

DOI: 10.11779/CJGE201910002

基于沉降控制的高路堤涵洞纵向调荷技术

谢永利¹, 冯忠居¹, 李少杰^{*1,2}, 董芸秀¹, 郝宇萌^{1,3}, 张梦冉¹, 胡海波¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040; 3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 710065)

摘要: 为解决高路堤涵洞纵向不均匀沉降所带来的病害问题, 基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷机理, 利用有限元软件研究涵洞填土与地基土特性以及不同 EPS 板参数对涵顶垂直土压力和涵底土体沉降的影响, 通过离心模型试验探讨涵洞纵向铺设 EPS 板对高路堤及涵洞的沉降的影响。通过数值模拟计算, 分析不同 EPS 板模量、铺设范围、厚度以及地基处理范围对高路堤涵洞纵向沉降差减少率的影响。研究结果表明: ①填土模量与泊松比对涵顶垂直土压力及涵底土体沉降的影响不显著; ②随着地基土模量与泊松比的增加, 涵底土体纵向沉降趋于均匀分布; ③数值仿真与离心模型试验成果得出, 沿涵洞纵向分层铺设 EPS 板时, 涵洞纵向调荷效果最佳; ④通过数值模拟计算得到了基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷设计计算方法。

关键词: 道路工程; 高路堤涵洞; 调荷技术; 数值模拟; 离心模型试验

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)10-1790-10

作者简介: 谢永利(1961—), 男, 山西芮城人, 工学博士, 教授, 博士研究生导师。E-mail: xieyl@263.net。

Longitudinal load adjustment technology for high embankment culverts based on settlement control

XIE Yong-li¹, FENG Zhong-ju¹, LI Shao-jie^{1,2}, DONG Yun-xiu¹, HAO Yu-meng^{1,3}, ZHANG Meng-ran¹, HU Hai-bo¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China;

3. China Second Highway Survey and Design Institute, Ltd., Wuhan 710065, China)

Abstract: In order to solve the disease problem caused by longitudinal uneven settlement of high embankment culverts, based on their vertical settlement control mechanism, the influences of the characteristics of culvert fill and foundation soil and different EPS plate parameters on the vertical soil pressures at culvert top and the soil settlements at culvert bottom are studied by means of the finite element software. The influences of longitudinal EPS plates on settlements of high embankment and culvert are studied through the centrifugal model tests. Through numerical simulation, the influences of different moduli, laying ranges, thicknesses of EPS planes and ranges of ground treatment on the reduction rate of longitudinal settlement difference of high embankment culverts are analyzed. The results show that: (1) The influences of modulus and Poisson's ratio of the fill on vertical soil pressures at culvert top and soil settlements at culvert bottom are not significant. (2) With the increase of modulus and Poisson's ratio of foundation soil, the longitudinal settlements of soil at culvert bottom tend to uniform distribution. (3) The results of numerical simulations and centrifugal model tests indicate that the longitudinal laying of EPS plates along the culvert leads to the best effectiveness of longitudinal load adjustment of culverts. (4) Through numerical simulation, the design method for high embankment culvert loads based on longitudinal settlement control is obtained.

Key words: road engineering; high embankment culvert; load adjustment technology; numerical simulation; centrifugal model test

0 引言

随着中国高等级公路在山区的建设发展, 建造的涵洞结构物越来越多, 然而由于高等级公路线形标准的要求和地形条件限制, 使得山区高等级公路的高填方路基及相应的高填方涵洞较多。由于公路涵洞高填荷载为“梯形荷载”, 容易使涵洞发生纵向发生不均匀沉降, 长时间作用后涵洞发生横向开裂, 严重时涵洞

丧失其使用功能。进一步而言, 与其他行业及低等级公路涵洞工程相比, 高速公路涵洞使用功能及标准要求存在明显差异, 除需满足常规涵洞结构承载能力外还需协调路堤顶部路面及涵身纵向差异沉降要求。因

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200231881224)

收稿日期: 2018-07-02

*通讯作者: (E-mail: 1181470168@qq.com)

此, 针对纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷技术广受业内人员重视, 它直接影响着高速公路的正常运营^[1-7]。

国内外对高路堤涵洞纵向不均匀沉降以及减荷措施进行了相关的研究。康佐等^[8-9]利用离心模型试验分析了涵洞发生病害的全过程, 探明了涵洞纵向不均匀沉降对涵洞结构破坏的机理。马强等^[10]通过利用有限元软件分析了不同减荷措施对涵顶的土压力集中系数的影响程度。后来通过对高填方涵洞采用加筋桥减载措施的现场试验, 研究了涵顶垂直土压力的变化规律, 探明了涵顶土压力的分布和集中系数随填土高度的变化规律^[11]。郑俊杰等^[12]在涵洞-填土-地基共同工作机制基础上, 分析了加筋的减载机理, 并探明了格栅下部填料的支撑作用对格栅受力与变形的影响。陈保国等^[13]以缓解涵顶土压力集中、减少涵洞结构为目的, 改进了涵洞结构形式, 提出一种新型减载式涵洞结构。杨锡武等^[14]通过模型试验证明了高填方涵洞加筋桥减载方法及加筋桥减载的可靠性。上述研究成果在高路堤涵洞不均匀沉降及减荷方面取得了较大进展, 但通过总结发现上述研究成果的不足主要表现在两个方面: ①有的成果探明了涵洞纵向不均匀沉降所带来的病害, 但未针对此问题提出有效的纵向调荷措施减少涵洞病害; ②有的成果提出了减荷措施, 但未考虑涵洞纵向不均匀沉降所带来的影响。因此, 有必要针对基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷技术展开研究。

笔者基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷机理, 利用有限元软件分析涵洞填土与地基土特性以及不同EPS板参数对涵顶垂直土压力和涵底土体沉降的影响。通过离心模型试验探讨涵洞纵向铺设EPS板对涵洞纵向沉降的影响。最后通过数值模拟计算, 分析不同EPS板模量、铺设范围、厚度以及地基处理范围对高路堤涵洞纵向沉降差减少率的影响, 并提出基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷设计计算方法。

1 基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷机理

如图1(a)所示, 由于高速公路路堤向两侧放坡的原因, 涵顶纵向填土为“梯形荷载”, 即沿涵洞纵断面方向将产生“中间荷载大两端荷载小”的不均匀受力情况, 相应的将引起涵洞中间沉降大两端沉降小($\delta_0 > \delta_1$)的不均匀沉降现象, 如果此现象严重将会导致涵洞发生横向开裂, 甚至影响高速公路正常使用。如图1(b)所示, 通过沿涵洞纵向不同位置合理铺设柔性填料(如EPS板)不仅可以使涵顶内土柱沉降大于外土柱沉降进而减少涵顶所受荷载, 还可以调节涵洞纵向所受荷载, 使其趋于均匀分布。通过与未铺设柔性填料时沿涵洞纵向“中间

沉降大两端沉降小”的现象对比, 涵洞顶部合理铺设柔性填料将使得涵洞沉降近似均匀($\delta_0 \approx \delta_1$), 减少高路堤涵洞的病害, 保证高速公路的正常运营。

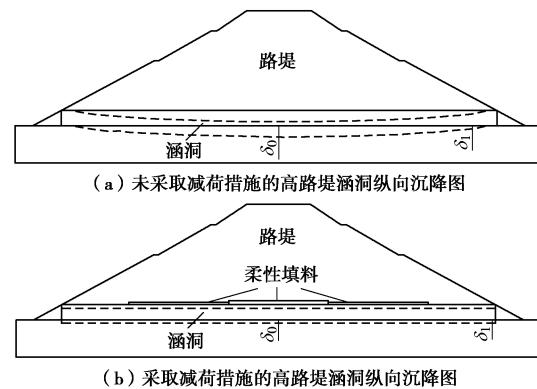


图1 高路堤涵洞纵向沉降图
Fig. 1 Vertical settlements of high embankment culvert

2 基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷影响因素数值仿真分析

2.1 模型的建立与参数的选取

选取有限元软件 MARC 来分析高路堤涵洞的受力与变形。通过建立高路堤涵洞三维计算模型分析涵洞-填土-地基共同作用机制。由于具有对称性, 取一半进行研究, 有限元模型单元划分如图2所示, 涵洞类型为4 m×4 m的箱涵, 纵向长度为82 m, 涵顶填土高度、路堤顶面的宽度分别为40, 13 m, 路堤的分段坡度分别为1:1.5, 1:1.75, 1:2。计算宽度和地基厚度分别取120, 40 m。土体、EPS板以及混凝土的本构模型分别选择Drucker-Prager屈服准则、Von Mises屈服准则、弹性模型。模型两侧仅约束水平位移, 模型底部同时约束水平和竖向位移。材料计算参数的选取如表1所示。

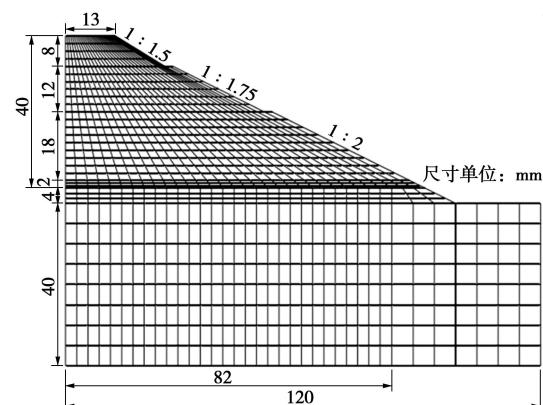


图2 模型网格划分图
Fig. 2 Partition of model grid

表1 材料计算参数

Table 1 Parameters of materials

材料	变形模量 E_0/kPa	弹性模量 E_d/kPa	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	泊松比 ν
填土	1.9×10^4	—	16	30	21	0.35
地基土	2.6×10^4	—	16	21	20	0.20
EPS板	—	1250	0.12	—	—	0.10
涵洞	—	3×10^7	25	3430	54	0.15

2.2 计算工况

计算具体工况如表2、3所示,计算内容包括以下几个方面:

(1)特定填土高度下箱涵随填土及地基土参数变化时的应力及沉降规律。

(2)特定填土高度下箱涵随涵顶铺设减荷材料厚度及参数变化时的应力及沉降规律。

(3)特定填土高度下箱涵随涵顶减荷材料铺设范围变化时的应力及沉降规律。

2.3 高路堤涵洞调荷影响因素的数值仿真成果分析

(1)填土模量和泊松比对涵顶受力及地基土沉降影响分析

不同填土模量作用下,涵顶垂直土压力以及涵底土体沉降沿涵洞纵向分布规律如图3、4所示。

从图3、4可以看出,随着距路堤中心距离的增大,涵顶垂直土压力与涵底土体沉降呈非线性减小的趋势,两者沿涵洞纵向分布不均匀,路堤中心与右侧土压力最大差值为780.72 kPa,涵底土体沉降最大差值为56.76 cm。这主要是因为受路堤两侧放坡的影响,沿涵长方向中心涵节填土高度最大,而沿路堤两侧放坡方向填土高度逐渐减小,在填土荷载作用下涵身中间涵节土压力及沉降量将大于两侧涵节,即沿涵身纵

向呈“V”字形沉降规律。随着填土模量的增大涵顶垂直土压力逐渐减小,当填土模量在15~30 MPa的变化过程中,路堤中心涵顶垂直土压力的减幅依次为0.64%,1.27%,1.90%,2.86%(以填土模量为10 MPa时为基准),其对涵顶垂直土压力的影响很小。此外,不同填土模量下的涵底土体沉降曲线几乎重合,说明填土模量对涵底土体沉降基本没有影响。

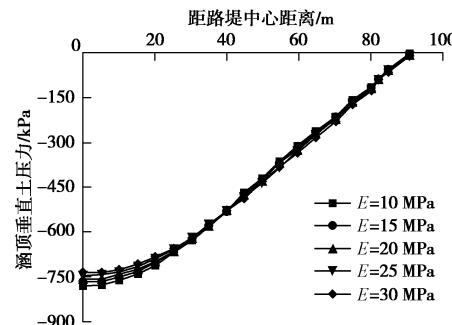


图3 填土模量对涵顶垂直土压力影响曲线

Fig. 3 Influences of soil modulus on vertical soil pressure at culvert top

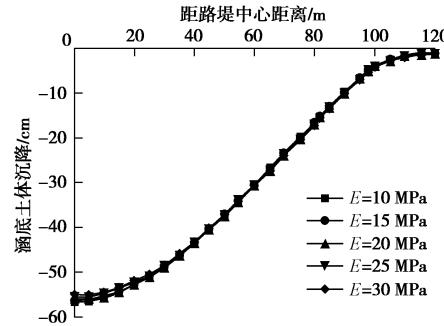


图4 填土模量对涵底土体沉降影响曲线

Fig. 4 Influences of fill modulus on soil settlement at culvert bottom

表2 填土及地基土参数对箱涵纵向土压力及沉降影响工况表

Table 2 Influences of parameters of fill and foundation soil on longitudinal soil pressure and settlement of box culverts

工况	变化因素		
	变形模量 E/MPa	泊松比 ν	
填土参数变化	模量变化	10, 15, 20, 25, 30	0.25
	泊松比变化	20	0.2, 0.25, 0.3, 0.35
地基土参数变化	模量变化	13, 22, 23, 25, 38	0.22
	泊松比变化	0.2, 0.22, 0.3	23

表3 调荷措施对箱涵纵向土压力及沉降影响工况表

Table 3 Influences of load adjustment measures on longitudinal soil pressure and settlement of box culverts

工况	变化因素		
	EPS 模量 E/MPa	EPS 铺设长度	EPS 铺设厚度
EPS 模量变化	0.5, 0.8, 1.25, 2.5, 5	$L_1=22.5 \text{ m}, L_2=59.5 \text{ m}$	
	2.5	$L_1=L_2=22.5 \text{ m}$	
	2.5	$L_1=22.5 \text{ m}, L_2=45 \text{ m}$	$h_1=80 \text{ cm}, h_2=20 \text{ cm}$
EPS 铺设长度变化	2.5	$L_1=22.5 \text{ m}, L_2=59.5 \text{ m}$	
	2.5	$L_1=30 \text{ m}, L_2=52 \text{ m}$	
	2.5	$L_1=L_2=L_3=22.5 \text{ m}$	
EPS 铺设厚度变化	2.5		$h_1=80 \text{ cm}, h_2=20 \text{ cm}$
	2.5	$L_1=22.5 \text{ m}, L_2=59.5 \text{ m}$	$h_1=80 \text{ cm}, h_2=40 \text{ cm}$
	2.5		$h_1=80 \text{ cm}, h_2=60 \text{ cm}$
	2.5		$h_1=80 \text{ cm}, h_2=60 \text{ cm}, h_3=40 \text{ cm}$

不同填土泊松比作用下, 涵顶垂直土压力以及涵底土体沉降沿涵洞纵向分布规律如图 5, 6 所示。

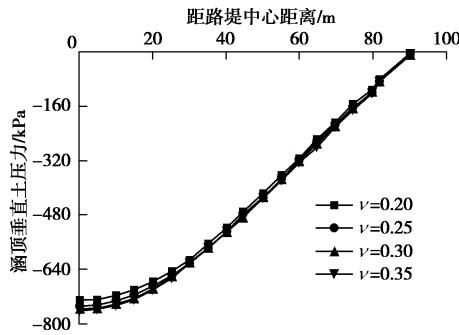


图 5 填土泊松比对涵顶垂直土压力影响曲线

Fig. 5 Influences of Poisson's ratio of fill on vertical soil pressure at culvert top

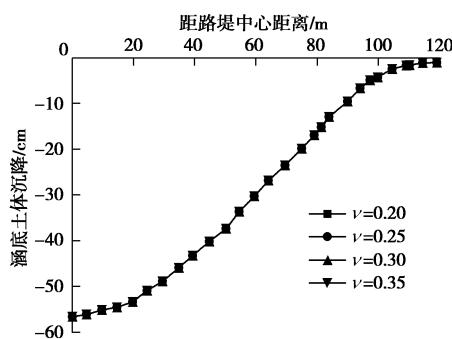


图 6 填土泊松比对涵底土体沉降影响曲线

Fig. 6 Influences of Poisson's ratio of fill on soil settlement at culvert bottom

从图 5, 6 可以看出, 涵顶垂直土压力与涵底土体沉降沿涵洞纵向的分布规律与上述情况一致。随着填土泊松比的增大涵顶垂直土压力逐渐增大, 当填土泊松比在 0.25~0.35 的变化过程中, 路堤中心涵顶垂直土压力的增幅依次为 2.31%, 3.63%, 4.29% (以填土泊松比为 0.2 时为基准), 填土的泊松比对涵顶垂直土压力也不大。另一方面, 填土泊松比变化时, 涵底土体沉降的基本不发生变化, 说明填土的泊松比对涵底土体沉降无显著影响。

(2) 地基土模量和泊松比对涵顶受力及地基土沉降影响分析

不同地基土模量作用下, 涵顶垂直土压力以及涵底土体沉降沿涵洞纵向分布规律如图 7, 8 所示。

从图 7, 8 可以看出, 随着地基土模量的增加, 涵顶垂直土压力及涵底土体沉降逐渐减小, 并且两者路堤中心与边缘处差值也降低。当地基土模量由 13 MPa 增至 38 MPa 的过程中, 路堤中心与边缘处的土压力差依次为 1812.69, 864.05, 803.62, 779.46, 755.29 kPa, 路堤中心与边缘处的沉降差依次为 152.52, 93.71, 82.74, 55.83 cm, 其中当地基土模量从 13 MPa 增至 22 MPa 时, 土压力差及沉降差急剧减少, 说明

地基土的模量取值较小时 (13 MPa), 会造成很大的涵底土体沉降而导致涵洞与土体之间的接触不连续, 临空部分的涵洞将独自承担上面传递下来的荷载, 不利于涵洞结构体的均匀受力。

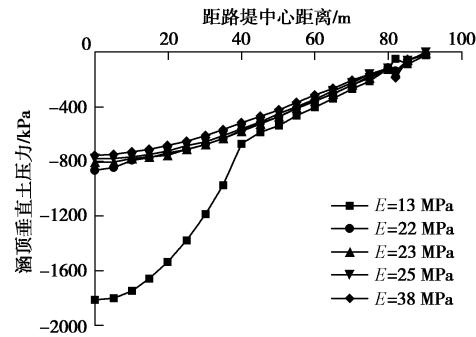


图 7 地基土模量对涵顶垂直土压力影响曲线

Fig. 7 Influences of modulus of foundation soil on vertical soil pressure at culvert top

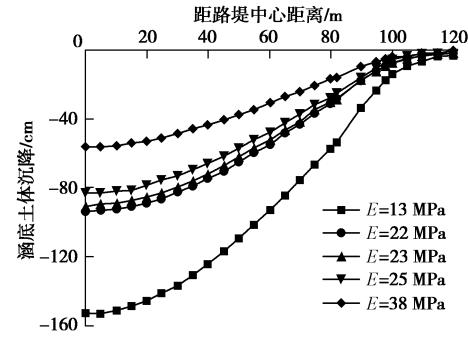


图 8 地基土模量对涵底土体沉降影响曲线

Fig. 8 Influences of soil modulus on soil settlement at culvert bottom

不同地基土泊松比作用下, 涵顶垂直土压力以及涵底土体沉降沿涵洞纵向分布规律如图 9, 10 所示。

从图 9, 10 可以看出, 随着地基土泊松比的增加, 涵顶垂直土压力变化较小, 涵底土体沉降逐渐减小, 同时土体沉降沿涵洞纵向也趋于均匀。当地基土的泊松比由 0.2 增至 0.3 的过程中, 涵底土体的沉降差依次为 57.26, 55.14, 49.22 cm, 说明采用较大泊松比的地基土有利于涵洞纵向均匀受力以及沉降。

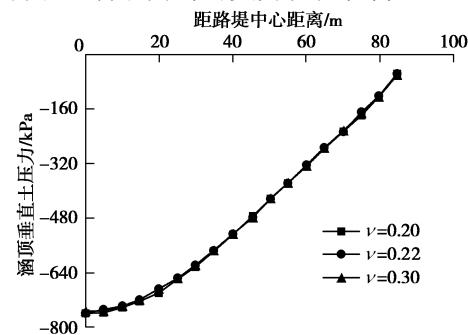


图 9 地基土泊松比对涵顶垂直土压力影响曲线

Fig. 9 Influences of Poisson's ratio on vertical soil pressure at culvert foundation

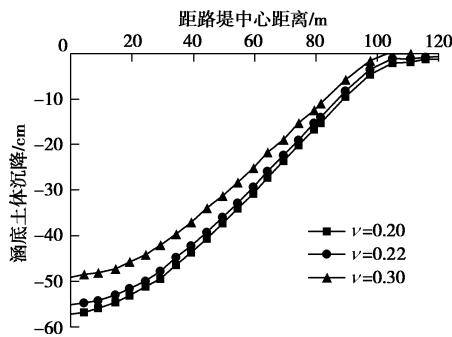


图 10 地基土泊松比对涵底土体沉降影响曲线

Fig. 10 Influences of Poisson ratio of foundation soil on soil settlement at culvert soil

(3) 调荷措施对涵顶受力及地基土沉降影响分析

a) EPS 模量和泊松比对涵顶受力及地基土沉降影响分析

不同 EPS 模量作用下, 涵顶垂直土压力以及涵底土体沉降沿涵洞纵向分布规律如图 11, 12 所示。

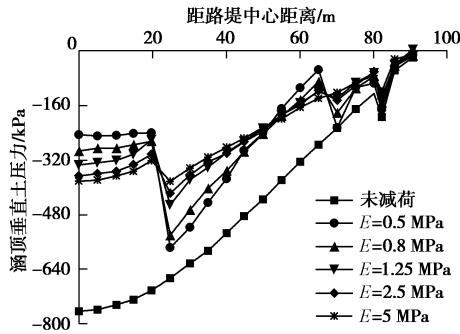


图 11 EPS 模量对涵顶垂直土压力影响曲线

Fig. 11 Influences of EPS modulus on vertical soil pressure at culvert top

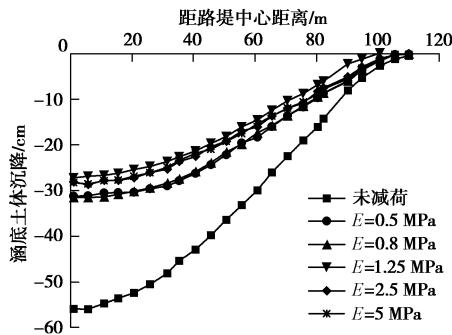


图 12 EPS 模量对涵底土体沉降影响曲线

Fig. 12 Influences of EPS modulus on soil settlement at culvert bottom

从图 11, 12 可以看出, 当沿涵顶纵向铺设 EPS 板后涵顶垂直土压力及涵底土体沉降大幅度减小并在 EPS 厚度变化处荷载发生了突变, 涵洞未减荷时在路堤中心处与边缘处的涵顶垂直土压力与沉降的差值分别为 762.60 kPa、55.91 cm, 铺设 EPS 板 ($E=0.5 \text{ MPa}$) 后涵顶垂直土压力与沉降的差值分别为 244.50 kPa,

31.10 cm, 两者沿涵洞纵向分布相比未减荷时趋于均匀, 说明铺设 EPS 板可以有效减弱涵洞纵向的不均匀沉降。另外, 当靠近路堤中心时 EPS 板模量越小涵洞减荷效果越好, 远离路堤中心时 EPS 板模量越大涵洞减荷效果相对较好。在路堤中心处, EPS 板模量在 $0.8\sim 5 \text{ MPa}$ 的变化过程中涵顶垂直土压力的增幅依次为 19.67%, 36.04%, 49.16%, 55.71% (以 EPS 板模量为 0.5 MPa 为基准), 在距路堤中心 25 m 处, EPS 板模量在 $0.8\sim 5 \text{ MPa}$ 的变化过程中涵顶垂直土压力的减幅依次为 6.48%, 21.75%, 27.77%, 33.80%。随着 EPS 板模量的增加涵底土体沉降先增大后减小, 以路堤中心为例, 当 EPS 板模量在 $0.8\sim 5 \text{ MPa}$ 的变化过程中涵底土体沉降的增幅依次为 3.16%, -12.63%, -8.42%, -7.37%。综上所述, 在沿涵顶纵向铺设 EPS 板时, 为达到涵洞纵向最优调荷的目的, 应选取合适的 EPS 板模量。

不同 EPS 泊松比作用下, 涵顶垂直土压力以及涵底土体沉降沿涵洞纵向分布规律如图 13, 14 所示。

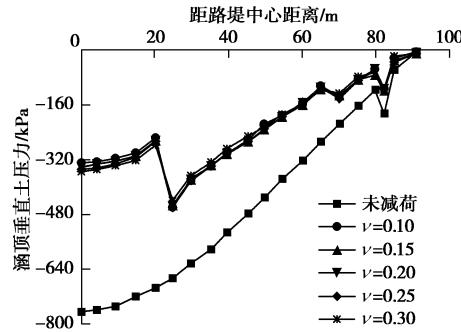


图 13 EPS 泊松比对涵顶垂直土压力影响曲线

Fig. 13 Influences of Poisson's ratio of EPS on vertical soil pressure at culvert top

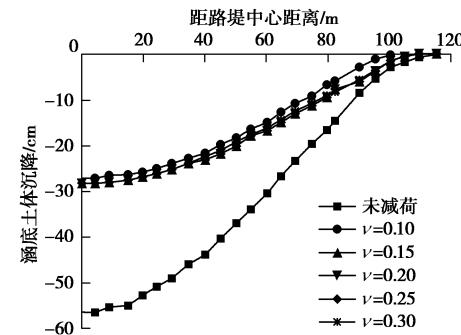


图 14 EPS 泊松比对涵底土体沉降影响曲线

Fig. 14 Influences of Poisson's ratio of EPS plate on soil settlement at culvert bottom

从图 13, 14 可以看出, 当沿涵顶纵向铺设 EPS 板后涵顶垂直土压力及涵底土体沉降大幅度减小且更加均匀分布。EPS 泊松比对两者的影响较小, 当 EPS 板泊松比在 $0.1\sim 0.3$ 的变化过程中, 在路堤中心处与

边缘处的涵顶垂直土压力的差值分别为 329.48, 343.16, 348.62, 349.636, 356.83 kPa, 涵底土体沉降的差值依次为 27.14, 28.12, 28.13, 28.14, 28.25 cm, 两者的差值变化量普遍较低, 说明 EPS 泊松比对涵洞纵向调荷的影响不明显, 因此在对涵洞进行纵向调荷时可以忽略 EPS 泊松比的影响。

b) EPS 铺设长度对涵顶受力及地基土沉降影响分析

不同 EPS 铺设长度作用下, 涵顶垂直土压力以及涵底土体沉降沿涵洞纵向分布规律如图 15, 16 所示。

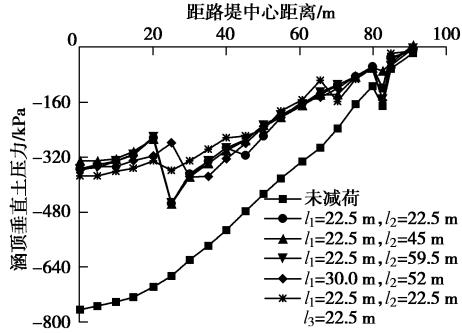


图 15 EPS 铺设长度对涵顶垂直土压力影响曲线

Fig. 15 Influences of laying length of EPS on vertical soil pressure at culvert top

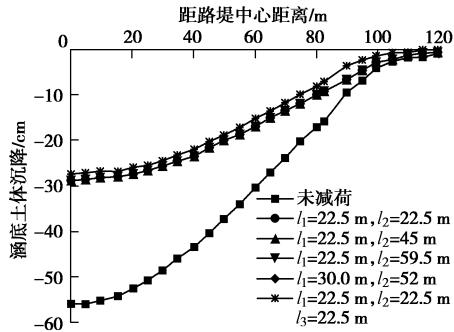


图 16 EPS 铺设长度对涵底土体沉降影响曲线

Fig. 16 Influences of laying length of EPS on soil settlement at culvert bottom

从图 15 可以看出, 当 EPS 板铺设长度 l_1 为 22.5 m, l_2 在 22.5~59.5 m 变化时, 靠近路堤中心处的涵洞垂直土压力变化微小, 但在 EPS 板厚度变化处会发生应力突变。当 EPS 铺设长度 $l_1=30\text{ m}$, $l_2=52\text{ m}$ 时, 路堤中心附近垂直土压力增大, 但在 EPS 板厚度变化处会发生应力突变较小, 涵顶垂直土压力沿涵洞纵向分布更加均匀。当 EPS 铺设长度 $l_1=22.5\text{ m}$, $l_2=22.5\text{ m}$, $l_3=22.5\text{ m}$ 时, 涵顶垂直土压力沿涵洞纵向分布最均匀。同时, 从图 16 中可以看出沿涵洞纵向等长铺设 EPS 板时涵底土体沉降趋于均匀。说明沿涵洞纵向等长铺设 EPS 板 ($l_1=22.5\text{ m}$, $l_2=22.5\text{ m}$, $l_3=22.5\text{ m}$) 时, 虽然涵洞局部土压力较大, 但是涵洞受力与变形分布

更加合理, 调荷效果最佳。

c) EPS 铺设厚度对涵顶受力及地基土沉降影响分析

不同 EPS 铺设厚度作用下, 涵顶垂直土压力以及涵底土体沉降沿涵洞纵向分布规律如图 17, 18 所示。

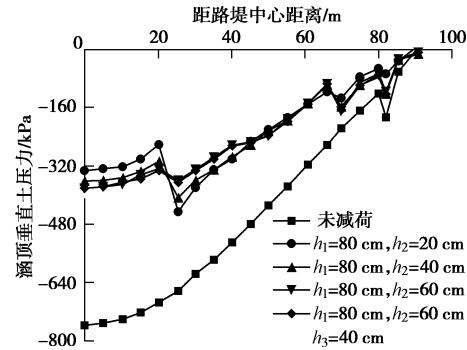


图 17 EPS 铺设厚度对涵顶垂直土压力影响曲线

Fig. 17 Influences of laying thickness of EPS on vertical soil pressure at culvert top

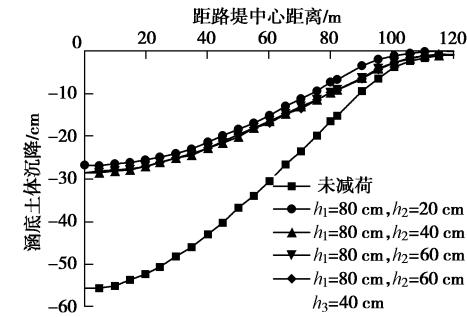


图 18 EPS 铺设厚度对涵底土体沉降影响曲线

Fig. 18 Influences of laying thickness of EPS on soil settlement at culvert bottom

从图 17 可以看出, 当靠近路堤中心处的铺设厚度 $h_1=80\text{ cm}$ 、相邻 EPS 板铺设厚度 h_2 在 20~60 cm 变化时, 路堤中心附近涵顶垂直土压力逐渐增大, 但在 EPS 板厚度变化处的应力突变减小, 涵洞垂直土压力分布较均匀。当沿涵洞纵向铺设不同厚度的 EPS 板 ($h_1=80\text{ cm}$, $h_2=60\text{ cm}$, $h_3=40\text{ cm}$) 时, 涵洞垂直土压力突变最小, 涵洞纵向受力更加均匀。从图 18 可以看出, 在涵洞纵向不同位置铺设不同厚度 EPS 板时, 涵底土体沉降变化不大, 但是相对于未减荷的涵洞涵底土体沉降明显较小且分布均匀。综上所述, 沿涵洞纵向铺设不同厚度 EPS 板 ($h_1=80\text{ cm}$, $h_2=60\text{ cm}$, $h_3=40\text{ cm}$) 时, 涵洞调荷效果最佳。

3 EPS 板对涵洞纵向调荷影响的离心模型试验分析

3.1 离心模型试验设计

(1) 离心模型试验相似律

表 4 高填路堤涵洞的离心试验相似率

Table 4 Centrifugal test similarity of high filled embankment culverts

参数	几何						填土材料			初始应力		涵洞结构反应	
	原型	h/L	D/L	h'/L	φ	$\gamma L/c$	E/c	v	$\gamma/\rho g$	d/L	σ_0/c	σ/c	ε
模型	h/L	D/L	h'/L	φ	$\gamma L/c$	E/c	v	$\gamma/\rho g$	d/L	σ_0/c	σ/c	ε	δ/h
是否相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似

高填方涵洞的离心试验相似关系主要取决于：①涵洞的结构尺寸及埋置深度等几何因素；②涵周土特性；③涵洞结构材料特性；④土体的初始应力状态。本次试验根据相似理论和量纲分析理论^[9]对试验模型的各物理量进行确定，将与原型的应力、应变和位移有关的物理量表示为

$$f\left(\frac{h}{L}, \frac{D}{L}, \frac{h'}{L}, \frac{\gamma L}{c}, \frac{E}{c}, v, \varphi, \frac{\gamma}{\rho g}, \frac{\sigma}{c}, \frac{\delta}{L}, \varepsilon\right) = 0 \quad (1)$$

式中 h 为涵洞的埋深，即涵顶至地面的距离； L 为涵节长度； D 为涵洞的宽度； γ 为材料重度； c ， φ 为材料的抗剪强度指标； E ， v 为涵洞材料及 EPS 减荷材料的弹性参数； σ ， ξ ， δ 为涵洞和土体材料的应力、应变、位移； h' 为涵洞的高度。

高填路堤涵洞的离心试验相似率见表 4。

表 4 中， d 为土粒直径。从表 4 可看出，模型与涵洞实际原型各物理量指标均相似，故采用离心模型试验模拟高填方涵洞问题在理论上是可行的。

(2) 涵洞模型设计

涵洞的材料采用实心硬木块，其比重与原型空心混凝土箱涵相同。试验中土体采用重塑黄土，经室内试验测得填土的干密度与含水率分别为 1.6 g/cm^3 ，16%，地基土的干密度与含水率分别为 1.6 g/cm^3 ，14%；选取 EPS 板作为减荷材料。原型箱涵的尺寸为 $7.5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ，下卧层厚度为 15 m ，实际模型与试验模型的比例尺为 $1:150$ ，模型如图 19 所示。在靠近玻璃板一侧的土体上划线量测土体沿涵洞纵向沉降，并用相机拍照得出涵洞周围土体的变形。首先，按照要求填筑涵洞地基，加速度设置与施加时间分别为 $150g$ 、 46.72 min （实际相当于 2 a ），保证土体充分固结，之后让模型静止一段时间使之恢复。然后相继在地基上放置涵洞、填筑路堤（试验工况中如有 EPS 板，应在涵顶放置 EPS 板）。上述步骤完成后再设置加速度为 $150g$ ，施加时间为 40 min （实际相当于 625 d ）。试验结束后测量涵底土划线至涵底的距离。

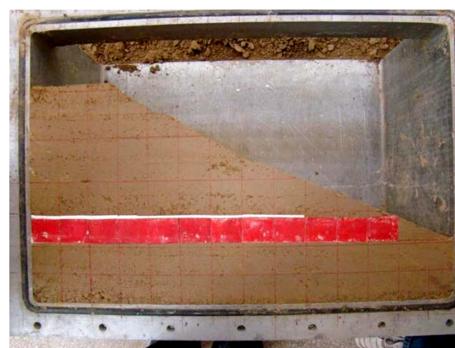
3.2 离心模型试验工况

本次试验主要研究沿涵洞纵向铺设 EPS 板对涵洞纵向沉降的影响，因此，试验方案主要包括两种工况①未铺设 EPS 板；②沿涵洞纵向铺设不同厚度及长度

的 EPS 板，具体试验工况如表 5 及图 20，21 所示。



(a) 未铺设EPS板



(b) 铺设EPS板后

图 19 试验模型图

Fig. 19 Test models

表 5 EPS 板尺寸

Table 5 Sizes of EPS plate

长度/(cm·m ⁻¹)	13.3/20	26.7/40
厚度/(cm·m ⁻¹)	0.5/80	0.3/40

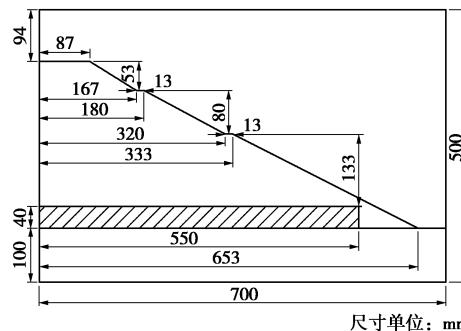


图 20 未加入 EPS 模型横断面图

Fig. 20 Cross section of model without EPS

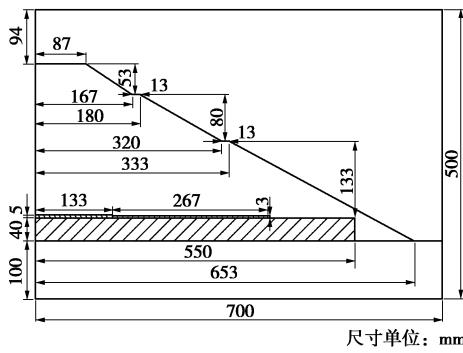


图 21 加入 EPS 模型横断面图

Fig. 21 Cross section of model with EPS

3.3 离心模型试验成果分析

未加入 EPS 板与铺设 EPS 板后涵底土体沉降变化规律如图 22, 23 所示。

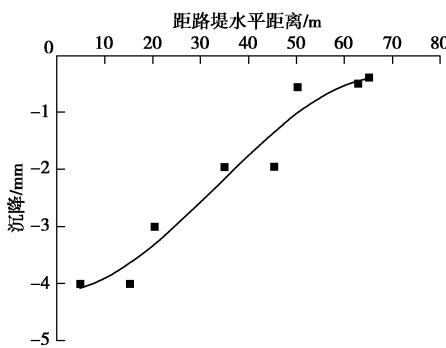


图 22 未加入 EPS 板时涵底土体沉降变化曲线

Fig. 22 Variation of soil settlement at culvert bottom without EPS plate

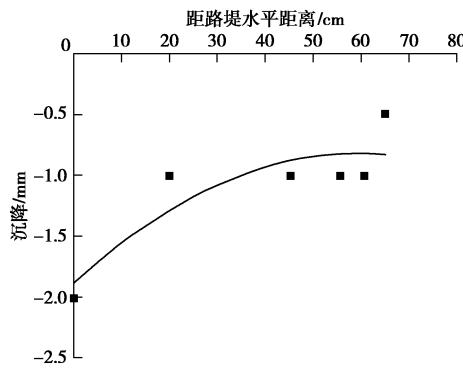


图 23 铺设 EPS 板后涵底土体沉降变化曲线

Fig. 23 Variation of soil settlement at bottom of EPS plate

从图 22 可以看出, 离心模型试验得出的涵底土体沉降变化规律与上述数值模拟分析得出的规律一致, 即路堤中心处涵底土体沉降最大, 边缘处沉降最小, 两者的沉降差为 4 mm 左右, 此时加速度为 150g, 所以实际沉降值为 60 cm, 涵底总体沉降沿涵洞纵向呈不均匀分布规律。由图 23 可以看出, 路堤中心与边缘处的沉降差为 1.5 mm, 换算到实体时为 22 cm, 与未

加入 EPS 相比较涵底土体沉降减少了 63.3%, 涵底沉降分布较均匀。说明通过沿涵洞纵向铺设不同长度及厚度的 EPS 板, 涵洞纵向调荷效果明显。

4 基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷设计方法

4.1 设计原则

通过上述研究可知, 基于纵向沉降控制的高路堤涵洞调荷设计方法是以涵底土体沉降趋于均匀为目的, 针对不同填土高度, 在涵顶铺设不同模量、长度及厚度的 EPS 板。在此基础上辅之以地基分段处理, 有效控制涵洞纵向沉降。

4.2 不同填土高度下涵洞铺设的 EPS 板模量选取分析

通过数值模拟分析可得, 不同填土高度作用下 EPS 板模量对高路堤涵洞纵向沉降差减少率的影响曲线, 如图 24 所示。

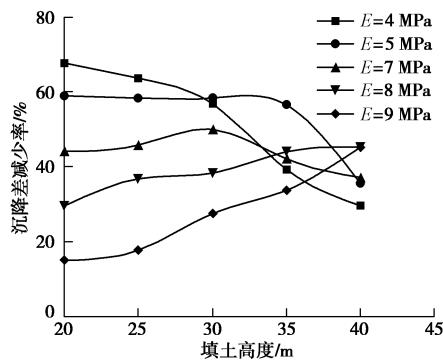


图 24 不同填土高度下 EPS 板模量对涵洞纵向沉降差减少率的影响曲线

Fig. 24 Influences of modulus of EPS plates on reduction rate of longitudinal settlement difference of culverts under different filling heights

从图 24 可以看出: 模量为 4, 5 MPa 的 EPS 板沉降差减少率随填土高度的增加逐渐减小; 模量为 7 MPa 的 EPS 板沉降差减少率随填土高度的增加先增大后减小; 模量为 8, 9 MPa 的 EPS 板沉降差减少率随填土高度的增加逐渐增加。针对上述情况为达到高路堤涵洞纵向调荷的最佳效果, 应采取如下措施: 当填土高度为 20~30 m 时, EPS 板模量宜取 4 MPa 左右; 当填土高度为 30~35 m 时, EPS 板模量宜取 5 MPa 左右; 当填土高度为 35~40 m 时, EPS 板模量宜取 8 MPa 左右。

4.3 不同填土高度下涵洞铺设 EPS 板方法分析

通过数值模拟分析可得, 不同填土高度作用下 EPS 板铺设方法对高路堤涵洞纵向沉降差减少率的影响曲线, 如图 25 所示。

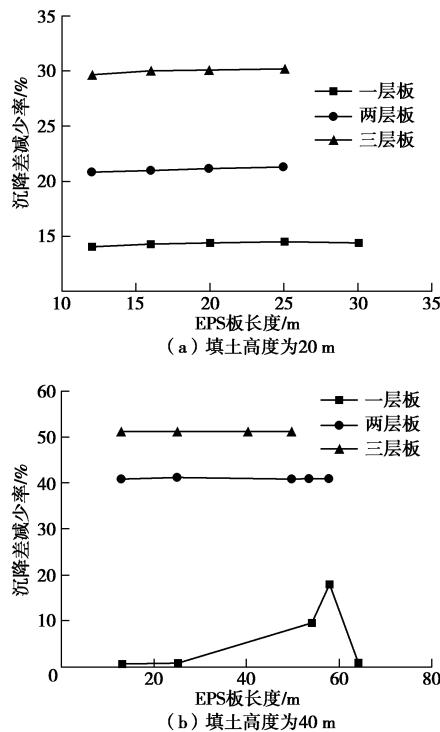


图 25 不同填土高度下 EPS 板铺设方法对涵洞纵向沉降差减少率的影响曲线

Fig. 25 Influences of laying methods of EPS plates on reduction rate of longitudinal settlement difference of culverts under different filling heights

从图 25 (a) 可以看出, 当填土高度为 20 m 时, 随着 EPS 板调荷长度的增加, 涵洞纵向沉降差减少率先增加后减小, 在 EPS 板调荷长度为 25 m 后发生转折, 说明合理的调荷范围为 0~25 m。随着铺设 EPS 板厚度的增加, 涵洞纵向沉降差减少率逐渐增加, 铺设三层板调荷效果最佳。从图 25 (b) 可以看出, 当填土高度为 40 m 时, 铺设一层 EPS 板调荷长度的转折点为 58 m, 铺设两层 EPS 板调荷长度的转折点为 50 m, 铺设一层 EPS 板调荷长度的转折点为 40 m, 因此铺设一、二、三层 EPS 板的合理调荷范围分别为 0~58, 0~50, 0~40 m。铺设三层 EPS 板对涵洞纵向沉降差减少率的影响最为显著。

4.4 不同地基范围下涵洞纵向调荷效果分析

为进一步地基处理对涵洞纵向调荷效果的影响, 通过数值模拟分析可得, 不同地基处理范围对高路堤涵洞纵向沉降差减少率的影响曲线, 如图 26 所示。

地基处理即对地基进行硬化处理, 使地基土模量增至 60 MPa。从图 26 (a), (b) 可以看出, 随着地基处理深度及宽度的增加, 涵洞纵向沉降差减少率逐渐增加, 但增加地基处理宽度对涵洞纵向沉降的调节比增加地基处理深度显著。当地基处理深度超过 8 m 后, 涵洞纵向沉降差减少率增幅趋于平稳; 当地基处理宽度超过 30 m 后涵洞纵向沉降差减少率增幅趋于

平稳。因此在铺设 EPS 板的基础上, 辅以地基处理时, 地基处理深度宜取 8 m 左右, 地基处理宽度宜取 30 m 左右。

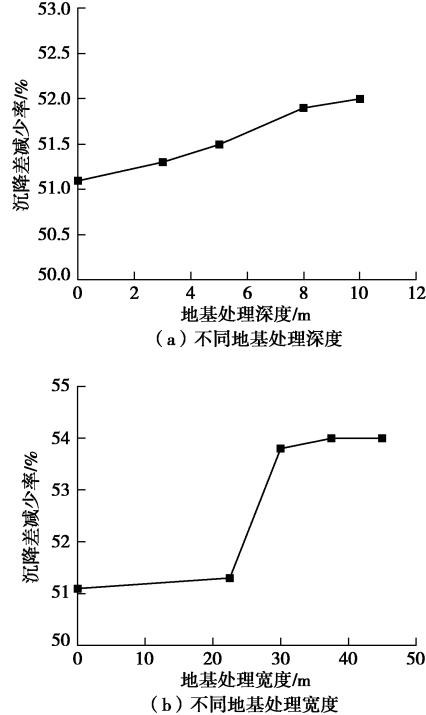


图 26 不同地基处理范围对涵洞纵向沉降差减少率的影响曲线

Fig. 26 Influences of different foundation treatment ranges on reduction rate of longitudinal settlement difference of culverts

5 结 论

(1) 通过数值仿真计算, 沿涵洞纵向铺设等长 EPS 板、不同厚度 EPS 板时, 虽然涵洞局部土压力较大, 但是涵洞受力与变形分布更加合理。证明通过在涵顶一定范围内分层铺设 EPS 板来进行调荷是可行的。

(2) 离心模型试验得出的涵底土体沉降变化规律与数值模拟分析得出的规律一致。通过沿涵洞纵向铺设不同长度及厚度的 EPS 板, 涵洞纵向调荷效果显著。进一步验证了通过在涵顶一定范围内分层铺设 EPS 板来进行调荷的可行性。

(3) 通过数值模拟计算得出的不同 EPS 板模量、铺设范围、厚度以及地基处理范围对高路堤涵洞纵向沉降差减少率的影响, 提出以下设计方法:

a) 当填土高度为 20~30 m 时, EPS 板模量宜取 4 MPa 左右; 当填土高度为 30~35 m 时, EPS 板模量宜取 5 MPa 左右; 当填土高度为 35~40 m 时, EPS 板模量宜取 8 MPa 左右。

b) 当填土高度为 20 m 时, EPS 板宜分三层铺设, 各层铺设范围均为 0~25 m (以路堤中心为起点); 当填土高度大于或等于 40 m 时, EPS 板宜分三层铺

设, 各层铺设范围为: 最上层 0~40 m, 中间层 0~50 m, 最下层 0~60 m; 当填土高度在 20~40 m 时, 可适当调整 EPS 板的铺设范围以达到高路堤涵洞纵向调荷的最佳效果。

c) 在上述铺设 EPS 板的基础上, 辅以地基硬化处理, 地基处理深度宜取 8 m 左右, 地基处理宽度宜取 30 m 左右, 以达到最优的调荷目的。

参考文献:

- [1] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 3~15. (GU An-quan. Study on vertical earth pressure of upper-buried pipeline and cavern[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 3~15. (in Chinese))
- [2] 伊哈卜, 谢永利, 赵丽娅. 聚苯乙烯泡沫塑料减荷力学性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(3): 18~23. (YI Ha-bu, XIE Yong-li, ZHAO Li-ya. Experimental study on mechanical properties of polystyrene foam under load reduction[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(3): 18~23. (in Chinese))
- [3] 冯忠居, 乌延玲, 贾彦武, 等. 钢波纹管涵洞受力与变形特性模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 187~192. (FENG Zhong-ju, WU Yan-ling, JIA Yan-wu, et al. Simulation test of stress and deformation characteristics of steel bellows culvert[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 187~192. (in Chinese))
- [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, 29. (GUO Ting-ting, GU An-quan. Numerical calculation of earth pressure and fill deformation of culvert under load reduction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 12~16, 29. (in Chinese))
- [5] 邓国华, 邵生俊. 填埋式涵洞上覆土压力的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 1): 4356~4360. (DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun. Finite element analysis of overburden pressure on landfill culverts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4356~4360. (in Chinese))
- [6] KANG J, PARKER F, YOO C H. Soil-structure interaction and imperfect trench installations for deeply buried concrete pipes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(3): 277~285.
- [7] KIM K, YOO C H. Design loading on deeply buried box culverts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1): 20~27.
- [8] 康佐, 谢永利, 冯忠居, 等. 应用离心模型试验分析涵洞病害机理[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 784~788. (KANG Zuo, XIE Yong-li, FENG Zhong-ju, et al. Analysis of culvert disease mechanism by centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 784~788. (in Chinese))
- [9] 康佐, 杨晓华, 谢永利, 等. 高填路堤下涵洞病害机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(2): 22~26, 30. (KANG Zuo, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. The disease mechanism of culverts under high fill embankment[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26(2): 22~26, 30. (in Chinese))
- [10] 马强, 郑俊杰, 张军, 等. 高填方涵洞减载机制与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 424~429. (MA Qiang, ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun, et al. Load shedding mechanism and numerical analysis of high fill culverts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 424~429. (in Chinese))
- [11] 马强, 郑俊杰, 张军. 高填方涵洞加筋减载的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2337~2342, 2348. (MA Qiang, ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun. Field test study on reinforced and reduced load of high fill culvert[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2337~2342, 2348. (in Chinese))
- [12] 郑俊杰, 马强, 张军. 加筋减载涵洞的涵顶土压力计算[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1135~1141. (ZHENG Jun-jie, MA Qiang, ZHANG Jun. Calculation of culvert earth pressure on reinforced and reduced culverts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1135~1141. (in Chinese))
- [13] 陈保国, 宋丁豹, 王云辉, 等. 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. (CHEN Bao-guo, SONG Ding-bao, WANG Yun-hui, et al. Research on load shedding mechanism and force characteristics of load-reduction rigid culvert[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 44(4): 79~84. (in Chinese))
- [14] 杨锡武, 张永兴. 山区公路高填方涵洞加筋桥减载方法及其设计理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1561~1571. (YANG Xi-wu, ZHANG Yong-xing. Research on load shedding method and design theory of high-filled culvert reinforced bridge in mountainous highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1561~1571. (in Chinese))