

文章编号:1671-6833(2014)03-0111-05

# 高填方涵洞受力特性现场测试及数值模拟研究

赵建斌, 申俊敏, 董立山

(山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘 要:** 依托岢临高速公路高填方涵洞工程, 对高填方路堤下混凝土拱涵垂直土压力及涵洞拱圈应力进行了现场跟踪观测, 分析了涵顶土压力及拱圈应力的分布情况及演变规律, 同时基于有限差分软件 Flac3D 计算出高填方路堤的应力场和位移场, 对现场实测数据进行了验证和分析. 研究结果表明: 由于涵洞结构与路堤填土之间存在明显刚度差异, 造成高填方涵洞顶部形成土压力集中; 涵顶土压力集中系数随填土高度的增加而增大, 并逐渐趋于稳定; 高填方涵洞拱圈内侧最大拉应力位于拱顶, 而最大压应力则位于拱腰与拱脚之间, 建议在涵洞拱圈内侧布设适量钢筋, 防止涵洞开裂破坏; 边坡可有效分担填土荷载, 当涵洞靠近边坡修筑时, 应考虑偏载效应对涵洞结构受力的影响.

**关键词:** 道路工程; 垂直土压力; 土压力集中系数; 涵洞; 偏载效应

**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.027

## 0 引言

在黄土地区公路建设中, 高填方涵洞是十分常见的跨越沟壑的结构物形式. 高填方涵洞需要承受较大的上覆土压力, 因此对土压力计算精度也要求较高, 若计算值较小会造成涵洞开裂甚至破坏, 而计算值过大又会增大结构物尺寸, 造成浪费<sup>[1]</sup>.

美国衣阿华州立大学 Marston<sup>[2-3]</sup> 开创了填埋涵管土压力计算方法的先河, 提出了著名 Marston 土压力计算公式; 曾国熙教授<sup>[4]</sup>对 Marston 公式进行了修正, 在公式中考虑了填土黏聚力对涵顶土压力的影响; 顾安全(1981)<sup>[5]</sup>考虑刚性涵洞、填土之间的协调变形, 以弹性理论为基础推导了涵顶垂直土压力计算式; 同时, 折学森等<sup>[6]</sup>通过室内模型试验分析了沟谷地形中涵顶土压力的变化规律, 考虑了沟谷宽度和沟谷岸坡坡脚对涵顶土压力的影响; El-Sawy(2003)<sup>[7]</sup>利用三维有限元法分析了活荷载作用下土体和钢管涵洞之间的相互作用, 并将计算结果与现有理论和试验结果进行对比, 说明有限元法能够准确地反映结构的受力和变形情况. 虽然国内外已有较多的涵洞土

压力分布及变化规律的理论研究, 但仍缺乏系统的现场监测试验数据的支持, 特别是关于涵洞结构自身应力分布规律的试验监测数据.

依托山西省岢(嵐)临(县)高速公路高填方涵洞工程, 结合现场测试和数值模拟对高填方涵洞垂直土压力分布特征和变化规律, 以及涵洞结构自身的应力分布情况进行了研究, 并将试验结果与我国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)<sup>[8]</sup>中所采用的线性土压力计算方法进行了对比分析. 同时, 分析了邻近边坡对涵顶垂直土压力的影响, 研究内容可为高填方构筑物垂直土压力的设计和施工提供参考依据.

## 1 现场试验及测试结果

### 1.1 现场测点布设

以岢临高速公路 ZK114+800~850 处高填方涵洞为观测试验段, 该涵洞为片石混凝土拱涵, 基础及墙身为 M7.5 浆砌片石, 拱圈为 C30 素混凝土, 涵洞高  $H$  为 5.0 m, 拱圈直径 2.0 m, 洞身平均宽度  $B$  为 4 m, 基础宽 7 m, 高 0.8 m, 全长 100 m. 涵洞地基为原状黄土经压实后铺设 50 cm 水稳碎石, 纵坡为 7%, 涵顶最大填土高度 21 m, 路

收稿日期:2013-10-11; 修订日期:2013-12-11

基金项目:山西省交通运输厅科研计划项目(2012-1-3)

作者简介:赵建斌(1983-), 男, 山西太原人, 山西省交通科学研究院工程师, 研究方向为岩土工程, E-mail: zjbhust@163.com.

堤填土重度  $18.5\text{ kN/m}^3$ . 涵洞左侧紧邻边坡侧壁, 由于为典型黄土冲沟, 因此边坡侧壁垂直. 为了加快施工进度, 涵洞右侧路堤在满足涵洞施工通行的前提下已提前进行填土作业, 填筑高度为  $14\text{ m}$ , 涵洞尺寸及监测仪器布设情况如图 1 所示.

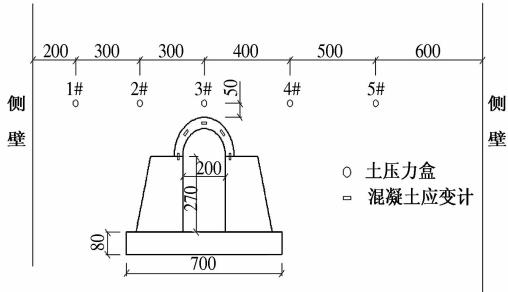


图 1 涵洞横断面图 (单位: cm)

Fig. 1 Cross section of culvert (unit: cm)

1.2 观测结果分析

1.2.1 涵顶垂直土压力变化规律

随路堤填筑高度的增加涵顶平面各监测点垂直土压力逐渐增大, 但因与涵洞轴线距离不同, 各监测点土压力增幅有所差异. 图 2 为土压力集中系数(土压力与线性土压力的比值)随填土高度变化规律. 从图 2 可以看出, 涵顶土压力集中系数(3 #)迅速增大, 但当达到一定填土高度后便趋于稳定; 2 #土压力盒距涵洞中心轴线仅  $3.0\text{ m}$ , 土压力集中系数远小于 1, 而 4 #土压力盒距涵洞中心轴线  $4.0\text{ m}$ , 土压力集中系数在填土高度较小时小于 1, 其后逐渐增大并趋近于 1; 1 #土压力盒虽距涵洞较远, 但却距左侧边坡只有  $2.0\text{ m}$  距离, 其土压力集中系数也略小于 1; 5 #土压力盒距涵洞最远, 在填土初期土压力集中系数略有起伏, 其后逐渐趋近于 1.

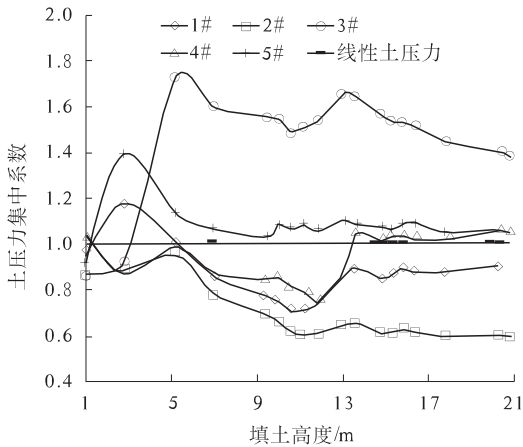


图 2 土压力集中系数随填土高度变化规律

Fig. 2 Variation of concentration factor of vertical earth pressure with height of fill

分析其原因, 由于涵洞洞身与周围填土之间的刚度差异, 造成涵顶填土产生沉降差, 涵洞两侧填土荷载通过“土拱作用”向涵洞顶部传递, 在涵顶形成土压力集中; 而 1 #土压力盒虽距涵洞轴线距离较远, 已超出涵顶“土拱作用”的影响区域, 但由于该测点邻近边坡侧壁, 通过边坡侧壁与路堤填土之间的摩阻作用, 边坡分担了部分填土荷载, 使得该测点处土压力增幅小于线性土压力.

图 3 为涵顶平面各监测点垂直土压力随填土高度的变化规律. 当填土高度较小时, 涵顶平面土压力分布较均匀, 但随着填土高度的增加, 涵顶土压力集中现象逐渐明显. 从图 3 可以看出, 涵洞对其周围路堤填土的影响范围在距涵洞轴线  $1.5B$  以内, 当超出此范围, 涵洞两侧填土压力逐渐趋近于线性土压力; 涵顶平面左侧土压力明显小于右侧值, 说明邻近边坡可以分担部分路堤填土荷载.

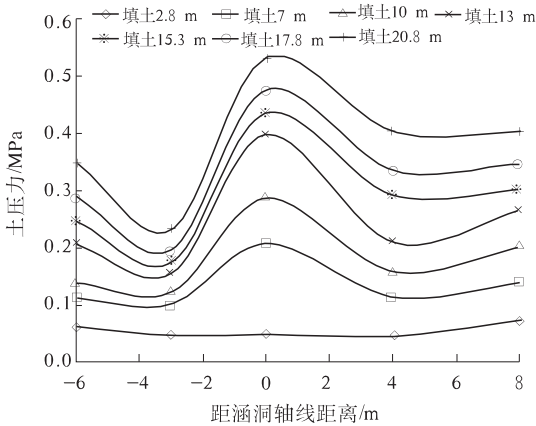


图 3 涵顶垂直土压力分布规律

Fig. 3 Distribution of vertical earth pressure on top of culvert

1.2.2 涵洞拱圈应力变化规律

拱圈采用 C30 素混凝土浇筑, 弹性模量  $30\text{ GPa}$ , 沿拱圈内侧布设了 5 只混凝土应变计(图 1), 分析涵洞拱圈应力变化规律, 如图 4 所示.

由图 4 可知, 拱圈浇筑完成初期, 混凝土水化产生自收缩, 内部以受拉为主; 待拱圈达到一定强度后进行路堤填筑, 随填筑高度的增加, 拱腰和拱角处混凝土以受压为主, 且拱腰受到的压应力大于拱角; 填筑初期, 拱顶处混凝土应力变化较为平稳, 但当路堤填筑高度达到  $8\text{ m}$  后, 拱顶处混凝土拉应力显著增大, 填筑完毕时, 拱顶处混凝土拉应力达到  $3.3\text{ MPa}$ . 同时, 由于涵洞左侧边坡的减载作用, 涵洞左侧拱腰应力变化较为平缓, 而右侧拱腰应力变化幅度则相对较大.

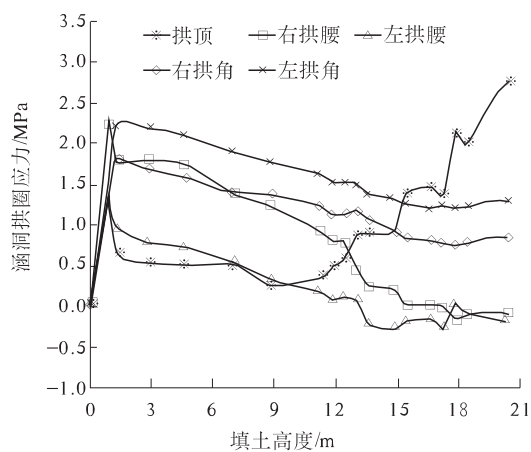


图 4 涵洞拱圈应力随填土高度变化曲线

Fig.4 Variation of stress of arch ring with height of fill

2 数值模拟分析

2.1 模型建立

基于现场试验工况,采用有限差分软件FLAC3D 建立数值分析模型,由于该模型为平面应变问题,路堤纵向宽度取 1 m,整个模型尺寸为 60 m×1 m×36 m.模型的边界位移条件如下:底部为基岩,即  $z=0$  m 的位置采用固定约束; $x=0$  m 及 60 m 位置约束其水平向的移动;约束整个模型  $y$  方向上的位移,以模拟平面应变情况;涵洞高 5 m,采用壳单元模拟,单元厚度设为 0.6 m,涵洞左侧距边坡侧壁 6 m,右侧距边坡侧壁 10 m,模型中具体几何尺寸及边界条件如图 5 所示.

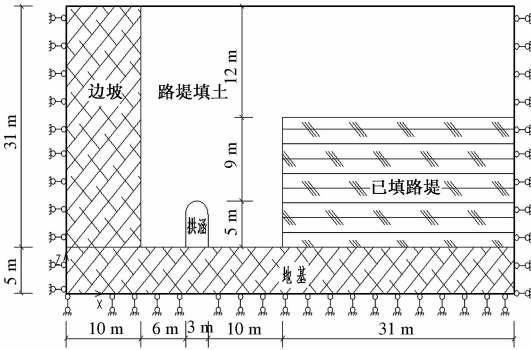


图 5 高填方涵洞数值模型及边界条件

Fig.5 Culvert model under high embankment and boundary conditions

模型中土体采用理想弹塑性本构模型,屈服准则采用 Mohr – Coulomb 强度准则<sup>[10]</sup>,材料参数见表 1,黄土边坡及路堤填土的物理力学参数通过室内压缩试验及常规三轴试验确定,涵洞材料参数由《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[11]</sup>查取,同时模型中考虑涵洞、填土以及边

坡之间的摩擦作用,即在其接触面上设置接触单元,接触参数通过室内试验得到的填土力学参数近似求得.

在数值分析过程中采用分级加载的方式激活路基单元以模拟路堤填筑施工过程,将路堤填土分成 21 层逐级加载,每级增加填土厚度 1.0 m.

表 1 模型物理力学参数

项目	体积模量	剪切模量	黏聚力	内摩擦角	切向刚度 $K_s$
	$K/\text{MPa}$	$G/\text{MPa}$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{^\circ})$	$/(\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1})$
边坡、地基	60	19.95	80	30	—
路堤填土	40	13.6	50	20	—
涵洞	16 667	12 500	—	—	—
界面接触单元	—	—	3.0	2.5	1.2

注:边坡、地基及路堤填土密度均为 1 850 kg/m<sup>3</sup>.

2.2 结果分析

图 6 为现场监测的涵顶土压力集中系数与相应位置处数值模拟计算结果的对比情况.从图 6 可以看出,涵顶填土达到一定高度后土压力集中系数逐渐趋于稳定,二者结果较为吻合,说明数值模型基本符合现场涵洞的实际情况.

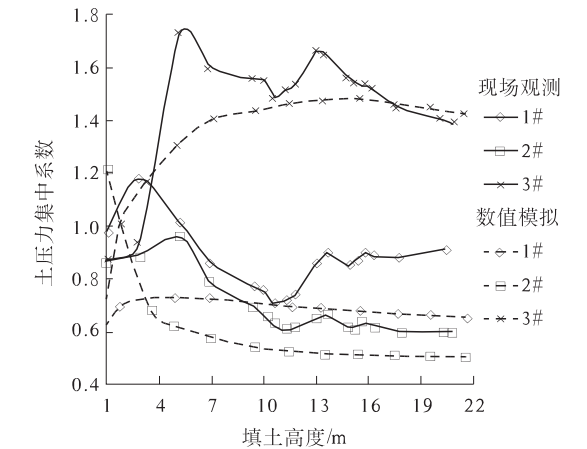


图 6 土压力集中系数随填土高度变化规律

Fig.6 Variation of concentration factor of vertical earth pressure with height of fill

图 7 为填土竖向位移等值线图.图 8 为涵顶垂直土压力等值线图.

由图 7、图 8 可知,涵洞与填土之间的刚度差异造成涵洞顶面填土产生差异沉降,涵洞两侧土体通过“土拱作用”<sup>[12]</sup>将路堤荷载传递至涵顶,在涵顶形成明显的垂直土压力集中区域,而涵洞两侧较近范围内垂直土压力则较小,这与现场实测得到的土压力分布情况基本相符.

同时由图 7 可知,由于涵洞左侧路堤填土受到边坡侧壁摩擦阻力的作用,边坡承担了部分填土

荷载,造成涵洞左侧填土垂直土压力小于涵洞右侧,使涵洞受到偏载作用。

图 9 为涵洞拱圈内侧应力分布情况. 可以看出,拱顶较大范围内以受拉为主,且最大拉应力已超出素混凝土的设计抗拉强度;而拱腰则为拱圈正负应力变换的部位,因此总应力较小;拱腰以下,拱圈则主要承受压应力作用,且呈先增大后逐渐减小的趋势,最大压应力为 1.77 MPa,位于拱圈右侧拱腰及拱角之间,因此可以看出由于涵顶土压力的偏载作用,拱圈应力分布并不对称. 图 9 所示的涵洞拱圈应力分布规律基本与现场实测结果相吻合。

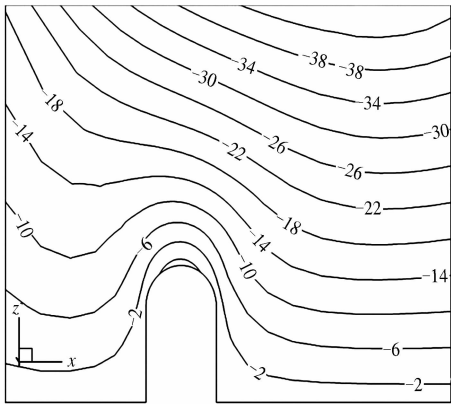


图 7 填土竖向位移等值线图 (单位: cm)  
Fig. 7 Equivalent line of vertical displacement of fill (unit: cm)

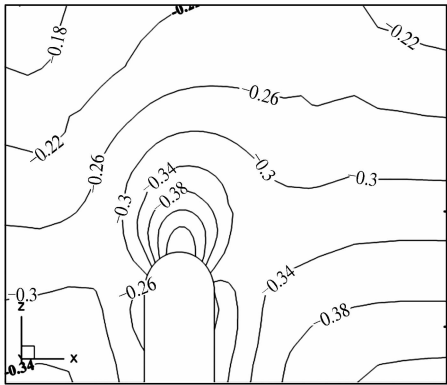


图 8 涵顶垂直土压力等值线图 (单位: MPa)  
Fig. 8 Equivalent line of vertical earth pressure on top of culvert (unit: MPa)

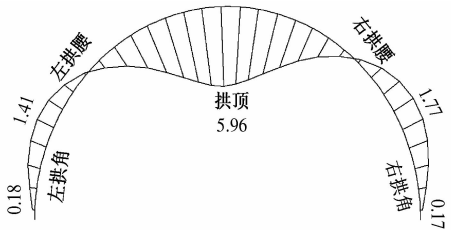


图 9 涵洞拱圈应力分布图 (单位: MPa)  
Fig. 9 Distribution of stress of arch ring (unit: MPa)

目前在高填方涵洞设计时,仍采用现行《公路桥涵设计通用规范》中的线性土压力计算公式,求得的土压力往往不能反映高填方涵洞实际受力情况,同时因为涵洞尺寸较小而取消布设钢筋,采用素混凝土浇筑拱圈的做法,极易造成涵洞开裂,留下安全隐患<sup>[13]</sup>。

图 10 为路堤填筑完毕时涵洞结构的位移增量矢量图. 从图 10 可以看出,由于邻近边坡的偏载作用,涵洞发生了较明显的不对称变形,涵洞侧墙右侧变形明显大于其左侧变形。

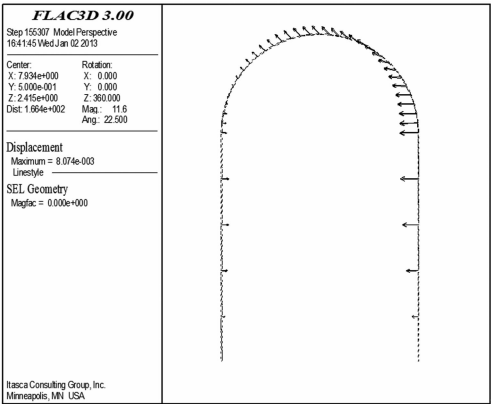


图 10 涵洞位移增量矢量图  
Fig. 10 Vector diagram of incremental displacement

3 结论

(1)涵洞和路堤填土之间存在刚度差异,造成涵顶平面填土产生不均匀沉降,在“土拱效应”作用下涵顶产生土压力集中;路堤填筑初期,随路堤填筑高度的增加,涵顶土压力集中系数显著增大,随后逐渐趋于稳定。

(2)由于邻近边坡侧壁和填土之间的摩阻作用,邻近边坡可有效分担部分路堤荷载,当涵洞靠近边坡修建时应考虑偏载效应对涵洞受力特性的影响。

(3)路堤荷载作用下,高填方涵洞拱圈拱顶处会产生较大拉应力,在设计中采用素混凝土可能会造成拱圈受拉破坏,而目前还没有一种能够准确反映各种影响因素的高填方涵洞垂直土压力计算公式,因此建议在涵洞设计时,在拱圈内布设少量钢筋以提高涵洞承载力,避免涵洞开裂破坏。

参考文献:

[1] 陶云川. 高路堤涵洞土压力计算方法研究[J]. 山西交通科技, 2012(2): 44-46.

- [2] MARSTON A, ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditch and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[R]. Ames: Iowa Engineering Experiment Station, 1913.
- [3] MARSTON A. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments[R]. Ames: Iowa Engineering Experiment Station, 1930.
- [4] 曾国熙. 土坝下管道竖向土压力的计算[J]. 浙江大学学报, 1960, (1): 79-97.
- [5] 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.
- [6] 折学森, 顾安全. 沟谷地形中埋设管道的土压力研究[J]. 西安公路学院学报, 1989, 7(4): 33-39.
- [7] EL-SAWY K M. Three-dimensional modeling of soil-steel culverts under the effect of truckloads[J]. Thin-Walled Structures, 2003, (41): 747-768.
- [8] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [9] 马强, 郑俊杰, 张军. 山区涵洞受力影响因素的数值模拟分析[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32(10): 1514-1517.
- [10] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [11] GB 50010—2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] KARINSKI Y S, DANCYGIER A N, LEVIATHAN I. An analytical model to evaluate the static soil pressure on a buried structure [J]. Engineering Structure, 2003, 25(1): 91-101.
- [13] 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.

## Field Test and Numerical Simulation of Mechanical Characteristic of Culverts under High Embankments

ZHAO Jian-bin, SHEN Jun-min, DONG Li-shan

(Key Lab of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Based on the project of the culvert under high embankment in the expressway from Kelan to Linxian, the vertical earth pressure and the stress of the culvert arch ring are monitored by the field tests, and according to the monitoring results, the analysis on the distribution characteristics and variation laws are conducted. Meanwhile, in order to verify and study the monitoring results, a 3D finite difference model has been built to obtain the stress and displacement fields of the high fill embankment. The results show that: the stiffness difference between the culvert and the fill is the main reason of the concentration of the vertical earth pressure on the top of culvert, and the concentration factor increases significantly with the height of the fills increasing at the early stage, then it remains stable; the maximum tensile stress is present to the vault of arch culvert, while the maximum compressive stress between the haunch and the skewback of the arch ring; in order to avoid cracking, it's proposed that the arch ring should be reinforced because of the high fill loading on the top of culvert; the slope can share a part of the fill load, leading to the offset load effect to the structure of the culvert, which must be noted when it is constructed near the slope.

**Key words:** road engineering; vertical earth pressure; concentration factor; culvert; offset load effect