

文章编号:1671-8879(2008)02-0031-05

高填方路堤涵洞碎散体填土成拱效应离心模型

翁效林, 谢永利, 刘保健

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了对高填方路堤涵洞上部碎散体填土压力性状进行较为直观合理的分析,通过离心模型试验,研究了不同边界条件下高填方涵洞垂直土压力随填土高度变化的规律以及涵洞周围填土位移场的变化情况。试验结果表明:由于受沟谷地形的影响,涵洞上部碎散体填土达到一定高度后将会产生具有不稳定性的成拱效应;平坦地形设涵,在上部碎散体填土达到一定高度且在涵中填土沉降量大于涵侧填土沉降量的情况下,土体中将产生成拱效应;由于高填方涵洞上方路基填料是不同于岩石的碎散体,所以高填方涵洞上方的拱效应具有不稳定的特点。

关键词:道路工程;高填土涵洞;拱效应;离心模型试验;土压力

中图分类号:U416.12

文献标志码:A

Centrifugal model of arch action of granular soil fills of culverts under high embankment

WENG Xiao-lin, XIE Yong-li, LIU Bao-jian

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to describe the pressure characteristics of granular soil fills of culverts under high embankment, the principle of earth pressure and fills displacement field around the culvert on the different boundary conditions with the height of fills are studied by model test. The results show that: the arch action occurs as the fills on the culverts is up to a certain height with the effect of clench topography; the fills of culvert on even terrain have the same characteristics when the settlement amount of the middle fills is bigger than that of two sides fills; the arch action above the high fill culvert has the characteristics of instability. 2 tabs, 7 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; culvert under high embankment; arch action; centrifugal model test; soil pressure

0 引言

在中国西部和山区高等级公路中,由于受地质地貌条件限制,有时必须采用高填方路基,填方高度达60 m,甚至高达200 m。涵洞是公路工程中广泛

采用的作为横穿路基的小型排水和交通构造物,为路基工程的必需配套物,占公路工程结构物工程量的比例很大,平均每公里约有一座涵洞结构^[1]。高填方涵洞是典型的地下填埋洞室结构,在受力机理上属于加载受荷,因而垂直土压力是其结构设计的

收稿日期:2007-02-16

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200231881224)

作者简介:翁效林(1980-),男,河南信阳人,博士研究生, E-mail: wengxiaolin2000@sohu.com

控制荷载。由于填土介质是不同于岩石的碎散体,当这种碎散介质的一部分产生相对位移或有相对位移的趋势时,土体中就可能产生拱效应。如果在高填方路堤洞室上方土体中产生了所谓的拱效应,高填土的质量不可能全部压在洞室上,因此,拱效应对土压力的影响是高填方涵洞土压力的计算理论和计算方法需面对的问题。目前,对高填方涵洞上方是否存在卸荷拱或拱效应,尚有不同的观点。一些研究人员认为^[2-5],在高填方涵洞上方有明显的拱效应,在设计中应予考虑;有的研究则认为设计中完全没有必要考虑拱效应。为此,本文以离心模型试验^[6-9]为研究手段,对设于沟谷和平坦地形下的高填方拱涵和管涵上部土压力值和周围填土相对位移场随填土高度的变化进行了试验测试,得出了高填方路堤下不同地形的涵洞上部填土拱效应的形成特点和规律。

1 模型相似分析与试验

1.1 模型相似分析

涵洞置于周围土体中要产生应力、应变和位移,主要取决于几方面的物理量:①涵洞的计算直径、涵洞拱圈的厚度及埋置深度等几何因素;②涵洞周围土体的性质;③涵洞结构体材料的性质;④土体的初始应力状态。

根据量纲分析理论,将与原型的应力、应变和位移有关的物理量表示为

$$f\left(\frac{h}{D}, \frac{\Delta}{D}, \frac{f_{\text{矢高}}}{D}, \frac{\gamma D}{c}, \frac{E}{c}, \nu, \varphi, \frac{\gamma}{\rho g}, \frac{\sigma}{c}, \frac{\delta}{D}, \epsilon\right) = 0$$

式中: h 为涵洞的埋深,即涵洞拱顶至地面的距离; D 为涵洞的计算直径; Δ 为涵洞拱圈的厚度; $f_{\text{矢高}}$ 为涵洞拱圈的计算矢高; γ 为材料容重; c 为粘聚力; φ 为内摩擦角; E 、 ν 均为涵洞材料与 EPS 板减荷材料的弹性参数; σ 、 δ 、 ϵ 分别为土体和涵洞材料的应力、位移、应变; ρ 为填土密度; g 为重力加速度。

涵洞的离心模型试验相似律见表1(表1中 d 为土粒直径; n 为倍数)。其中土的破坏准则采用摩尔-库仑破坏准则。从表1可看到,除土体的粒径不相似外,其他各项无量纲量均相似。因而,用离心模型试验模拟高填方路堤涵洞在理论上是可行的。

1.2 试验模型

试验采用的原材料主要有土、混凝土和柔性PVC管,试验材料的物理力学性能如表2所示。试验中,控制模型的干密度 $\rho_d=1.26\text{ g/cm}^3$,含水质量分数 $\omega=18\%$ 。在模型制作过程中,首先在模型箱周边涂上液体硅油,以减弱箱壁的摩擦作用;然后根

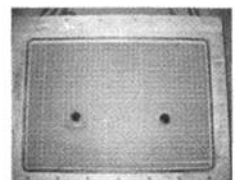
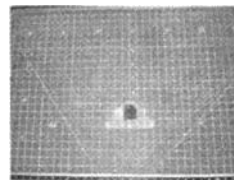
表1 涵洞的离心模型试验相似律

参 数	原型	离心模型	是否相似
重力加速度	g	ng	
几何材料	h/D	h/D	相似
	Δ/D	Δ/D	相似
	$f_{\text{矢高}}/D$	$f_{\text{矢高}}/D$	相似
	φ	φ	相似
	$\gamma D/c$	$\gamma D/c$	相似
	E/c	E/c	相似
	ν	ν	相似
	$\gamma/(\rho g)$	$\gamma/(\rho g)$	
	d/D	d/D	不相似
涵洞结构反应	σ/c	σ/c	相似
	ϵ	ϵ	相似
	δ/h	δ/h	相似

据模型料的最大干密度和最佳含水质量分数,将称好质量的土料按每层厚4~6 cm填筑,击实到规定的密度。填筑时,把土颗粒分层均匀摊铺于箱中,每摊一层,都进行夯实,尽量使土体均匀一致。在模拟刚性基础上拱涵与圆管涵工况时,拱涵模型箱放置在主测量箱一侧,用来模拟两边岸坡比,其分别为1:0.35和1:1。沟谷地形设涵洞时,涵洞上部土压力性状随填土高度变化而变化,圆管涵放置在副测量箱一侧,同时进行离心模拟。主测量箱拱涵结构模型假设为实际涵洞的1/60,副测量箱左侧A管涵模型为钢管,为对比起见,右侧B管涵选用柔性PVC管代替,材料的物理力学性能如表2所示,模型位移测点布置如图1所示。

表2 试验材料的物理力学性能

项 目	弹性模量 E_d/kPa	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
填土	2.90×10^4	0.250	30	21
地基土	3.80×10^4	0.220	45	25
拱涵模型	2.55×10^7	0.167		
A管涵	3.80×10^7	0.121		
B管涵	1.98×10^4	0.360		



(a) 主测量箱

(b) 副测量箱

图1 模型位移测点的布置

1.3 试验装置与测试

1.3.1 竖向位移测试

本次试验选用700 mm×500 mm×360 mm规格模

型箱制备模型模拟工况,模型箱有一面可以拆卸的透明有机玻璃板。试验通过在土体外侧标示20 mm×20 mm网格来监控各级加速度下的位移场的变化。通过数码相机定点拍摄运动模型箱内模型的变化,运用计算机软件对数字图像进行处理;读取每一级填土加载后各位移标点的坐标,与初坐标之差即为各标点在填土加载过程中产生的位移,从而测量和观测不同填土高度时涵洞周围位移的变化情况。针对管涵模型,通过选取孔洞模型中线左侧、右侧和中线3处横断面位置,以及模型涵顶填土高度为1.88、11.88、23.88 cm 3 个分析层面,分析涵管周围土体随填土高度变化位移场的变化。1.88 cm 对应涵顶全部填土高度的0.054,11.88 cm 对应涵顶全部填土高度的0.339,23.88 cm 对应全部填土高度的0.682。

1.3.2 土压力测试

土压力采用直径 3.0 cm、量程 0.1 MPa 的微型土压力盒测试。埋设在涵顶和涵侧外的土压力盒的高程相同,主测量箱和副测量箱的土压力盒的埋设见图 2。当土压力盒埋设后,即进行连续监控测试,填土达到一定高度,进行一次读数记录。

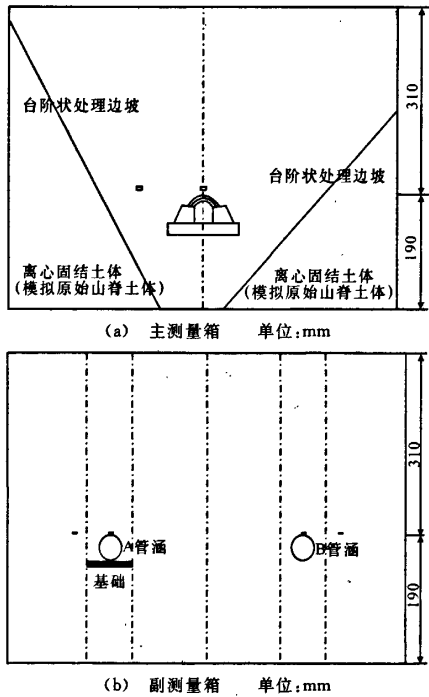


图 2 不同边界条件的模型结构及土压力盒的测点布置

2 试验结果分析

2.1 沟谷拱涵模型结果分析

图 3 为沟谷拱涵模型涵顶与涵侧土压力随填土

高度的变化曲线;图 4 为离心机停机后实测模型各点沉降量所得出的模型沉降变化曲线,表示模拟填土高度 40 m 的情况。图 4 中,虚线为变形前的基准线,实线为变形后的填土沉降曲线,实线间断处表示模拟的涵洞实体。从图 3 可看出:在沟谷地形的影响下,填土高度较低时,涵顶和涵侧的土压力值均接近理论土压力值;随着填土高度的增加,涵顶土压力值小于理论土压力值,而涵顶外侧土压力值明显大于理论土压力值,并且这种变化趋势随着填土高度的增加更趋于明显。由图 4 可看出:在 40 m 填土高度,拱涵涵顶填土的沉降量明显小于两侧填土的沉降量。这说明在沟谷地形的影响下,当涵洞填土达到一定高度后,两侧沟坡具有阻止涵洞两侧填土土柱下沉的作用,这种作用一直延伸到填土表面,使土体由于压缩和沉降,产生了不均匀位移。由于土颗粒间产生互相“楔紧”的作用,于是就在一定范围的土层中产生了拱效应,使得涵顶土压力值小于理论土压力值。由于涵洞上方的卸荷拱把上部填土质量传递到涵洞外侧“拱脚”,涵侧土压力值大于理论土压力值。

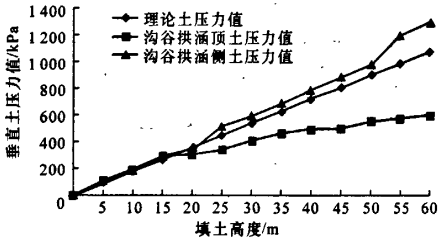


图 3 沟谷拱涵模型涵顶与涵侧土压力随填土高度的变化曲线

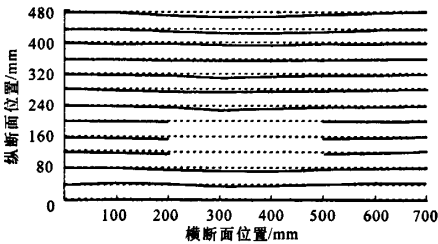
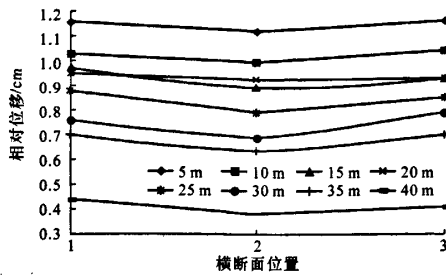


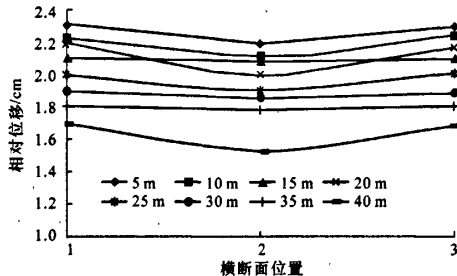
图 4 沟谷拱涵模型涵顶的沉降变化曲线

2.2 平坦地形管涵模型结果分析

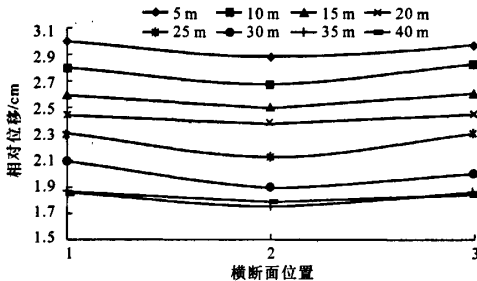
图 5、图 6 分别为 A 管涵和 B 管涵横断面相对位移变化图,位置 1、2、3 分别为涵洞左侧、中线和右侧位置。由图 5 可看出:随着填土高度的增加,涵洞上部填土的沉降量逐渐减小,A 管涵涵上上部填土的沉降量远小于涵洞左右两侧的填土沉降量。由图 6 可看出:B 管涵第一和第二分析层在离心模拟填土高度小于 25 m 时,相对位移均匀减小;当模拟填土高度大于 25 m 时,相对位移突然减小;但第三分析层相对位移减小的趋势较为均匀,无突变现象。这



(a) A管涵第一分析层随填土高度的变化曲线

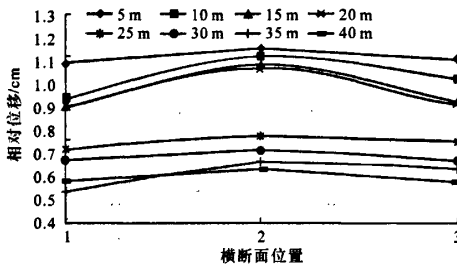


(b) A管涵第二分析层随填土高度的变化曲线

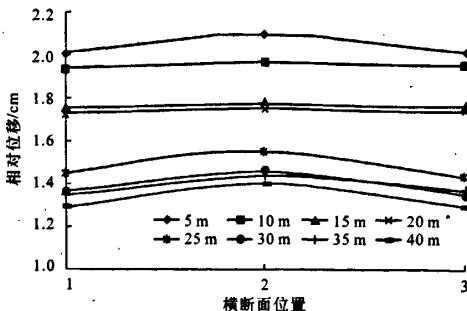


(c) A管涵第三分析层随填土高度的变化曲线

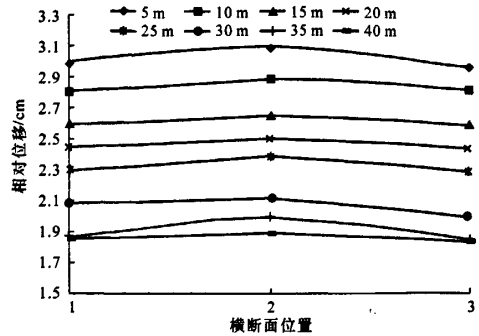
图5 A管涵横断面相对位移变化



(a) B管涵第一分析层随填土高度的变化曲线



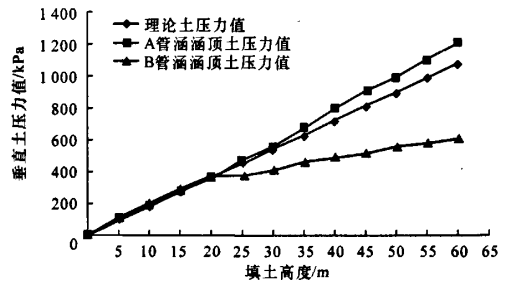
(b) B管涵第二分析层随填土高度的变化曲线



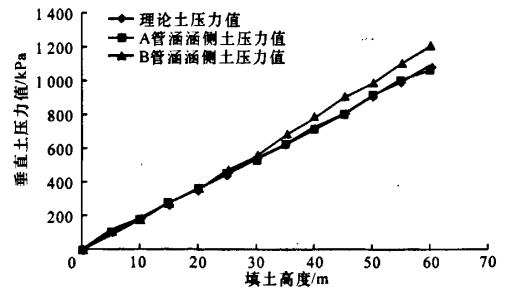
(c) B管涵第三分析层随填土高度的变化曲线

图6 B管涵横断面相对位移变化

说明柔性涵管填土增加到一定高度后,由于上方路堤的填料逐渐密实,在孔顶第二分析层和第三分析层之间产生了拱效应,使得孔顶的竖向位移有突然减小的趋势;同时,由曲线的上凸形态可以看出,涵管中线的相对位移明显大于两侧的相对位移。由图7可看出:A管涵的涵顶土压力值略大于理论土压力值,涵侧垂直土压力值与理论土压力值基本一致;柔性B管涵在较高填土时涵顶垂直土压力值远小于理论土压力值,并且这种变化趋势随着填土高度的增加越来越明显,而涵侧外垂直土压力值却大于理论土压力值,从而说明由于柔性涵管在上部荷载的作用下沉降量大于周围填土的沉降量。在填土较低时,增加较快,曲线斜率较大,其土压力值比较接近理论土压力值,说明涵洞上方未能形成明显的拱效应;但随着填土高度的增加,涵土压力值的生长开



(a) 管涵涵顶土压力值随填土高度的变化曲线



(b) 管涵涵侧土压力值随填土高度的变化曲线

图7 管涵涵顶和涵侧土压力随填土高度的变化曲线

始变慢,曲线变得平缓,土压力值仍在增长,但明显小于土柱压力值(理论土压力值),而涵外侧的土压力值却比理论土压力值大。这说明当填土较高时,在高填方柔性涵洞上方由于存在明显的拱效应,使涵洞的垂直土压力值减轻,孔顶外侧的土压力值则因“土拱”的存在而大于理论土压力值。试验结果同时表明,即使在上部土体中产生了拱效应,使得垂直土压力值小于理论计算,但土压力值的持续增加说明了高填方中的卸荷拱的稳定性不同于具有天然岩石介质的隧道上方卸荷拱。若采用经典的隧道卸荷拱理论进行荷载计算,有可能过低估计上部填土的垂直土压力值。通过结果比较可以看出,A管涵由于刚度较大,使其涵顶填土沉降量小于涵侧填土沉降量,所以涵洞上部填土不会产生拱效应。

3 结 语

(1)碎散体高填方路堤涵洞在沟谷地形边界条件影响下,涵洞上部填土可以产生拱效应;由于涵洞上方路基填料是不同于岩石的散粒体,产生的拱效应具有不稳定的特点;随着填土高度的增加,仍有部分土压力传递到涵洞上,使高填方涵洞涵顶的垂直土压力随填土高度的增加而增加。

(2)平坦地形下碎散体高填方路堤涵洞上部填土也可以产生拱效应,但必须具备两个条件:一是涵顶部填土达到一定高度;二是涵顶范围内填土的沉降值大于涵顶外侧填土的沉降值。

(3)高填方路堤填土介质为破碎的岩土,其上方填土产生的“土拱”具有不稳定的特点,表现为随着填土高度的增加仍有部分土压力传递到洞室上,涵顶土压力随填土高度成非线性增加。

参考文献:

References:

- [1] 顾子刚,方左英,姚祖康,等.公路设计手册:路基[M].北京:人民交通出版社,1997.
- [2] 杨锡武.山区公路高填方涵洞土压力理论及加筋减载研究[D].重庆:重庆大学,2004.
- [3] 杨锡武,张永兴.山区公路高填方涵洞的成拱效应及土压力计算理论研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3887-3893.
YANG Xi-wu, ZHANG Yong-xing. Study on arch action and earth pressure theory for culverts under high embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (21): 3887-3893.
- [4] 谭冬莲,方志.钢筋混凝土圆管涵竖向土压力计算方法[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):40-42.
TAN Dong-lian, FANG Zhi. Calculation method of vertical earth pressure on circular reinforced concrete culvert [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 40-42.
- [5] Rodriguez S J, Bishop P L. Three-dimensional quantification of soil biofilms using image analysis [J]. Environmental Engineering Science, 2007, 24 (1):96-103.
- [6] 黄志全,王思敬.离心模型试验技术在我国的应用概况[J].岩石力学与工程学报,1998,17(2):199-203.
HUANG Zhi-quan, WANG Si-jing. A survey of application of centrifugal model testing in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 199-203.
- [7] 康佐,杨晓华,谢水利,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 Xiao-hua, XIE Yong-li, 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.
- [8] 葛折圣,黄晓明.含EPS夹层台背回填材料的离心模型试验[J].交通运输工程学报,2004,4(1):11-14.
GE Zhe-sheng, HUANG Xiao-ming. Centrifugal modeling test on abutment backfill with EPS inclusion [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(1): 11-14.
- [9] 康佐,谢水利,杨晓华,等.减荷拱涵周围土体位移变化的离心模型试验[J].中国公路学报,2006,19(6):13-18.
KANG Zuo, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Centrifugal model test on displacement variation of earth surrounding reducing-load arch culvert [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (6): 13-18.