

DOI: 10.7672/sgjs2024210114

# 土体参数对高填方公路拱涵受力特性的影响研究\*

朱建明

(中铁十一局集团第二工程有限公司,湖北 十堰 442000)

[摘要] 为研究不同土体参数条件下高填方公路拱涵受力特性,依托萍莲高速公路工程,通过数值模拟计算,分析不同地基土、上填土模量对拱涵周围土压力分布的影响及拱涵环向应力分布规律。研究表明,随着地基土模量的增大,涵顶土压力和涵侧土压力基本逐渐减小,涵洞基底反力逐渐增大,地基土模量的增大有利于拱涵结构的稳定;随着上填土模量的增大,涵顶土压力、涵洞基底反力及涵侧土压力基本逐渐减小,上填土模量的增大可减小拱涵结构受力;上填土模量对拱圈应力无明显影响。在拱涵施工过程中,建议地基土和上填土采用模量大的岩土体。

[关键词] 公路;拱涵;土压力;受力特性;数值模拟

[中图分类号] U449

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0114-05

## Study on the Influence of Soil Parameters on the Stress Characteristics of High Fill Highway Arch Culvert

ZHU Jianming

(China Railway 11th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Shiyan, Hubei 442000, China)

**Abstract:** In order to study the stress characteristics of high fill highway arch culverts under different soil parameter conditions, based on the Pinglian Expressway project, numerical simulation calculations were carried out to analyze the influence of different foundation soil and filling soil modulus on the distribution of soil pressure around the arch culvert and the distribution law of circumferential stress of the arch culvert. The research results show that as the modulus of the foundation soil increases, the soil pressure on the top and sides of the arch culvert gradually decreases, and the reaction force on the arch culvert base gradually increases. The increase in the modulus of the foundation soil is beneficial for the stability of the arch culvert structure. As the modulus of the filling soil increases, the soil pressure on the top and sides of the arch culvert, the reaction force on the arch culvert, and the soil pressure on the sides of the arch culvert gradually decrease. The increase in the modulus of the filling soil can reduce the stress on the arch culvert structure. The modulus of the filling soil has no significant effect on the stress of the arch ring. During the construction of arch culverts, it is recommended to use rock and soil with high modulus for the foundation soil and filling soil.

**Keywords:** roads; arch culverts; soil pressure; force characteristics; simulation

### 0 引言

随着山区高速公路的快速发展,其建设过程中不可避免地会遇到沟谷和河道,为确保高速公路线路符合设计要求,需在沟谷和河道区域修建涵洞,而高填方涵洞的修建对施工技术提出了更高的要求。为探求高填方涵洞受力特性,确保工程质量,

已有学者进行了多方面研究,如吴达烽<sup>[1]</sup>采用数值模拟方法,对不同高填方土体抗剪强度下坝下涵管结构受力变形影响进行了分析;刘海洋等<sup>[2]</sup>以4孔跨度9m钢波纹板拱涵为研究对象,分析不同拱跨、有无加强圈断面关键位置受力和变形特征;解卫江等<sup>[3]</sup>通过试验研究,对湿陷性黄土地区高填方路基大孔径钢波纹管涵洞施工过程中的受力特性进行了测试,研究认为波峰、波谷和波侧最大应变均出现在上半圆或下半圆45°处,且波峰和波谷相同角

\* 中铁十一局集团科研课题

[作者简介] 朱建明,高级工程师,E-mail:jihdsjshdjosd@yeah.net

[收稿日期] 2024-05-21

度的应变值相反;冯忠居等<sup>[4]</sup>采用离心模型试验与数值模拟相结合的方法,明确指出沟谷宽度为4~6倍拱涵净跨径时,涵顶土压力集中系数增幅较大;廖若超<sup>[5]</sup>以实际工程为例,分析了高填方拱涵设计要点,明确了拱涵实际受力状态;李晓旭等<sup>[6]</sup>依托山西省某拱涵工程,采用数值模拟方法对黄土路基涵洞土压力分布特性进行了研究,结果表明涵洞中心与两侧土体沉降明显不同,导致了土拱效应的产生,这是影响涵洞顶部垂直土应力变化的重要因素;刘强等<sup>[7]</sup>依托西安市科技二路综合管廊工程,研究下穿皂河箱涵结构施工过程中组合加固技术施工效果。以上学者对涵管结构受力变形进行了研究,并对涵洞土压力分布特性进行了分析。

基于此,本文参考已有研究成果,依托萍莲高速公路工程,通过数值模拟计算,对不同土体参数条件下高填方公路涵洞受力特性进行了研究,分析了不同地基土和上填土模量对拱涵周围土压力分布的影响及拱涵环向应力分布规律。

## 1 工程概况

萍莲高速公路 A4 标位于萍乡市湘东区白竺乡,路线总长 7.9km。本工程位于地质复杂山区,素有“地质博物馆”之称,填方普遍较高,涵洞数量较多,本研究选取最典型的高填方拱涵作为研究对象,拱涵所处区域分布了低山残丘,丘陵山区地形起伏大,在自然状态下,山体处于稳定状态。拱涵处山体表面土层为岩土混合物,表面土层下为强风化砂岩和中风化砂岩,岩土层厚度不均匀。在高速公路建设过程中,为确保公路施工质量,需对拱涵受力特性进行研究。

## 2 数值模拟分析

### 2.1 数值模型建立

根据拱涵周围地形分布及施工要求,设置拱涵高度为 13.4m、宽度为 14.6m、跨径为 9.6m,地基土厚度为 16.5m,拱涵区域沟谷宽度为 23m、高度为 52m、左右边坡坡度为 43°,上填土高度为 41m。考虑模型边界效应及拱涵结构的影响,设置模型长度为 143m、高度为 68.5m、厚度为 30m,如图 1 所示。沟谷两侧山体为中风化砂岩,拱涵地基土为强风化砂岩,拱涵上填土为岩土混合物,单位体积内风化岩石碎渣所占比例略大于素土。

### 2.2 模拟参数选取

拱涵结构采用钢筋混凝土制成,混凝土强度等级为 C35,分为拱圈、基础、台身部分,设置相同材料均为各向同性,涵洞地基、两侧边坡土体及回填土均采用遵循莫尔-库仑准则的弹塑性材料模拟,涵洞

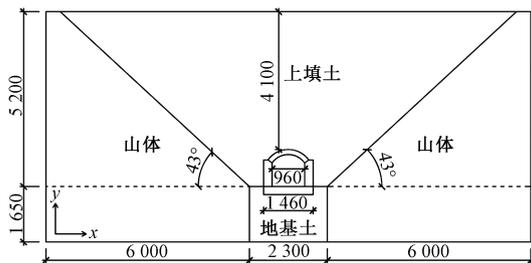


图 1 有限元模型(单位:cm)

Fig. 1 Finite element model (unit: cm)

结构采用弹性材料模拟,各材料物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

项目	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	黏聚力/内摩擦角/ kPa ( $^{\circ}$ )	泊松比
拱圈	26.2	32 100	—	0.21
基础	25.8	29 000	—	0.21
台身	25.4	29 800	—	0.21
回填土	17.2	42	13.6 30	0.35
边坡岩土体	24.8	27 200	175.0 34	0.30
地基土	22.6	480	10.0 32	0.32

本研究采用 ABAQUS 软件对模型进行模拟计算,在模型建立过程中,对模型边界进行约束,设置模型底部在各方向均为固定约束,顶部为自由加载,山体两侧在水平方向( $x$ 向)均为固定约束。边界约束设置完成后,按照岩土层界线对模型进行网格划分,并将涵洞地基土和涵洞结构网格加密,将山体和上填土网格稀疏,采用八结点实体单元对模型进行有限元离散,将该模型划分为 10 634 个单元、11 537 个结点。

### 2.3 模拟方案确定

当土体参数不同时,拱涵受到土体的压力不同。本研究设置了 5 种不同的地基土模量,分别为 430,480,530,580,640MPa,设置了 4 种不同的上填土模量,分别为 20,24,28,42MPa,通过地基土和上填土模量变化,对拱涵受力特性进行了研究。采用单因素法,当土体参数变化时,其他参数保持不变,研究过程中仅考虑填土荷载,未考虑公路荷载和车辆荷载。

## 3 拱涵周围土压力影响因素分析

### 3.1 地基土模量

当上填土高度为 41m 时,不同地基土模量下拱涵周围土压力分布云图如图 2 所示。由图 2 可知,随着地基土模量的增大,涵顶土压力逐渐减小,填土顶部压力范围逐渐扩大,涵洞基底反力逐渐增大。

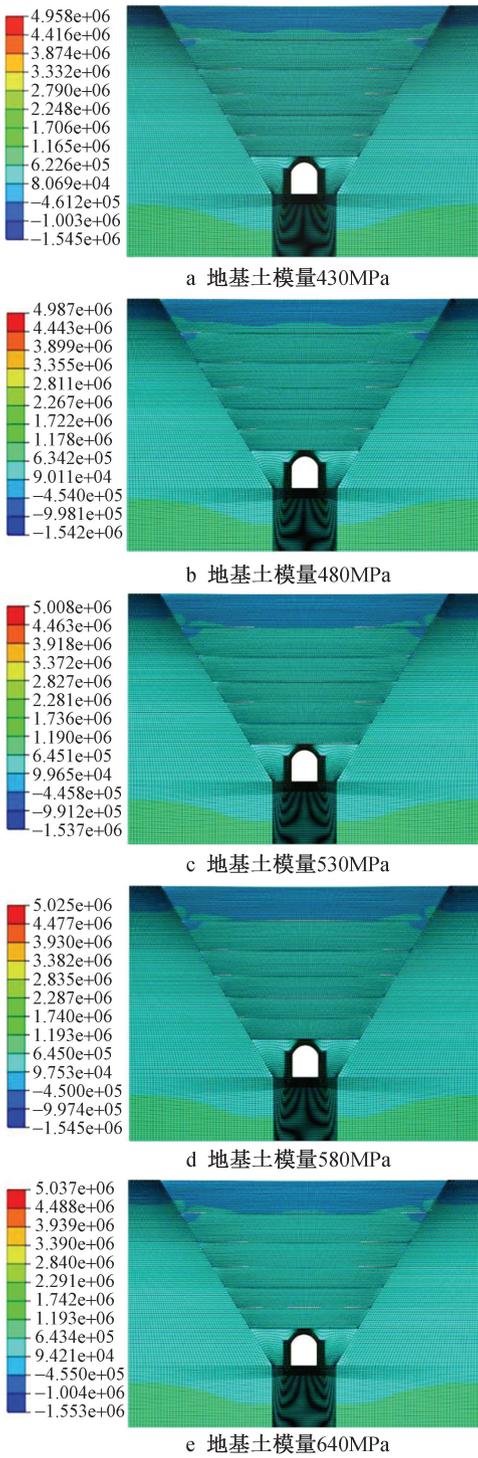


图 2 不同地基土模量下拱涵周围土压力分布云图(单位:MPa)

Fig. 2 The distribution cloud map of soil pressure around the archculvert under different foundation soil modulus (unit: MPa)

根据数值模拟结果,不同地基土模量下拱涵周围土压力变化曲线如图 3 所示。由图 3a 可知,随着地基土模量的增大,涵顶土压力逐渐减小;随着距拱涵中轴线距离的增大,涵顶土压力先减小后增

大。不同地基土模量下涵顶土压力最大值均出现在拱涵中轴线上,随着地基土模量的增大分别为 534. 99,529. 11,523. 52,516. 28,509. 67kPa;不同地基土模量下涵顶土压力最小值均出现在距拱涵中轴线 13. 8m 处,随着地基土模量的增大分别为 361. 02,355. 42,351. 47,347. 57,342. 59kPa。

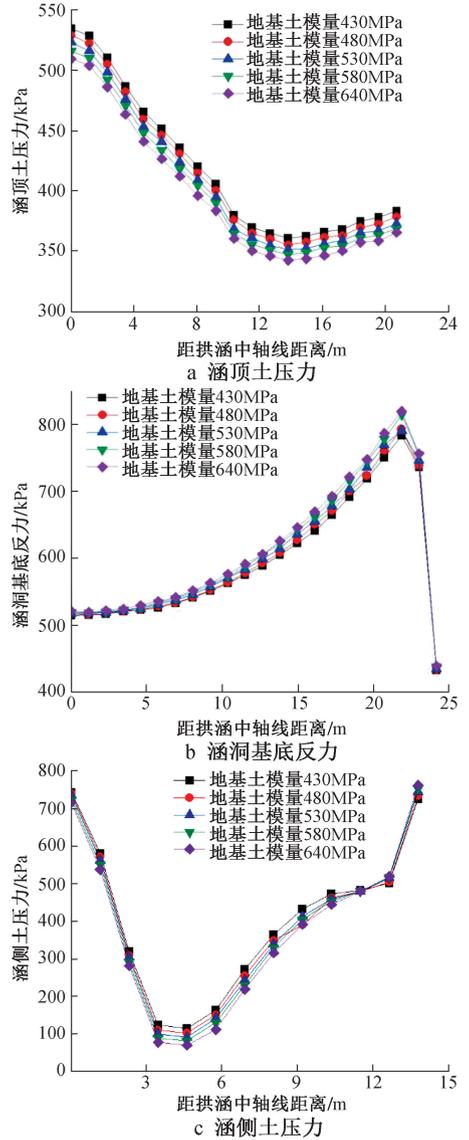


图 3 不同地基土模量下拱涵周围土压力变化曲线

Fig. 3 The variation curves of soil pressure around the arch culvert under different foundation soil modulus

由图 3b 可知,随着地基土模量的增大,涵洞基底反力逐渐增大;随着距拱涵中轴线距离的增大,涵洞基底反力先逐渐增大后快速减小。不同地基土模量下涵洞基底反力最大值均出现在距拱涵中轴线 21. 9m 处,随着地基土模量的增大分别为 782. 6,792. 51,790. 33,814. 26,819. 21kPa。当距拱

涵中轴线距离 $>21.9\text{m}$ 时,涵洞基底反力快速减小;当距拱涵中轴线距离达 $24.2\text{m}$ 时,涵洞基底反力达到最小值。

由图3c可知,随着地基土模量的增大,涵侧土压力基本逐渐减小;随着距拱涵中轴线距离的增大,涵侧土压力先减小后增大。不同地基土模量下涵侧土压力最小值出现在距拱涵中轴线 $4.6\text{m}$ 处,随着地基土模量的增大分别为 $114.44, 103.17, 91.67, 81.70, 70.21\text{kPa}$ 。当距拱涵中轴线距离 $>4.6\text{m}$ 时,涵侧土压力快速增大。

随着地基土模量的增大,地基强度增大,土体变形减小,地基对沉降的土体产生向上的抗力,减小涵顶和涵侧土压力,同时地基强度的增大分担了更多的土体压力,涵洞基底反力增大。因此,地基土模量的增大有利于拱涵结构的稳定,在拱涵施工过程中,地基土应采用模量大的岩土体。

### 3.2 上填土模量

当上填土高度为 $41\text{m}$ 时,不同上填土模量下拱涵周围土压力变化曲线如图4所示。由图4a可知,随着上填土模量的增大,涵顶土压力基本逐渐减小;随着距拱涵中轴线距离的增大,涵顶土压力先减小后增大再减小。不同上填土模量下涵顶土压力最大值均出现在拱涵中轴线上,随着上填土模量的增大分别为 $653.58, 646.08, 638.50, 556.08\text{kPa}$ 。当距拱涵中轴线距离为 $3.5\sim 4.5\text{m}$ 时,涵顶土压力基本逐渐增大;当距拱涵中轴线距离 $>4.5\text{m}$ 时,涵顶土压力基本逐渐减小。

由图4b可知,随着上填土模量的增大,涵洞基底反力逐渐减小;随着距拱涵中轴线距离的增大,不同上填土模量下涵洞基底反力均先逐渐增大后快速减小。不同上填土模量下涵洞基底反力最大值基本出现在距拱涵中轴线 $6.4\text{m}$ 附近区域,随着上填土模量的增大分别为 $963.99, 954.99, 941.33, 749.03\text{kPa}$ 。当距拱涵中轴线距离 $>6.4\text{m}$ 时,涵洞基底反力快速减小。

由图4c可知,随着上填土模量的增大,涵侧土压力逐渐减小;随着距拱涵中轴线距离的增大,不同上填土模量下涵侧土压力均先减小后增大。不同上填土模量下涵侧土压力最小值出现在距拱涵中轴线 $2.9\text{m}$ 处,随着上填土模量的增大分别为 $75.46, 52.48, 36.66, 16.40\text{kPa}$ 。当距拱涵中轴线距离 $>2.9\text{m}$ 时,涵侧土压力快速增大。

上填土模量越大,土体越不易发生变形,拱涵上方土体沉降减小,拱涵顶部和侧面受到的土压力减小,涵洞基底反力相应减小。因此,上填土模量

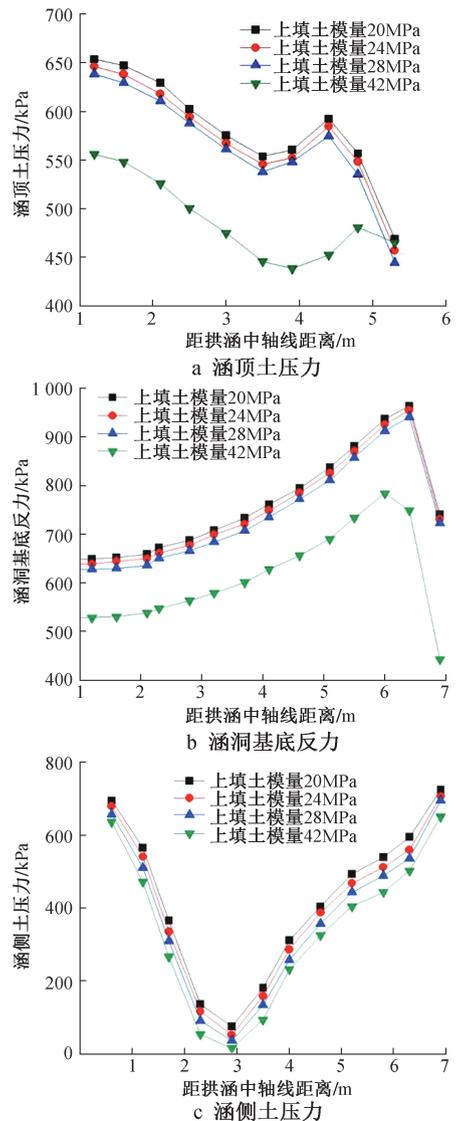


图4 不同上填土模量下拱涵周围土压力变化曲线  
Fig. 4 The variation curves of soil pressure around the arch culvert under different filling soil modulus

的增大有利于减小拱涵结构受力,在拱涵施工过程中,上填土应采用模量大的岩土体作为填充材料。

### 4 拱圈环向应力分布

当上填土高度为 $41\text{m}$ 时,不同上填土模量下拱圈环向应力变化曲线如图5所示。由图5可知,不同上填土模量下,随着拱圈长度的增加,内、外侧环向应力变化曲线几乎重合。拱圈外侧环向应力最大值出现在拱圈长度为 $0.8, 8.8\text{m}$ 区域,其值为 $2\ 669.14\sim 2\ 684.73\text{kPa}$ ;拱圈内侧环向应力最大值出现在拱圈长度为 $4.8\text{m}$ 区域,其值为 $5\ 273.49\sim 5\ 289.68\text{kPa}$ 。拱涵填土完成后,在土体作用下,拱脚对台身产生水平推力,由于土体模量对拱圈的影响集中在土体被动压力上,上填土对台身产生的水

平约束作用小,因此,不同上填土模量对拱圈应力无明显影响。

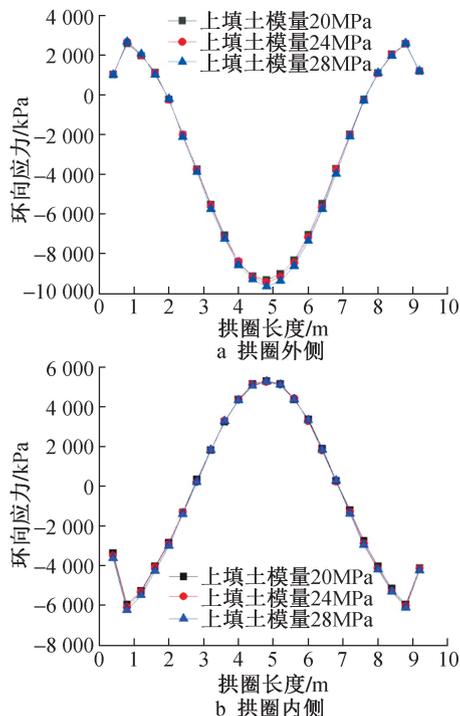


图5 不同上填土模量下拱圈环向应力变化曲线

Fig. 5 The variation curves of circumferential stress of arch ring under different filling soil modulus

## 5 结语

1)随着地基土模量的增大,涵顶土压力和涵侧土压力基本逐渐减小,涵洞基底反力逐渐增大。随着距拱涵中轴线距离的增大,涵顶土压力和涵侧土压力均先减小后增大,涵洞基底反力先增大后快速减小。

2)随着上填土模量的增大,涵顶土压力、涵洞基底反力及涵侧土压力基本逐渐减小。随着距拱涵中轴线距离的增大,涵顶土压力先减小后增大再减小,涵洞基底反力先增大后减小,涵侧土压力先减小后增大。

3)在不同上填土模量下,随着拱圈长度的增加,内、外侧环向应力变化曲线几乎重合,上填土模量对拱圈应力无明显影响。

4)地基土模量和上填土模量的变化可引起拱涵周围土压力变化,在拱涵施工过程中,建议地基土和上填土采用模量大的岩土体,由于模量大的岩

土体抗变形能力强,有利于减小拱涵结构受力,增强拱涵结构稳定性。

## 参考文献:

- [1] 吴达烽. 高填方土体抗剪强度参数对坝下涵管结构受力变形影响分析[J]. 水利技术监督, 2022(11): 183-186.  
WU D F. Analysis of influence for shear strength parameters of high fill soil on stress and deformation for culvert pipe structures under dams [J]. Technical supervision in water resources, 2022 (11): 183-186.
- [2] 刘海洋, 樊正, 陈韬, 等. 带加强圈的多跨钢波纹板拱涵施工力学行为试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(6): 155-160.  
LIU H Y, FAN Z, CHEN T, et al. Experimental study on mechanical behavior of multi-span steel corrugated plate arch culverts with reinforced rings during construction [J]. Construction technology, 2024, 53 (6): 155-160.
- [3] 解卫江, 梁凯, 胡滨, 等. 湿陷性黄土地区高填方大孔径钢波纹管涵洞受力分析[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 156-160.  
XIE W J, LIANG K, HU B, et al. Stress analysis of high fill large-diameter steel corrugated pipe culverts in collapsible loess areas [J]. Journal of China & foreign highway, 2022, 42 (3): 156-160.
- [4] 冯忠居, 王思琦, 王溪清, 等. 沟谷地形对高填方拱涵涵周土压力影响研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 119-130, 143.  
FENG Z J, WANG S Q, WANG X Q, et al. Study on influence of valley terrain on soil pressure around high fill arch culverts [J]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(1): 119-130, 143.
- [5] 廖若超. 高填方路基工程中拱涵结构受力研究[J]. 运输经理世界, 2022(3): 17-20.  
LIAO R C. Study on stress of arch culvert structure in high fill roadbed engineering [J]. Transport business China, 2022 (3): 17-20.
- [6] 李晓旭, 叶海林, 金俊喜, 等. 高速黄土路基涵洞土压力分布特征研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(8): 37-43.  
LI X X, YE H L, JIN J X, et al. Study on distribution characteristics of soil pressure in highway loess subgrade culverts [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2021, 38 (8): 37-43.
- [7] 刘强, 骆发江, 田勇, 等. 组合加固技术在综合管廊下穿大断面箱涵结构中的加固效果分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(1): 80-85.  
LIU Q, LUO F J, TIAN Y, et al. Analysis of reinforcement effect of combined reinforcement technology in large section box culvert structures under comprehensive pipe galleries [J]. Construction technology, 2023, 52 (1): 80-85.