

刚性地基与柔性地基下减载式涵洞受力特性

吴 森

中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年7月7日; 录用日期: 2022年7月18日; 发布日期: 2022年7月27日

摘 要

减载式涵洞通过改变涵-土体系应力的传递路径来减小涵顶土压力, 达到减载的效果, 但是地基的刚度对减载式涵洞不同位置受力特性的影响还未知。本文通过模型试验的方法对该新型减载式涵洞在柔性地基和刚性地基下的荷载传递规律进行了对比研究, 得到了地基的刚度对减载式涵洞的受力特性的影响。试验结果表明: 刚性地基与柔性地基下减载式涵洞涵顶土压力与涵侧水平土压力差别较小, 而涵底土压力差别较大。地基的刚度对减载式涵洞的涵顶土压力和涵侧水平土压力的影响相对较小, 但不是完全没有影响; 地基的刚度对涵底土压力影响较大。刚性地基下涵底中间土压力远大于柔性地基下涵底中间土压力, 且二者的差距随着填土高度的增加而逐渐增大。柔性地基下涵底侧边土压力明显大于刚性地基下涵底侧边土压力, 且二者的差距随着填土高度的增加而先增大后减小。

关键词

减载式涵洞, 地基刚度, 涵底土压力, 受力特性

Mechanical Characteristics of Load Reduction Culvert under Rigid Foundation and Flexible Foundation

Sen Wu

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Received: Jul. 7th, 2022; accepted: Jul. 18th, 2022; published: Jul. 27th, 2022

Abstract

The load reduction culvert reduces the soil pressure at the top of the culvert by changing the transfer path of the culvert-soil system to achieve the effect of load reduction, but the influence of the

stiffness of the foundation on the force characteristics of the load reduction culvert at different locations is unknown. In this paper, the load transfer law of the new load reduction culvert under flexible foundation and rigid foundation is studied by model test method, and the influence of the stiffness of the foundation on the force characteristics of the load reduction culvert is obtained. The test results show that the difference between the soil pressure at the top of the culvert and the horizontal soil pressure at the side of the culvert under the rigid foundation and the flexible foundation is small, while the difference between the soil pressure at the bottom of the culvert is large. The stiffness of foundation has relatively little influence on the earth pressure at the top and the horizontal earth pressure at the side of the culvert, but it is not completely irrelevant. The stiffness of foundation has great influence on the subsoil pressure of culvert. The earth pressure in the middle of the culvert under the rigid foundation is much larger than that of the soft foundation, and the difference between them increases with the increase of the fill height. The soil pressure at the bottom of the soft foundation is obviously greater than that at the bottom of the rigid foundation, and the difference between the two increases first and then decreases with the increase of the filling height.

Keywords

Load Reduction Culvert, Foundation Stiffness, Subsoil Pressure of Culvert, Mechanical Characteristics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国西部山区高速公路与铁路的修建,高填方涵洞的修建越来越普遍。高填方刚性涵洞作为排水、行人、生态保护的主要通道,其重要地位不言而喻。然而由于涵洞的刚度与上覆填土的刚度差别较大,涵洞上方会产生应力集中的现象,而传统设计方法往往低估了涵顶土压力的大小,因此涵洞顶部会出现开裂的现象。为此,许多学者通过在涵洞顶部铺设 EPS 泡沫板来减小涵顶土压力。

Al-Naddaf M 等[1]采用模型试验的方法证明了涵顶铺设 EPS 泡沫块使得涵顶上方产生了土拱效应,减小了涵顶的竖向土压力,而竖向土压力的大小与 EPS 板刚度的大小呈反比。谢永利等[2]利用数值模拟技术研究了 EPS 板的刚度对于涵顶土压力和涵底土体沉降的影响,并通过离心模型试验的方法探究了涵洞纵向铺设 EPS 板对高路方涵洞的沉降的影响。姜峰林[3]对一上部铺设 EPS 板的盖板涵进行涵顶土压力和 EPS 板的压缩变形量的监测,结果证明涵顶土压力明显减小,减载效果良好。郭婷婷[4]等以两座涵洞为试验工点,结合 ANSYS 有限元分析,研究了有无 EPS 板减荷措施和不同厚度的情况下涵顶竖向土压力和填土变形规律。刘静[5]在涵顶铺设 EPS 板,利用数值模拟及现场测试结果验证了上埋式涵洞涵顶处应力集中性状,测试得到土压力系数在 0.3~0.6 之间,并得出 EPS 板的厚度与密度应与填土高度相匹配。

而由于涵顶铺设 EPS 板使得涵洞上方土压力减小,但却造成了涵洞侧边土压力增大,从而使得侧墙承受的水平土压力增大,从而可能会造成涵洞侧墙发生开裂的现象。为此,一种新型减载式涵洞应运而生,如图 1 所示。

宋丁豹[6]采用模型试验和理论推导的方法对新型减载式涵洞进行了荷载传递规律的研究。陈保国[7]利用有限差分软件 FLAC(2D)对该新型减载式涵洞进行了数值模拟,研究了涵洞的受力特性。

现有工作已经研究了减载式涵洞的荷载传递规律,但对于减载式涵洞的受力特性却并未分析透彻,

尤其是涵洞地基的刚度对该新型减载式涵洞的受力特性的影响还未知。本文通过模型试验的方法对该新型减载式涵洞在柔性地基和刚性地基下的荷载传递规律进行了对比研究，得到了地基的刚度对减载式涵洞的受力特性的影响。

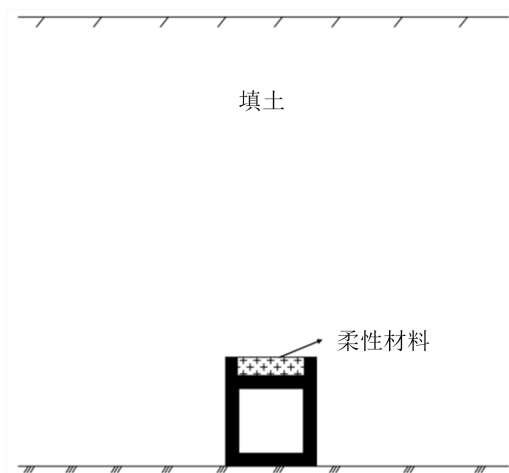


Figure 1. Structural diagram of load reduction culvert
图 1. 减载式涵洞构造示意图

2. 试验方案

该试验在长宽高均为 1.5 m 的模型箱内进行，模型箱内填土为中砂，取自武汉市。涵洞模型材料为钢材，涵顶上部铺设 EPS 板，减载式涵洞模型如图 2 所示。在地面铺设 2 cm 左右的沙层模拟刚性地基，在地面铺设 20 cm 厚的沙层模拟柔性地基。并分别在涵洞顶部，涵洞侧墙，涵洞底部铺设若干土压力盒用于监测涵洞各位置以及涵洞土压力的大小。由于涵洞宽度为 20 cm，而涵洞土体也会产生应力重分布规律，因此取到涵洞宽度的 1/4 倍内的涵洞土体来研究涵洞土压力。因此研究涵洞顶部土压力与涵洞底部土压力时分别取涵洞顶部和涵洞底部平面处距离涵洞中线 0~15 cm 内的土压力进行研究。试验现场照片如图 3 和图 4 所示。

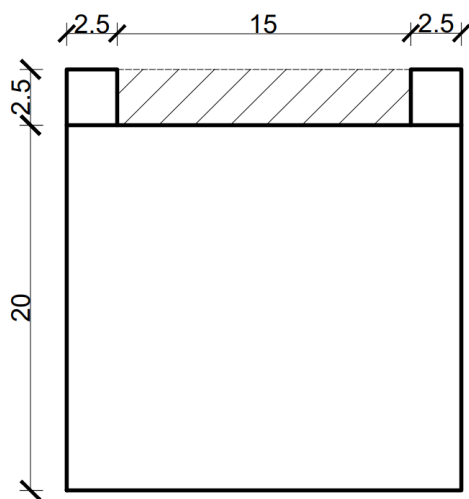


Figure 2. Geometric model size of load reduction culvert (unit: cm)
图 2. 减载式涵洞几何模型尺寸(单位: cm)

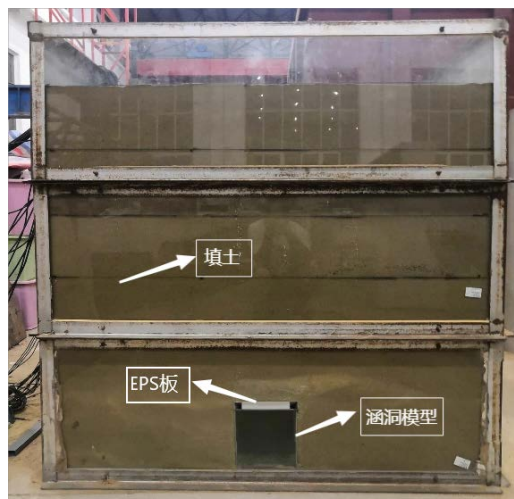


Figure 3. Model test of rigid foundation
图 3. 刚性地基模型试验



Figure 4. Model test of flexible foundation
图 4. 柔性地基模型试验

3. 试验结果分析

3.1. 涵洞不同位置土压力分布规律

3.1.1. 一层填土时涵洞不同位置土压力分布规律

第一层填土结束之后,涵顶土压力的分布规律如图 5 所示。在距离涵洞中线 0~6 cm 的位置,刚性地基下的涵顶土压力与柔性基地下的涵顶土压力大小相同。在距离涵洞中线 7.5~15 cm 的位置,刚性地基下的涵顶土压力略大于柔性基地下的涵顶土压力大小。刚性地基下的涵顶土压力与柔性基地下的涵顶土压力差距最大的位置发生在距离涵洞中线 13.5 cm 处,刚性地基下的涵顶土压力比柔性基地下的涵顶土压力增大了 25.9%。涵底土压力的分布规律如图 6 所示。在距离涵洞中线 0~4.5 cm 的位置,刚性地基下的涵底土压力明显大于柔性地基下的涵底土压力;在距离涵洞中线 6~9 cm 的位置,柔性地基下的涵底土压力大于刚性基地下的涵底土压力;在距离涵洞中线 10.5~15 cm 的位置,刚性地基下的涵底土压力大于

柔性地基下的涵底土压力。涵测水平土压力如图 7 所示。在距离减载块顶部 0~15.75 cm 的位置上, 刚性地基下的涵测水平土压力大于柔性地基下的涵测水平土压力; 在距离减载块顶部 15.75~22.50 cm 的位置上, 柔性地基下的涵测水平土压力大于刚性地基下的涵测水平土压力。

由此可得: 一层填土时刚性地基与柔性地基下涵顶土压力差别较大的位置为涵洞侧边; 一层填土时距离涵洞中线 0 cm 处和 9 cm 处刚性地基下的涵底土压力与柔性地基下的涵底土压力的差别较大, 地基的刚度对涵底土压力影响较大; 一层填土时刚性地基与柔性地基下涵侧水平土压力差别较小, 地基的刚度对涵侧水平土压力影响较小。

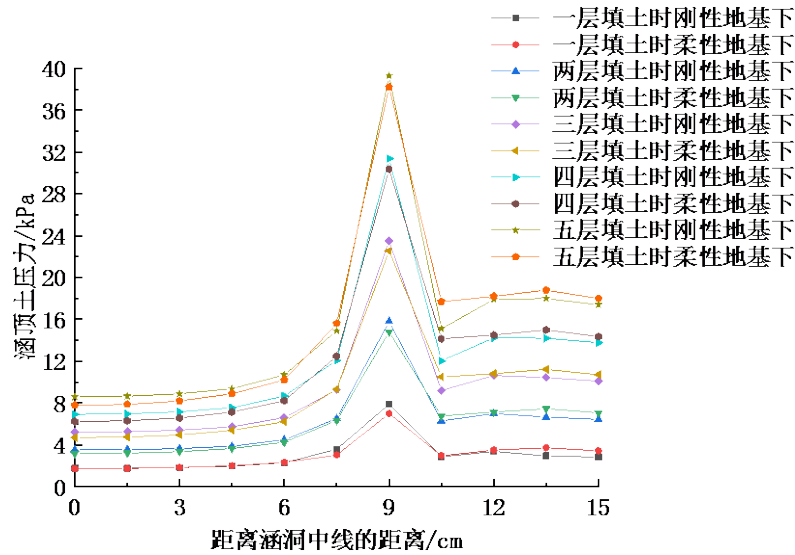


Figure 5. Distribution law of earth pressure on culvert top under rigid foundation and flexible foundation

图 5. 刚性地基下与柔性地基下的涵顶土压力分布规律

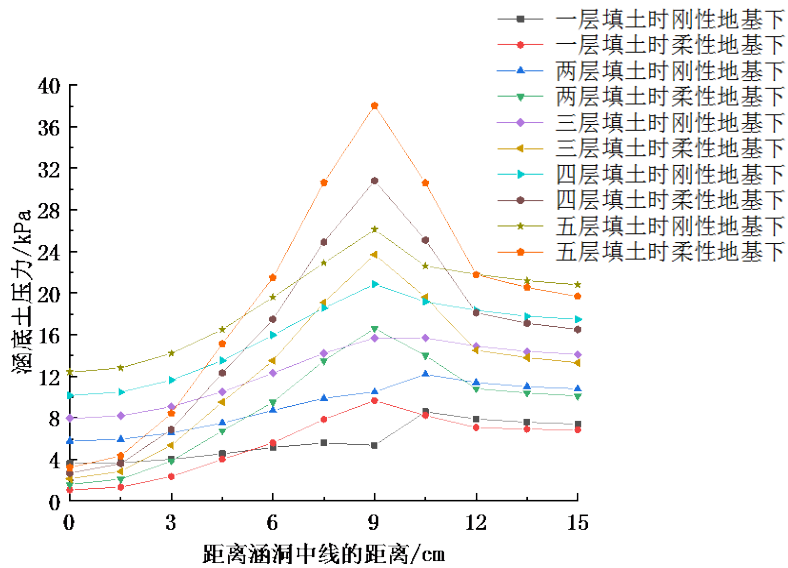


Figure 6. Distribution law of earth pressure at culvert bottom under rigid foundation and flexible foundation

图 6. 刚性地基下与柔性地基下的涵底土压力分布规律

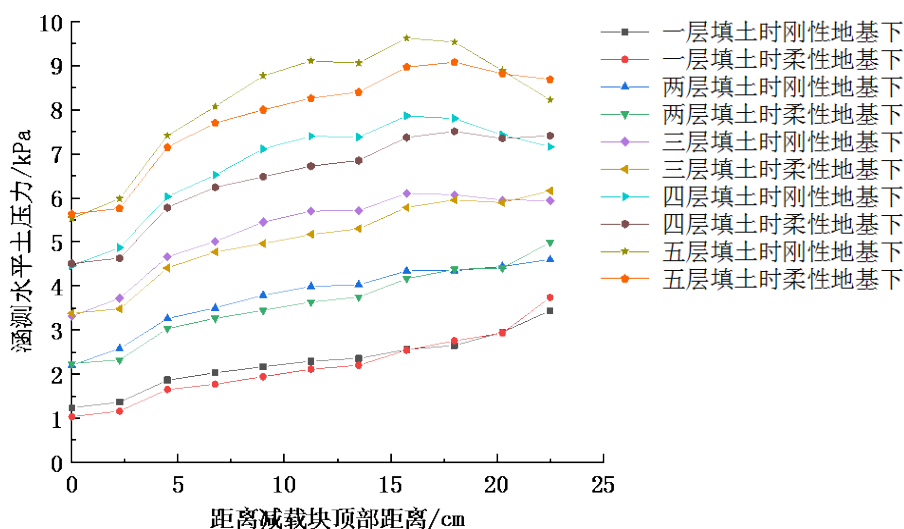


Figure 7. Distribution law of horizontal earth pressure measured by culvert
图 7. 涵洞水平土压力分布规律

3.1.2. 两层填土时涵洞不同位置土压力分布规律

第二层填土结束之后, 涵顶土压力的分布规律如图 5 所示。在距离涵洞中线 0~9 cm 时, 刚性地基下涵顶土压力略大于柔性地基下涵顶土压力; 在距离涵洞中线 10.5~15 cm 时, 柔性地基下涵顶土压力略大于刚性地基下涵顶土压力。涵顶土压力的分布规律如图 6 所示。在与涵洞中线的距离为 0~4.5 cm 的位置上, 刚性地基下的涵底土压力明显大于柔性地基下的涵底土压力; 在与涵洞中线的距离为 6~10.5 cm 的位置上, 柔性地基下的涵底土压力明显大于刚性地基下的涵底土压力; 在与涵洞中线的距离为 12~15 cm 的位置上, 刚性地基下的涵底土压力略大于柔性地基下的涵底土压力。涵顶土压力的分布规律如图 7 所示, 刚性地基下与柔性地基下的涵侧水平土压力差别不大。可以得出: 两层填土时地基刚度对涵顶土压力和涵侧水平土压力影响不大, 对涵底土压力影响较大。

3.1.3. 三、四、五层填土时涵洞不同位置土压力分布规律

第三、四、五层填土结束之后, 如图 5、图 6、图 7, 刚性地基下涵顶土压力与柔性地基下涵顶土压力差别不大; 刚性地基下与柔性地基下的涵底土压力差别较大; 刚性地基下涵侧水平土压力与柔性地基下涵侧水平土压力差别较小; 总体规律与第一层填土和第二层填土结束之后相似。

由此可得: 地基的刚度对减载式涵洞的涵顶土压力和涵侧水平土压力的影响相对较小, 但不是完全没有影响; 地基的刚度对涵底土压力影响较大。因此下文重点研究涵洞底部的受力特性, 而根据上图可知, 刚性地基下与柔性地基下在距离涵洞中线的距离为 0 cm (即涵底中间) 和 9 cm (即涵底侧边) 这两个位置上涵底土压力差别较大, 因此下文重点研究这两个位置上涵底土压力随着填土高度的变化规律。

3.2. 涵底土压力变化规律

3.2.1. 涵底中间土压力随填土高度的变化规律

如图 8, 在填土高度为 20 cm~100 cm 时, 刚性地基下涵底中间土压力远大于柔性地基下涵底中间土压力。填土高度为 20 cm 时, 刚性地基下涵底中间土压力为柔性地基下涵底中间土压力的 3.35 倍; 当填土高度增大到 100 cm 时, 刚性地基下涵底中间土压力为柔性地基下涵底中间土压力的 3.83 倍。可以看出, 刚性地基下与柔性地基下涵底中间土压力的差距随着填土高度的增加而逐渐增大。

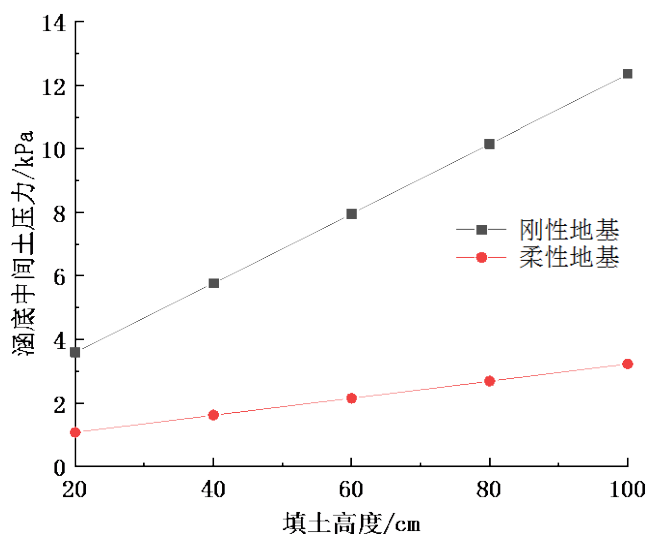


Figure 8. Variation law of soil pressure in the middle of culvert bottom with filling height

图 8. 涵底中间土压力随填土高度的变化规律

3.2.2. 涵底侧边土压力随填土高度的变化规律

如图 9，在填土高度为 20 cm~100 cm 时，柔性地基下涵底侧边土压力明显大于刚性地基下涵底侧边土压力。填土高度为 20 cm 时，柔性地基下涵底侧边土压力为刚性地基下涵底侧边土压力的 1.31 倍；填土高度为 40 cm 时，柔性地基下涵底侧边土压力为刚性地基下涵底侧边土压力的 1.59 倍；填土高度为 60 cm 时，柔性地基下涵底侧边土压力为刚性地基下涵底侧边土压力的 1.51 倍；填土高度为 80 cm 时，柔性地基下涵底侧边土压力为刚性地基下涵底侧边土压力的 1.48 倍；填土高度为 100 cm 时，柔性地基下涵底侧边土压力为刚性地基下涵底侧边土压力的 1.46 倍。可以看出，柔性地基下与刚性地基下涵底侧边土压力的差距随着填土高度的增加而先增大后减小。

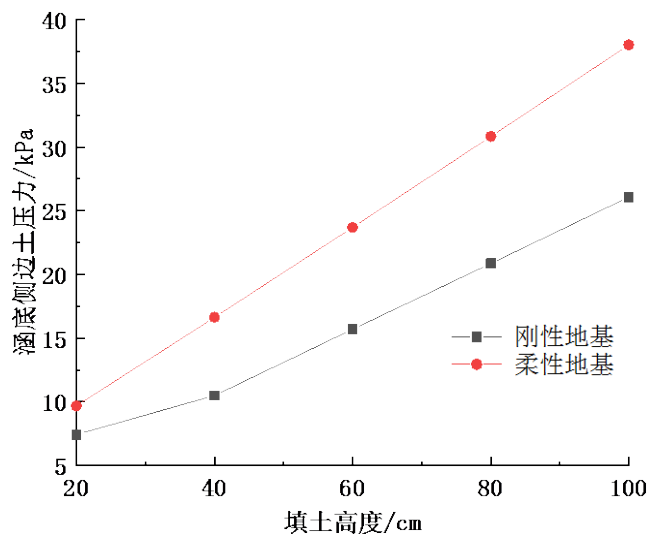


Figure 9. Variation law of earth pressure at the side of culvert bottom with filling height

图 9. 涵底侧边土压力随填土高度的变化规律

4. 结论

通过在刚性地基与柔性地基两种情况下对减载式涵洞进行模型试验, 得到两种情况下的受力特性, 比较二者的差别, 得到结论:

1) 刚性地基与柔性地基下减载式涵洞涵顶土压力与涵侧水平土压力差别较小, 而涵底土压力差别较大。地基的刚度对减载式涵洞的涵顶土压力和涵侧水平土压力的影响相对较小, 但不是完全没有影响; 地基的刚度对涵底土压力影响较大。

2) 刚性地基下涵底中间土压力远大于柔性地基下涵底中间土压力, 且二者的差距随着填土高度的增加而逐渐增大。柔性地基下涵底侧边土压力明显大于刚性地基下涵底侧边土压力, 且二者的差距随着填土高度的增加而先增大后减小。

参考文献

- [1] Al-Naddaf, M., Han, J. and Xu, C. (2019) Geofam Stiffness Effect on Surface Load Distribution on Buried Box Culverts Installed with the Induced Trench Method. *Geosynthetics Conference*, Houston, 2019, 323-333.
- [2] 谢永利, 冯忠居, 李少杰, 董芸秀, 郝宇萌, 张梦冉, 胡海波. 基于沉降控制的高路堤涵洞纵向调荷技术[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1790-1799.
- [3] 姜峰林. 高填方涵洞 EPS 板减荷技术应用及数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [4] 郭婷婷, 顾安全. 减荷措施下涵洞土压力与填土变形数值计算[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 12-16.
- [5] 刘静. 高填路堤涵洞土压力理论及减荷技术研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2004.
- [6] 宋丁豹, 蒲诃夫, 陈保国, 孟庆达. 高填方减载式刚性涵洞受力特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 823-830.
- [7] 陈保国, 宋丁豹, 王云辉, 周刘芳. 减载式刚性涵洞减载机理与受力特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 79-84.