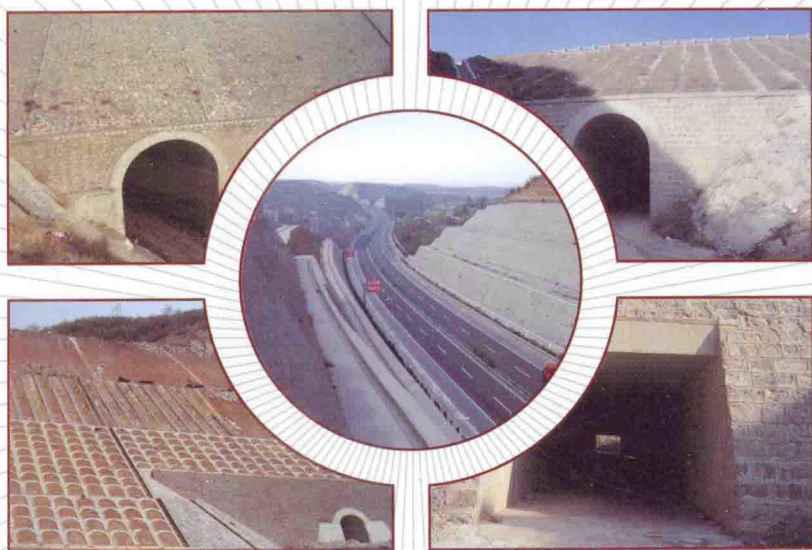


高填方涵洞工程特性 理论与应用

赵队家 张军 马强 著



科学出版社

高填方涵洞工程特性 理论与应用

赵队家 张 军 马 强 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书结合工程调研、现场试验、数值模拟和理论分析等研究手段,揭示了高填方路堤下涵洞非线性土压力的分布和变化规律,以及填土内部的土拱效应,推导了非线性土压力理论计算表达式;探讨了填土高度、边界条件、涵洞几何尺寸、填料性质及地基刚度等因素对填土-涵洞结构体系受力和变形的影响,并对涵洞减载措施进行了研究;根据不同的地形条件,结合理论分析和数值模拟对高路堤下涵洞的选型和选址进行了系统研究;分析了地基受力和变形特性及其影响因素;考虑涵洞基础的埋深效应,对涵洞地基承载力进行修正,确定了涵洞地基处理的范围,并对不同地基处理方法的效果进行了对比分析;同时,对地震荷载和交通荷载作用下高填方涵洞的动力响应进行了系统分析。

本书可供从事公路、铁路和水利工程科研、设计、施工和管理的相关人员参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

高填方涵洞工程特性理论与应用/赵队家,张军,马强著. —北京:科学出版社,2014.5

ISBN 978-7-03-040479-4

I. ①高… II. ①赵…②张…③马… III. ①涵洞工程—研究 IV. ①U449

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 081544 号

责任编辑:汤 枫 / 责任校对:张怡君
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 5 月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:222 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

山区高速公路高填方涵洞应用广泛,现行公路桥涵设计通用规范中线性土压力理论未能准确反映涵顶垂直土压力变化规律,土压力计算结果与实际情况存在较大差异,导致涵洞在施工或使用过程中出现不同程度的病害。此外,由于设计人员对涵-土相互作用机理认识不足,未能充分考虑高填方路堤下涵洞基础的埋深效应和地基承载力的修正,对涵洞地基承载力提出了过高的要求,从而使地基的刚度显著增大,一方面造成经济浪费,另一方面使涵顶应力集中现象加剧,给涵洞带来严重的安全隐患。

在国家自然科学基金委员会、山西省交通运输厅等各级领导的关怀和支持下,山西省交通科学研究院联合华中科技大学、中国地质大学、湖北工业大学和黄土地地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室等多家单位成立了“山区高速公路通涵工程设计理论与方法、关键技术及工程应用”课题攻关小组。经过近6年的艰苦努力,课题组在山区高填方涵洞受力特性、设计理论、减载措施、选型与选址、地基承载特性及动力特性等方面取得了一系列研究成果。目前,研究成果已成功应用于山西境内汾离高速公路、崞临高速公路、山平高速公路、神河高速公路等10余条高速公路。同时,还应用于内蒙古、陕西、河南、河北、湖北、贵州等省(自治区)的20余条高速公路工程,取得了显著的经济效益与社会效益,具有重要的理论意义和工程应用价值。为了有效总结高填方涵洞工程特性理论与应用相关研究成果,特撰写本书。

在撰写本书过程中作者得到了华中科技大学郑俊杰教授和中国地质大学陈保国副教授的热心指导和帮助,在此表示衷心的感谢!

本书共10章,第1、2、4章由赵队家撰写,第5、9、10章由张军撰写,第6、7章由马强撰写,第3章由赵建斌撰写,第8章由汪海博撰写。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请各位读者批评指正。

作 者

2014年3月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高填方涵洞工程特性研究的意义	1
1.2 涵洞病害类型及原因	2
1.2.1 涵洞选址不当	2
1.2.2 涵洞洞身开裂	5
1.2.3 台背处不均匀沉降	6
1.2.4 涵洞淤塞积水	6
1.2.5 护坡滑塌	8
1.2.6 涵洞侧墙及翼墙开裂	9
1.2.7 涵洞渗漏水	10
1.3 高填方涵洞受力特性研究现状	11
1.4 山区工程地质特征与涵洞选型选址研究现状	14
1.4.1 山区高速公路高填方路段特征	14
1.4.2 涵洞选型选址研究现状	14
1.5 地基处理技术研究现状	15
1.6 动力特性研究现状	16
1.6.1 黄土动力特性研究现状	16
1.6.2 涵洞动力特性研究现状	17
1.7 本章小结	18
第 2 章 高填方路堤-涵洞现场试验研究	20
2.1 工程概况	20
2.2 现场试验测点布置	20
2.3 现场试验结果分析	23
2.3.1 单点位移计	23
2.3.2 测斜管	24
2.3.3 混凝土应变计	26
2.3.4 柔性位移计	27
2.3.5 竖向土压力	29
2.4 本章小结	33

第3章 高填方涵洞受力特性数值模拟研究	35
3.1 计算模型选取	35
3.2 材料参数及本构模型	36
3.3 数值模拟结果分析	37
3.3.1 涵顶土压力分布规律	37
3.3.2 边界条件对涵洞受力状态影响	42
3.3.3 涵洞填土高度对涵顶土压力的影响	43
3.3.4 涵洞外形及几何尺寸对涵顶土压力的影响	44
3.3.5 涵洞台背填土性质对涵顶土压力的影响	47
3.3.6 涵顶填土类型对涵顶土压力的影响	47
3.3.7 地基刚度对涵顶土压力的影响	49
3.3.8 偏载效应对涵洞受力的影响	50
3.3.9 涵洞洞身结构受力分析	53
3.4 本章小结	55
第4章 高填方涵洞受力特性理论研究	57
4.1 非线性土压力回归计算公式	57
4.2 现行土压力计算理论及其修正	58
4.2.1 Marston 土压力计算理论	58
4.2.2 修正的 Marston 理论公式	58
4.2.3 普氏理论	59
4.2.4 耶梅里扬诺夫公式	59
4.2.5 顾安全公式	59
4.2.6 修正顾安全公式	60
4.2.7 公路桥涵设计通用规范	62
4.2.8 铁路桥涵设计基本规范	62
4.2.9 美国公路桥涵设计规范	62
4.3 理论结果与现场监测对比分析	63
4.4 本章小结	65
第5章 高填方涵洞减载措施研究	67
5.1 减载原理	67
5.2 减载措施	67
5.2.1 中松侧实法	67
5.2.2 柔性填料法	69
5.2.3 加筋桥减载法	72
5.2.4 先填后挖法	73

5.2.5 利用天然地形	74
5.3 本章小结	74
第6章 高填方涵洞选址与选型	75
6.1 涵洞设置	75
6.1.1 涵洞设置原则	75
6.1.2 典型涵位及受力特性	76
6.2 涵洞选址	77
6.2.1 数值分析模型	77
6.2.2 沟谷宽度对涵洞受力和位移的影响	79
6.2.3 岸坡角度对涵洞受力和位移的影响	82
6.2.4 地基刚度对涵洞受力和位移的影响	84
6.2.5 地基均匀性对涵洞受力和位移的影响	85
6.2.6 偏载效应对涵洞受力和位移的影响	86
6.3 洞口选型	87
6.4 基础选型	88
6.4.1 对称均匀地基设涵	88
6.4.2 半软半硬地基设涵	91
6.4.3 存在偏载效应地形设涵	95
6.4.4 偏载效应条件下半软半硬地基上设涵	98
6.5 涵体选型	101
6.5.1 对称均匀地基设涵	101
6.5.2 半软半硬地基设涵	106
6.5.3 存在偏载效应设涵	110
6.6 本章小结	114
第7章 地基承载力确定与处理方法研究	116
7.1 地基承载力理论研究	116
7.2 地基承载力修正探讨	118
7.2.1 天然地基承载力修正分析	120
7.2.2 复合地基承载力修正分析	123
7.3 地基处理范围确定	125
7.3.1 地基处理原则	125
7.3.2 理论分析	126
7.3.3 数值模拟	129
7.4 地基处理效果对比	132
7.4.1 换填法、刚性桩与柔性桩复合地基法研究	132

7.4.2 换填法、刚性桩与柔性桩复合地基处理效果对比分析	135
7.5 扇子沟涵洞的地基处理方法探讨	138
7.5.1 现场测试与数值结果比较	139
7.5.2 扇子沟涵洞不同地基处理方法效果比较	141
7.6 本章小结	143
第8章 地震荷载作用下涵洞动力响应分析	144
8.1 概述	144
8.1 模型的建立	144
8.2.1 网格划分	144
8.2.2 参数选取	145
8.3 不同条件下的涵洞地震响应	146
8.3.1 不同填土高度下涵洞的地震响应	146
8.3.2 不同地震烈度下涵洞的地震响应	148
8.3.3 不同地震波传播角度下涵洞的地震响应	150
8.4 本章小结	152
第9章 交通荷载作用下涵洞动力响应分析	153
9.1 概述	153
9.2 工程概况与数值建模	154
9.2.1 工程概况	154
9.2.2 数值建模	154
9.3 计算结果分析	156
9.4 不同条件下土-结构体系动力响应规律	158
9.4.1 荷载循环次数的影响	159
9.4.2 车辆荷载大小的影响	159
9.4.3 行车速度的影响	162
9.5 本章小结	163
第10章 黄土震陷性对涵顶土压力的影响	164
10.1 概述	164
10.2 模型及假设	164
10.3 上埋式涵洞土压力计算	165
10.3.1 静态填土土压力计算方法	165
10.3.2 黄土状填土震陷量计算方法	169
10.3.3 震陷后填土土压力计算方法	169
10.4 工程实例验证	170
10.5 参数分析	171
10.6 本章小结	172
参考文献	173

第1章 绪 论

1.1 高填方涵洞工程特性研究的意义

现今我国公路建设投资不断增加并且公路等级不断提高,特别是在西部大开发以后,很多高速公路修建于山岭重丘区,这些地区地势起伏、沟壑纵横,因此公路涵洞应用十分广泛。由于高等级公路线形标准的要求和地形条件限制,山区高等级公路的填土高度不断增高,高填方涵洞也就越来越多。对于高填方涵洞,其受到的填土荷载大,再加上受山区特殊地质地理条件的影响,涵洞的受力及变形特性极为复杂,其中很多涵洞出现了开裂、地基沉降过大等现象,有的甚至出现垮塌,严重影响了公路的正常使用,这对公路设计和施工提出了更高的要求。

根据目前我国《公路桥涵设计手册》对高填方路堤的定义,填方总高度超过20m的填方路基称为高路堤,在路基底部修建的涵洞也就是高填方涵洞。我国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)中规定,作用于涵顶的竖向土压力采用土柱法计算,即涵顶土压力将随填土高度呈线性变化,没有考虑涵洞与周围填土的相互作用及涵洞埋设边界条件对涵顶土压力的影响,因而不能准确反映涵洞结构物的受力状态。

目前在涵洞设计中存在两个误区。一方面,如果在涵洞设计过程中过于保守,采用过大的安全系数,那么为了使地基承载力满足设计要求,往往需要投入大量的人力和物力进行涵洞地基的处理,同时造成涵洞顶部填土压力更加集中,这种做法是不经济的,也是不合理的;另一方面,如果对涵顶“土拱效应”认识不足,没有考虑到高填方涵洞拱顶的土压力集中现象,得出较小的土压力,从而导致结构物因强度不够而开裂,或因地基承载力不能满足实际受荷要求,而导致基底沉降和不均匀沉降过大,造成涵洞结构物顶部拉裂或路面开裂,有些涵洞还可能出现中部沉降值较大,造成涵洞内积水甚至基础开裂的情况,严重影响涵洞的正常使用。因此,合理确定高填方土压力分布状态成为高填方涵洞设计和施工中的首要问题。

同时,涵洞选址是否合理直接影响涵洞结构物的受力状态,决定着涵洞的使用功能能否正常发挥。在不同的地形条件下,对涵洞结构形式的要求也不相同,涵洞选型是否合理不仅决定着涵洞受力状态,也关系到工程造价的高低,因而开展涵洞选址与选型工作具有非常重要的实际意义。

在工程实践中,特别是在高填方情况下,为了使地基承载力满足设计要求,往往需要投入大量的人力和物力进行涵洞基底的地基处理,这种做法是不经济的。高路堤下的涵洞,填土相当于使涵洞基础具有埋深效应,因而可以显著提高地基承载力。深刻认识埋深效应有助于指导高填方涵洞的地基承载力的确定,如果地基承载力修正认识不足,过分强调修正效果,会导致结构物因地基承载力不足,基底沉降和不均匀沉降过大,甚至引起结构物或路面开裂,影响道路的正常使用。因此,合理确定高填方涵洞地基承载特性、准确对地基承载力进行修正,成为高填方涵洞设计和施工中的突出问题。

此外,与地上结构相比,地下结构在地震和交通荷载作用下受到的影响较小。因此,地震和交通荷载作用对地下结构尤其是涵洞的影响经常被忽略。但是,对于处于地震活跃区的涵洞,特别是高填土路堤下的涵洞,其在地震作用下的位移与内力响应显得至关重要。而随着车辆载重不断增加,特别是山西省境内高等级公路大多作为运煤通道,交通重载现象显著,交通荷载对涵洞的影响逐渐增大。因而,对黄土地区涵洞地震和交通动力响应的研究可填补这方面研究的空白,具有重要的理论及实际意义。

1.2 涵洞病害类型及原因

本书中的涵洞病害工程调研主要针对山西省已建成的高速公路沿线涵洞,调研的主要路线为太旧高速、大运高速、太佳高速、汾离高速、离军高速和平阳高速等,调研方式主要采用激光测距仪、游标卡尺、钢卷尺、数码相机等设备对涵洞病害进行现场调查,对病害形式及特征进行归类。

通过工程调研发现,涵洞病害在山西省各条高速公路上都较为普遍,山西省不同地区的地质环境差异使得涵洞类型差别也较大,因此造成涵洞病害特征也不尽相同,下面对涵洞各种病害进行详细分析。

1.2.1 涵洞选址不当

黄土地区沟壑纵横,地势起伏,高速公路往往采用高填方的形式跨越数量众多的黄土冲沟。这些冲沟是黄土高原的汇水排水通道,同时由于黄土的水敏性,在雨季时节仍会不断发育。因此,在涵洞选址时既要尽量保持冲沟的天然水流状态,还要考虑到其未来的发育情况。如果选址不当,将无法发挥出涵洞应有的排水作用,极有可能造成涵洞洞外排水,导致路基土强度下降,路面下沉,更有甚者在水流侵蚀作用下造成路面结构下部脱空,并可能引发路基塌陷。

图 1-1 所示为在高填方路堤上部的混凝土盖板涵,由于跨越位置在黄土冲沟的沟头部位,路堤两侧填方高度差异较大,因此涵洞布设位置要同时考虑路堤两

侧的排水情况。此涵洞直接布设在路堤顶部,从涵洞内部观察,并未发现有较大水流通过的迹象,而在急流槽部位发现若干水流侵蚀作用下形成的空洞(图 1-2),说明此涵洞未能发挥出应有的排水作用,已造成路基下部脱空,并可能引起填方路基塌陷。

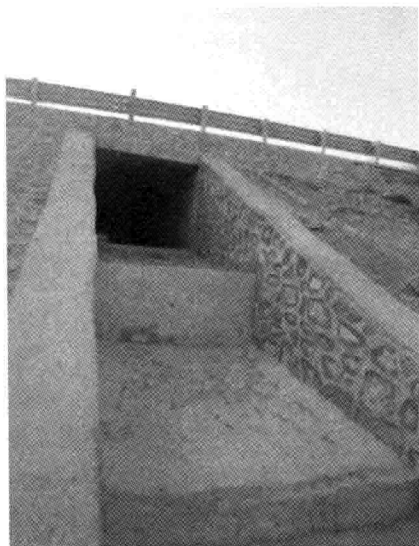


图 1-1 设在路堤上部的混凝土盖板涵



图 1-2 路基下方脱空

图 1-3 所示为设置在路堤顶部的涵洞由于在其下游未能做好防护措施,造成路堤坡脚被雨水冲毁,护坡措施已完全破坏,并可能引起高填方路堤整体失稳。



图 1-3 路堤坡脚冲毁

由于涵洞无法发挥出其应有的过水作用,可能会造成路堤填土浸水后强度下降,并产生过大沉降。从图 1-4 中可以看到,此处高填方路堤上的路面最大沉降已达到 5cm 以上,为不影响高速公路通行质量,公路养护部门已对该部位进行了整体修补,并对路堤进行了灌浆加固处理。但由于涵洞属于隐蔽工程,这些处理措施并未彻底消除病害根源,路面有可能会再次发生沉降。



图 1-4 涵顶路堤沉降

1.2.2 涵洞洞身开裂

高速公路采用填方路堤形式跨越黄土冲沟时,填方高度一般较高,此时在路堤下设置涵洞时多采用混凝土拱涵。涵洞主要承受上部的填土荷载,与其周围填土、地基构成一个相互协调、相互影响的统一结构体系。而在现行公路桥涵设计规范中,涵顶垂直土压力采用线性土压力计算方法,未能考虑由于涵洞结构刚度远大于其两侧填土刚度造成的涵顶土应力集中,使得涵顶设计荷载小于其实际受到的真实荷载,从而导致高速公路中很多高填方涵洞出现开裂、地基沉降过大等问题,有的甚至出现垮塌。

图 1-5 所示为填方路堤下的混凝土拱涵,涵洞高 5.5m,宽 5m,填土高度 8m,路堤坡面采取了全封闭防护。虽然该涵洞填土高度只有 8m,远未达到高填方标准,但还是发生了沿拱圈的环向裂缝(图 1-6)及拱脚部位的纵向裂缝(图 1-7)。这是由于涵洞高度较高,从而在涵顶平面产生较大差异沉降,致使涵顶土压力集中现象更加明显,并可能超出涵洞结构设计强度,导致拱圈开裂(图 1-8)。

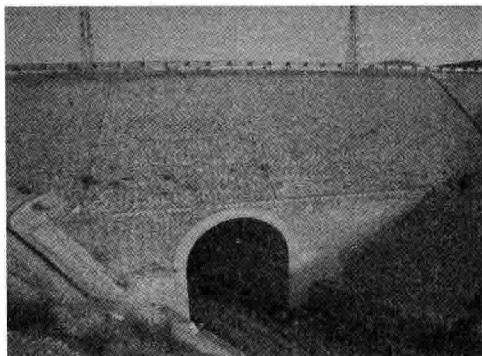


图 1-5 路堤下混凝土拱涵

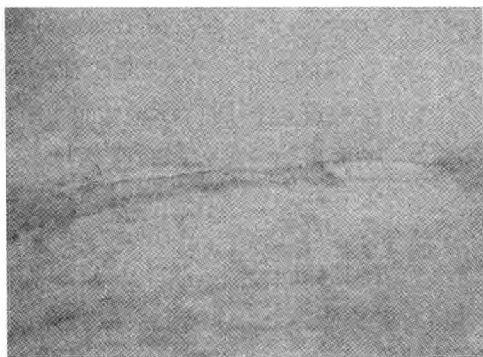


图 1-6 混凝土拱涵拱圈部位的环向裂缝



图 1-7 混凝土拱涵拱脚部位的纵向裂缝

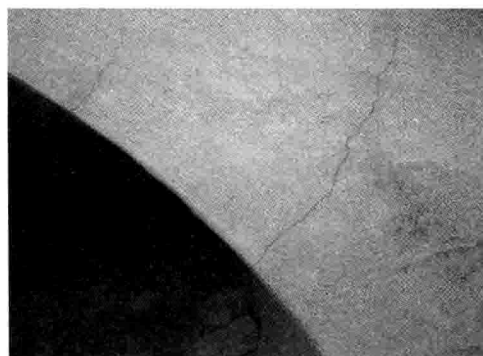


图 1-8 混凝土拱涵洞口的径向裂缝

1.2.3 台背处不均匀沉降

涵洞洞身与两侧台背填土之间存在刚度差异,因此会在其交界处产生不均匀沉降,导致其上方路面形成一条或数条横向裂缝,并产生跳车现象(图 1-9)。虽然在目前高速公路涵洞设计过程中都要求对台背填土进行处理,有的甚至加铺了土工格栅,但仍然无法避免此类病害的发生。在经调查的高速公路中,几乎所有涵洞都存在这样的裂缝,并且有些裂缝经扩展后形成大面积的破损面(图 1-10),经多次修补后仍不能完全修复,严重影响高速公路行车质量。

1.2.4 涵洞淤塞积水

由于涵洞地基处理不当引起的涵洞底板沉陷、涵洞底板纵坡设计不合理以及洞口处由于流速减慢引起的淤积阻塞水流,都会造成涵洞内部积水(图 1-11),积水沿涵洞施工缝渗入地基(图 1-12),会进一步降低地基强度,造成涵洞发生不均匀沉降、错台,甚至可能出现失稳破坏。



图 1-9 涵洞台背交界处的路面裂缝



图 1-10 经修补后的路面破损面



图 1-11 涵洞内部积水



图 1-12 涵洞错台

同时,由于黄土高原地表径流都会夹带着大量的泥沙(图 1-13),特别是在暴雨集中的 7、8 月份,这些泥沙在涵洞内部沉淀,在底板上形成一层很厚的淤泥层,减小了涵洞的过水面积,降低了排水效率。



图 1-13 涵洞内部淤积

1.2.5 护坡滑塌

当涵洞尺寸较大且两侧填土高度较高时,多采用浆砌片石锥形护坡,但在护

坡设计和施工时,往往忽视了护坡坡脚以及护坡与边坡交界处的处理,例如,护坡接缝处封闭不严(图 1-14)、护坡基础未按最大冲刷和最大冻深确定其埋置深度、涵洞洞口铺砌面过短等均会造成涵洞护坡及排水沟冲毁(图 1-15),甚至导致路堤的整体失稳。



图 1-14 浆砌片石护坡与路堤交界处破坏

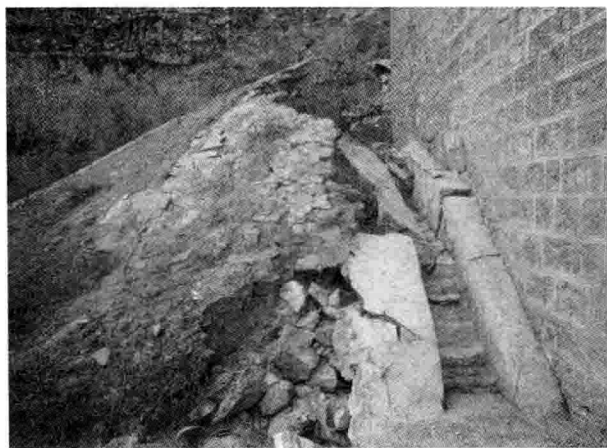


图 1-15 浆砌片石护坡被冲毁

1.2.6 涵洞侧墙及翼墙开裂

涵洞侧墙及翼墙开裂也是较为普遍的涵洞病害之一,分析其原因可能有以下两种情况:①涵洞上方填土高度较高,从而使得涵洞侧墙及翼墙承受较大的侧向