的工程性质,利用有限元法计算出红旗渠预制工法试验段原结构拱涵的拱圈与侧墙的反力弹簧系数。通过有限元计算得出板底地基土层反力弹簧系数为36.68 MPa/m,而利用标准贯入锤击数 N 计算得出板底地基土层反力弹簧系数为40.00 MPa/m,绝对误差为8.3%。各反力弹簧系数的具体取值见表3。

表3 反力弹簧系数表

Table 3 Reaction spring coefficient table MPa/m			
位置	拱圈	侧墙	板底
反力弹簧系数	9.85	23.24	36.68

红旗渠预制工法试验段加固完成后,为研究修复后结构的受力情况,在管渠上方进行水袋堆载试验。试验水袋宽度约5.0 m,长度约11.0 m,在加满水后,其高度约2.2 m。堆载加载完成后,测量加固后新拱涵结构的拱顶、拱腰、拱趾及侧墙的位移和应力。利用现场堆载试验与预制工法加固后,管渠现状如图14~15所示。

采用Midas/GTS进行建模分析,将原有的拱涵结构和外围土层简化为反力弹簧,如图16所示,并根据表3设定反力弹簧系数。设定新加固预制拱涵结构的弹性模量为42 500 MPa,泊松比为0.2。按实

际的工况条件,对新加固的拱涵结构施加了相应的水平土压力和竖向土压力,并考虑了堆载试验的荷载。再将设置了反力弹簧边界条件的新加固预制拱涵结构 Midas/GTS 计算结果与实际测量结果进行对比,验证有限元法在计算拱涵反力弹簧系数的可靠性。其对比结果见表 4~5,应力的对比情况如图 17 所示。



图 14 堆载试验

Fig. 14 Surcharge test



图 15 预制工法加固

Fig. 15 Prefabrication reinforcement

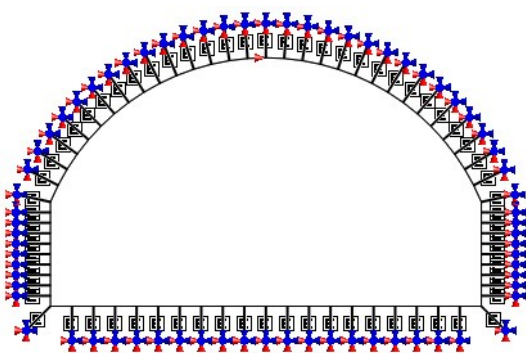


图 16 有限元模型

Fig. 16 Finite element model

表 4 位移结果对比表

Table 4 Comparison of displacement results table

位置	实测位移/ mm	有限元计算位移/ mm	相对误差/ %
拱顶	1.2	1.3	8.3
拱腰	0.6	0.6	0.0
拱趾	1.3	1.4	7.7
侧墙	0.3	0.3	0.0

表 5 应力结果对比表

Table 5 Comparison of stress results table

位置	实测应力/ MPa	有限元计算应力/ MPa	相对误差/ %
拱顶	1.03	1.11	7.8
拱腰	0.52	0.57	9.6
拱趾	1.98	2.12	7.1
侧墙	0.59	0.64	8.5

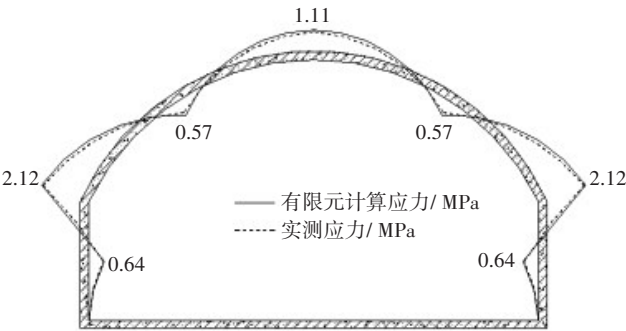


图 17 应力对比图

Fig. 17 Stress comparison diagram

由表 4~5 可知,在等效反力弹簧边界条件下,采用有限元 Midas/GTS 计算新加固预制拱涵结构的位移与实际测量结果之间的最大相对误差为 8.3%,而应力结果的最大相对误差为 9.6%。这些误差均在工程容许范围内。因此,采用该方法计算的等效反力弹簧刚度具有可靠性。

5 结论

1) 随着浆砌片石侧墙砂浆强度等级的提升,拱涵侧墙的反力弹簧系数会相应增大;同样,砖砌拱圈砂浆和砖砌块强度等级的提升,也会导致拱圈反力弹簧系数的增大。

2) 拱涵侧墙的反力弹簧系数与地基土层承载力成正比;拱圈的反力弹簧系数与地基承载力成正比;侧墙的反力弹簧系数与地基土层泊松比成正比;拱圈的反力弹簧系数与地基土层泊松比成反比。

3) 随着外侧土层含水率的增加,会导致拱涵侧墙与拱圈的反力弹簧系数减小,且对侧墙反力弹簧系数的影响更明显。同时,随外侧土层泊松比的增大,侧墙反力弹簧系数增大,而拱圈反力弹簧系数减小,且减小速率会随外侧土层泊松比的增大而加快。

4) 随着素填土层含水率的增加,拱涵侧墙与拱圈的反力弹簧系数减小,且填土层含水率对侧墙反力弹簧系数的影响更为明显;随着素填土层泊松比的增大,侧墙反力弹簧系数增大,拱圈反力弹簧系数减小。

5) 在红旗渠试验段预制法加固结构的计算中,将外侧的原有拱涵及周围土体等效为有限元法计算出的反力弹簧边界条件,再进行全结构加固计算,将其计算结果与监测数据进行对比后发现,采用等效有限元法计算的拱涵等效反力弹簧刚度是具有可靠性的。

参考文献(References):

- [1] 单炜, 张维. 含水率和附加荷载对北黑高速公路滑坡路段土体弹性模量影响研究[J]. 森林工程, 2013, 29(4): 103-107. DOI: 10.16270/j.cnki.slgc.2013.04.014.
SHAN Wei, ZHANG Wei. The influence of moisture content and additional load on soil elastic modulus of soil landslide in bei ' an-heihe highway[J]. Forest Engineering, 2013, 29(4): 103-107. DOI: 10.16270/j.cnki.slgc.2013.04.014.
- [2] 杨光华. 现代地基设计理论的创新与发展[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 1-18. DOI: 10.11779/CJGE202101001.
- [3] 丁德云, 杨秀仁. 反应位移法抗震设计中地基弹簧系数取值的探讨[J]. 地震工程学报, 2016, 38(5): 685-692. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0685.
DING Deyun, YANG Xiuren. Discussion on the spring constant of ground foundation in the seismic design of underground structures using the response displacement method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5): 685-692. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0685.
- [4] 邱滢佳, 张鸿儒, 于仲洋. 利用双参数地基模型修正反应位移法弹簧[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 148-155. DOI: 10.11918/201906201.
QIU Yanjia, ZHANG Hongru, YU Zhongyang. Modified the spring of response displacement method using two-parameter foundation model [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 148-155. DOI: 10.11918/201906201.
- [5] 李英民, 王璐, 刘阳冰, 等. 地下结构抗震计算地基弹簧系数取值方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(1): 106-113. DOI: 10.13197/j.eeev.2012.01.022.
LI Yingmin, WANG Lu, LIU Yangbing, et al. Analysis of methods for determining the spring constant of ground foundation in seismic design of underground structures [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(1): 106-113. DOI: 10.13197/j.eeev.2012.01.022.
- [6] 董正方, 王君杰, 赵东晓, 等. 浅埋盾构隧道地基弹簧刚度的求解方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(6): 28-32. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.005.
DONG Zhengfang, WANG Junjie, ZHAO Dongxiao, et al. Solving method for soil spring stiffness of shallow shield tunneling [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(6): 28-32. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.005.
- [7] 杨飞, 董新勇, 周沈华, 等. 地下结构抗震计算中地基反力弹簧刚度取值方法研究[J]. 四川建筑, 2017, 37(5): 114-118, 121. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8983.2017.05.038.

(下转第107页)

- 2020, 39 (2): 62-68, 117. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.02.10.
- ZHANG Junfeng, TU Baozhong, LIU Qingshuai, et al. Value of time step in the simulation of fluctuating wind field by weighted amplitude wave superposition method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39 (2): 62-68, 117. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.02.10.
- [14] 蒋友宝, 刘志, 贺广零, 等. 考虑脉动风场的3 MW 风机钢塔筒基础底板脱开失效概率[J]. 工程力学, 2021, 38 (5): 199-208. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0426.
- JIANG Youbao, LIU Zhi, HE Guangling, et al. Failure probability of foundation slab void for 3 MW wind turbine steel tower considering turbulent wind field [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38 (5): 199-208. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0426.
- [15] 赵文超, 廖明夫. 一种 Kaimal 谱的修正方法及算法实现[J]. 机械科学与技术, 2013, 32 (10): 1446-1450. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.2013.10.031.
- ZHAO Wenchao, LIAO Mingfu. A method for improving Kaimal spectrum and its algorithm implementation [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32 (10): 1446-1450. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.2013.10.031.
- [16] 丁泉顺, 陈艾荣, 项海帆. 大跨度桥梁空间脉动风场的计算机模拟[J]. 力学季刊, 2006, 27 (2): 184-189. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0053.2006.02.002.
- DING Quanshun, CHEN Airong, XIANG Haifan. Simulation of spatial fluctuating wind field on long span bridges [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27 (2): 184-189. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0053.2006.02.002.
- [17] 铁道部第三工程局. 铁路架桥机架梁规程: TB 10213—99[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- The Third Engineering Bureau of the Ministry of Railways. Regulations for railway bridge erection by girder-erecting machine: TB 10213—99 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- (责任编辑: 石月珍; 英文编辑: 周锐)
-
- (上接第70页)
- YANG Fei, DONG Xinyong, ZHOU Shenhua, et al. Study on the method of determining the stiffness of foundation reaction spring in seismic calculation of underground structures [J]. Sichuan Architecture, 2017, 37 (5): 114-118, 121. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8983.2017.05.038.
- [8] 柳春光, 冯晓波. 采用等效弹簧边界分析埋地管线在沉降情况下的反应[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29 (6): 197-202. DOI: 10.13197/j.cee.2009.06.014.
- LIU Chunguang, FENG Xiaobo. Using equivalent spring boundary to analyze the responses of buried pipeline subjected to ground settlement [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29 (6): 197-202. DOI: 10.13197/j.cee.2009.06.014.
- [9] 李治. Midas/GTS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- LI Zhi. Application of Midas/GTS in geotechnical engineer [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体结构设计规范: GB 50003—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of masonry structures: GB 50003—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [11] 唐静, 夏永胜. 不同降雨入渗条件下路堑边坡渗流特性研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37 (3): 22-29. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.004.
- TANG Jing, XIA Yongsheng. Study on seepage characteristics of subgrade slope under various rainfall infiltration conditions [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37 (3): 22-29. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.004.
- (责任编辑: 罗容; 英文编辑: 陈璐)