

Analysis of Loads on Culvert and Influencing Factors

涵管的作用荷载 与影响因素分析

刘保健 谢永利 程海涛 著

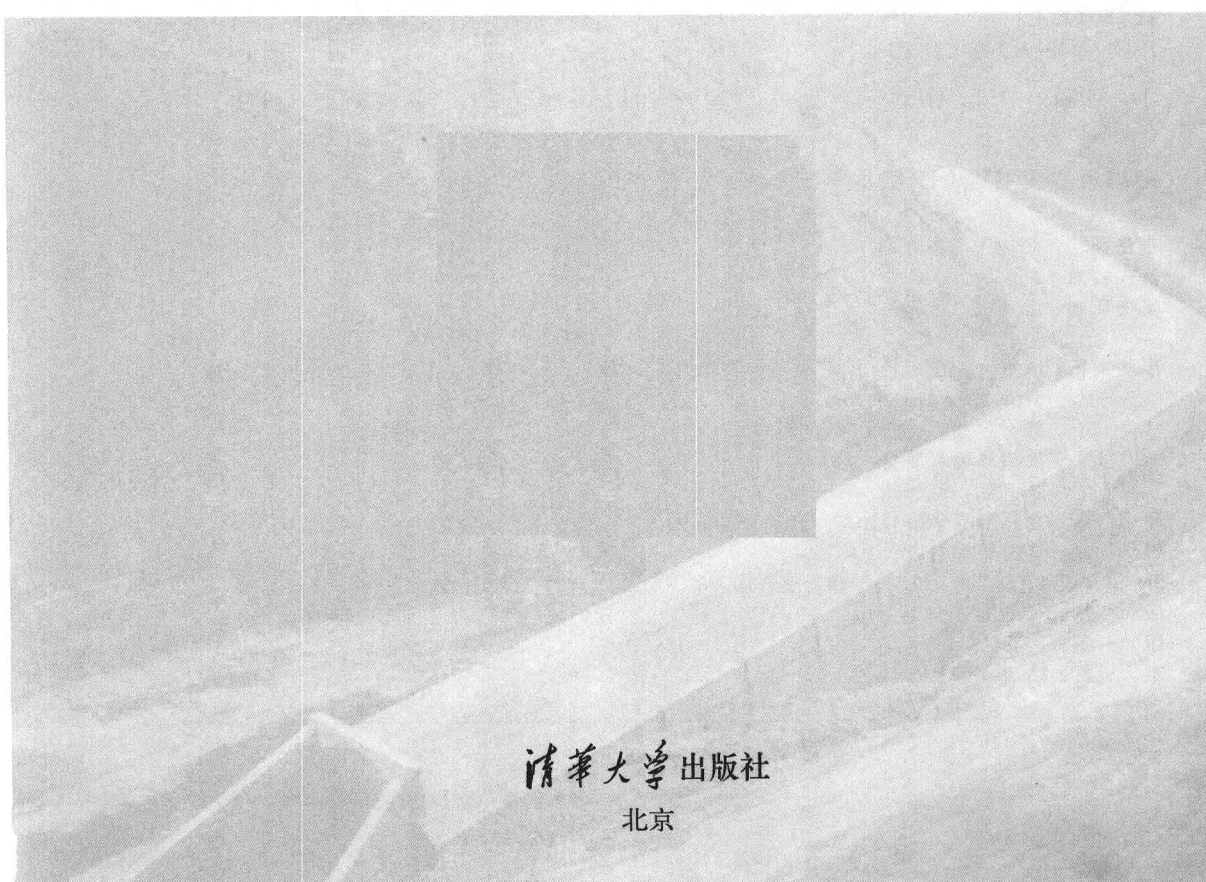


清华大学出版社

Analysis of Loads on Culvert and Influencing Factors

涵管的作用荷载 与影响因素分析

刘保健 谢永利 程海涛 著



清华大学出版社
北京

前 言

涵洞和涵管属于小型工程,在某些情况下甚至是附属工程,因此在工程勘察和设计中往往不被重视。另一方面,涵洞和涵管又是土体中的构筑物,它和周围土体共同工作,相互作用,工作机理复杂。到目前为止,用常规的结构力学验算方法并不能取得满意的设计结果,甚至是一种误算,多数情况下,这种算法低估了土体对涵管的作用力,从而引起结构病害。

涵洞、涵管是小型工程、附属工程,因而在理论与技术方面往往不被重视。现行的涵洞和涵管设计理论基本上是借用或套用的,没有自成体系,没有考虑涵管的工作特性,甚至有些套用是完全错误的。例如,将工业与民用建筑的地基及基础设计原则套用到涵管工程就是错误的。正确的计算,错误的原则,会产生严重的工程问题。

本书较为系统地介绍了目前学术与工程界对涵洞和涵管问题的研究成果,同时添加了作者的研究成果和独到见解。愿本书能为工程设计研究人员、在校学生提供参考。对于书中的错误和有争议的问题,期待读者同仁给予批评指教。

2009 年 1 月

目 录

第 1 章 概述	001
1.1 涵洞与涵管	001
1.2 涵管的应用	003
1.3 涵管应用中存在的问题	003
第 2 章 涵管受力分析模型	008
2.1 长安大学“质弹剪”模型	008
2.2 顾克明《涵洞》手册模型	015
2.3 Marston-Spangler 模型	019
2.4 温特克恩《基础工程手册》模型	020
第 3 章 涵管竖向土压力计算理论及方法	022
3.1 经典土压力计算理论及规范确定方法	022
3.2 Marston 竖向土压力计算理论	027
3.3 曾国熙竖向土压力计算方法	037
3.4 顾安全竖向土压力计算方法	038
3.5 其他竖向土柱模型方法	042
3.6 楔形土体涵管竖向土压力计算方法	054
3.7 卸荷拱竖向土压力计算法	061
3.8 经验拟合方法	065
3.9 结构抗力法	069
3.10 其他竖向土压力计算公式	069

3.11	土压力数值计算方法	070
3.12	对涵管竖向土压力问题的思考和建议	070
第4章	涵管竖向土压力影响因素	072
4.1	涵管竖向土压力影响因素研究综述	072
4.2	涵管竖向土压力影响因素分类	076
4.3	涵管竖向土压力影响因素分析结果	076
4.4	部分影响因素目前确定方法及水平	087
第5章	涵管竖向土压力分布调整措施	091
5.1	涵管竖向土压力分布调整技术综述	091
5.2	涵管竖向土压力定量调整设计方法	094
5.3	涵管竖向土压力施工调整方法	101
第6章	涵管地基与基础设计方法	103
6.1	概述	103
6.2	涵管地基与基础常规设计方法	105
6.3	对涵管地基与基础设计的认识和建议	109
第7章	涵管受力研究方法及实例	113
7.1	概述	113
7.2	静力模型试验法	113
7.3	离心模型试验法	123
7.4	原型试验	124
7.5	分析的分析与研究的研究	136
第8章	对涵管工程设计的建议	142
8.1	概述	142

8.2 对竖向土压力计算的建议.....	142
8.3 对涵管地基及基础设计的建议.....	144
参考文献	145
致谢	153

第 1 章

概述

1.1 涵洞与涵管

涵洞主要是为宣泄地面水流(包括小河沟)或供人通行而设置的横穿道路的小型排水或交通构造物,也可用于城市的供排水系统。涵管主要用于城市的供排水系统,也可用于横穿道路的排水。涵洞与涵管也可同时用于城市地下管线。

涵洞(管)可按表 1-1 所示的建筑材料进行分类。

表 1-1 按建筑材料分类^[2]

种类		适 用 性	优 缺 点
常用	石涵	产石地区,可做成石盖板涵、石拱涵	节省钢筋、水泥,经久耐用,造价、养护费用低
	混凝土涵	可现场浇注或预制成拱涵、圆管涵和小跨径盖板涵	节省钢筋,便于预制;损坏后修理和养护较困难
	钢筋混凝土涵	用于管涵、盖板涵、拱涵;软土地基上可用箱涵	涵身坚固,经久耐用,养护费用少;管涵、盖板涵安装运输便利,但耗钢量较多,预制工序多,造价较高
	砖涵	平原或缺少石料地区,可做成砖拱涵,有时做成砖管	便于就地取材;强度较低,在水流含碱量大或冰冻地区易损坏
其他	陶瓷管涵	陶瓷产地,定型烧制	强度较高;运输、安装时易碎
	铸铁管涵	工厂化生产的金属定型产品	强度很高;长期受水影响易锈蚀
	波纹管涵	小跨径暗涵	力学性能好;施工管节接头不易处理,易锈蚀
	石灰三合土涵	可做成石灰三合土篾管涵或拱涵	强度较低,造价低;水流冲刷极易损坏

涵洞(管)也可按表 1-2 所示的构造型式进行分类。

表 1-2 按构造型式分类^[2,8]

构造型式	跨(直)径/cm	适用性	优缺点
圆管涵	50、75、100、125、150	有足够填土高度的小跨径暗涵	对基础的适应性及其受力性能都较好,不需墩台,圬工数量少,造价低
盖板涵	75、100、125、150、200、250、300、400	过水面积要求较大时,低路堤上的明涵或一般路堤的暗涵	构造较简单,维修容易,跨径较小时用石盖板,跨径较大时用钢筋混凝土盖板
拱涵	100、150、200、250、300、400	跨越深沟或高路堤时设置;山区石料资源丰富,可用石拱涵	跨径较大,承载潜力较大;自重引起的恒载也较大,施工工序较繁多
箱涵	200、250、300、400、500	软土地基时设置	整体性强;用钢量多,造价高,施工较困难
柔性波纹管	15~300	软土及不均匀土地基	对基础的适应性及其受力性能都较好;耐腐蚀

涵洞(管)也可按填土高度或孔数分类^[2]。按洞顶填土情况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;暗涵是指洞顶填土大于50 cm 的涵洞,适用于高路堤、深沟渠。涵洞按孔数可分为单孔、双孔和多孔等。

涵洞(管)也可按表 1-3 所示的水力性质进行分类。

表 1-3 按水力性质分类^[2]

水力性质	外观描述	适用性
无压力式	进口水流深度小于洞口高度,水流受侧向约束,进口后不远处形成收缩断面。下游水面不影响水流出口,水流流经全涵保持自由水面	要求涵顶高出水面,涵前不允许壅水或壅水不高时
半压力式	水流充满进口,呈有压状态,但进口不远的收缩断面及以后的其余部分均为自由水面,呈无压状态	全涵净高相等,涵前允许一定的壅高,且略高于涵进口净高
有压力式	涵前壅水较高,全涵内充满水流,无自由水面。一般出口被下游水面淹没,但升高式进水口(流线型),且涵底纵坡小于摩阻坡度时,出口不被下游水面淹没	深沟高路堤,不危害上游农田、房屋前提下,涵前允许较高壅水
倒虹吸管	进出水口设置竖井,水流充满全部涵身	横穿路线的沟渠水面标高基本同于或略高于路基标高

1.2 涵管的应用

涵洞是公路工程中的重要组成部分之一。在公路工程中,无论是在工程数量还是在工程造价方面,涵洞都占有相当的比重。据有关资料介绍:小桥涵工程数量约占桥涵总数的70%~80%,在平原地区,每千米平均约有1~3道(座),山岭重丘地区,每千米平均约有4~6道(座);小桥涵工程造价约占桥涵总额的50%以上。在小桥涵中,涵洞又占绝大多数,在平原地区,混凝土圆涵占涵洞的80%以上,有的几乎达到100%。因此可以说,不存在没有涵洞的公路^[136]。

例如,在总长77.7 km的汾离高速公路中,填方高度超过20 m的涵洞工程有100余处,有的填方高度甚至超过40 m^[139]。以云南省为例,一二级公路中平均每千米有3~5道涵洞,三四级公路中平均每千米有5~7道涵洞,工程量比重达10%~40%^[128]。

除了道路,涵管也广泛用于城市建设的各种工程中,如污水管、雨水管、自来水管、煤气管、热力管等。涵管已经成了城市基础设施的重要组成部分,是不可或缺的生命线,其设计标准可与工业与民用建筑和桥梁设计标准相媲美,对其重视程度远高于道路工程中对涵管的重视程度。目前,更多的农用涵管也正在建设中。因此,对涵管建设提出了更高的质量要求。

1.3 涵管应用中存在的问题

顾安全教授^[39]于20世纪60年代对涵洞的病害进行了调研分析,在调研的303座涵洞中,管道开裂破坏占63.5%,其中70%属纵向开裂(原因是设计土压力小于实际土压力)。

魏红卫^[56]于2000—2001年在湖南两条公路圆管涵裂缝的调研中发现,填土高于6 m的圆管涵裂缝较普遍,个别涵洞甚至发生坍塌。

赵立岩^[136]根据对所在地区各级公路的观测、调查和了解,发现多数混凝土圆管涵洞在使用3个月~2年后即出现不同程度的各种病害,其中约有8%的涵洞需进行大中修或改建;涵洞的破损情况,不论是在绝对还是相对数量方面,都大大高于桥梁;在洪水期,其水毁率达70%以上,是公路水毁的首发之处和重点部位。

赵立岩认为涵洞病害的表现形式主要为:

(1) 洞身部分:混凝土管节贯通性(径向、纵向)裂纹或断裂、边缘破损、缺口;管节

一端或整个沉陷、错口、分裂;管节缝隙的沥青麻絮脱落;涵上路基沉陷,出现孔洞,涵顶跳车;由于裂缝、沉陷等原因引起水从管节接口处渗漏,流水冲刷垫层、基座和路基,并形成洞外排水。

(2) 涵洞洞口部分:端墙、翼墙向外倾斜;墙体断裂、破碎,表面剥落,向外渗漏水;洞口铺砌层碎裂、下沉、水毁;隔(截)水墙碎裂、倒塌;水从铺砌层下面和隔水墙内流出。

按其发生与发展情况,赵立岩把病害分为:

(1) 按病害出现的时间(由早到晚)

涵管管节接口错口、沉陷→沥青麻絮脱落、断落→铺砌层碎裂、下沉→翼墙外倾→端墙开裂和外倾。

(2) 按病害比重(由大到小)

管节下沉、错口、分离→沥青麻絮脱落→翼墙外倾→洞口铺砌和隔水墙破损、水毁→管节大裂纹→端墙断裂、外倾。

(3) 按病害程度(由重到轻)

洞口铺砌碎裂下沉→管节分离、错口、下沉→翼墙倾斜、倒塌→隔水墙水毁→墙体表面剥落、渗漏水。

例如,109线二期某工程K181+355~K182+800段为重丘区,天然沟壑分布密集,路基处于大填大挖路段,地貌特征为小五台山背坡,坡陡水急,冲刷十分严重,故多处设置钢筋混凝土管涵。涵身处于砂性土路基填料中。竣工通车不久,发现该路段涵管出现明显裂缝,甚至破坏^[140]。李亚东认为其破裂原因主要有以下三点:管顶荷载过大;管壁10cm偏薄;管壁内设筋偏细,导致管壁拉应力偏小,受力筋拉断。其中,土压力过大是造成涵管破裂的最主要原因。

冯忠居在文献[81]中提到某工程路基中设置的一座涵洞,其地表为3~5m厚度不等的淤泥,原设计采用桩基,涵洞采用2.5m跨径的半圆拱型结构,其上最高填土20m。结果填土还未达到设计高度,涵洞结构就出现破坏。再次重建,又遭破坏,最后只能改用其他方案处理。他认为发生破坏的原因是涵洞与桩基的刚度较其两侧填土及淤泥地基的刚度大得多,从而在涵洞顶引起极大的沉降差与附加应力,使涵洞顶土压力远远超过计算值。

杨龙江^[137]通过对登封地区铁路涵洞开裂问题进行调查,发现有的涵洞同一节基础落在不同承载力的地层上;有的基底有孤石存在,孤石四周是低承载力地基;有的地基表面是均质地层,而其下却有陷坑、穴洞等隐患;有的地基本身整体条件较差,达不

到设计的承载要求。遇到这些情况,如果不采取相应的措施对基底进行严格处理,涵洞修建时或承重后必将产生不均匀下沉而导致涵洞开裂。如登封铁路某工程 K59+999 段的 1.0~6.0 m 板涵,由于施工时对当地地质条件了解不够,致使涵洞基础坐落在一条沉积沟上,涵洞建成后东边墙严重下沉,整个涵洞拉裂。他还指出在涵洞砌筑过程中,沉降缝的预留是有规范规定的,无论是基础部分还是墙身部分,一旦出现砌体部分相互啮合,即基础、边墙或盖板(拱)的沉降缝不在同一铅垂面上,沉降缝将不能发挥其应有的作用,当涵洞砌体与地基一同轻微下沉时,由于各部位的沉降量不同,就会造成基础、边墙、盖板(拱)相互错动,这是涵洞开裂的一个重要原因。雨季来临后洞口处积水,则可能浸泡冲刷基底,甚至掏空基底,引起部分涵身倾斜或不均匀下沉,导致涵洞开裂。如登封铁路某段 K46+783 的 1.0~4.0 m 的交通涵,由于涵基进水,水流冲刷造成涵洞出口端翼墙下沉。其主要原因为施工工序不当,出入口没有及时铺砌,致使雨季水流浸入冲刷。按规范要求,涵背填土必须水平对称进行,若对涵背填土采取偏填高填,或重型路基压实机械在施工时距涵背太近,涵洞上方填土在 1 m 以下就通过或进行重型机械碾压,则可使涵洞承受不均匀荷载,造成涵洞侧墙偏载或遭受集中应力破坏,其结果是将涵洞挤裂或推裂。

王熙东^[127]通过对侯西铁路侯禹段 K66~K68 湿陷性黄土地基上的 11 座涵洞进行调查,发现路基成型后涵洞均发生了不同程度的病害,主要表现为:

(1) 涵洞整体下沉,下沉呈锅底形,以中部沉陷量最大,出入口次之,并波及到出入口 6~7 m。同时,下沉量与填土高度及湿陷等级关系密切,与之呈正比关系。

(2) 盖板箱涵边翼墙开裂,裂缝普遍发生在靠近出入口端涵长 1/3 处,向洞身逐渐消失,多为斜裂缝和水平裂缝。

(3) 矩形涵板顶接头处挤伤。

(4) 涵洞外地面及建筑物开裂,影响范围 4.0~13.5 m,开裂房屋数十间。

曹增平^[124]通过对青藏铁路可可西里至尺曲段涵洞使用情况进行调查,发现产生病害的涵洞有 42 座,占涵洞总数的 24%,其中严重病害 8 座,一般病害 23 座,轻微病害 11 座,使用良好率为 76%,且病害分布具有明显的区域性。

吴少海^[125]通过对青藏公路格拉段二级公路多年冻土区的 772 座涵洞使用情况进行调研,发现大部分采用钢筋混凝土圆涵和钢筋混凝土盖板涵形式的涵洞均发生了不同程度的破坏,其中严重破坏的占总数 15.4%,一般破坏的占 21.1%,轻微破坏的占 63.5%。涵洞破坏最多、最严重的部位为出入口端翼墙和出入口铺砌。以上两种破坏类型占已破坏涵洞的 86%以上。

作者对西部地区 5 省 17 条高速公路 182 个涵洞进行了实地调研,发现 80% 以上的涵洞存在不同程度的病害,如表 1-4 所示。

表 1-4 涵洞病害调研汇总

调研涵洞类型及比例	常见病害特征	占所属类型比例	主要原因	典型涵洞
拱涵 (9%)	涵身沿纵向裂缝及纵横向裂缝,拱脚开裂	63%	结构竖向荷载及水平荷载过大,涵身强度不足	达(州)——渝(重庆)K19+548 白(银)——兰(州)K1684+100
	基础开裂,沉降缝拉裂,涵身错位	19%	地基不均匀沉降	柳(沟河)——忠(河)K21+900
	进水口铺砌层破裂,水从底部渗出	3%	质量差	西(安)——黄(陵)K145+650
箱涵 (7%)	洞顶路面不均匀沉降,结构顶部和底部有裂缝	43%	结构荷载过大及不均匀沉降	西(安)——临(潼)K24+180
圆管涵 (14%)	涵洞中部沉降过大,洞内淤积,路面开裂及跳车	35%	结构荷载过大,地基处理不当	达(州)——渝(重庆)K13+434 天(水)——岷(口)K33+400
	涵身纵向裂缝,结构挤压变形	20%	结构荷载过大或涵身强度不足	达(州)——川(成都)K72+500
	基础开裂,沉降缝拉裂,涵身错位	18%	地基不均匀沉降	天(水)——岷(口)K33+400
盖板涵 (70%)	板顶结构裂缝,洞身与路基连接处有裂缝	35%	结构荷载过大或涵身强度不足	白(银)——兰(州)K1652+750
	翼墙开裂、偏移	28%	不均匀沉降及水平荷载过大	天(水)——岷(口)K06+950 玉(溪)——元(江)K113+950
	沉降缝变形、错位	13%	地基不均匀沉降	玉(溪)——元(江)K201+300
	进水口铺砌层破裂,水从底部渗出	5%	质量差	元(江)——磨(江)K264+990

从以上文献及调研可见,目前涵洞(管)病害非常普遍,之所以发生这种状况,作者认为主要有以下原因:

- (1) 土建类高校中没有设置关于涵管设计的专门课程。
- (2) 公路行业将小桥涵结构设计的安全等级定为三级,但却按用途或习惯将其归

在与小桥同类规范进行设计,忽视了涵管工作的特点,即忽视了涵管与土体共同工作的特点。

(3) 涵管设计理论不成体系,例如,涵管的过水断面根据水力学原理或交通用途确定,作用在涵管周边的土压力根据半无限成层土弹性体、主动土压力、被动土压力、隧道围岩土压力、散粒体的卸载拱压力进行确定,应用较混乱,需要理顺、指导、创新。

(4) 涵管地基和基础的设计,基本上是套用工业与民用建筑的地基与基础理论或桥台地基与基础的理论,忽视了涵管作用特点,存在前提和概念的错误。

(5) 现有的设计理论与方法中没有考虑涵管与土体共同工作机理,既不成体系,也存在互不相容的矛盾现象。

(6) 施工方法的差异对涵管的受力影响较大,现有设计理论或规范没有考虑这一点。

如上所述,对涵管的作用荷载与影响因素进行系统研究是非常必要的。

2.1 长安大学“质弹剪”模型

涵管与周围介质共同作用机理一直是涵管工程问题研究的重点,文献[2,23]对该问题均作了研究,并提出了涵土共同作用模型,但此分析模型仅能模拟部分工况下涵土共同工作机理。在前人工作及研究的基础上,作者提出了能够分析各种工况下涵管与周围介质共同工作机理的“质弹剪”模型。该模型分为横向与纵向两种形式,如图 2-1、图 2-2 所示。

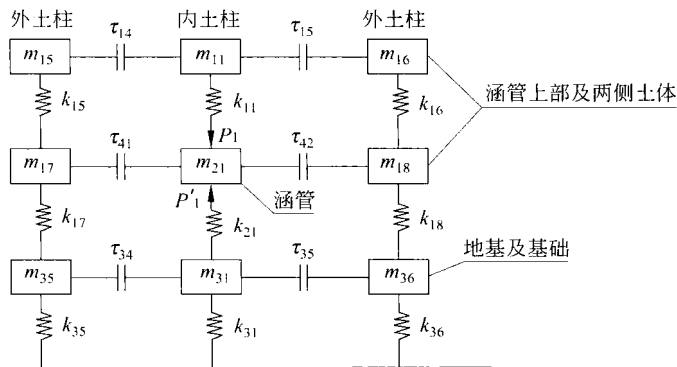


图 2-1 涵管与周围介质共同工作横向受力模型

基于图 2-1、图 2-2 所示的涵管与周围介质共同工作模型,可以分析各种工况下涵管受力性状,下文根据图 2-1 所示横向受力模型进行分析。

工况 1 上埋式-刚性涵管-刚性地基及基础

该工况下涵管为刚性,地基为刚性,则在图 2-1 中令

$$k_{21} = \infty$$

$$k_{35} = k_{31} = k_{36} = \infty$$

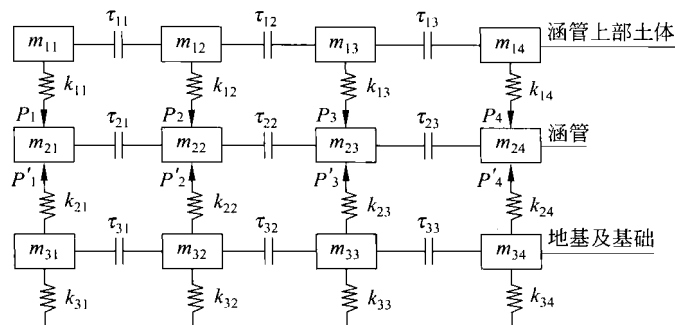


图 2-2 涵管与周围介质共同工作纵向受力模型

m_{1i} —涵管上部及两侧土体重量； m_{2i} —涵管重量； m_{3i} —涵管地基及基础重量； k_{1i} —涵管上部及两侧土体弹簧刚度，相当于土体的变形模量； k_{2i} —涵管弹簧刚度，相当于涵管的变形模量； k_{3i} —涵管地基及基础弹簧刚度，相当于地基及基础的变形模量； τ_{1i} —涵管上部土体间剪切力，反映了土体剪切特性； τ_{2i} —涵管节间的剪切力； τ_{3i} —涵管地基及基础间剪切力，反映了地基及基础自身的剪切特性； τ_{4i} —涵管与涵管两侧土体间的剪切力，反映了涵管与两侧土体间摩擦力； P_i —涵管顶土压力； P'_i —涵管底部应力。

假定涵管上部与两侧填土性质相同，则有：

$$m_{15} = m_{11} = m_{16} = m_{17} = m_{18}$$

$$k_{15} = k_{11} = k_{16} = k_{17} = k_{18} \ll k_{21}$$

假定涵管等效密度与填土密度相等，则有：

$$m_{17} = m_{21} = m_{18}$$

考虑涵管上部内外土柱间的剪切力，即

$$\tau_{14} = \tau_{15} > 0$$

不考虑涵管与两侧填土间的剪切力，即

$$\tau_{41} = \tau_{42} = 0$$

根据上述填土与涵管刚度假定，易知外土柱沉降大于内土柱沉降，涵管顶部土压力为：

$$P_1 = m_{11} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

涵管底部压力为：

$$P'_1 = m_{11} + \tau_{14} + \tau_{15} + m_{21} > m_{11} + m_{21} \quad (\text{土柱压力} + \text{涵管自重})$$

这说明该工况下涵管顶部土压力产生集中现象，大于土柱压力。

如果考虑涵管与两侧填土剪切力，即 $\tau_{41} = \tau_{42} > 0$ ，则内外土柱沉降差较前述情况

要小,因而剪切力 $\tau_{14} = \tau_{15}$ 较前述情况要小。涵管顶底部压力为:

$$P_1 = m_{11} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

$$P'_1 = m_{11} + m_{21} + \tau_{14} + \tau_{15} + \tau_{41} + \tau_{42} > m_{11} + m_{21} \quad (\text{土柱压力} + \text{涵管自重})$$

这说明仍是在涵顶发生应力集中现象。

如果仅涵管宽度范围内地基为刚性,而两侧填土地基为非刚性,则相当于软基中涵管下地基用桩基等进行良好处理而两侧未处理(多数情况下仅涵基下进行地基处理条件也类同),此时

$$k_{35} = k_{36} \ll k_{31} = \infty$$

如果不考虑涵管与内侧填土、涵管下刚性地基与两侧非刚性地基的剪切力,即

$$\tau_{41} = \tau_{42} = \tau_{34} = \tau_{35} = 0$$

易知,相对于内土柱外土柱的沉降差更大,由于涵管周围填土一般处于非极限状态,根据 τ - ϵ 本构关系易知,剪应力增加。则涵管顶部土压力为:

$$P_1 = m_{11} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

且 P_1 大于涵管下及两侧地基均匀刚性时的涵管顶土压力,即土压力在涵管顶部集中现象更为明显,容易导致涵管破坏,文献[59,81]涵管病害调研即印证了这一点。在设计时应避免这种情况。

工况 2 上埋式-柔性涵管-刚性地基及基础

与工况 1 的不同之处仅是涵管刚度,令 $k_{21} \ll \infty$,其余与工况 1 相同。

当 $k_{21} \ll k_{17} = k_{18} = k_{15} = k_{16} = k_{11}$ 时,考虑涵管上部填土剪切力,即 $\tau_{14} = \tau_{15} > 0$;不考虑涵管与两侧填土剪切力,即 $\tau_{41} = \tau_{42} = 0$ 。由上述刚度假定易知,内土柱沉降大于外土柱沉降,因而涵管顶、底部土压力为:

$$P_1 = m_{11} - \tau_{14} - \tau_{15} < m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

$$P'_1 = m_{11} + m_{21} - \tau_{14} - \tau_{15} < m_{11} + m_{21} \quad (\text{土柱压力} + \text{涵管自重})$$

这说明当涵管刚度远小于填土刚度时,涵管顶部土压力部分转移至两侧,压力小于土柱压力。

当 $k_{21} \gg k_{17} = k_{18} = k_{15} = k_{16} = k_{11}$ 时,同工况 1 中刚性涵管类似,外土柱沉降大于内土柱沉降,但沉降差小于刚性涵管工况。此时涵管土压力在涵管顶部产生应力集中,涵管顶、底部压力分别为:

$$P_1 = m_{11} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

$$P'_1 = m_{11} + m_{21} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} + m_{21} \quad (\text{土柱压力} + \text{涵管自重})$$

当 $K_{21} = K_{17} = K_{18}$,即涵管刚度与填土刚度相等时,内外土柱相对沉降差为零,此

时 $\tau_{14} = \tau_{15} = 0$, 涵管顶部与底部压力分别为:

$$P_1 = m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

$$P'_1 = m_{11} + m_{21} \quad (\text{土柱压力} + \text{涵管自重})$$

这说明该工况下, 涵顶土压力可能大于、小于或等于土柱压力, 这取决于涵管刚度与填土刚度之比。

工况 3 上埋式-刚性涵管-柔性地基及基础

该工况下涵管为刚性, 令 $k_{21} = \infty$, 而填土与地基为柔性有:

$$k_{15} = k_{11} = k_{16} = k_{17} = k_{18} \ll k_{21} = \infty$$

$$k_{35} = k_{31} = k_{36} \ll k_{21} = \infty$$

假定 $m_{35} = m_{31} = m_{36}$, 其余同前。

考虑 $\tau_{14} = \tau_{15} > 0$, $\tau_{41} = \tau_{42} = 0$, $\tau_{34} = \tau_{35} = 0$, 由上述刚度假定易知, 外土柱沉降大于内土柱沉降, 则涵管顶、底部压力分别为:

$$P_1 = m_{11} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

$$P'_1 = m_{11} + m_{21} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} + m_{21} \quad (\text{土柱压力} + \text{涵管自重})$$

这说明该工况下土压力涵管顶部产生应力集中, 大于土柱压力。

工况 4 上埋式-柔性涵洞-柔性地基及基础

该工况下填土、涵洞、地基及基础均为柔性, 令:

$$k_{15} = k_{11} = k_{16} = k_{17} = k_{18} \ll \infty$$

$$k_{35} = k_{31} = k_{36} \ll \infty$$

$$k_{21} \ll \infty$$

各层 m 假定同前。

当 $k_{21} \ll k_{17} = k_{18}$, 即涵管刚度远小于填土刚度时, 仍考虑 $\tau_{14} = \tau_{15} > 0$, 而令 $\tau_{41} = \tau_{42} = \tau_{34} = \tau_{35} = 0$, 易知内土柱沉降大于外土柱沉降, 涵管顶、底部土压力分别为:

$$P_1 = m_{11} - \tau_{14} - \tau_{15} < m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

$$P'_1 = m_{11} + m_{21} - \tau_{14} - \tau_{15} < m_{11} + m_{21} \quad (\text{土柱压力} + \text{涵管自重})$$

即涵管顶、底压力均小于土柱压力。

当 $k_{21} \gg k_{17} = k_{18}$ 时, 同理易知:

$$P_1 = m_{11} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} \quad (\text{土柱压力})$$

$$P'_1 = m_{11} + m_{21} + \tau_{14} + \tau_{15} > m_{11} + m_{21} \quad (\text{土柱压力} + \text{涵管自重})$$

即在涵顶出现应力集中现象, 涵顶土压力大于土柱压力。

当 $k_{21} = k_{17} = k_{18}$ 时, 内外土柱沉降差相等, 压力沿横向均匀分布, 有: