

文章编号:1674-599X(2022)03-0086-08

## 不同土层参数对砖石排水拱涵受力影响

陈逵<sup>1</sup>,付鹏<sup>1</sup>,杨冰清<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.长沙市公共工程建设中心,湖南 长沙 410000)

**摘 要:**为研究不同土层参数对城镇砖石排水拱涵受力特性的影响,依托红旗渠项目试验段建立有限元模型,分析了地基土层的承载力和泊松比、结构外侧土层的含水量和泊松比及覆土层厚度对砖石拱涵结构受力的影响。研究表明:随着地基土层承载力的增大,拱趾内侧压应力增大,拱顶内侧拉应力、拱圈变形及拱圈受拉区域均减小。随着结构外侧土层含水量的增大,拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力、侧墙底部内侧压应力、拱顶竖向变形及拱圈受拉区域均增大,且结构外侧土层含水量为10%~20%时,含水量变化对拱涵受力及拱圈变形影响较大。随着地基土层或结构外侧土层泊松比增大,拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力、侧墙底部内侧压应力及拱圈变形均减小。随着覆土层厚度增加,拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力、侧墙底部内侧压应力及拱顶竖向变形均呈线性递增趋势,且拱圈受拉区域增大。且结论均与红旗渠试验段现场检测结果较吻合,该研究成果可为地下拱涵结构检测鉴定提供参考。

**关键词:**拱涵;地基承载力;含水率;拱圈变形;拱圈应力;反弯点

**中图分类号:**U441

**文献标志码:**A

## The influence of different soil parameters on the force of masonry drainage arch culvert

CHEN Kui<sup>1</sup>, FU Peng<sup>1</sup>, YANG Bingqing<sup>2</sup>

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

2.Changsha Pubic Engineering Construction Center, Changsha 410000, China )

**Abstract:**In order to study the influence of different soil parameters on the mechanical characteristic of urban masonry drainage arch culvert, the finite element simulation model was built based on the test section of the Hongqi Canal project. The impact of the bearing capacity and the Poisson's ratio of foundation soil, the water content and the Poisson's ratio of the soil layer outside the structure and the overburden soil thickness on the mechanical characteristic of masonry drainage arch culver were analyzed. The results show that, with the increase of bearing capacity of foundation soil, the compressive stress inside the arch toe increases, the tensile stress inside the vault, the deformation of arch ring and the tension area of arch ring decrease. With the increase of the water content of the outer soil layer of the structure, the tensile stress inside the vault, the compressive stress inside the arch toe, the compressive stress inside the bottom of the side wall, the vertical deformation of the vault and the tensile area of the arch ring increase. When the water content of the outer soil layer of the structure is 10 % -20 % , the change of water content has a great influence on the stress of arch culvert and the deformation of arch ring. With the increase of the Poisson's ratio of the soil layer of the foundation or the soil layer outside the structure, the tensile stress inside the vault, the compressive stress inside the arch toe, the compressive stress inside the bottom of the side wall and the deformation of the arch ring decrease. With the increase of the thickness of the overburden layer, the tensile stress inside the vault, the compressive stress inside the arch toe, the compressive stress inside the bottom of the side wall and

收稿日期:2021-05-27

基金项目:2020年长沙市政府项目“红旗渠主渠结构加固试验段工法研究及实施”

作者简介:陈逵(1979—),男,长沙理工大学讲师,博士。

the vertical deformation of the vault increase linearly, and the tensile area of the arch ring increases. The analysis conclusions are in good agreement with the field test results of the Hongqi Canal test section, which can provide reference for the detection and identification of underground arch culvert structure.

**Key words:** arch culvert; bearing capacity of foundation; water content; deformation of arch ring; stress of arch ring; reversal point

随着城市化率提高,对城市排水管网的功能要求也随之提高。为了鉴定拱涵结构的安全,有必要研究不同土层参数对排水拱涵的受力影响。地基承载力及土体含水率是影响土层性质的关键参数,许多学者对其进行了研究。杨光华<sup>[1]</sup>提出了地基承载力计算方法,计算结果表明:地基压缩模量增大,地基承载力提高。王琼等人<sup>[2]</sup>通过试验研究了含水量对非饱和土压缩模量的影响,得到随含水量的增加压缩模量逐渐减小的结论。国内外学者对拱涵形式、土层环境及材料特性等受力影响因素进行了研究<sup>[3-7]</sup>。本研究拟以长沙市红旗渠项目试验段为背景,采用有限元模型模拟拱涵结构的受力状况,并将拱涵结构周围土层分为地基土层、结构外侧土层和覆土层 3 层,分析地基土层承载力和泊松比,结构外侧土层的含水量和泊松比及覆土层的厚度对拱涵结构受力的影响,以期对拱涵结构的缺陷分析及安全性鉴定提供参考依据。

1 工程概况

本研究假定计算模型中拱涵结构、周围土层分布如图 1 所示。

1.1 拱涵结构

红旗渠试验段始建于二十世纪五十年代,该试

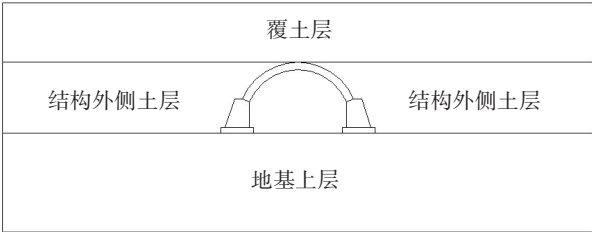


图 1 结构周围土层分布  
Fig.1 Distribution of soil layers around the structure

验段渠体以砖砌拱涵及浆砌片石侧墙形式为主。根据现场检测,该试验段拱涵净高 3.0 m,拱矢高 1.6 m,侧墙高 1.4 m,侧墙之间净宽 5.0 m,基础高度 0.3 m,宽度 1.7 m。根据回弹法检测得到,砖强度为 9 MPa,砖拱砂浆强度为 7.5 MPa,片石侧墙砂浆强度为 7.5 MPa。

1.2 地质条件

该场地内分布的土层主要有素填土、粉质黏土、中粗砂及卵石,基岩为白垩系泥质粉砂岩各风化带。该试验段拱涵结构周围土层分为地基土层、结构外侧土层及覆土层 3 层,其中,地基土层为中粗砂或卵石,结构外侧土层为粉质黏土,覆土层为素填土。各土层参数见表 1。

表 1 土层参数表

Table 1 Table of soil parameters

参数	天然重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	承载力/kPa
素填土	19.9	5	10	10	0.30	70
粉质黏土	20.0	6	27	14	0.28	170
中粗砂	20.0	22	2	24	0.25	190
卵石	21.5	42	2	38	0.20	320

2 有限元模拟

2.1 模型建立

采用 Midas/GTS 软件建立有限元模型<sup>[8]</sup>,土层采用莫尔-库伦模型,拱涵结构采用弹性模型。考虑

土层对拱涵结构最有效的影响范围,水平方向土层边界由拱结构中心向外延伸 3 倍洞距<sup>[9]</sup>,垂直方向土层边界按地勘报告中的土层厚度取值,有限元分析模型及网格划分如图 2 所示。

2.2 参数选取

有限元模型中的土层参数除计算变化参数外,

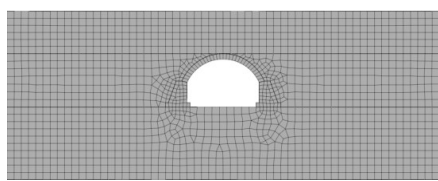


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

其他土层参数均按地勘报告中实测土层参数取值。

根据现场结构强度检测,依据《砌体结构设计规范》(GB50003—2011)确定拱涵结构参数,见表2。

活荷载取值为  $20 \text{ kN/m}^2$ , 荷载组合  $1.35 \times \text{自重} + 1.40 \times \text{活荷载}$ 。

表2 拱涵结构参数表

Table2 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	砖及砂浆	21	14 400	0.15
侧墙	片石及砂浆	26	5 650	0.20

### 3 地基土层参数影响分析

#### 3.1 地基土层承载力的影响

通过改变地基土层压缩模量,模拟地基土层承载力的变化。地基土层压缩模量范围为  $5 \sim 50 \text{ MPa}$ , 均分为10级逐级变化。分析不同地基土层承载力时的拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力、侧墙底部内侧压应力、拱顶竖向变形、拱趾横向变形及拱内圈反弯点位置的变化规律。计算结果如图3~5所示。

从图3可以看出,随着地基土层压缩模量增大,拱趾内侧压应力呈增大趋势,侧墙底部内侧压应力变化较小。拱趾内侧压应力在地基土层压缩模量处于  $5 \sim 15 \text{ MPa}$  时增长较快,在地基土层压缩模量处于  $15 \sim 30 \text{ MPa}$  时增速减缓,地基土层压缩模量大于  $30 \text{ MPa}$  之后趋于稳定;拱顶内侧拉应力整体呈减小趋势,在地基土层压缩模量在  $5 \sim 15 \text{ MPa}$  时减小速度较快,地基土层压缩模量  $15 \sim 30 \text{ MPa}$  时变化平缓,地基土层压缩模量大于  $30 \text{ MPa}$  之后趋于稳定。这表明:随着地基土层承载力增大,拱涵结构拱趾内侧压应力增大,拱顶内侧拉应力减小;地基土层承载力较小时,地基土层承载力变化对拱涵受力影响较大。

从图4可以看出,随着地基土层压缩模量增大,拱顶竖向变形逐渐减小,在地基土层压缩模量为

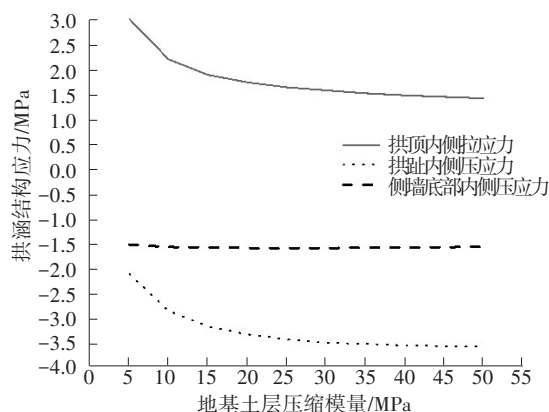


图3 拱涵结构应力-地基土层压缩模量曲线

Fig.3 Arch culvert structure stress - compression modulus of foundation soil curve

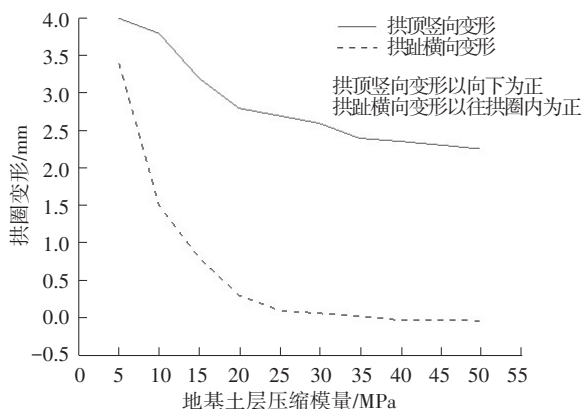


图4 拱圈变形-地基土层压缩模量曲线

Fig.4 Arch ring deformation-compression modulus of foundation soil curve

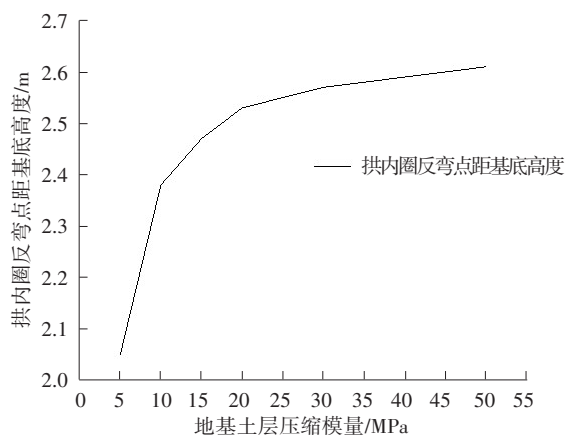


图5 拱内圈反弯点位置-地基土层压缩模量曲线

Fig.5 The position of the arch inner ring reversal point-compression modulus of the foundation soil curve

$5 \sim 20 \text{ MPa}$  时变化较快,地基土层压缩模量大于  $20 \text{ MPa}$  之后缓慢减小;拱趾横向变形在地基土层压缩模量为  $5 \sim 20 \text{ MPa}$  迅速减小,减幅为拱顶竖向变形的两倍,地基土层压缩模量大于  $20 \text{ MPa}$  之后逐渐稳定且

拱趾出现外扩趋势。表明:随着地基土层承载力增大,拱圈变形减小;当地基土层承载力较小时,地基土层承载力对拱涵变形影响较大,拱趾横向变形相比于拱顶竖向变形更快。

从图5可以看出,拱内圈反弯点位置随着地基土层压缩模量的增大不断上移,地基压缩模量处于5~20 MPa时上移速度较快,之后速度放缓。这表明:随着地基土层承载力增大,拱内圈反弯点位置上移,拱圈受拉区域减小,且当地基承载力较小时,随着地基土层承载力增大,拱圈受拉区域减小较快。

### 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,将其均分为10级逐级变化。分析地基土层泊松比取不同值时,拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力、侧墙底部内侧压应力、拱顶竖向变形、拱趾横向变形及拱内圈反弯点位置的变化规律。计算结果如图6~8所示。其中,拱顶竖向变形以向下为正,拱趾横向变形以指向拱圈内为正(如图7、10、13、16所示)。

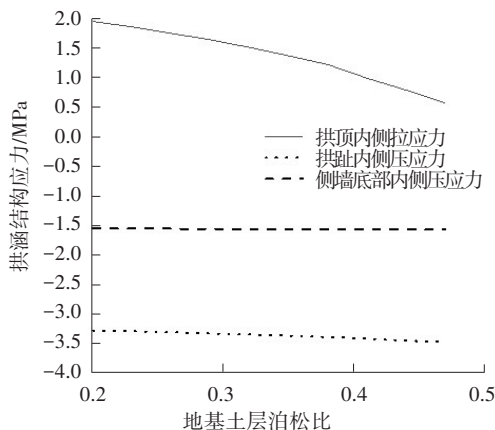


图6 拱涵结构应力-地基土层泊松比曲线

Fig.6 Arch culvert structure stress - the Poisson's ratio of foundation soil curve

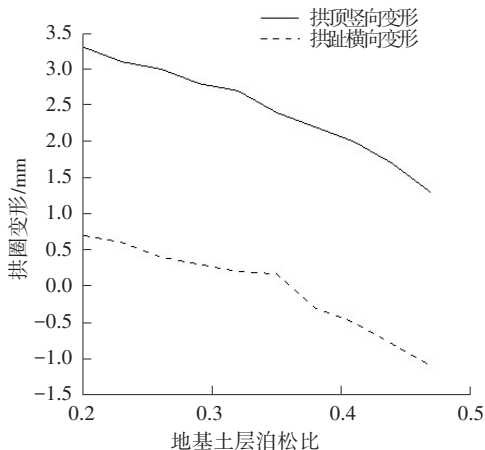


图7 拱圈变形-地基土层泊松比曲线

Fig.7 Arch ring deformation - the Poisson's ratio of foundation soil curve

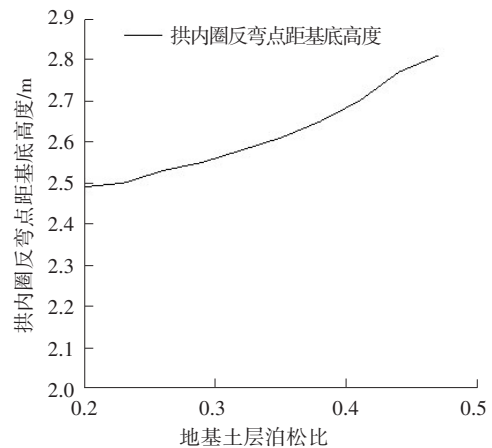


图8 拱内圈反弯点位置-地基土层泊松比曲线

Fig.8 The position of the arch inner ring reversal point - the Poisson's ratio of the foundation soil curve

从图6可以看出,随着地基土层泊松比增大,拱顶内侧拉应力呈线性减小趋势。随着地基土层泊松比增大,拱趾内侧压应力及侧墙底部内侧压应力的变化较小,但整体呈线性增大趋势。从图7~8可以看出,随着地基土层泊松比增大,拱顶竖向变形及拱趾横向变形均呈线性减小趋势,当地基土层泊松比超过0.35后,拱趾出现外扩现象,这是随着地基土层泊松比增大,地基土层横向变形增大所致。拱内圈反弯点位置也随着地基土层泊松比增大不断上移。

## 4 结构外侧土层参数的影响分析

### 4.1 结构外侧土层含水量的影响

通过改变结构外侧土层压缩模量,模拟结构外侧土层含水量的变化,结构外侧土层压缩模量变化范围为5~50 MPa,将其均分为10级逐级变化。分析结构外侧土层含水量不同时,拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力、侧墙底部内侧压应力、拱顶竖向变形、拱趾横向变形及拱内圈反弯点位置的变化规律。计算结果如图9~11所示。

从图9可以看出,随着结构外侧土层压缩模量增大,拱顶内侧拉应力及拱趾内侧压应力均减小,当结构外侧土层压缩模量为5~20 MPa时,其变化较快。随着结构外侧土层压缩模量增大,侧墙底部内侧压应力基本不变。表明:随着结构外侧土层含水量减小,拱顶内侧拉应力及拱趾内侧压应力均呈减小趋势。当结构外侧土层含水量为10%~20%<sup>[2]</sup>时,含水量变化对拱涵受力影响较大。



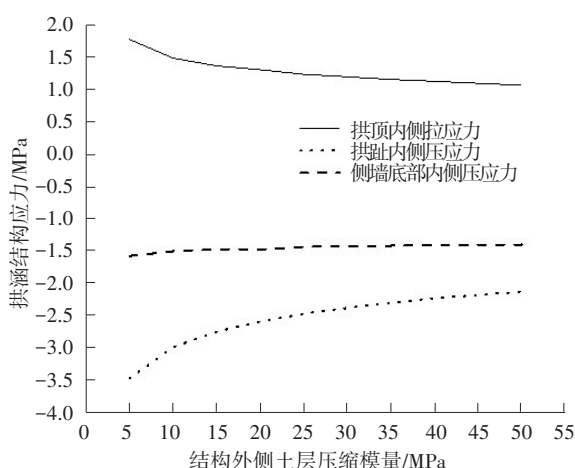


图9 拱涵结构应力-结构外侧土层压缩模量曲线

Fig.9 Arch culvert structure stress - compressive modulus of the outer soil layer of the structure curve

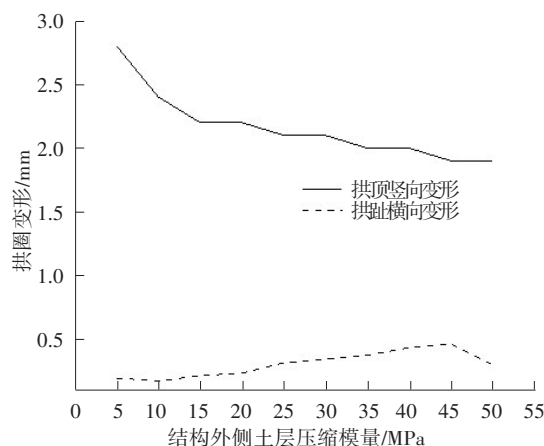


图10 拱圈位移-结构外侧土层压缩模量曲线

Fig.10 Arch ring displacement - compressive modulus of the outer soil layer of the structure curve

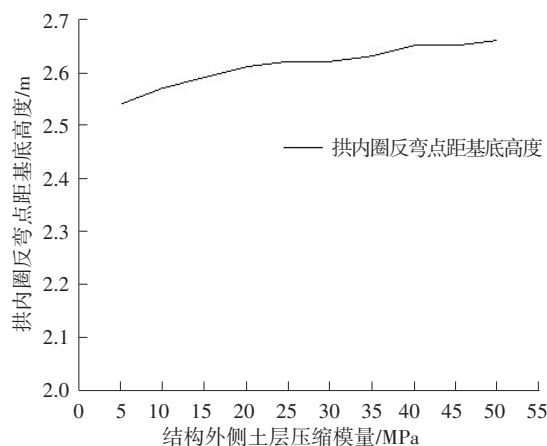


图11 拱内圈反弯点位置-结构外侧土层压缩模量曲线

Fig.11 The position of the arch inner ring reversal point - compression modulus of the outer soil layer of the structure curve

从图10可以看出,结构外侧土层压缩模量增大时,拱顶竖向变形逐渐减小,其当结构外侧土层压

缩模量为5~20 MPa时变化明显;随着结构外侧土层压缩模量增大,拱趾横向变形缓慢增大。表明:随着结构外侧土层含水量减小,拱趾横向变形基本不变,拱顶竖向变形减小,且当结构外侧土层含水量为10%~20%<sup>[2]</sup>时,含水量变化对拱圈变形影响较大。

从图11可以看出,拱内圈反弯点位置随着结构外侧土层压缩模量的增大而上移,上移幅度较小且变化缓慢。表明:随着结构外侧土含水量减小,拱内圈反弯点上移,拱圈受拉区域减小,但减小幅度较小。也表明结构外侧土层含水对拱涵结构受力较为不利。

#### 4.2 结构外侧土层泊松比的影响

仅改变结构外侧土层泊松比,变化范围为0.17~0.47,将其分为10级逐级变化。分析不同结构外侧土层泊松比时,拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力、侧墙底部内侧压应力、拱顶竖向变形、拱趾横向变形及拱内圈反弯点位置的变化规律。计算结果如图12~14所示。

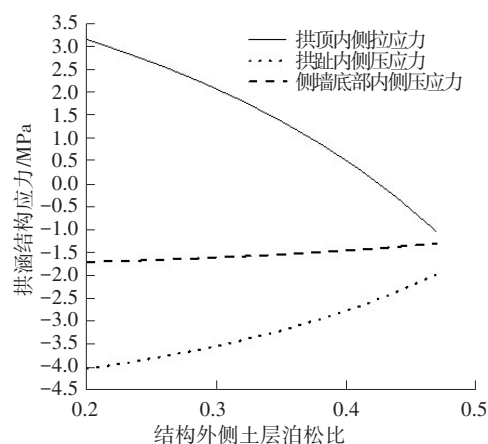


图12 拱涵结构应力-结构外侧土层泊松比曲线

Fig.12 Arch culvert structure stress - the Poisson's ratio of the outer soil layer of the structure curve

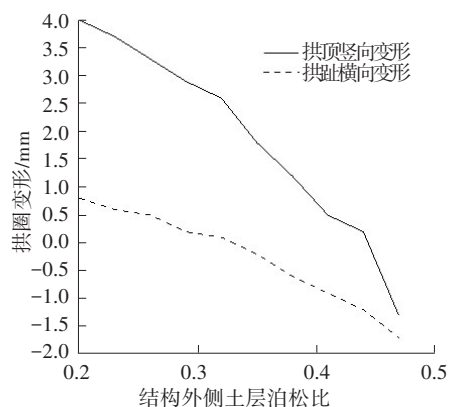


图13 拱圈位移-结构外侧土层泊松比曲线

Fig.13 Arch circle displacement - the Poisson's ratio of the outer soil layer of the structure curve

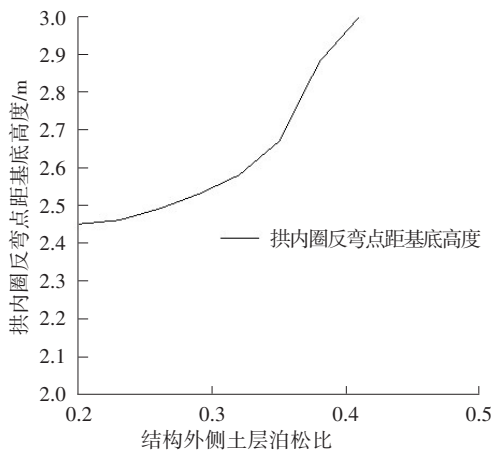


图14 拱内圈反弯点位置-结构外侧土层泊松比曲线

Fig.14 The position of the reverse bending point of the inner arch of the arch - the Poisson's ratio of the outer soil layer of the structure curve

从图12、14可以看出,随着结构外侧土层泊松比增大,拱顶内侧拉应力减小。结构外侧土层泊松比达到0.4时,拱内圈反弯点上移到极限,拱圈全截面受压,此时压应力随结构外侧土层泊松比继续增大而增大。随着结构外侧土层泊松比增大,拱趾内侧压应力减小,侧墙底部内侧压应力呈减小趋势,但减幅不大。从图13可以看出,随着结构外侧土层泊松比增大,拱顶竖向变形减小,结构外侧土层泊松比超过0.45时,拱顶有上凸趋势。随着结构外侧土层泊松比增大,拱趾横向变形减小,结构外侧土层泊松比超过0.35时,拱趾变形由正转负。这是由于随着泊松比增大,结构外侧土层侧压力系数增大<sup>[4]</sup>,影响了拱涵受力<sup>[10]</sup>,对拱涵结构产生挤压作用,使拱顶内侧产生了压应力。

## 5 覆土层厚度影响分析

仅改变覆土层厚度,变化范围为1~4 m,将其均分为10级逐级变化。分析覆土层厚度不同时,拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力、侧墙底部内侧压应力、拱顶竖向变形、拱趾横向变形及拱内圈反弯点位置的变化规律。计算结果如图15~17所示。

从图15可以看出,随着覆土层厚度增加,拱涵结构拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力及侧墙底部内侧压应力均呈线性增大趋势,前两者增幅较大,后者增幅较小。从图16可以看出,随着覆土层厚度增加,拱圈变形呈线性增大趋势,其中,拱顶竖向变

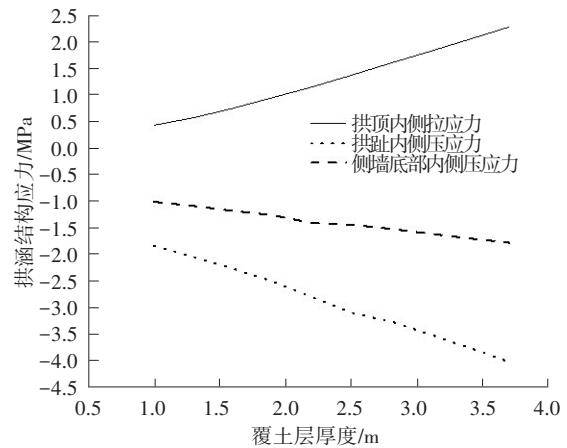


图15 拱涵结构应力-覆土层厚度曲线

Fig.15 Arch culvert structure stress - overburden thickness curve

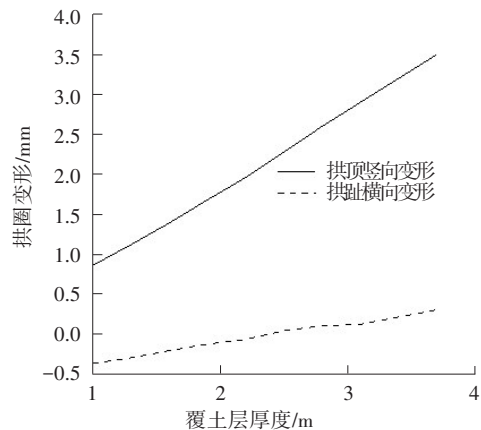


图16 拱圈变形-覆土层厚度曲线

Fig.16 Arch ring deformation - overburden thickness curve

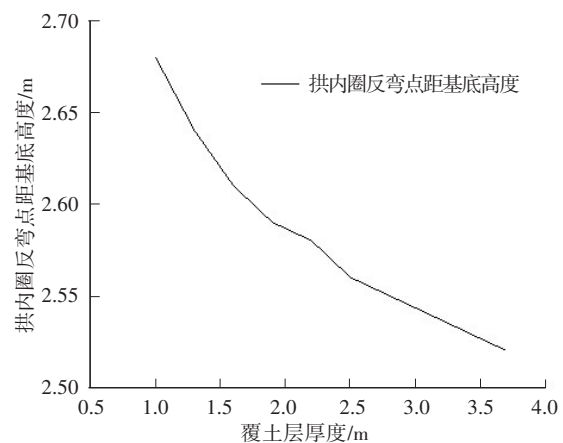


图17 拱内圈反弯点位置-覆土厚度曲线

Fig.17 Reversal point position of arch inner ring - overburden thickness curve

形增长较快,拱趾横向变形增长缓慢且变形方向由外扩转向内移,这变形对拱涵结构更为不利。从图17可以看出,随着覆土层厚度增加,拱内圈反弯

点不断下移,拱圈受拉区域增大,在覆土厚度小于2 m时,拱圈受拉区域的增速较快。

## 6 工程应用

以红旗渠试验段为工程背景,根据地勘报告对试验段不同区段各土层性质进行分析,并对已有渠道缺陷进行安全性鉴定。由地勘报告可知:该试验段附近共有4个钻孔点,钻孔位置如图18所示。图18中最左侧钻孔点地基土层为中粗砂层,覆土厚度在4个钻孔点中最浅为3 m,其余钻孔点均为卵石层。

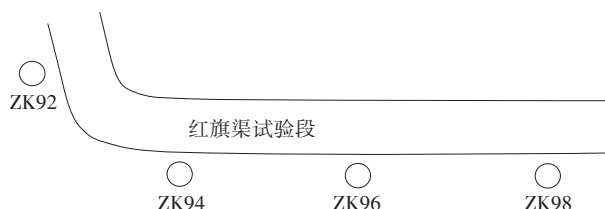


图18 地勘钻孔位置示意

Fig.18 Geological exploration drilling location

根据现场观察检测结果,该钻孔点附近渠段出现多处侧墙及拱圈渗漏现象,如图19~20所示。表明:该渠段拱涵结构外侧土层的含水量较大。



图19 侧墙渗漏

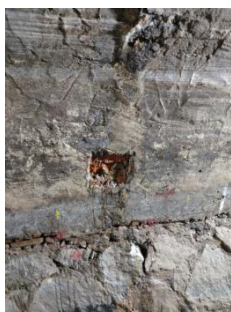


图20 拱圈渗漏

Fig.19 Leakage of side wall Fig.20 Leakage of arch ring

该渠段的地基土层承载力相对整个试验段的小,结构外侧土层含水量较大,覆土层厚度在整个试验段中相对较厚。根据本研究有限元模拟结果分析,该渠段拱顶内侧拉应力及拱趾内侧压应力较大,拱顶及拱趾易出现结构性缺陷,初步判断该渠段为红旗渠试验段中受力最不利的渠段。

现场检测发现,在该渠段拱顶存在纵向裂缝,宽度为0.8 mm,延伸长度为9.5 m,现场记录如图21~22所示。该渠段拱趾出现砂浆脱落及劣化现象,且拱趾存在局部内移现象,检测结果与有限元分析吻合。因此,排水砖石拱涵的设计施工,需充

分考虑地基土层性质及结构外侧土层性质对结构受力的影响。当地基及结构外侧土层性质不佳时,应选取合理结构尺寸及材料强度或对地下拱涵结构周围土体进行处理,改善土体力学性能,以提高结构安全性,有效降低事故风险<sup>[11]</sup>。



图21 拱顶裂缝



图22 砂浆脱落

Fig.21 Cracks in the vault Fig.22 The mortar falls off

## 7 结论

1) 随着地基土层承载力增大,拱涵结构拱趾内侧压应力增大,拱顶内侧拉应力减小。当地基土层承载力较小时,拱趾内侧压应力及拱顶内侧拉应力变化较快。随着地基土层承载力增大,拱圈变形减小,拱趾横向变形相比于拱顶竖向变形的变化更快。随着地基土层承载力增大,拱圈受拉区域减小。当地基土层承载力较小时,受拉区域减小较快。

2) 随着地基土层泊松比增大,拱顶内侧拉应力线性递减,拱趾内侧压应力缓慢增大,侧墙底部内侧压应力不变。同时,拱顶竖向变形及拱趾横向变形均呈线性减小趋势,拱圈受拉区域逐渐减小。

3) 随着结构外侧土层含水量减小,拱涵结构应力均呈减小趋势,其中拱顶内侧拉应力及拱趾内侧压应力在含水量为10%~20%时减小较快。随着结构外侧土层含水量减小,拱顶竖向变形减小且当含水量为10%~20%时,减幅较大,拱趾横向变形较小,拱圈受拉区域减少。

4) 随着结构外侧土层泊松比增大,拱顶内侧拉应力减小,结构外侧土层泊松比大于0.4时,拱圈全截面受压。随着结构外侧土层泊松比增大,拱趾内侧压应力减小,侧墙底部内侧压应力呈减小趋势,但减幅不大。拱圈变形减小,结构外侧土层泊松比较大时,结构外侧土层侧压力系数增大,对拱涵结构产生挤压作用,改变了拱圈变形方向。

5) 随着覆土层厚度增加,拱涵结构拱顶内侧拉应力、拱趾内侧压应力及侧墙底部内侧压应力均呈线性增大趋势,前两者增幅较大,后者增幅较小。随着覆土层厚度增加,拱圈变形呈线性增大趋势,其中,拱顶竖向变形增长较快,拱圈受拉区域增大。当覆土厚度小于2 m时,拱圈受拉区域变化相对较快。

6) 分析计算结果与红旗渠试验段现场检测结果较为吻合,表明:模筑法施工段是红旗渠试验段中拱涵结构受力最不利的渠段。

### 参考文献(References):

- [1] 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. (YANG Guanghua. Innovation and development of modern foundation design theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 1-18. (in Chinese))
- [2] 王琼, 邓艺, 韩坤立, 等. 含水量对非饱和土抗剪强度和压缩模量影响研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(1): 96-97. (WANG Qiong, DENG Yi, HAN Kunli, et al. Study on effect of water content on shear strength and compression modulus of unsaturated soil [J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(1): 96-97. (in Chinese))
- [3] 程奇云. 不同洞型条件下填土性质对涵顶土压力及土拱效应的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015. (CHENG Qiyun. Research on the soil pressure and soil arching effect with different culvert types and soil properties [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [4] 谢璞. 考虑土-结构相互作用的拱涵有限元计算分析研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2017, 26(1): 5-7. (XIE Pu. Element Analysis of arch culvert considering soil structure interaction [J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2017, 26(1): 5-7. (in Chinese))
- [5] 李军, 冯忠居, 王景奇, 等. 涵周土特性对高填方涵洞顶垂直土压力及变形特性影响的数值分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(9): 199-203. (LI Jun, FENG Zhongju, WANG Jingqi, et al. Numerical analysis of the influence of culvert soil characteristics on the vertical earth pressure and deformation characteristics of the culvert top of high fill culvert [J]. Highway and Transportation Technology (Applications Technical Edition), 2017, 13(9): 199-203. (in Chinese))
- [6] 杨锡武. 高填方涵洞土压力变化规律与影响因素的数值模拟研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(5): 42-47. (YANG Xiwu. Numerical simulation study on the law of earth pressures on the culvert beneath high embankment and the factors of effect on the earth pressure [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(5): 42-47. (in Chinese))
- [7] 王旭, 岑国平, 刘一通, 等. 上埋式拱涵应变分布特性及有限元分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(9): 81-84, 115. (WANG Xu, CEN Guoping, LIU Yitong, et al. Strain distribution properties of positive buried arch culvert and its finite element analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(9): 81-84, 115. (in Chinese))
- [8] 李治. Midas/GTS 在岩土工程中应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (LI Zhi. Midas/GTS application in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2013. (in Chinese))
- [9] 苏晓堃. 隧道开挖数值模拟的围岩边界取值范围研究[J]. 铁道工程学报, 2012(3): 64-68. (SU Xiaokun. Research on choosing boundary range of surrounding rock in numerical simulation of tunnel excavation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(3): 64-68. (in Chinese))
- [10] 柳厚祥, 庞昌秀. 侧压力系数对节理岩体隧道稳定性的影响[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 28-35. (LIU Houxiang, PANG Changxiu. Impact of lateral pressure coefficient on stability of tunnel in jointed rock mass [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 28-35. (in Chinese))
- [11] ZHANG Z H, LI W B, YANG J. Analysis of stochastic process to model safety risk in construction industry [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 27(2): 87-99.

(责任编辑: 欧兆虎; 校对: 罗容 李脉; 英文编辑: 陈璐)