

山区公路高填方涵洞 土压力计算方法与结构设计

杨锡武 著



人民交通出版社

China Communications Press

U449

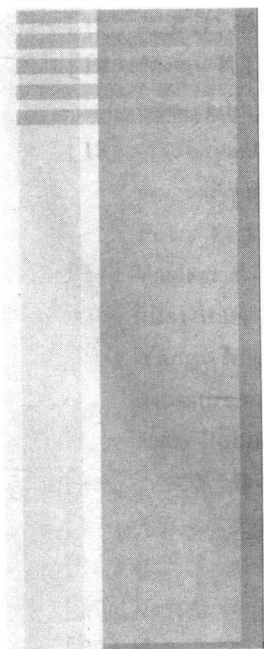
1

山区公路高填方涵洞 土压力计算方法与结构设计

Shanqu Gonglu Gaotianfang Handong

Tuyali Jisuan Fangfa Yu Jiegou Sheji

杨锡武 著



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

目前我国山区公路高填方涵洞较多,而国内外尚没有填土高度在 18m 以上的涵洞结构标准图供设计施工采用,也没有合适的土压力计算理论和方法,使高填方涵洞在设计 and 应用中产生了各种问题,而产生这些问题的根本原因是没有评价和计算高填土条件下涵洞上方的拱效应对土压力影响的理论和方法。本书系统地介绍了高填方涵洞的土压力变化规律和拱效应特点及一种新的高填方涵洞土压力计算公式和方法——反映高填方涵洞拱效应不稳定特点的非线性土压力计算方法;介绍了设计、施工简单,效果明显的高填方涵洞减载新方法——加筋桥加载及结构设计理论;用新的土压力计算理论公式计算得出了填土高度 18~50m 的不同孔径高填方拱涵和盖板涵的结构尺寸,供高填方涵洞及其他深填埋涵管结构设计参考应用。

本书可供公路工程和铁道工程专业、水利水电专业和岩土工程专业的设计、施工技术人员及大专院校教师、研究生和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

山区公路高填方涵洞土压力计算方法与结构设计 / 杨锡武著.

北京:人民交通出版社, 2006.8

ISBN 7-114-06011-4

I. 山... II. 杨... III. ①道路工程:涵洞工程—土压力—计算②道路工程:涵洞工程—结构设计
IV. U449

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 048875 号

书 名: 山区公路高填方涵洞土压力计算方法与结构设计

著 作 者: 杨锡武

责任编辑: 孙 玺

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 85285656, 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司.

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 9.75

字 数: 243 千

版 次: 2006 年 8 月 第 1 版

印 次: 2006 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-06011-4

印 数: 0001~2000 册

定 价: 20.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

高填方涵洞设计是我国 20 世纪 90 年代中后期在山区高等级公路建设中产生的一个新的结构设计课题。产生高填方涵洞的原因是:为了满足山区公路的纵面线形标准要求和利用附近路堑开挖产生的废方,使得在一些地形高差大的地段不得不采用高路堤或把桥梁方案改为高路堤通过,用涵洞进行这些地段的排水,使得这些地段的涵顶填土高度增大(在重庆地区有的高填方涵洞涵顶填土达 60m)。很明显,现有的涵洞设计标准图已不能满足这种高填土条件下的涵洞设计需要。这是因为与涵顶填土高度较低的涵洞相比,高填土条件下的涵洞具有填土高度大、土压力大但不随填土高度线性增加的特点,要使其结构设计安全可靠、经济合理,必须正确评价和计算高填土条件下的涵顶拱效应及拱效应对土压力的影响,过高或过低地估计拱效应对土压力的影响将会使涵洞的结构设计不安全或不经济,因此,如何进行拱效应条件下的土压力计算是高填方涵洞设计的重点和难点。同时,在高填方涵洞设计中,为了减小涵顶土压力,减小结构尺寸,节约工程费用,在设计中可以采取减载措施,所以,减载是高填方涵洞及其他深填埋涵管设计的另一重要课题。在我国经济高速发展、山区高等级公路大量修建的今天,研究高填方涵洞的土压力计算理论及减载无疑具有重要的技术和经济意义。

基于高填方涵洞结构设计在技术上存在的难题及对此问题进行研究的重要工程应用价值,本书系统地介绍了高填方涵洞土压力变化规律的模型试验、理论分析计算和现场试验工程测试的研究成果,包括:反映高填方涵洞拱效应不稳定特点的非线性土压力计算新方法;用加筋进行高填方涵洞减载的加筋桥减载方法和结构设计的理论公式;应用非线性土压力计算公式计算了填土高度 18~50m、孔径 2~5m 的高填方盖板涵和拱涵的结构尺寸。这些成果不但可以用于山区公路高填方涵洞的设计,对其他行业的深填埋涵管的结构设计也具有一定的参考应用价值。

高填方涵洞的土压力计算和结构设计属于深填埋地下涵管的设计问题,目前尚没有统一的合理设计理论和方法。限于作者水平,书中不妥甚至错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2006 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 公路涵洞的分类与构造.....	1
第二节 高填方涵洞及其特点.....	6
第三节 公路高填方涵洞结构设计及应用现状.....	8
第四节 高填方涵洞土压力计算方法的国内外研究现状	10
第二章 高填方涵洞的土压力变化规律	13
第一节 高填方涵洞土压力模型试验的模拟相似分析	13
第二节 高填方涵洞土压力变化规律的模型试验	20
第三节 不同边界条件下的高填方涵洞土压力变化规律	25
第四节 高填方涵洞土压力变化规律及影响因素的数值模拟	30
第三章 高填方涵洞的成拱效应及非线性土压力计算方法	41
第一节 填埋式洞室的土压力计算典型理论和方法	41
第二节 高填方涵洞的成拱效应	48
第三节 高填方涵洞的非线性土压力计算方法	50
第四节 非线性土压力计算理论与其他土压力计算方法的对比	55
第五节 非线性土压力计算公式与适用条件	60
第四章 高填土路基上的涵洞土压力及结构形式	62
第一节 高填土路基上的涵洞土压力模型试验	62
第二节 高填土上涵洞受力的数值模拟	64
第三节 高填土上的涵洞受力特点与设计原则	66
第五章 高填方涵洞加筋桥减载与结构设计方法	67
第一节 概述	67
第二节 高填方涵洞加筋桥减载原理	70
第三节 高填方涵洞加筋桥减载试验	71
第四节 加筋减载试验成果与分析	73
第五节 加筋桥减载的数值模拟	75
第六节 高填方涵洞加筋桥减载结构计算理论	82
第七节 加筋桥减载设计算例	87
第六章 高填方涵洞土压力变化规律及加筋减载的现场试验	90
第一节 现场试验工程概况	90
第二节 现场涵洞测试成果及分析	92

第三节 高填方涵洞加筋减载施工程序与质量要求	93
第七章 公路高填方涵洞结构与施工控制	95
第一节 高填方盖板涵的结构尺寸及主要工程数量	95
第二节 高填方拱涵结构设计尺寸及主要工程数量	114
第三节 山区公路高填方涵洞施工工艺及施工质量控制	125
第八章 山区公路涵洞水力计算及孔径确定	129
第一节 涵洞设计流量计算	129
第二节 涵洞孔径计算	143
参考文献	149

第一章 绪 论

涵洞是为宣泄地面水流(包括小河沟)而设置的横穿路基的小型排水构造物。按照《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)的规定:单孔标准跨径 $L_k < 5\text{m}$ (管涵及箱涵不论管径或跨径大小、孔数多少)称为涵洞。

在公路工程中,涵洞作为重要排水构造物,其构造简单,工程数量较小,就单道涵洞而言,工程造价也较低。但是,对整条公路来讲,由于小桥涵分布于全线,一般平原区公路每公里设小桥涵 1~3 道,山区公路则每公里 3~5 道,地形复杂时数量更多,因此,其工程量在全路的结构物中所占比重很大。据全国 195 条公路资料统计^[1],小桥涵投资占公路总投资的 20.56%,其投资额为大、中桥的 3 倍左右。由此可见,小桥涵的结构设计与布置是否合理,对整条公路的造价和使用质量都有很大影响。

第一节 公路涵洞的分类与构造

一、涵洞的分类^[2,3]

公路涵洞一般可根据如下条件进行分类:

1. 按建筑材料分类

涵洞按建筑材料分类,通常可以分为石涵、混凝土涵、钢筋混凝土涵、砖涵,有时也可用陶瓷管涵、铸铁管涵、波纹管涵、石灰三合土涵等。其中,石涵主要用于产石地区,可做成石盖板涵、石拱涵;混凝土涵可预制成拱涵、圆管涵和小跨径盖板涵;钢筋混凝土涵可用于管涵、盖板涵、拱涵以及软土地基上的箱涵。

2. 按构造形式分类

涵洞按构造形式可分为管涵(圆管涵)、盖板涵、拱涵、箱涵等。这几种不同构造形式涵洞的常用跨径与适用条件如表 1.1 所示。

不同构造形式的涵洞常用跨径与适用条件

表 1.1

构造形式	跨径(直径)(cm)	适用条件
圆管涵	50、75、100、125、150	有足够填土高度的小跨径暗涵
盖板涵	75、100、125、150、200、250、300、400	过水面积较大时,低路堤上的明涵或一般路堤的暗涵
拱涵	100、150、200、250、300、400	跨越深沟或高路堤时设置,石料丰富地区可用石拱涵
箱涵	200、250、300、400、500	软土地基时设置

3. 按涵顶填土高度分类

涵洞按涵顶填土高度可分为明涵和暗涵两类。明涵是指洞顶不填土的涵洞,适用于低路堤、浅沟渠;暗涵是指洞顶填土高度大于 0.5m 的涵洞,适用于高路堤、深沟渠。

4. 按孔数分类

涵洞按孔数可分为单孔、双孔和多孔涵等。

5. 按水力性质分类

根据水流通过涵洞的状态确定的涵洞水力计算图示,分为无压力式、半压力式和压力式三种,因此涵洞按水力计算图示和水力性质可以分为无压力涵洞、半压力式涵洞和压力式涵洞三类。

二、涵洞的构造

一道完整的涵洞由洞身、基础和洞口建筑三部分组成。就组成而言,高填方涵洞与一般低填方涵洞没有差别,但根据高填方涵洞所处地形地质条件、受力特点和排水要求,山区公路高填方涵洞多采用盖板涵和拱涵两种结构形式。

1. 洞身

洞身是涵洞的主要部分,通常由承重结构(拱圈或盖板等)、涵台、基础以及防水层、伸缩缝等部分构成。其作用是承受荷载与土压力并传递给地基,并具有保证设计水流通过的必要孔径,同时坚固稳定。

(1) 盖板涵

盖板涵主要由盖板、涵台、基础、洞身铺底、沉降缝及防水层等部分组成。

① 盖板:盖板是涵洞的承重结构部分,可用石盖板或钢筋混凝土盖板。跨径在 2m 以下,石料丰富时,一般可采用石盖板。作盖板石的石料,质量必须严格选择,一般石料标号应在 40 号以上,板厚随填土高度及跨径而异,一般为 15~40cm。当孔径大于 2m 或在无石料地区时,宜采用钢筋混凝土盖板,其厚度为 8~30cm,跨径为 1.50~6.00m。对于上部有填土的暗涵和填土高度较大的高填方涵洞,应采用钢筋混凝土盖板,其厚度随填土高度的增加而变化,应根据填土高度和土压力的大小确定。

② 涵台、基础:涵台和基础一般用浆砌块、片石构成。砂浆强度等级为 M7.5,基础厚度一般 60cm,或根据地基条件确定。

(2) 拱涵

拱涵由拱圈、护拱、拱上侧墙、涵台、基础、涵底铺砌、沉降缝及排水设施等部分组成。

① 拱圈:拱圈是拱涵的承重结构部分,可由石料、混凝土等材料构成。高填方拱涵常用采用等厚的圆弧拱,矢跨比常用 1/2,不同填土高度的高填方拱涵的拱圈厚度随填土高度而变化,应通过土压力计算确定。

② 护拱:护拱的作用主要是保护拱圈,防止活载冲击,使拱圈受力均匀,通常用 M5 水泥砂浆砌片石构成。护拱高度一般为矢高的一半。

③ 涵台、拱上侧墙、基础:涵台、拱上侧墙、基础多用 M7.5 砂浆砌块、片石砌筑,基础厚度 60cm 或根据地基条件确定。

(3) 沉降缝及防水层

涵洞沿洞身长度方向应分段设置沉降缝,以防止不均匀沉降引起洞身开裂。设置沉降缝的一般原则如下:

①涵洞与急流槽、端墙、翼墙等结构分段处设置沉降缝,以使洞口沉降不致影响洞身。沉降缝应贯穿整个断面(包括基础),缝宽约 2~3cm。

②沉降缝沿洞身每隔 3~6m 设一道,具体位置需结合地基土质变化情况及路堤高度而定。高填方涵洞在路基宽度与边坡交界处应设置一道沉降缝。

③凡地基土质发生变化、基础埋置深度不同或基础地基压力发生较大变化以及基础填挖交界处,均应设置沉降缝。

④凡采用填石抬高基础的涵洞,都应设置沉降缝,其间距不宜大于 3m。

⑤置于均匀岩石地基上的涵洞,可不设置沉降缝。

⑥斜交正做涵洞,沉降缝与涵洞中心线垂直;斜交斜做涵洞沉降缝与路中心线平行,但拱涵、管涵的沉降缝应与涵洞中线垂直。

沉降缝应用填充料填筑,其方法如下:

①基础衬边以下,填嵌沥青木板或沥青砂板,也可用粘土填入捣实,并在流水面边缘用 1:3 水泥砂浆填塞,深约 15cm。

②在基础衬边以下,接缝处外侧以热沥青浸制麻筋填塞,深度约 5cm,内侧以 1:3 水泥砂浆填塞,深约 15cm,中间如有空隙可以填粘土。

③在基础衬边以上,应顺沉降缝周围设置粘土保护层,厚约 20cm。

涵洞防水层的做法及要求如下:

①各式钢筋混凝土涵洞的洞身及端墙,在基础面以上,凡被土掩埋部分的表面,均应进行防水处理,其方法是涂以两层热沥青,每层厚 1~1.5mm。

②混凝土及石砌涵洞(包括端、翼墙)被土掩埋部分的表面,只需将圬工表面做平、无凹入存水部分,可以不设防水层。

③钢筋混凝土明涵,采用 2cm 厚防水砂浆或 4~6cm 防水混凝土。

④石盖板涵顶可用 10~15cm 草筋胶泥糊顶防水层,并将表面做成拱形,以利排水。

(4)涵底铺砌

为使水流安全通过涵洞,减小对涵底的冲刷,需要对涵底和进出水口的河床进行加固铺砌,并有一定的纵坡,以利排水,其最小坡度为 0.4%。必要时在涵洞前后加设调治构造物和消能设施。涵底铺砌厚度一般为 30cm,采用干砌或 M5 浆砌片石。

2. 洞口建筑

洞口建筑是洞身、路基、河道三者的连接构造物,位于涵洞上游侧的洞口称进水口,位于涵洞下游侧的洞口称为出水口。其作用是:一方面使涵洞与河道顺接,使水流进出顺畅;另一方面确保路基边坡稳定,使之免受水流冲刷。洞口建筑连接着洞身与路基边坡,应与洞身较好地衔接并形成良好的宣泄水流条件。

山区公路地形条件复杂,涵洞洞口形式多样,构造多变,十分灵活。根据涵洞类型、所处河沟水流特点、地形及路基断面形式等因地制宜地选择好洞口形式,做好进出水口处理,对于确保涵洞及路基的稳定、水流畅通具有重要作用。山区公路涵洞常用洞口形式有以下几种:

(1)八字墙洞口

八字墙洞口形式如图 1.1。这种洞口为重力墙式结构,特点是:构造简单、结构较美观,常用于河沟平坦顺直、无明显河槽,且沟底与涵底高差变化不大的情况。当墙身较高时(一般大

于5m),圬工体积增加较多,不太经济。八字墙墙身砌筑对石料的形状及规格要求较高,一般需要用块石砌筑。

八字翼墙墙身与路中线垂直方向的夹角叫扩散角。按水力条件考虑,并经过实验,进口水流扩散角以 13° 为宜,出口扩散角不宜大于 10° 。但为便于集纳水流和减小出口翼墙末端的单宽流量,减少冲刷,扩散角多采用 30° ,并且左右翼墙对称。经验表明,扩散角过大则靠近翼墙处易产生涡流,致使冲刷加大。因此设计时应按不同河沟地形情况因地制宜灵活设置,以利于合理集纳和扩散水流,使之与原沟渠顺接。当扩散角 $\beta=0^{\circ}$ 时,八字墙墙身与公路中线垂直,叫直墙式洞口,如图1.2。直墙式洞口主要适用于涵洞跨径与河沟宽度基本一致,无需集纳和扩散水流或仅为疏通两侧农田灌溉时的情况。直墙式洞口翼墙短且洞口铺砌少,较为经济。

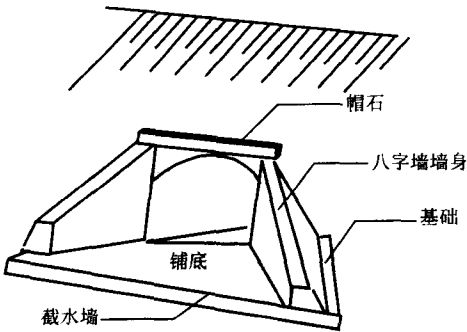


图 1.1 涵洞八字墙洞口

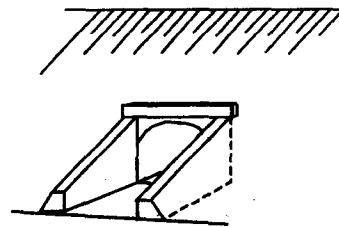


图 1.2 涵洞直墙式洞口

当涵洞与路线斜交时,为更好地汇集水流,宜采用斜交八字墙洞口形式。当洞口帽石方向不与路线方向平行时,即构成斜做洞口(通常称为斜交斜做洞口)。当洞口帽石方向与涵轴线方向垂直时,即构成正做洞口(通常称为斜交正做洞口)。正做洞口的翼墙一般采用正翼墙,较长一侧的翼墙叫大翼墙,较短的叫小翼墙。由于正做洞口两个翼墙的高度不同,因而其伸出的长短亦不一致,其翼墙尾端的连线应与路中线平行,端墙和帽石可做成台阶或斜坡式两种。

(2)端墙式洞口

在涵洞两端的垂直于台身,并与洞顶台身同高的矮墙叫端墙(又叫一字墙)。在端墙外侧,可用砌石的椭圆锥坡或天然土坡或砌石护坡或挡土墙与天然沟槽和路基相连接,即构成各种形式的端墙式洞口。这种洞口仅在沟床稳定、土质坚实的情况下才采用。

端墙配锥形护坡洞口(如图1.3),是最常用的一种洞口。它的使用条件与八字墙相类似。但由于它比八字墙洞口水流条件要好些,因而常用于宽浅河沟或孔径压缩较大的情况。当墙高较高时(一般大于5m),由于其稳定性和经济性比八字墙较好,因而它更适用于涵台较高的涵洞。此外,由于锥坡的表面坡度可以随路基边坡坡度变化,因而能适应各种不同路基边坡的情况,灵活性比八字墙较强。

当涵洞与路线斜交时,锥坡洞口一般多用斜交正做洞口。其端墙亦可做成斜坡式或台阶式。

(3)跌水井洞口

当天然河沟纵坡度大于50%,涵洞进口开挖大以及天然沟槽与洞口高差较大时,为使沟槽或路基边沟与涵洞进口连

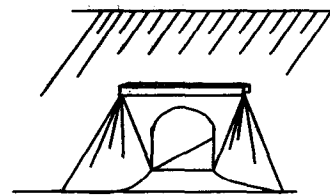


图 1.3 端墙配锥形护坡洞口

接,常采用跌水井洞口形式。其形式可根据地形条件采用边沟跌水井洞口,如图 1.4 所示。

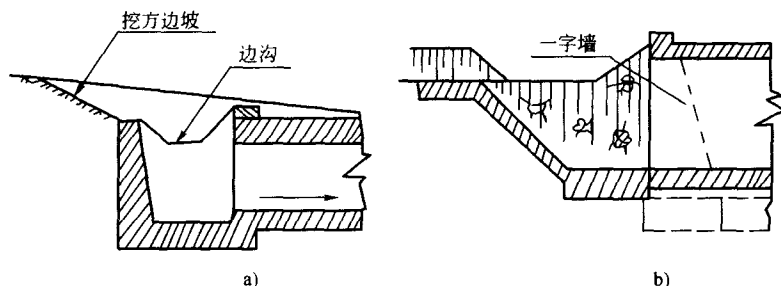


图 1.4 跌水井洞口

a) 边沟跌水井洞口; b) 一字墙跌水井洞口

3. 基础

涵洞的基础对涵洞的使用质量具有较大影响。砖涵、石拱涵等都要求具有坚实稳定的基础,其他类型的涵洞也要求基础不能有过的沉降,而且沉降必须均匀。因此,涵洞应尽量避免设置在地基松软、强度不均匀或地质条件不良的地段,当地基强度较低而无法避让时,应采取措施对地基进行加固或加强处理。涵洞基础设计包括基础形式和埋深两方面。

(1) 基础形式

一般涵洞基础采用 M7.5 砂浆砌块、片石,厚度 60cm 或 100cm。高填方涵洞基础可根据地基承载力情况采用与低填方涵洞相同的基础形式,或刚性扩大基础或整体式基础形式。当地基承载力较低,处理费用较高时,可与改沟结合,调整涵位,满足地基承载力要求和排水要求。

(2) 基础埋置深度

确定涵洞基础埋置深度主要考虑三个因素:一是地基的强度,即承载力的大小,不同土壤地质条件的地基基本承载力如表 1.2 所示;二是水流的冲刷能力;三是地基冰冻的程度。考虑这三方面因素,基础埋置深度应符合下列要求:

①当地基为基岩时,基础可直接置于基岩上,但应清除风化层。如风化层较厚难于清除时,亦可置于风化层上。高填方涵洞的基础应尽量置于基岩或中风化层上。

②当地基为一般土壤河床,又无冲刷时,基础应埋于地面下 0.6m 或 1.0m(盖板涵用 0.6m,石拱涵及小桥用 1.0m)。如河床上有铺砌时,一般宜设在铺砌层底面以下 1.0m。

③当地基为淤泥或软弱层时,应根据地质情况采取扩大基础、块石挤淤等加固措施,或移动涵位,改为岸坡设涵。

④在有冲刷的河流上,因涵洞都设有铺砌,一般不考虑冲刷深度对基础埋深的影响。

⑤冰冻对地基的影响较大,地基土壤冻胀后承载能力大大降低,特别是春季土壤消融后引起土基翻浆,严重影响基础的稳定。因此在冰冻地区,基础埋置深度还应考虑冰冻深度。当地基土壤为不冻胀层(如岩石、卵石、中粗砂等)时,可不受冰冻深度限制。一般情况下基础应埋于冰冻线以下 0.25m。但对于孔径小、洞身长的涵洞基础埋置,可只将洞口两端 2m 范围内的基础埋于冰冻线以下 0.25m;其余洞内基础可视情况埋于冰冻层内,一般为冰冻深度的 0.6~0.7 倍;对于地基土属于弱冻胀土的小桥涵基础,可埋在冻结层内,但其深度不小于最大冻土深度的 70%。

⑥当涵洞位于陡坡上时,基础可做成台阶形,台阶高度与长度之比不宜大于 1:2,以免造成台阶过高或过短致使转折处产生裂缝。

地基基本承载力表 表 1.2

地 基 类 型		地 基 性 状		基本承载力	备 注
一般粘性土		密实 (空隙比 ≤ 0.7)	硬塑(液性指数 $I_L<0.5$)	294~441	空隙率及液性 指数小者取高限, 大者取低限
			软塑($I_L>0.5$)	186~372	
		疏松 (空隙比 ≥ 0.8)	硬塑(液性指数 $I_L<0.5$)	186~372	
			软塑($I_L>0.5$)	118~235	
砂性土	细砂	密实及中等密 实(相对密度 > 0.33)	潮湿(饱和度 $\leq 80\%$)	196~343	密实取高限,中 密取低限
	粉砂		饱和(饱和度 $> 80\%$)	98~294	
	砾砂、粗砂		与湿度无关	392~539	
	中砂			343~441	
石质土	卵石土	松散		294~490	含硬质岩块及 砂性土取高限,含 软质岩块、粘性土 含水量大者取低 限
		中密		588~980	
		密实		980~1176	
	碎石土	松散		196~392	
		中密		490~784	
		密实		784~980	
	砾石土	松散		196~294	
		中密		392~686	
		密实		686~882	
岩石	坚硬岩石	抗压强度 $R> 29.4\text{MPa}$	碎石状	1.47~1.96	易软化岩石及 极软岩石浸水时 取低限
			块碎状	1.96~2.94	
			大块状	>3.92	
	软岩石	$R=4.9\sim 29.4\text{MPa}$	碎石状	0.784~1.176	
			块碎状	0.98~1.47	
			大块状	1.47~2.94	
	极软岩石	$R<4.9\text{MPa}$	碎石状	0.392~0.784	
			块碎状	0.588~0.784	
			大块状	0.784~1.176	

第二节 高填方涵洞及其特点

1. 高填方涵洞的划分

我国的公路桥涵设计规范^[4]中对高填方涵洞并没有明确定义。根据前述的涵洞分类,高

填方涵洞属暗涵,但根据高填方涵洞涵顶填土高度变化较大的特点,对于设计应用来讲,仅用暗涵概念是不够的。其原因在于涵洞上的填土压力并非随填土高度的增加而线性增加,当填土达到一定高度后将在涵洞上方产生拱效应,使得土压力小于土柱的重量。若此时进行涵洞结构设计不考虑拱效应作用而减少的土压力,所得出的涵洞结构尺寸将会很大,而使得结构设计不经济甚至浪费;反之,若过分强调拱效应作用,低估高填土下作用于涵洞上的土压力,则可能会使设计的涵洞尺寸太小而不安全。由此可知,当填土达到多大高度才考虑拱效应和如何考虑拱效应是高填土条件下涵洞设计的关键,也是高填方涵洞与低填方涵洞结构设计的重要区别。因此,划分高填方涵洞和低填方涵洞对于涵洞设计的安全可靠和经济合理具有十分重要的意义。

根据目前我国桥涵设计手册中的暗涵最大填土高度^[3,4],以及我国路基设计规范^[5]、文献^[6]对高填方路基的定义及路基边坡进行稳定性验算的高度,把填方总高度超过 20m 的填方路基为高路堤。在确定高填方涵洞与低填方涵洞的填土高度界限时,根据高填方涵洞产生拱效应的填土高度,同时考虑到施工中填土性质和压实度变化对土压力的影响及涵洞结构的安全性,建议涵顶填土高度 18m 为划分高填方涵洞与一般低填方涵洞的填土高度界限。涵顶填土高度 $H \geq 18\text{m}$ 的涵洞为高填方涵洞,结构设计时应考虑拱效应,并采用相应方法计算土压力。

需要指出,在山区高等级公路的建设中,另一种“高填方涵洞”是基础设在高填土(软基)上的涵洞。在一些半填半挖路基上或高填方路基上,由于地形的限制或为了缩短涵洞长度,节约工程造价,把设于原地面上的涵洞置于回填土上,形成另一类位于高填方地基上的“高填方涵洞”。这种高填方涵洞的涵顶填土并不高,但由于其位于高填方上,地基比较软弱,容易产生沉降,于是产生了另一类高填方涵洞的涵洞形式选择和结构设计问题。这种地段的涵洞可以归结为软基上的涵洞。

高填方涵洞的结构形式一般有石拱涵、混凝土拱涵、钢筋混凝土盖板涵、钢筋混凝土箱涵和圆管涵几种。具体应用时,可以根据当地材料来源、地基条件、地形条件、施工技术条件、工程投资和工期等条件的不同,选择合理的涵洞形式。

2. 高填方涵洞的特点

与低填方(填土高度 18m 以下)涵洞和其他填埋式地下涵管相比,公路高填方涵洞具有以下特点:

(1)高填方涵洞对地基沉降要求高。高填方涵洞一般为石拱涵(或混凝土拱涵或钢筋混凝土盖板涵),基础的不均匀沉降将导致涵台的开裂或拱圈的开裂与塌陷,同时涵洞的坍塌会引起路面的沉降破坏。因此,高填方涵洞对基础承载力及均匀性要求较高,一般要求地基为基岩。

(2)工程量大,造价高。由于填土高度大,高填方涵洞洞身较长,造价较高,如果结构设计不合理,结构尺寸偏大,则使高填方涵洞的造价剧增,造成浪费;反之,结构尺寸太小,可能会使结构承载力不能满足荷载要求而导致涵洞的开裂坍塌,酿成工程事故,并增加加固维修工程费用。

(3)涵洞所处地形条件变化较大,受力复杂。有些高填方涵洞所处沟谷地势相对开阔,高填方路基长度较大,涵位距天然山坡较远;有的沟谷则地势狭窄呈“V”形,涵位距岸坡较近;有的涵洞为了减少涵长或由于沟心地基条件太差,地基处理费用太高,在选择涵位时把涵洞设于

岸坡脚一侧,非对称受力;有的高填方涵洞为了节约工程造价,把涵洞设于高填方或岸坡上,以缩短涵洞长度,并通过改沟达到排水目的。这些涵洞所处的地形边界不同,其受力条件亦不一样,因此其受力大小、结构尺寸、安全性及经济性亦明显不同。

(4)承受的土压力大。由于填土高度大,使其承受的土压力随填土高度的增加而增加,结构尺寸也随填土高度而增大。

(5)加固维修难度大。高填方涵洞的填土高度大,长度大,一旦产生破坏病害,不仅会引起路基路面沉降,影响道路正常营运,而且由于涵洞长度大,通风采光条件差,工作面狭窄,加固维修困难。

由于高填方涵洞的上述特点,必须对其涵位选择、结构设计和施工质量控制予以高度重视,确保工程质量。

第三节 公路高填方涵洞结构设计及应用现状

一、山区公路高填方涵洞的应用现状

20世纪90年代以前,我国修建的高等级公路较少,公路线形标准普遍较低,高填深挖路基很少,但到20世纪90年代中后期,随着国家经济的快速发展,尤其是西部大开发战略的实施,山区高等级公路越来越多。在多山的云贵川等西部地区,为满足高等级公路的线形标准要求,高填深挖路基已是山区公路常见的路基结构形式。而高填方路基地带一般为地势最低洼的地带,为满足排水与人行的要求,在这些高填方路段就必须修筑排水或同时排水与通行的涵洞,即高填方涵洞;此外,在一些山沟较深的路段,原设计为桥梁,但由于附近有大量挖方无地方堆弃,为避免征地堆放,造成工程费用的增加和水土流失,从节约工程造价与环保出发,常把桥梁设计方案改成高路堤,采用涵洞排水,由此产生了由桥改高路堤用涵洞排水的高填方涵洞。如成渝高速公路三星沟隧道出口一段36m高的高填方就是为消化附近隧道挖方的弃渣而由3跨70m箱形拱桥改成高路堤,其下设跨径5.0m、拱圈厚度达1.5m的高填方拱涵,且地基较为软弱,下面采用加筋和塑料排水板复合措施进行了地基加固处理;在渝(重庆)长(长寿)高速公路B合同段,为消化附近立交桥开挖及附近挖方的弃土,亦把100多米长的桥改为高填方,填方最高处27m,设计的高填方涵洞为跨径3.0m的石拱涵,拱圈厚60cm;在重庆丰都—忠县二级公路上,为消化附近开挖废方,把一座60m跨径的钢筋混凝土拱桥改为高填方路堤,最大填土高度达34m,设计的高填方涵洞为3m跨径的钢筋混凝土盖板涵;此外,在太原东山过境高速公路K10+841处设有一道高2.0m、宽2.0m,涵顶填土高度达54.7m的拱涵^[7]。

二、山区公路高填方涵洞结构设计存在的问题

在山区高等级公路高填方涵洞增多的同时,国内外涵洞设计中却没有填土高度在15m以上的涵洞土压力计算方法,更没有结构设计标准图^[8,9],使得山区公路高填方涵洞不得不进行单独设计,在进行单独设计时也没有合适的理论指导。根据我国的桥涵设计规范^[4],涵洞的设计荷载采用垂直土压力计算公式 $\sigma = \gamma h$ 进行计算,但这个公式仅适用于较低填土条件下的涵洞土压力计算。在进行高填方涵洞设计时,若仍然采用这个公式计算土压力,一些高填方涵洞

的结构尺寸将过分保守,使涵洞的结构造价及地基工程处理费用大大增加,造成经济上不必要的浪费;另一方面,由于高填方涵洞没有合适的土压力计算理论,部分高填方涵洞凭经验比拟设计,过分强调拱效应作用,使涵洞结构尺寸偏小,导致部分高填方涵洞在施工期间或填土完成后即出现各种不同形式的开裂破坏病害,增加了加固维修费用^[10,11],造成经济上的浪费。文献[10]对303座填土较高的涵管的开裂调查统计表明,涵管开裂者占63.5%,其中有70%为纵向开裂。管顶填土高度 H 愈大,管道外径 D 越大,则纵向开裂的比例越高。对这些破坏病害的分析表明,过大的土压力是产生这些破坏病害的一个重要原因。

高填方涵洞在应用中存在着各种病害,产生这些病害的一个根本原因是高填方涵洞的结构设计缺乏合理的土压力计算方法,凭借低填方涵洞或隧道的土压力计算方法计算涵顶土压力,而不针对高填方涵洞本身的加载与受力特点及填土高度,采用相应的土压力计算方法计算涵顶土压力进行涵洞的结构尺寸和相应的地基处理措施,使高填方涵洞结构过分保守或不安全,导致高填方涵洞工程造价的增加或产生破坏病害。

因此,为使高填方涵洞结构设计安全可靠、经济合理,首先必须解决其土压力计算理论和方法。高填方涵洞的土压力计算属人工深填埋地下洞室的土压力计算问题,其问题的核心是在计算土压力时是否应该考虑拱效应?如何考虑拱效应?在不同地基条件下土压力计算如何考虑地基条件与沉降对涵洞土压力的影响?关于对这些问题的研究最早始于水利水电工程地下填埋式沟管的土压力计算。这些排水结构物的特点是尺寸较大,填土高,但填土的压实可不考虑对地面结构物的影响。在国际上,专门对公路高填方涵洞的土压力计算问题进行的研究则与各个国家的自然地形条件密切相关,具有一定的特殊性,不同国家对这个问题的研究深度及重点明显不同。

此外,由于高填方涵洞的填土高度大,土压力大,在涵管孔径大、填土高的条件下,涵顶将产生巨大的土压力,使涵洞结构尺寸很大和地基处理费用很高而不经济。在这种情况下,采取合理的工程技术措施,对高填方涵洞进行减载,减小涵顶土压力是另一项重要的研究课题,但在国内的高填方涵洞及其他填埋式涵管设计中尚未引起重视。有关高填方涵洞的减载研究在国外已有一定的研究成果,包括室内试验和现场试验研究成果^[13~15]。其减载的方法主要是在涵顶上方一定高度范围内用软质材料(如轻质膨胀的聚苯乙烯块、淤泥质粘土等)填筑,形成土拱效应达到减载目的,并取得了一定的经济效益。在国内,有关高填方涵洞减载研究的文献很少见到。这说明过去我国公路高填方涵洞较少,有关高填方涵洞的土压力计算和减载问题并不突出。国内主要重视了适应大土压力的高填方涵洞结构研究,对减载的研究重视不够。然而,在一定条件下,减载可能会给工程带来很大的节约。文献[16]是目前国内报道到关于地下涵管减载方法研究的极少数文献之一。该文献用三种不同变形模量的海绵(聚氨酯泡沫塑料)作减载材料,模拟现场采用的聚苯乙烯泡沫塑料柔性填料,在室内进行了模型试验,以研究柔性填料在填土重力作用下,通过变形对应力的调整能力,得出了管顶柔性填料的变形模量、厚度、管道突出地面高度和填土高度等因素的变化与减荷效果的关系,采取减载措施的管道垂直土压力的计算方法等一些规律性的室内试验成果。但这些研究仅停留在室内试验上。有关高填涵洞减载的现场试验国内尚未见到有文献报道。此外,对高填方涵洞的减载研究还可用于施工过程中涵洞开裂病害的处治,通过减载减小作用于开裂病害涵洞上的土压力而不用进行结构加固。

第四节 高填方涵洞土压力计算方法的国内外研究现状

高填方涵洞土压力计算理论属于深埋地下洞室的土压力计算问题,有关深埋地下洞室的土压力计算理论在国内外都有一定的研究。就我国而言,在东南沿海地区和北方地区,地势平坦,高填方路基较少,高填方涵洞也很少,因此,高填方路基及相应的高填方涵洞问题较少;而在西南的云贵川及重庆和陕西等西部地区,地势起伏大,在过去的公路修建过程中,由于道路等级低,线形标准低,公路线形基本是顺着地形随弯就弯修建,15m 以上的高填方路基很少,高填方涵洞也不多见,因此,早期的公路桥涵设计标准图的涵洞最大填土高度也仅为12m^[9]。但随着公路等级的提高与大量山区高等级公路的修建,为满足公路的较高线形标准要求,过山沟地带的高填方路基增多,12m 已是山区公路非常普遍的一般路基填方高度,填土高度在20m 以上的路基也较为常见。这些低填方条件下的涵洞结构已不能满足山区高等级公路路基排水设计的需要,使山区公路高填方涵洞的结构设计问题变得比较突出,已成为目前我国山区高等级公路建设中的重要研究课题之一。一些工程对高填方涵洞的结构设计和施工控制都作了应用研究。

在国内的研究中,文献[10]在室内用砂作填料,制作了125cm×145cm×50cm 的室内模型,研究了地基刚度与涵洞刚度之差在涵洞上引起的附加应力变化情况,得出了当涵顶与涵台外的沉降差为 $+\delta$ 时,将使作用于涵洞上的土压力 σ_v 增大,反之使 σ_v 减小,涵顶附加土压力 $\Delta\sigma_v$ 的大小完全取决于参数 δ 变化的结论,提出涵顶土压力可用公式 $\sigma_v = \gamma H + \Delta\sigma_v$ 计算的土压力计算方法。此方法的不足是无论填土有多高,作用于涵顶上的土压力仍用不考虑拱效应的低填土条件下的土压力公式 $\sigma_v = \gamma H$ 计算,在高填土条件下得出的土压力将会很大,因此不适合高填方涵洞的土压力计算;其次,这种方法考虑了由涵顶填土与涵台外填土沉降差产生的附加剪应力作用。而模型试验表明,高填土条件下,涵顶和涵台外填土沉降差相对于高填方涵洞的填土而言较小,由此引起的填土沉降差将可以忽略,因此也不适用于高填方涵洞的土压力计算。文献[17,18]用1:25 的相似比在室内制作了200cm×200cm×150cm 的三维模型,用碎石与河砂作碎散体模拟材料,研究了涵洞的应力随填土高度变化的情况。其研究结果表明,随着填料高度的增加,涵洞拱上的压力增大,但并不呈线性增加,当填方层厚度大于5 倍涵洞宽度之后,涵洞拱上的压力小于自重压力;并且证明,碎散体沉降在涵洞的拱上产生负摩擦力,使拱上压力大于碎散体自重应力这一结论的局限性。与文献[4]所得结论相反,三维模型试验还证明碎散体能够形成压力拱,压力拱形状为半椭圆而不是抛物线,进一步推导出了碎散体涵洞的半椭圆形压力拱曲线,并以能否形成压力拱为条件,提出了划分深埋洞室与浅埋洞室的填土高度计算公式。深埋洞室的填土高度为:

$$h \geq \frac{2a}{\tan^2(45^\circ - \varphi/2) \cdot \tan\varphi} \quad (1.1)$$

能形成全压力拱的浅埋洞室的填土高度为:

$$h < \frac{2a}{\tan^2(45^\circ - \varphi/2) \cdot \tan\varphi} \quad (1.2)$$

上两式中: $2a$ ——涵洞的孔径;

φ ——填土的内摩阻角。

三维模型试验最后还推导出了不同条件下碎散体高填方涵洞拱顶的土压力计算公式。其研究还表明,现行涵洞土压力计算理论与实际监测结果相差较大,不适应于高填方涵洞的土压力计算;涵洞的施工不是在碎散体中开挖洞室,而是在涵洞拱结构上堆填碎散体,涵洞拱上的应力取决于涵洞的整体刚度和高填方层的厚度与刚度。在应用方面,文献[7]根据文献[10]的研究结论,现场进行了对比试验与验证,通过土压力和路基顶面沉降测试,证明了文献[10]的一些假设。文献[19]根据隧道的卸荷拱理论,将涵洞顶部 24.53m 高的填土压力减为按 10m 高设计,修筑了 1 跨 3m 的拱涵,拱圈厚 0.40m,用 M7.5 浆砌片石砌筑,拱圈的矢跨比 1/2,采用土牛拱胎施工。在施工过程中,当填土到 18m 高度时,拱圈上出现了顺涵的纵向裂缝,裂缝从上游拱脚处斜向延伸至下游洞口另一侧的拱脚处,在中部近拱顶处约 8.0m 处的一段内裂缝最宽达 10mm 以上,但裂缝经过一个多月观察未发展。后来也未进行加固,继续填筑,直到设计标高。最后整道涵洞未作加固,裂缝亦尚未发展,趋于稳定。文献建议在高填土涵洞设计中可以采用卸荷拱理论,以减少一部分土压力,使涵洞结构经济;同时文献还分析了施工过程中产生裂缝的原因主要是涵洞的一岸出现滑坡,以及填土未能充分压实所致。这是典型的用卸荷拱理论,考虑高填方涵洞拱效应而设计的涵洞,为后来高填方涵洞设计是否应该考虑拱效应提供了现场试验案例。文献[20~22]则通过数值模拟分析对高填方涵洞的结构受力和影响高填方涵洞受力的因素进行了分析计算和研究,从理论上对高填方涵洞的受力机理进行了探讨。

高填方涵洞的涵位变化较大,其基础的地质条件也很不同,而高填方涵洞的土压力较大,对基础要求较高,在地基承载力较低条件下,地基处理方法的不同对涵洞工程造价有重要影响,因此,国内对高填方涵洞研究的另一个主题是关于高填方涵洞的地基加固处理^[23~25]。这些文献从工程应用的角度介绍了基础破坏引起涵洞破坏的实例、高填方涵洞的基础设计、加固处理方法等,对高填方涵洞的基础设计、加固方法以及设计中对基础的考虑有一定的指导意义,是高填方涵洞结构设计和研究的重要课题之一,尽管目前的研究仍处于工程试验阶段。

在国外,如欧美等国和地区的自然地形条件与中国差别较大,经济发达,公路设计、建设更重视环保,在设计施工中要求尽量减少对天然山体的破坏,逢山挖洞,遇沟架桥,尽量减少高填深挖路基,保护环境;在同样公路等级和地形条件下,其高填方路基和高填方涵洞很少。这些发达国家和地区虽然已具有完善的高速公路网,高速公路已基本建完,但有关高填方涵洞的研究成果并不多见,有关低填方涵洞或明涵的试验与研究成果则较多。相比之下,前苏联对高填方涵洞这种散粒体作用下的地下填埋洞室研究较多且较为深入。克列因著的《散粒体结构力学》较为深入地研究了埋入散粒体(土体)内结构物上的土压力^[26],提出了填埋式地下洞室的土压力计算方法、计算力学模型,同时介绍了一些相关的室内试验与现场测试成果,但是其提出的计算方法与试验结果更多集中于不考虑地表结构变形的水利水电工程地下排水涵管的土压力计算;对公路高填方涵洞这种既要考虑结构的受力与安全性,又要考虑对路面影响的地下填埋洞室的土压力计算方法未作出分析研究。但是,该著作中提出的填埋于散粒体内的结构物的土压力计算方法和考虑拱效应的土压力计算方法,对研究高填方涵洞的土压力计算理论仍具有重要的参考价值。

在涵洞土压力试验研究方面,文献[12]用离心模型研究了不同跨径条件下箱涵土压力随