

高填方边坡下涵洞受力变形数值模拟

朱思迪¹, 顾强康¹, 张 龙¹, 姚志华¹, 范 涛¹, 吕 勃²

(1.空军工程大学机场建筑工程系,西安,710038;2.94608 部队,南京,210000)

摘要 针对高填方边坡下涵洞的受力变形特征尚无系统研究的现状,结合延安机场超高填方黄土边坡下涵洞工程,运用 PLAXIS 有限元软件对涵洞周围土压力分布特征和涵体变形规律进行研究。将研究结果与相同工况下的上埋式涵洞进行对比分析,进而得出其受力变形规律,并由此提出实际工程中所需要解决的一些问题。研究表明:高填方边坡下涵洞受偏压作用明显,在竖向与侧向上发生了倾斜与偏转;当边坡坡率为 1:2,填方边坡最高点距涵洞中心线水平距离为 10 倍洞径宽度时,边坡坡面的边界效应开始显现,涵洞受偏压作用;高填方边坡下涵洞涵顶的竖向土压力可参照依其中心线上填土高度所确定的上埋式涵洞的竖向土压力来作为其取值依据。

关键词 高填方边坡;涵洞;数值模拟;土压力

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.019

中图分类号 U449 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0100-06

Research on Numerical Simulation of Force and Deformation for Culvert under High Embankment Slope

ZHU Sidi¹, GU Qiangkang¹, ZHANG Long¹, YAO Zhihua¹, FAN Tao¹, LÜ Bo²

(1.Airport Construction Engineering Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710038,China;
2.Unit of 94608,Nanjing,210000)

Abstract: Aimed at the present situation that the characteristics of force and deformation of the culvert under high embankment slope has not been systematically studied, the distribution characteristics of surrounding soils and deformation laws of the culvert are studied by PLAXIS finite element software combined with the culvert project under super-high embankment loess slope at Yan'an airport. Compared the studied results with the positive buried culvert of the same working condition, some laws of force and deformation are obtained and some problems needed to be solved in the practical project are put forward. The results show that the culvert under high embankment slope is obvious in bias pressure, and incline and deflection appear in vertical and in lateral direction. The boundary effect of slope appears when the slope ratio is 1:2 and the horizontal distance between the highest point of slope and culvert's center line is more about 10 times than the culvert's diameter under the action of culvert subjected to the bias pressure. The vertical earth pressure of culvert top under high embankment slope can be referred to earth pressure of positive

收稿日期:2015-12-21

基金项目:国家自然科学基金(51509257)

作者简介:朱思迪(1991-),男,湖北武汉人,硕士生,主要从事机场地基处理和边坡加固技术研究.E-mail:zhusidi19911230@163.com

引用格式:朱思迪,顾强康,张龙,等.高填方边坡下涵洞受力变形数值模拟[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):100-105. ZHU Sidi, GU Qiangkang, ZHANG Long, et al. Research on Numerical Simulation of Force and Deformation for Culvert under High Embankment Slope[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 100-105.

buried culvert, which is designed by the filling depth of the culvert under slope, and the specific relationships between them remain to be further studied.

Key words: high embankment slope; culvert; numerical simulation; earth pressure

高填方路基和边坡是山区常见的填方工程,为满足填方区域内原有的排水和人行要求,一般会在相应填筑体下修建涵洞。这些涵洞涵顶上部填土较厚,所受荷载不均匀,所处山区地形条件复杂,容易出现因不均匀沉降而产生的局部应力集中现象,从而使其结构出现各种不同的病害^[1-2]。在实际工程中,由于对高填方涵洞上部土压力认识不足,相关计算理论研究滞后,设计过程中无法对高填方涵洞土压力进行合理取值及过分地强调涵洞上部“土拱效应”而导致土压力取值较小。针对这些问题,国内外学者对高填方涵洞的受力情况及工作特性进行了许多研究^[3-12]。郑俊杰等^[13]研究了高填方涵洞垂直土压力分布特征及变化规律,并对顾安全垂直土压力计算公式进行了修正。赵建斌等^[14]研究了上埋式涵洞和宽敞沟谷设涵,指出涵洞土压力集中系数随填土高度增加非线性增长且与填土在涵洞平面产生的沉降差有关。姜士磊等^[15]利用三维数值模拟的方法研究了洞顶垂直土压力的各项影响因素,明确了土压力集中系数与填土高度和坡率的关系。BENNETT^[16]和 PIMENTEL^[17]研究了高填方路堤下箱型涵洞的竖向荷载,指出竖向土压力与填土高度、涵洞跨径和其上填土高度之比有关。但至今还没有一套系统的计算方法能够对涵洞土压力合理取值,也没有针对高填方涵洞的设计规范和标准图集^[18],这使得高填方涵洞工程的设计施工相当困难。

延安机场高填方黄土边坡工程是目前国内最高的山区边坡工程,其北部边坡在放坡过程中碾压了 210 国道,故决定在高填方边坡下修建大型公路明洞(本文为了利于研究其称为涵洞)。此涵洞由于尺寸较大,涵顶上部填土过高且处于边坡下,不仅存在一般高填方涵洞所面临的土压力过大问题,而且存在因边坡边界条件而导致的荷载不对称问题。因上述问题一直得不到有效解决,整个边坡的填筑工作一直处于停滞状态。本文应用岩土工程专用有限元软件 PLAXIS 对高填方边坡下涵洞的受力和变形情况进行了研究。

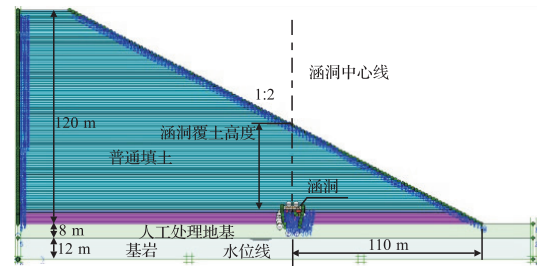
1 有限元模型的建立

1.1 模型概况

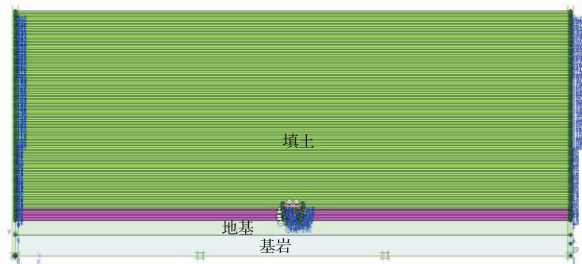
所建立的边坡模型中基岩为 12 m,人工处理地

基 8 m,最高填方高度 120 m,边坡坡率为 1:2。模型中涵洞为受力合理的曲墙式拱形涵洞,其最大直径为 6 m,仰拱高度为 0.8 m,涵洞高度为 6.5 m,涵顶中心填方高度为 55 m。定义边坡的高度为填方高度,涵顶到填方边坡最高点的垂直距离为填土高度。

将边坡断面简化为平面应变问题来考虑,应用 15 节点平面三角形来划分网格。定义基岩、地基土、填土体时采用莫尔-库伦屈服准则,定义涵洞的混凝土结构时采用线弹性模型。同时采用接触单元来考虑涵洞和填土之间的摩擦作用,模型中每层填土均为 1 m,由于其地下水位线在基岩处故不考虑填土中地下水作用,其几何模型见图 1(a)。同时,在研究边坡下涵洞土压力分布规律时引入相同工况下填方高度为 120m 的上埋式涵洞进行对比,其几何模型见图 1(b)。



(a) 边坡下涵洞几何模型



(b) 上埋式涵洞几何模型

图 1 涵洞几何模型

Fig.1 Geometric model of culvert

1.2 计算参数取值

在埋填涵洞过程中,为避免对其造成破坏,涵洞周边一定范围内的填土是不进行夯实的,因此涵洞两侧和上部填土密实度较低。在模拟过程中为贴近实际,在涵洞埋设区域内设置一个 V 型槽,其底部为人工处理地基,内部为人工填筑的松散碎石土,外部两侧为密实土,上部为普通填土,见图 2。其中材料参数取自延安机场工程地质勘察报告其物理力学性质见表 1。

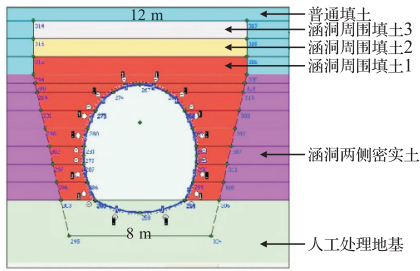


图2 涵洞结构及周围填土示意图

Fig.2 The sketch map of culvert structure and surrounding earth fil

表1 各部分的物理力学指标

Tab.1 The physical and mechanical parameters of each part

材料	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	C / kPa	$\varphi / (^\circ)$	E / MPa	μ
基岩	25.0	800	45	50 000	0.20
人工处理地基	20.0	100	35	200	0.30
涵洞两侧密实土	19.0	20	30	30	0.33
涵洞周围填土1	17.0	5	30	5	0.35
涵洞周围填土2	17.5	10	30	10	0.35
涵洞周围填土3	18.0	15	30	15	0.35
普通填土	17.0	5	30	5	0.35
涵洞	25.2			30 000	0.20

2 模拟结果与分析

2.1 涵洞土压力规律研究

2.1.1 涵洞竖向土压力变化规律

涵洞竖向土压力分布见图3,为更直观地分析其分布规律,对图例进行了调整:(a)、(b)为0~1 800 kPa,(c)、(d)为0~3 000 kPa。其中,由于部分土体出现应力过于集中,图中深红色区域出现部分中空现象。

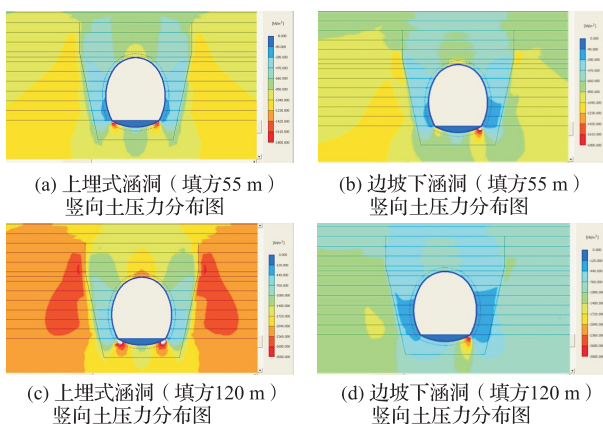


图3 涵洞周围竖向土压力分布图

Fig.3 The distribution map of surrounding vertical earth pressure

由图3可以得出以下结论:

1) 竖向土压力集中现象主要出现在涵洞顶部、

底部仰拱两端和周围密实土体内,涵洞周围松散土体土压力较小。

2) 比较图3(a)和3(b)可知,当填方高度为55 m时,上埋式与边坡下涵洞的竖向土压力在大小和分布上差距不大,其中边坡下涵洞的涵顶竖向土压力略小,底部仰拱靠近边坡坡面一侧应力集中明显,土压力呈不对称分布。

3) 比较图3(c)和3(d)可知,当填方高度达到120 m时,上埋式涵洞竖向土压力总体明显高于边坡下涵洞,边坡下涵洞仰拱靠近坡面一侧土压力集中现象明显,背离边坡坡面一侧土压力较小,且背离坡面一侧密实填土土压力集中高于靠近坡面一侧。同时,边坡下涵洞填方120 m相对于填方55 m时竖向土压力增加不大。

综上所述,随着填方高度的增加,边坡下涵洞受偏压作用明显,仰拱靠近坡面一侧竖向土压力比背离坡面一侧大,且偏压作用随填土高度增加而越发明显,且所受土压力相对于上埋式涵洞明显较小。

从图4可以看出随着填土高度的变化,边坡下涵洞、上埋式涵洞及土体自重作用在涵顶的平均竖向土压力变化情况,此平均土压力为涵顶各点竖向土压力的均值。当填土高度未超过5 m时,三者重合;随填土高度增加,涵顶土压力逐渐大于其上部填土自重土压力,边坡下涵洞涵顶的平均竖向土压力随其上填土高度的增加逐渐增大,在填土高度为15 m到48.5 m之间比上埋式涵洞略大,而当填土高度超过48.5 m后增长开始放缓,曲线逐渐趋于平坦。这是由于在边坡的填土高度达到涵顶上最终填土高度后,新增加的填土由于距离涵洞位置较远,其重量引起的涵顶应力增加较小。

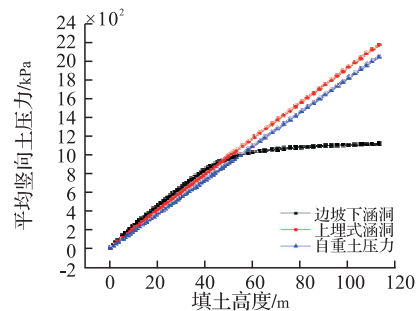


图4 涵顶平均竖向土压力随填土高度变化图

Fig.4 Mean earth pressure on the top of culvert with the height of filling

通过比较图5中3条曲线可以得到,3种不同情况下的涵洞在拱顶处土压力变化规律基本相同,土压力集中均出现在中心部位(±3 m范围)。其中,边坡下填方55 m的涵洞涵顶土压力均略小于另外两者。填方55 m的上埋式涵洞,除涵顶中心

处与填方 120 m 的边坡下涵洞土压力差距较大外, 其它位置差距不大, 且靠近边坡坡面一侧土压力相对稍大总体上二者相差不大。因此对于高填方边坡下涵洞顶部的竖向土压力, 可以参照依其涵顶上部的填方高度所确定的上埋式涵洞的竖向土压力数值来作为其取值依据。通过进一步计算可以得到: 在涵顶中心处, 边坡下涵洞比上埋式涵洞大 11.8%; 在涵顶左侧范围内, 平均大 11.5%; 在涵顶右侧范围内, 平均小 2.3%。而二者的具体关系与边坡几何形态及涵洞在边坡中所处位置有关, 有待进一步研究。

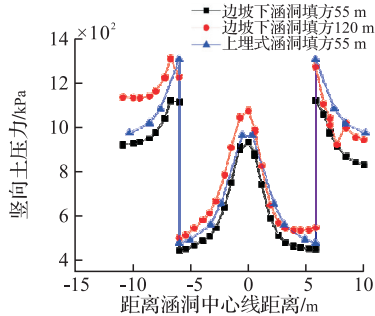


图 5 距涵洞中心线不同距离涵顶竖向土压力图
Fig.5 Vertical earth pressure at different distance from the center line of the culvert

2.1.2 涵洞侧向土压力变化规律

涵洞侧向土压力分布见图 6, 为更直观地分析其分布规律, 对图例进行了调整: (a)、(b)、(c) 均为 100~ -800 kPa。

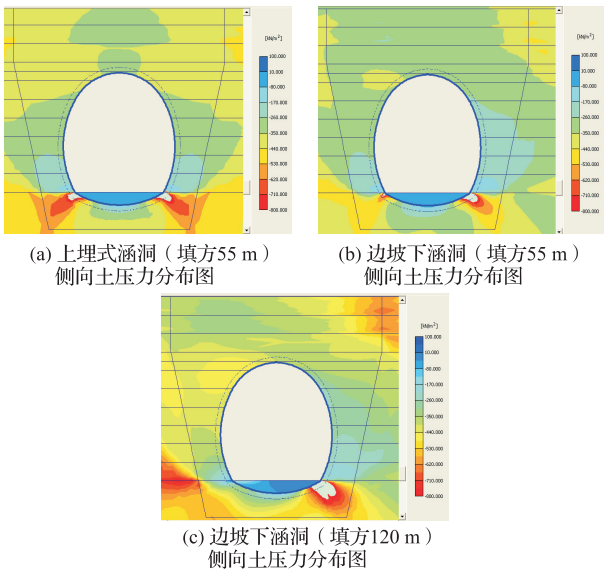


图 6 涵洞周围侧向土压力分布图
Fig.6 The distribution map of surrounding lateral earth pressure

比较图 3 与图 6 可知, 涵体周围的侧向土压力整体相对竖向土压力较小。比较图 6 (a)、6 (b) 可得: 在填方高度为 55 m 时, 2 类涵洞周围侧向土压力分布在大小上差距不大, 边坡下涵洞靠近坡面一

侧应力较背离坡面侧更大, 两边呈非对称分布; 比较图 6 (a)、6 (c) 可得, 2 种情况下涵洞在靠近边坡一侧土压力分布情况相近, 但图 6 (c) 中涵洞的背离边坡一侧, 尤其是在拱顶处, 土压力大于图 6 (a), 且在仰拱右端出现较大范围的应力集中。

以上结果表明随着填土高度增加, 涵洞背离边坡坡面的侧向土压力有较快增长。同时在仰拱处, 靠近坡面一端的侧向土压力较背离坡面一侧增长较快, 涵洞整体受到一个使其发生偏转的力矩作用。

2.2 涵洞变形规律研究

在实际施工过程中, 涵洞的刚度相对周围土体而言很大, 其本身结构变形很小, 因此涵体的变形主要表现为整体结构的竖向与侧向位移。为研究涵洞的变形规律, 依次选取拱顶、仰拱两端和仰拱中心处 K、O、Q、P 4 点作为研究参考点。其中 O 点和 Q 点是拱底边界处关于涵洞中心轴对称的两点, O 点在背离边坡, Q 点靠近边坡, K 点和 P 点分别为涵顶最高点和拱底最低点。其中竖向位移的正方向为向下, 侧向位移的正方向为面向坡面一侧, 即向右。

2.2.1 涵洞竖向变形规律

由图 7 可得, K、P、Q 3 点竖向位移随填方高度增加而增大, 其中 P 点曲线前期较陡后期较缓, 而 K、Q 2 点曲线则较陡。当填方高度小于 24 m 时, O、Q 2 点的曲线重合, 随后 O 点曲线增长趋势放缓; 而当填方高度超过 50 m 时, O 点的竖向位移随填方高度增加开始缓慢下降并最终与 P 点曲线重合。

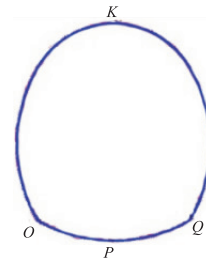


图 7 涵洞各参考点竖向位移随填方高度变化
Fig.7 The reference point with vertical displacement of the embankment height change

由上述规律可以发现, 当填方高度小于 24 m 时, 涵洞仰拱两侧沉降量相等, 两侧变形情况相同。随着填方高度的继续增加, 背离边坡一侧的 O 点竖向沉降量开始增长放缓并开始逐渐减小, 最终与 P 点相同。这表明在填土高度增加的过程中, 靠近边坡坡面一侧的 K、Q 点发生一直向下的竖向沉降, 而背离坡面的 O、P 2 点竖向沉降相对较小。而当填方高度超过 50 m 后 O 点甚至发生反向抬升。涵洞整体表现为不均匀沉降, 出现面向坡面一侧的倾斜。

2.2.2 涵洞侧向变形规律研究

由图8可知,当填方高度小于24 m时, K 、 P 2点水平位移为0, O 、 Q 2点水平位移关于涵洞中轴线对称。随着填方高度的增加,涵底处 O 、 P 、 Q 3点水平位移增长缓慢,而涵顶 K 处水平位移增长较快,涵底水平位移明显小于涵顶水平位移。

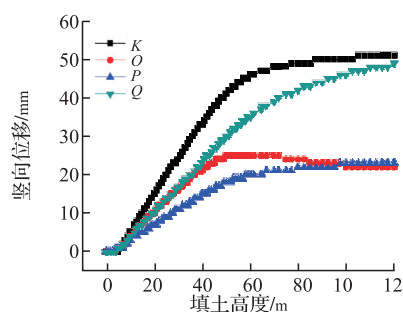


图8 涵洞各点侧向位移随填方高度变化

Fig.8 The reference point with lateral displacement of the embankment height change

由上述变化规律可知,当填方高度小于24 m时,涵洞整体不发生侧向移动,只在原地发生微小的对称变形;而当填方高度大于24 m后,涵洞整体开始出现面向坡面一侧的水平位移,且涵顶位移大于涵底位移,最终使得涵洞发生面向坡面一侧的偏转。

2.3 涵洞受力变形规律综合分析

结合涵洞周围土压力分布特征与涵体变形规律可以得出,与普通高填方涵洞相比,高填方边坡下涵洞既存在由于竖向受力不均匀而形成的倾斜,又存在由于水平受力不均匀而形成的偏转,因此会出现面向坡面一侧的偏转侧移。

同时,在对此涵洞模型进行竖向与侧向变形分析的过程中可以发现二者的规律具有一致性。当填方高度小于24 m时,涵洞中心线两侧的土体范围较大,相当于一埋式涵洞,边坡坡面的边界效应对涵洞无影响;之后随着填方高度的增加,边坡的边界效应开始显现,涵洞背离坡面一侧的侧向土压力逐渐大于面向坡面一侧,出现了明显的偏压作用,在其作用下涵洞发生偏转倾斜。由此可见,填方高度24 m处是一个判断偏载影响的分界值,其对应的边坡坡面最高点距涵洞中心线水平距离为62 m,约10 D (D 为涵洞洞径宽度)。由此可知当边坡坡率为1:2时,其边界效应作用范围约为其下结构物的10倍宽度。在实际工程中可将边坡坡面最高点距结构中心线的水平距离与结构物的宽度进行比较,用以预估边坡对结构物所受偏压作用的影响。

总结以上结论,对于高填方边坡下的涵洞工程,我们需要解决的主要问题有:①涵顶处较大的竖向土压力及涵洞两侧非对称的水平土压力;②涵洞整体发生侧向位移以及涵顶由于偏转产生较大侧向

位移;③因偏转导致仰拱处土压力分布不均,靠近边坡坡面一侧压力集中现象严重。

3 结语

本文结合延安机场超高填方边坡下涵洞工程,利用数值模拟的方法对高填方边坡下涵洞的土压力分布特征与涵体变形规律进行了研究。

参考文献(References):

- [1] 赵建斌,李万乐,申俊敏,等.黄土地区高速公路涵洞病害调查及分析[J].土木工程与管理学报,2014,31(1):24-28.
ZHAO Jianbin, LI Wanle, SHEN Junmin, et al. Investigation and Analysis on Diseases of Expressway Culvert in Loess Area [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2014, 31(1): 24-28. (in Chinese)
- [2] 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.
KANG Zuo, YANG Xiaohua, XIE Yongli, et al. Disease Mechanism of Culvert under Embankment of Special High-stacked Soil [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 22-26. (in Chinese)
- [3] 马强.高填方涵洞受力特性及新型格栅减载方法研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
MA Qiang. Study on Stress Characteristics and Load Reduction by Triax Geogrid Reinforcement for High Embankment Culverts [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] 张宁霞.公路大跨径高填方涵洞工作特性综合研究[D].西安:长安大学,2014.
ZHANG Ningxia. Comprehensive Study of Operating Characteristics of Long-Span and High-Fill highway Culvert [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [5] 边学成,申文明,马桥祖.不同填土管涵土压力模型试验和数值模拟研究[J].土木工程学报,2012,45(1):127-133.
BIAN Xuecheng, SHEN Wenming, MA Qiaozu. Model Test and Numerical Simulation of Earth Pressure on Culvert under Different Earth Backfill Conditions [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 127-133. (in Chinese)
- [6] DASGUPTA A, SENGUPTA B. Large-Scale Model Test on Square Box Culverts Backfilled with Sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(1): 156-161.
- [7] ZHANG Junhui, YAO Yongsheng, ZHENG Jian-

- long et al. Centrifugal Model Test and Numerical Simulation of Vertical Earth Pressure on Soft Foundation Box Culvert[J]. J Cent South University, 2015, 22: 3556-3563.
- [8] CHEN Baoguo, ZHENG Junjie, HAN Jie. Experimental Study on Concrete box Culverts in Trenches[J]. Front. Archit. Civ. Eng. China 2009, 3(1): 73-80.
- [9] CHEN Baoguo, ZHENG Junjie, HAN Jie. Experimental Study and Numerical Simulation on Concrete box Culvert in Trenches[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2010, 24(3): 223-234.
- [10] CHEN Baoguo, SUN Liang. Performance of a Reinforced Concrete Box Culvert Installed in Trapezoidal Trenches[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(1): 120-130.
- [11] KANG J, PARKER F, YOO C H. Earth-Structure Interaction for Deeply Recess Corrugated Steel Pipes. Part I Embankment installation [J]. Engineering Structures, 2008, 30(2): 384-392.
- [12] Kim K, Yoo C H. Design Loading on Deeply Buried Box Culverts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1): 20-27.
- [13] 郑俊杰, 赵建斌, 陈保国. 高路堤下涵洞垂直土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1009-1013. ZHENG Junjie, ZHAO Jianbin, CHEN Baoguo. Vertical Earth Pressure on Culverts under High Embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1009-1013. (in Chinese)
- [14] 赵建斌. 高填方路堤下涵洞垂直土压力研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. ZHAO Jianbin. The Vertical Earth Pressure on Culverts under High Embankments[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008. (in Chinese)
- [15] 姜士磊, 李永刚, 张昂. 边坡下涵洞顶部垂直土压力三维数值计算[J]. 水电能源学, 2014, 32(10): 116-118. JIANG Shilei, LI Yonggang, ZHANG Ang. Three-Dimensional Numerical Calculation of Vertical Earth Pressure on Culvert under Slope[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(10): 116-118. (in Chinese)
- [16] BENNETT R M, WOOD S M, DRUMME C, et al. Vertical Loads on Concrete box Culverts Under High Embankment [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 4: 366-375.
- [17] PIMENTEL M, COSTA P, FELIX C, FIGUEIRAS J. Behavior of Reinforced Concrete Box Culverts under High Embankment[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 4: 366-375.
- [18] 交通部公路科学研究院. JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG D60-2015 General Specifications for Design of Highway Bridge and culvert[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)