



混凝土涵洞防渗抗裂技术探讨

李龙彬, 孟凡军

(山东水利建设集团有限公司, 山东 济宁 272021)

摘要: 为完善混凝土涵洞防渗抗裂技术, 本文运用建筑工程防渗原理, 针对某混凝土涵洞防渗, 研究提出加设垫梁、截渗环等系统防渗技术, 同时探讨提出土工格栅加筋土法、混凝土盖板保护法、涵洞底部仰拱法3种涵洞实用减荷抗裂方法; 针对涵洞混凝土配筋, 提出环氧树脂涂层钢筋和 GFRP 筋两种应用方案。结果表明: 此类技术能有效提高涵洞防渗抗裂性能, 延长涵洞使用寿命, 降低使用阶段维护成本。本文成果可为今后建筑结构防渗抗裂提供一些启示和借鉴。

关键词: 混凝土涵洞; 防渗抗裂; 土压力; 减荷; 配筋

中图分类号: U457

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)05-0041-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.05.062

Discussion on anti-leakage and anti-cracking technology of concrete culvert

LI Longbin, MENG Fanjun

(Shandong Water Conservancy Construction Group Co., Ltd., Jining 272021, Shandong, China)

Abstract: In order to improve the impermeable crack technology of concrete culverts, through the analysis of the principle of anti-leakage in construction engineering, aiming at seepage prevention of concrete culverts, the anti-leakage technologies of the system such as adding cushion beams and seepage interception rings are studied and proposed, and such three practical load reduction and anti-cracking methods for culverts as geogrid reinforced soil method, concrete cover plate protection method, and culvert bottom inverted arch method are discussed and proposed. For the concrete reinforcement of culverts, two application schemes of epoxy resin coated steel bars and GFRP bars are proposed, which effectively improve the anti-leakage and anti-cracking performance of the culvert, prolong the service life of the culvert, and reduced the maintenance cost in the use stage. The results can provide some enlightenment and reference for anti-leakage and anti-cracking of building structures in the future.

Key words: concrete culvert; anti-leakage and anti-cracking; earth pressure; load reduction; reinforcement

在公路、水利、市政等工程建设中, 混凝土涵洞常作为地下排水、输水通道或管线廊道使用。而涵洞开裂、渗漏作为常见的工程施工病害, 影响着涵洞本身使用寿命的同时, 对涵洞周围土体或上部结构安全稳定性也带来极大的隐患, 严重时会引起上部道路或堤坝沉陷、垮塌。针对涵洞防渗及抗裂技术, 多位学者对此进行了研究分析。如: 蔡天佑^[1]以厦门至成都高速公路湖南段中的

高填方涵洞工程进行现场试验, 验证了涵顶填土中铺设土工格栅可起到很好的减荷作用; 温珍斐^[2]总结了涵洞垂直土压力的6类计算方法, 研究提出了高填方及深软基涵洞不均匀沉降的折线法设计原理及其工程应用; 邓玉华等^[3]分析了江阴市长江堤防涵洞渗漏隐患存在的原因, 确定了其渗漏隐患合理的解决办法。目前, 关于混凝土涵洞防渗的本质原理分析和研究较少, 对一些特

收稿日期: 2023-04-12

作者简介: 李龙彬(1989—), 男, 高级工程师, 从事水利、水运及路桥工程施工技术研究。

殊形式涵洞(长距离涵洞和高填方涵洞等)的防渗及抗裂技术研究还不够全面系统。因此,本文通过对建筑工程及涵洞防渗原理思考分析,提出加设垫梁、截渗环等涵洞系统防渗技术,土工格栅加筋土法、混凝土盖板保护法、涵洞底部仰拱法 3 种涵洞实用减荷抗裂方法;另外,针对涵洞混凝土配筋,提出环氧树脂涂层钢筋和 GFRP 筋两种应用方案,以期今后建筑结构防渗抗裂提供一些启示和借鉴。

1 涵洞防渗原理分析

经调查发现^[1-3],以往混凝土涵洞在进行防渗处理时,大多没有系统地考虑各种渗漏诱因,防渗方法较为单一,无法全面杜绝渗漏隐患;或由于对于结构防水防渗工作的重要性认识不到位,降低了涵洞防渗工程质量的管理,从而引发涵洞渗漏病害。因此,有效预防混凝土涵洞渗漏病害,必须从防渗原理上辩证分析,综合施策,全面治理^[4-5]。

从地下环境分析,混凝土涵洞长期埋于地下,受地基承载力、土压力、地面荷载、温度应力、收缩应力等综合影响,受土壤、微生物、地下水、孔道水等的侵蚀影响,又结合其自身孔洞结构特征,与一般建筑物相比,其面临的渗漏隐患更大、渗漏诱因更多。从施工工艺分析,受混凝土拆模及浇注工艺影响,涵洞一般在墙趾处设施工缝分两次浇筑。而对于长距离涵洞,为降低不均匀沉降和位移的影响,每隔 10~15 m 设伸缩缝(节段缝),进行分段浇筑。墙体、施工缝、伸缩缝在上述复杂地下环境的长期作用下产生渗漏通道。

2 涵洞系统防渗技术

结合涵洞地下环境和施工工艺分析,将混凝土涵洞防渗分为涵洞结构本身防渗、涵洞与周围土体之间防渗两类,其中涵洞结构本身防渗又可分为墙体防渗、施工缝防渗、伸缩缝防渗 3 种,涵洞防渗分类如图 1 所示。

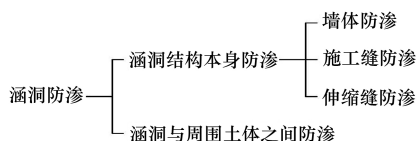


图 1 涵洞防渗分类

2.1 墙体防渗

2.1.1 诱因分析

地下混凝土本身的微裂缝等,在毛细作用下,会产生一定的渗水或吸潮现象^[6];同时,涵洞墙体为薄壁混凝土,混凝土布料、振捣空间狭小,易产生混凝土施工质量弊病,如蜂窝、麻面等;另外,墙体模板对拉丝杆孔洞未进行严密封堵。这些弊病长期在涵洞内外水体侵蚀、冻融的作用下,逐渐形成渗水通道。

2.1.2 实施对策

在涵洞内壁涂刷两遍环氧沥青漆。环氧沥青漆防水性、耐候性好,适用于大面积混凝土防腐,可有效应对涵洞混凝土毛细作用细潮,防止涵洞孔洞内流水对内壁的侵蚀。

在涵洞外壁施加两遍环氧沥青漆+1 层沥青防水卷材+1 层沥青保护板。防渗卷材防水性、柔韧性好,可满足长距离涵洞节段间一定范围内的不均匀沉降和位移;沥青保护板可保护沥青防水卷材受损。涵洞外壁的 3 道防护可有效预防涵洞外土壤、地下水等复杂水体的侵蚀。

2.2 施工缝防渗

2.2.1 诱因分析

施工缝作为涵洞墙身混凝土的一个薄弱地带,当新老混凝土接触面未有效凿毛或混凝土振捣不实,且长期在涵洞内外水体侵蚀、冻融的作用下,易形成渗水通道。

2.2.2 实施对策

结合墙体防渗技术,在施工缝处采用中埋式橡胶止水带,直接阻断涵洞墙体施工缝处渗水通道。橡胶止水带具有弹性、耐磨性、耐老化性和抗撕裂性能,适应变形能力强、防水性能好。

2.3 伸缩缝防渗

2.3.1 诱因分析

受温度作用、混凝土收缩等影响产生的变形量,经过不断累积,将结构某些部位拉裂,产生小裂缝,且这些小裂缝会持续不断地扩大或闭合。为抵消这种变形量的累积,一般通过在结构上预设一定间距和数量的伸缩缝(节段缝),但如果涵洞结构不均匀沉降或位移等引发伸缩缝变形过大,也会出现可透水缝隙。

2.3.2 实施对策

在伸缩缝处采用中埋式橡胶止水带。橡胶止水带可适应相邻段涵洞的不均匀沉降和位移，有效阻断涵洞伸缩缝处渗水通道。同时，为避免因相邻段涵洞不均匀沉降和位移值积累引起伸缩缝变形过大、增加伸缩缝处渗漏风险，在伸缩缝底部设混凝土垫梁，并在垫梁内设钢筋，使每段涵洞类似于一个特殊的超静定结构，有效约束涵洞的不均匀沉降和位移。

2.4 涵洞与周围土体间防渗

2.4.1 诱因分析

由于涵洞的建造改变了涵洞处原地下水体的流动空间，使涵洞与周围土体间形成渗流，且随涵洞两侧水位变化进行往复流动冲蚀，从而加剧涵洞的不均匀沉降和位移，甚至会引发上部构筑物如道路、水利堤坝(水库)的沉陷和垮塌。

2.4.2 实施对策

在涵洞回填土按要求分层回填压实的前提下，在涵洞外周垂直于涵洞长度方向，按合适间距设混凝土截渗环(每段涵洞至少设 1 道)，并在截渗环内设钢筋，与混凝土墙身钢筋连接。截渗环可有效阻挡涵洞与周围土体间的渗流冲蚀，延长渗流路径，削弱渗流水头，提高涵洞与周围土体间防渗性能；同时，有利于涵洞的整体稳定性，与

垫梁共同作用减少涵洞不均匀沉降和位移，降低伸缩缝渗水风险。

将上述技术方案进行组合运用，形成一种适用于混凝土涵洞系统性防渗技术方案(图 2)，可全方位、互补性的阻断各种涵洞渗水路径，从根本上提高涵洞防渗性能，延长涵洞使用寿命^[7]。该技术已成功在菏泽市成武县伯乐湖水库等工程应用实施。

2.5 工程实例

以在菏泽市成武县伯乐湖水库工程入库泵站穿堤涵洞实践应用为例，穿堤涵洞长度为 66 m，每隔 11 m 设伸缩缝，涵洞断面尺寸为 5.5 m×3.6 m，双孔。垫梁尺寸为 800 mm×500 mm，截渗环尺寸为 500 mm×1 000 mm，截渗环钢筋绑扎、模板支设如图 3、4 所示。

涵洞防水防渗施工中，还应注意以下事项。

- (1) 做好涵洞与水库围坝结合部位防渗处理。工程水库采用土工膜作为截渗材料，土工膜渗透系数小，防渗效果好，整个库底全断面水平截渗。
- (2) 严格按照施工方案和规范要求进行涵洞垫层、钢筋绑扎、模板支设、混凝土拌和、浇筑及振捣、养护施工，确保涵洞结构实体施工质量。
- (3) 进场检验橡胶止水带原材料质量。工程采用 651 型橡胶止水带，按照规范要求进行安装、

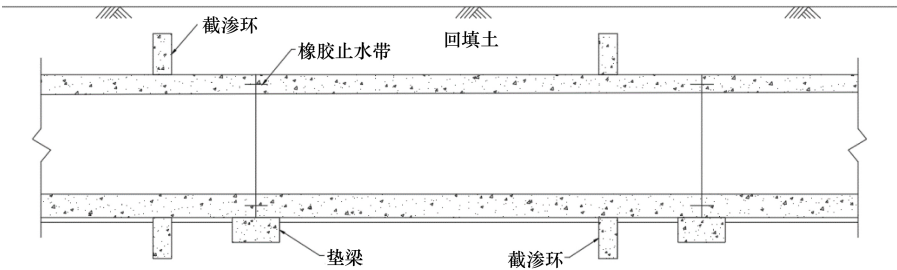


图 2 涵洞系统防渗方案



图 3 截渗环钢筋绑孔图



图 4 截渗环境板支设

固定及连接,避免浇筑振捣过程中位置偏移。伸缩缝内采用泡沫板、密封胶柔性材料填充。

(4) 混凝土养护结束后,分两遍均匀涂布环氧沥青漆,干膜厚度(dry film thickness, FT)为 $500\ \mu\text{m}$ 。沥青防水卷材、沥青保护板铺贴方法、方向和搭接顺序、宽度应符合规定,卷材与基层、保护板与卷材之间黏结应牢固,不得皱折、鼓包、翘边。

3 涵洞减荷抗裂技术

除做好上述涵洞结构系统防渗措施外,还应重点关注由高填方带来的涵洞结构土应力集中问题,以避免受力不均或受力过大而引发的严重渗漏和垮塌事故。

涵洞洞身承受填土压力和地面荷载压力,并将土压力和荷载压力传递给地基。为确保涵洞的安全使用,需正确计算在高填方下涵洞结构受力状况,如涵洞垂直土压力、侧向土压力、基底反力等,具体如图 5 所示。涵洞结构受力状况与地基形态、涵洞和基础的刚度、土层的压缩性、填土高度、地面荷载等有关,需要选择恰当的涵洞结构模型和土压力计算方法进行数值模拟及计算。关于这方面的学术研究已有很多,如: MARSTON 等^[8]最早提出了计算埋管土压力的理论及方法,根据散体极限平衡条件下“等沉面”等假定,揭示了涵洞本身与其两侧填土刚度的不同引起涵洞垂直土压力的变化;曾国熙^[9]对 Marston 公式进行了修正,认为滑动面上的摩擦力是外土柱自重压力与摩擦系数和侧压力系数乘积,把土的黏聚力对摩擦力的影响也考虑到计算中;顾安全^[10]通过对多座填土较高的涵管调查,分析了涵管开裂的规律,探讨了各种公式的问题所在,进而根据室内模型试验结果,提出了减荷措施和用管顶沉降差来概括土压力的各种影响因素之见解,并分别提出了土压力的计算公式;刘全林等^[11]考虑了作用于上埋式管道的竖向土压力受管土相对刚度及基床形式的影响因素,提出了管土相互作用的土压力计算方法。但普遍认为,由于计算方法的广泛性和不统一,参数取值的主客观差异,大量假设条件的附加,计算结果也不尽相同,最终应用于涵洞现场设计和施工的符合性和实用性,仍需要结合涵洞

实际环境、工况和过程变化去比对验证。

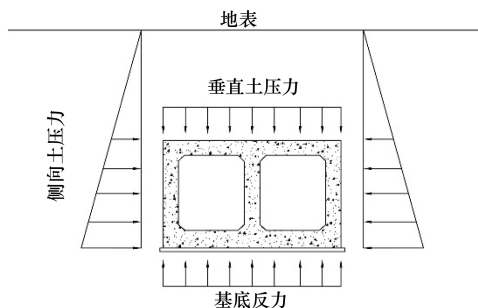


图 5 涵洞受力

为有效预防此类涵洞开裂、渗漏病害,结合涵洞结构受力模式、有关学术研究及类似工程技术借鉴和思考,总结提出 3 种涵洞实用减荷抗裂方法。

(1) 土工格栅加筋土法。在涵洞上方填土中铺设土工格栅,形成加筋土体。筋材与土体的相互作用,不仅调整了涵洞周围土体的应力分布,使涵洞受力相对均匀,还明显改善涵洞顶的垂直土压力集中现象,减小了涵洞顶的土压力;同时,提高了土体强度、刚度、填土整体性,使涵洞顶填土沉降均匀。蔡天佑^[1]研究发现,土工格栅铺设的层数越多,涵洞顶垂直土压力越小;土工格栅铺设的间距越小,涵洞顶垂直土压力越小。考虑减荷效果、经济性以及实际施工的可操作性,涵洞顶填土中铺设 4~8 层土工格栅,间距范围为 25~50 cm 为宜,结构示意图如图 6 所示。土工格栅加筋土法在公路工程中得到成熟应用,现场施工如图 7 所示。

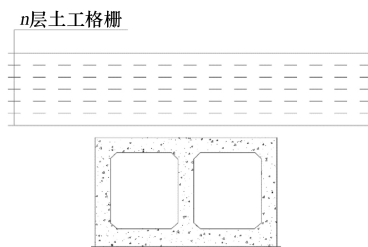


图 6 土工格栅加筋土法



图 7 土工格栅铺设与回填

(2) 混凝土盖板保护法。借鉴市政工程中地下设施保护的方法, 在涵洞顶的一定范围内现浇或预制安装混凝土盖板, 使盖板上方的垂直土压力经盖板传递后卸荷, 直接减小传递到涵洞顶的土压力, 结构示意图如图 8 所示。此项方法可与土工格栅加筋土法结合使用。混凝土盖板保护法从原理上借鉴可行, 但尚未在工程中广泛应用, 另外混凝土盖板距涵洞顶和地表的最优距离, 以及盖板超出涵洞跨度的宽度, 均需计算和实际验证。

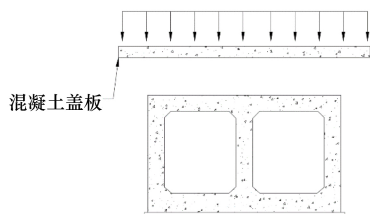


图 8 混凝土盖板保护法

(3) 涵洞底部仰拱法。借鉴隧道工程中隧道底部仰拱的设计原理, 以及拱涵中顶拱的设计原理, 在高填方涵洞底部增设仰拱, 将涵洞顶部的垂直土压力通过涵洞边墙有效传递到地下, 有效抵抗涵洞地基传来的基底反力, 提高涵洞结构稳定性, 结构示意图如图 9 所示。涵洞底部仰拱法从原理上借鉴可行, 但尚未在涵洞工程中应用, 隧道仰拱施工参考如图 10 所示。

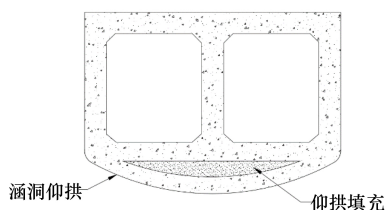


图 9 涵洞底部仰拱法



图 10 隧道仰拱施工

4 涵洞混凝土配筋技术

目前, 国内混凝土涵洞体内配筋通常被称为“黑钢筋”, 即没有防腐涂层的热轧带肋钢筋。涵

洞的地下侵水环境极易诱发钢筋锈蚀, 导致钢筋力学性能下降, 涵洞混凝土保护层开裂、起鼓、剥落, 出现涵洞渗漏水现象, 影响涵洞正常使用功能, 有时甚至出现在钢筋绑扎安装阶段。基于这类情况, 提出两种涵洞混凝土配筋优化方案。

(1) 结合国外工程应用情况, 推荐在涵洞等地下混凝土结构中使用环氧树脂涂层钢筋, 可以显著解决涵洞内钢筋锈蚀问题。在钢筋切断、弯曲、安装过程中应注意对环氧树脂涂层的保护。建议在施工现场配备环氧树脂油漆, 补涂钢筋局部少量破损涂层。

(2) 采用玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋替代普通钢筋。GFRP 筋是一种新型复合材料, 具有重量轻、耐腐蚀的优点, 其抗拉强度优于普通钢筋, 抗压强度范围一般为 550 ~ 750 MPa, 与钢材相比, 其热膨胀系数更接近水泥, 与混凝土结合握裹力更强。与普通钢筋相比, GFRP 筋的抗弯、抗剪承受能力相差较多, 在筋笼起吊、下笼、浇筑过程中稳定性不及普通钢筋笼, 易出现散笼、卡笼、上浮等特殊状况, 在筋笼制作及吊装中需特别注意。

以上两种涵洞配筋技术方案在沙特朱拜勒二号公路扩建工程过路涵洞中得到推广应用^[12], 且应用效果较好。环氧树脂涂层钢筋应用如图 11 所示, GFRP 筋应用如图 12 所示。



图 11 环氧树脂涂层钢筋应用



图 12 GFRP 筋应用

5 结 语

近年来,我国相继建设了一批规模宏大、结构复杂、技术难度高的建(构)筑物,如港珠澳大桥及深中通道沉管隧道等,这既推动了建筑防渗抗裂技术的不断创新,也涌现出一大批新型防渗抗裂材料与施工工艺,但重视建筑物结构本质防渗仍需放在首位。本文从防渗原理出发,对混凝土涵洞防渗抗裂技术进行系统分析,综合施策,从根本上有效提高涵洞防渗抗裂性能,延长涵洞使用寿命。在施工阶段,成本投入较多,但从建设项目全寿命周期的角度考虑,后期使用阶段维护维修成本将大大降低,优质耐久、安全舒适,符合国家倡导的“平安百年品质工程”建设理念。

参考文献:

- [1] 蔡天佑. 高速公路涵洞结构受力模式及实用减荷技术研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [2] 温珍斐. 高填方及深软基涵洞结构受力与沉降分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.
- [3] 邓玉华,王红星,陈伯进. 通江涵洞渗漏隐患的处理

技术综述[J]. 江苏水利,2014(7):26-27.

- [4] 李龙彬,姜立志. 水运工程质量通病防治的分级管理探究[J]. 工程质量,2020,38(10):57-60.
- [5] 李龙彬. 航道整治工程半圆体预制气囊成孔工艺研究[J]. 山东工业技术,2023(2):48-52.
- [6] 胡骏. 建筑工程渗漏水判断与维修[J]. 中国建筑防水,2014(10):7-14.
- [7] 山东水利建设集团有限公司. 一种长距离防渗型涵洞结构:202123231785.8[P/OL]. 2022-05-10[2023-04-12]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [8] MARSTON A, ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipes. Engineering, 2012, 4(4):202-209.
- [9] 曾国熙. 土坝下涵管竖向土压力的计算[J]. 浙江大学学报(工学版), 1960(1):79-98.
- [10] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J]. 岩石工程学报, 1981(1):3-15.
- [11] 刘全林,杨敏. 上埋式管道上竖向土压力计算的探讨[J]. 岩土力学, 2001(2):214-218.
- [12] 李龙彬. 国外大型桥梁支座修复施工技术[J]. 工程建设, 2023, 55(5):49-56.

(上接第 40 页)

(1)既有运营隧道在新建隧道施工完成时,其管片的水平和竖向变形均满足施工控制要求。

(2)由于基坑开挖和盾构开挖引起的既有隧道上方土体卸荷,最终导致既有运营隧道在施工完成时,其竖向变形以上浮为主。

(3)明挖段新建隧道由基坑开挖引起的既有运营隧道最大水平变形为 1.21 mm,最大竖向变形值为 0.57 mm(隆起);暗挖段盾构隧道施工引起的既有运营隧道最大水平变形为 0.39 mm,最大竖向变形值为 0.27 mm(隆起)。

参考文献:

- [1] 王远六,易领兵,杜明芳,等. 砂卵石富水区域盾构小净距穿越单洞双线暗挖站施工技术[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(8):1109-1114.

- [2] 易领兵,陈庆怀,孟旭央,等. 富水细砂地层盾构斜向超近距下穿双洞双线暗挖站施工技术[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(6):822-827;848.
- [3] 刘香,郭建圆,张立波,等. 盾构隧道穿越 CFG 桩复合地基变形机理研究[J]. 工程建设, 2019, 51(11):5-11.
- [4] 高锐斌. 地铁隧道盾构下穿施工地块的数值分析[J]. 工程建设, 2019, 51(2):7-11.
- [5] 刘斌,冯兴仁,蒋承轩,等. 盾构施工侧穿邻近既有构筑物的稳定性及施工控制[J]. 工程建设, 2018, 50(1):63-67.
- [6] 郑州市人大常委会办公厅. 郑州市轨道交通条例[EB/OL]. (2015-10-29)[2016-01-01]. <https://gfwj.zhengzhou.gov.cn/flfg/107.jhtml>.
- [7] 城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.