

文章编号: 1000-7598-(2014) 06-1679-08

高填方输煤暗道周边土压力试验研究

田建勃¹, 陈 凯², 韩晓雷¹, 史庆轩¹, 徐生玉³, 郝 旭¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院, 西安 710054;
3. 中国轻工业西安设计工程有限责任公司, 西安 710048)

摘 要: 高填方暗道在西部沟壑地区得到越来越广泛的应用, 但有关高填方暗道周边土压力分布的计算尚不十分清楚, 需要进一步研究。通过对山西平朔东露天煤矿输煤暗道周边土压力现场测试资料分析, 得出了高填方输煤暗道周边土压力分布和变化规律, 对暗道周边的应力状态有了更为清晰地了解。试验结果表明, 高填方暗道结构顶部存在竖向土压力集中现象, 高填方暗道侧部竖向土压力分布呈现如下规律: 当填土高度较低时, 土压力随填土高度增加较快; 当填土高度较大时变化缓慢。高填方暗道竖向土压力计算时, 当填土高度较低时, 宜采用土柱法; 填土高度较大时宜选用顾安全公式法。与暗道结构相比, 公路桥涵与地下埋管尺寸和刚度较大, 建议计算侧向土压力系数采用静止土压力系数。

关 键 词: 高填方; 土压力; 土压力系数; 现场测试

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

Experimental research on circumjacent earth pressure on coal handling conduit under high earth-fill

TIAN Jian-bo¹, CHEN Kai², HAN Xiao-lei¹, SHI Qing-xuan¹, XU Sheng-yu³, HAO Xu¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Xi'an Engineering Investigation and Design Research Institute of China National Nonferrous Metals Industry, Xi'an 710054, China;
3. China Light Industry Xi'an Design Engineering Company Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: The conduits under high earth-fill have become more widely used in gully area in Western China; but the calculation of the circumjacent earth pressure on it is still not very clear. That needs further study. Based on the field tests on circumjacent earth pressure of the coal handling conduit in Shuozhou of Shanxi Province, the distribution and variation laws of the circumjacent earth pressures, stress state around the conduit are obtained. The test results show that there is a stress concentration for vertical earth pressure at the top of the coal conduit. The earth pressure increases faster when the filling height is lower; but the ratio of increase gets slower for the vertical earth pressure on the side of the conduit. The soil core method is preferably used when the filling height is lower; but the formula named 'Gu Anquan' is preferably applied to calculating the vertical earth pressure. Comparing culverts and underground penstock, the dimensions and rigidities of the high fill channels are larger, and using the coefficient of earth pressure at rest is recommended when calculating the coefficient of lateral earth pressure.

Key words: high earth-fill; earth pressure; coefficient of earth pressure; field test

1 引 言

随着我国西部大开发的持续推进, 高填方暗道这种地下深埋结构物在西部沟壑地区得到越来越广泛的应用。但有关高填方暗道土压力计算理论, 仍没有一个简单可靠的方法, 只能参考深埋涵洞、涵管等小尺寸结构计算方法。高填方暗道土压力计算的影响因素多, 现行规范不能准确反映暗道顶部、

侧部土压力分布及变化规律, 导致设计中经常出现较大的经济浪费。或者出现由于土压力荷载估算不足而导致暗道结构在建成后出现不同程度的损坏, 严重的还将影响结构物的正常使用, 开展此项研究, 具有重要的理论及工程价值。

有关高填方结构土压力分布的计算, 最早始于美国土木工程学会主席马斯顿(Marston)教授。1930年 Marston 教授^[1]提出了作用于埋埋下涵管的土压

收稿日期: 2013-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51078309, No. 51178380)。

第一作者简介: 田建勃, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事土力学与工程的理论分析、数值计算等研究工作。E-mail: tianjianbo2006@sina.com

力计算方法,此方法利用散体材料的极限平衡条件作为理论基础,后人称为 Marston 公式。1933~1947 年,美国学者 Spangler^[2]又通过大量试验研究,进一步充实和阐述了马斯顿理论。此后,1994 年美国公路桥涵设计规范对垂直土压力表征值计算,使用处于一个 1~2 之间的土与结构相互作用系数 F_e 进行修正,使该理论继续沿用^[3-5]。在我国,浙江大学曾国熙教授^[6]对马斯顿公式进行了修正,提出工程土坝下涵管竖向压力的计算方法。折学森等^[7-8]对沟谷地形深埋管道受力状况研究后,指出现行土压力计算方法存在不同方面的缺点,根据试验数据和有限元软件模拟结果分析,认为深埋地下结构物的“减荷作用”是一个复杂的多方面因素影响的问题。杨锡武等^[9-10]通过模型试验研究了宽、窄沟谷沟心设涵和岸坡脚设涵 3 种边界条件下公路高填方涵洞涵顶土压力随填土高度变化的规律,以及高填方涵洞的拱效应。刘保健等^[11]通过首次给出的涵洞、填土体、地基及基础共同工作机制模型,分析了公路涵洞的受力及其与土体的共同工作性状。陈保国等^[12]通过数值模拟得出梯形沟谷设涵时,钢筋混凝土箱型涵洞顶部填土内的应力状态和土拱的分布规律。马强等^[13]通过对高填方涵洞采用加筋桥减载措施的现场试验,研究了涵顶及格栅上、下垂直土压力的变化规律。

到目前为止,高填方暗道竖向土压力计算方法较多,但归纳起来主要有以下几种^[14-15]:以 Marston 散体极限平衡理论为代表的散体极限平衡法;以拱效应为理论基础的卸荷拱法;假定土压力与填土高度成正比的土柱法;从变形条件出发,以弹性理论为基础的弹性理论法(顾安全公式法);以土压力集中系数关系为基础的土压力集中系数法;以材料屈服模型为基础的有限元数值分析法。对涵洞侧向土压力计算,归纳起来大致可分为 3 大类^[16]:按主动土压力计算、按静止土压力计算以及按经验数值计算。高填方土压力计算的理论,尽管国内外研究的很多,但其角度和侧重点各不同。我国各部门都有一套内部适用的理论方法:如公路部门涵洞设计长期采用土柱法进行垂直土压力计算;铁路部门根据相关调查和工程经验绘制曲线,确定涵洞土压力;冶金部门则多选用顾安全理论及其修正公式。随着对这方面问题研究的逐步深入,考虑范围也越来越广,在填土压密情况下,高填方暗道土压力分布中是否该考虑在岩体稳定中存在的“减荷拱”;及作用在结构侧部的土压力如何考虑;什么时候该考虑结

构顶部的土压力集中系数及如何考虑等系列问题都均需作深入研究。

基于以上,本文以“山西平朔东露天煤矿暗道测试与研究”为依托,现场埋置土压力盒,安装沉降观测仪,进行了为期半年多的现场数据监测,对作用在暗道基底反力、顶部及两侧土压力的分布进行了深入研究;根据实测数据,对比分析了应用于各部门的高填方土压力计算理论,比较其优缺点,找出适合工程条件的最适宜的理论计算方法,以期对大尺寸深埋暗道土压力分布有更加深刻的认识,并希望对高填方暗道结构设计有一定指导意义。

2 现场测试研究

2.1 工程概况

工程位于山西省北部朔州市,地处山西、陕西、内蒙国家能源化工基地。地貌为典型的黄土高原沟壑地带,冲沟发育。地质条件复杂,覆盖土层自上而下依次为深厚冲填土,中等湿陷性黄土,粉质黏土,泥岩碎屑岩和砂岩。暗道所处位置原先地貌为一个冲沟,开挖完成后,暗道深度达近 40 m,下层地基土软弱,且有地下水渗出。作为监测对象的输煤暗道是成品煤向外运输的交通暗道,是联接选煤厂槽仓与铁路装车站的枢纽工程,测试现场暗道纵向布置图如图 1 所示。暗道结构横断面宽为 7.10 m,高为 7.65 m,北侧距离边坡 6~8 m,坡角 45°~55°;南侧距离边坡 6~8 m,坡角 45°~55°。断面形式为宽胸腔非对称沟埋式。全长 230 m,等分为 23 段,节段间设 70 mm 施工缝,土压力盒分别布置在第 12、13 节段并在第 12 节段中布置沉降观测仪器。现场回填采取震动碾压、分层多阶段完成,最终回填到地面高度。



图 1 现场高填方输煤暗道布置图
Fig.1 Layout of coal conduit under high earth-fill

2.2 测点布置

本次测试,土压力盒由西至东依次布设: A、C、B、D 4 个监测断面,每个断面埋设 13 个压力盒,分布于暗道结构周围,其中 A、B 断面与 C、D 断

面土压力盒量程分别相同。埋设位置分别在暗道底部、侧部和顶部,通过所测土压力数值研究暗道周围土压力分布,为类似深埋地下工程的设计和施工提供理论指导。暗道周围土压力盒布置具体位置如图2、3所示。

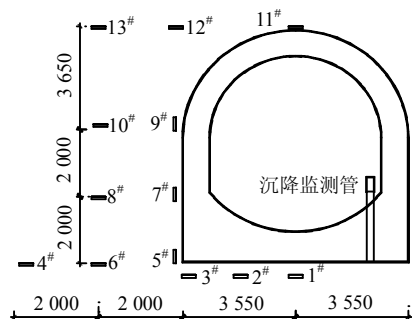


图2 暗道剖面土压力盒布置示意图(单位: mm)

Fig.2 Layout of earth pressure cells buried in conduit periphery in cross-section (unit: mm)

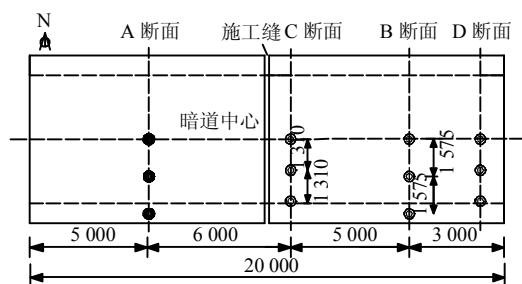


图3 暗道纵向底部土压力盒布置示意图(单位: mm)

Fig.3 Layout of earth pressure cells buried in the bottom of the longitudinal conduit (unit: mm)

2.3 土压力盒埋设

监测仪器性能稳定性是直接影响到测试成功与否的关键,为保证数据采集稳定可靠,选用零点漂移小的钢弦式土压力盒。该仪器直径为 120 mm,厚度为 25 mm,从以往的使用情况来看其性能稳定性较好,满足测试要求。土压力盒在埋设前首先进行标定,绘制出压力盒在特定介质下条件,负荷-输出关系曲线,进行仪器防水性能测试。并在埋设前对仪器调零,保证读数稳定可靠。

埋设土压力盒时,为使读数稳定(防止由于底部土体松散造成的填土后压力盒受力面倾斜等不良问题出现)在埋设压力盒之前先将填土碾压密实。埋置时,先铺设混凝土,再将土压力盒放置在混凝土上找平、压实,使压力盒受力面略微高出混凝土表面,随后在压力盒受力面上薄薄的铺层中砂将压力盒覆盖,然后覆土。埋设完成后,将土压实铺平。为防止数据传输线在施工中遭到损坏,压力盒埋设后,将断面所有数据线,集中放置在暗道内部的数

据线收集盒内。测试现场暗道侧部和顶部的土压力盒埋设如图4所示。



(a) 暗道侧部土压力盒埋设 (b) 暗道顶部土压力盒埋设

图4 测试现场土压力盒埋设图

Fig.4 Layout of earth pressure cells on-site

3 现场测试结果分析

3.1 暗道基底反力分布

暗道地基土体承载力不满足设计条件,故采用CFG桩进行处理,地基反力分布类似于弹性地基梁,在填土高度达到顶部以上 22.5 m 时,在结构底部中心处反力最大,向两侧反力减小,反力分布类似开口向上的抛物线。

本工程施工中,在暗道结构底部预埋土压力盒(1#、2#、3#),其中 A、B 面土压力盒位置相同,C、D 面土压力盒位置相同,具体布置位置见图3。从暗道主体结构施工完成到暗道顶部填土高度 22.5 m 过程中,分析暗道基底反力,其不同阶段暗道基底反力分布规律如图5所示。

从图可以看出,随着填土高度增大,基底反力分布产生较大变化。在暗道沟槽尚未填土时,在结构竖墙位置基底反力分布最大、中心部位最小,反力分布类似于硬黏性土中中心荷载作用下的刚性基础。此时作用在地基上的荷载强度较小,地基土塑性区主要发生在竖墙下部,反力分布类似马鞍形。

当填土高度达到顶部 22.5 m 后,在上部回填土的巨大荷载作用下,刚性基础下土中塑性区不断开展,基础与地基的接触面积增大,反力发生应力重分布。塑性区由结构侧墙位置扩展到基础中心位置,这时反力分布发生较大变化,反力急剧增大,但分布规律依然类似刚性基础。

由以上分析认为,修建于刚性地基上的深埋暗道结构,结构周围作用有巨大荷载时,结构刚度相对减弱,发生反力重分布,地基塑性区从最初的侧墙位置转移到全部底面受力,呈完整马鞍形分布。

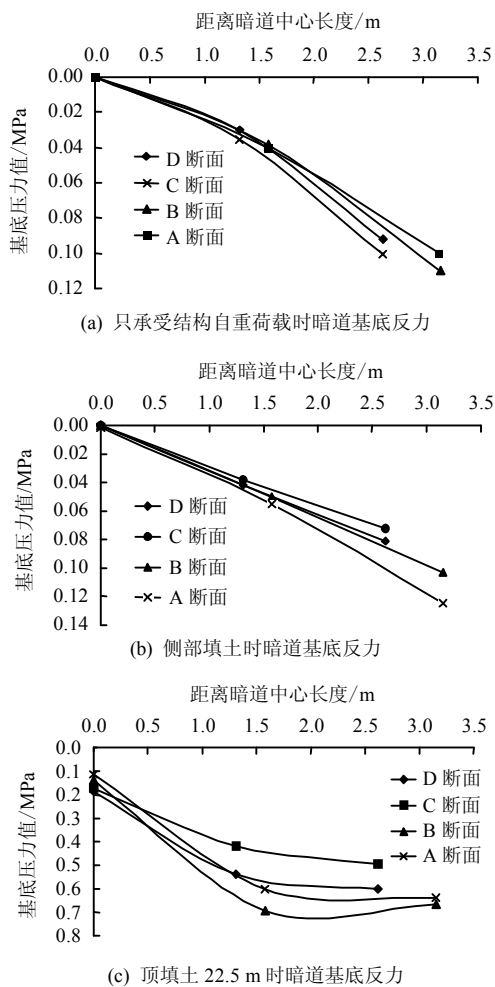


图5 不同阶段暗道基底反力分布规律

Fig.5 Distribution curves of subgrade reaction for conduit at different stages

3.2 暗道顶部竖向土压力分布

随着暗道顶填土高度增加, 回填土竖向和水平向土压力都发生变化, 其暗道顶部竖向土压力随填土高度的变化曲线如图6所示。由暗道顶部4个监测断面竖向土压力监测数据分析可以看出, 在暗道顶平面内, 结构中心部位(即11[#]压力盒)竖向土压力最大, 其数值高于结构中心以外实测值(即12[#]、13[#]压力盒)与土柱法计算得到的土压力值。距离暗道中心3.55 m(12[#]盒)和5.55 m(13[#]盒)处土压力两者数值较接近, 距离中心3.55 m(12[#]盒)处土压力值略高于后者。从以上可以看出, 在暗道顶平面内竖向应力在靠近结构中心部位存在应力集中, 且应力集中强度由暗道中心向两侧递减。

对暗道顶部范围内竖向土压力取平均值, 得到下面的暗道顶部范围竖向土压力平均值随填土高度增加的变化曲线如图7所示。由图可以看出, 暗道顶部平面内, 竖向土压力均值小于土柱法计算结果,

且当填土高度增大到19 m以上时, 土压力数值不断接近土柱法结果。分析整个回填作业过程认为, 填土较低时, 土体自重荷载相对较小, 在土体未固结情况下, 作用在结构顶部的荷载可认为是土体有效应力, 土颗粒间存在很多孔隙, 土体自重荷载通过土体颗粒骨架向深部传递, 认为土体荷载传递过程中存在一个“负压系数”阻碍土体总应力的传递, 使土体自重荷载仅有部分作用在结构顶部。当填土高度及作用时间增长时, “负压系数”逐渐弱化, 直至消失, 自重荷载重新分布。

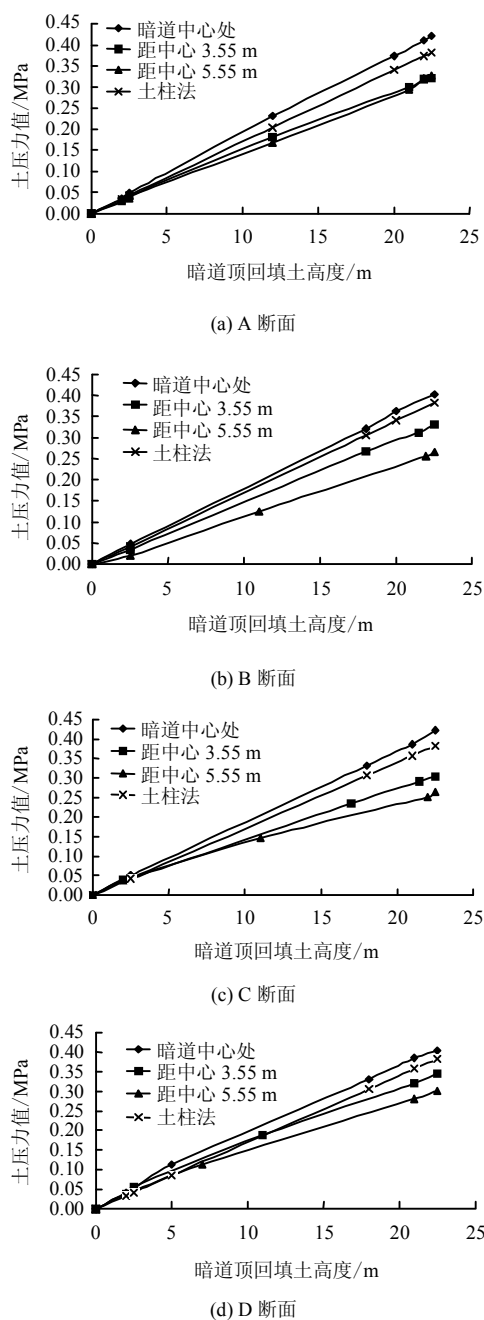


图6 暗道顶部竖向土压力随填土高度变化曲线
Fig.6 Curves of vertical earth pressure and filling height at the top of conduit

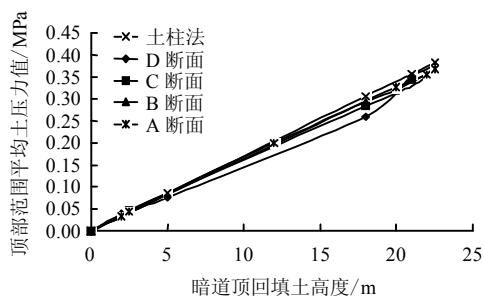


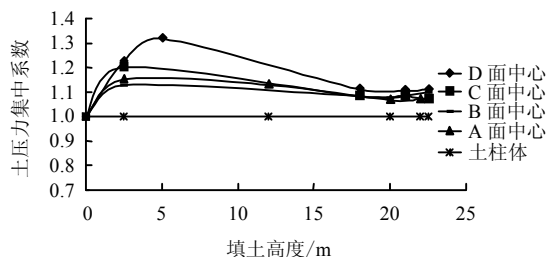
图7 暗道顶部范围土压力平均值变化规律

Fig.7 Variation laws of average earth pressures at the top of conduit

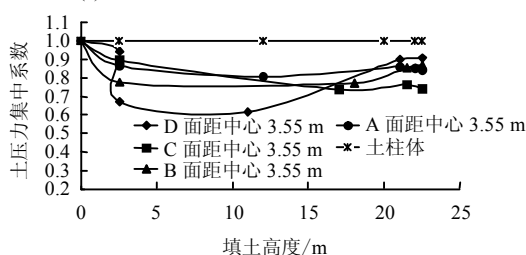
从上述分析认为,填土高度较大时,除暗道顶部中心部位竖向土压力高于自重应力外,整个顶面内土体竖向土压力仍小于自重压力,顶部土压力增长基本保持线性,与顾安全竖向土压力理论相符合,所以认为,在高填方工程中,当填土高度较低,且作用时间较短时填土中未必存在“减荷拱”。

3.3 暗道顶面土压力集中系数分布

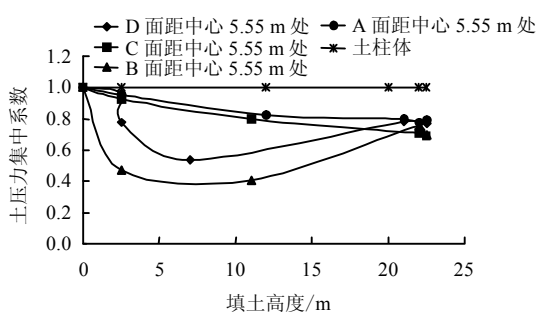
填土过程中,暗道顶部垂直土压力 σ_v 随填土高度变化,将实测竖向土压力 σ_v 与土柱法计算得到的竖向土压力作比,得到竖向土压力系数 k_v ($k_v =$



(a) 暗道顶中线处土压力集中系数变化曲线



(b) 距暗道中心 3.55 m 处土压力集中系数变化曲线



(c) 距暗道中心 5.55 m 处土压力集中系数变化曲线

图8 不同位置处土压力集中系数变化曲线

Fig.8 Curves of concentration coefficient of earth pressure in different positions

$\sigma_v / \gamma h$), 做竖向土压力系数 k_v 与回填土高度曲线关系, 得到土压力集中系数曲线。图8分别为暗道中线处(11#盒)、距暗道中心 3.55 m 处(12#盒)、5.55 m 处(13#盒)的土压力集中系数曲线。

从图8可以看出,在暗道顶部中心位置,土压力集中系数在填土高度较低时随填土高度增高而变大,填土较高时逐步减小并最终趋于稳定;而在距离暗道顶部中心位置较远的 3.55 m (12#盒)和 5.55 m (13#盒)处,土压力集中系数均小于 1,随着填土高度增大,集中系数逐渐增大并不断趋向土柱压力,说明土压力集中效应,仅出现在暗道结构顶部区域范围内。

3.4 暗道侧部竖向土压力分布

(1) 通过 4 个断面实测,对比暗道侧距离结构分别为 2、4 m (4#、6#土压力盒) 实测数据分析,得到暗道侧竖向土压力的分布曲线,由曲线图得到在暗道结构侧部不同位置处,土压力分布关系如图9所示。

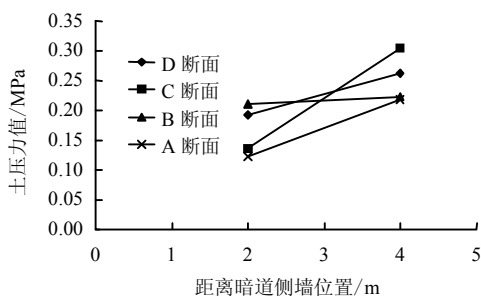


图9 暗道侧 2、4 m 处竖向土压力分布曲线

Fig.9 Curves of vertical earth pressure at the location from conduit 2 m and 4 m respectively

从图可以看出,距离暗道 4 m (4#盒) 位置处土压力大于距暗道 2 m (6#盒) 处,分析认为,4 m (4#盒) 位置处土压力盒处在暗道与边坡中心位置,竖向土压力传递不会受到结构和边坡摩阻力影响,土压力较距离暗道结构较近的 (6#盒) 偏大。

(2) 暗道侧 2 m, 距离地基面分别高 2、4 m 的 8#、10#土压力盒,竖向土压力值随填土高度变化关系如图 10、11 所示。

从上面暗道侧部不同高度处竖向土压力随填土高变化规律可以看出,随着填土高度增大,暗道侧部竖向土压力在填土高度较低时土压力增长迅速。当填土高度增大到地基面 15 m 以上时,随着填土高度增加,侧部竖向土压力增加缓慢,单位填土高度荷载增量明显减小。且从上面曲线图看出,在暗道侧部竖向土压力显然小于土柱法计算值。

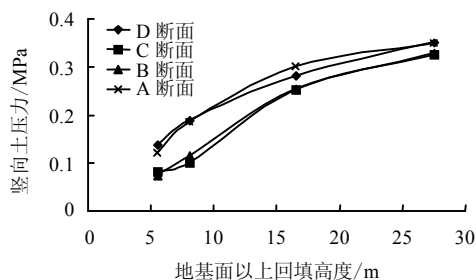


图 10 暗道侧 2 m 高处 (8# 盒) 竖向土压力变化曲线
Fig.10 Curves of vertical earth pressure at the location from conduit 2 m (8# cell)

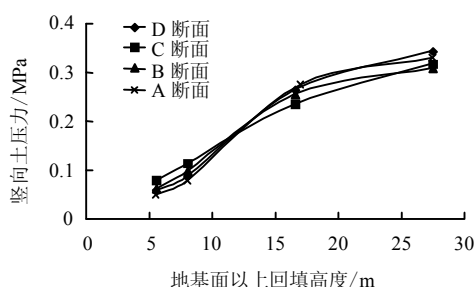


图 11 暗道侧 4 m 高处 (10# 盒) 竖向土压力变化曲线
Fig.11 Curves of vertical earth pressure at the location from conduit 4 m (10# cell)

3.5 暗道侧向土压力分布

在地下埋管土压力计算时, 将管道结构变形量与结构外同等高度土体压缩量之比, 称为结构与土体相对刚度。在填土条件相同时, 结构与周围土体刚度比越大, 荷载分担比越大; 同一管道, 当填土不同或夯实程度不同时, 管道结构土压力分布亦有显著差别。土体荷载下, 管道结构与周围土体发生变形协调作用, 相互间产生变形约束, 管壁挤压周围土体, 反过来周围土体约束管道结构。两者变形协调时达到稳定。

本工程中, 深埋暗道结构土压力分布与地下管道存在显著差别。通过实测数据得到填土高度达到顶部以上 22.5 m 时, 暗道侧竖向、侧向土压力分布曲线如图 12、13 所示。

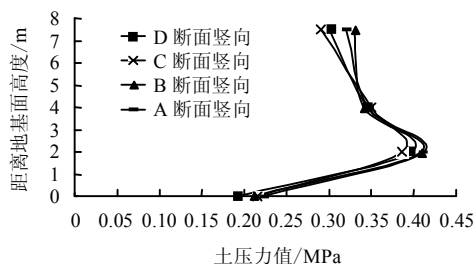


图 12 暗道侧向土压力分布曲线
Fig.12 Curves of vertical earth pressure on the side of conduit

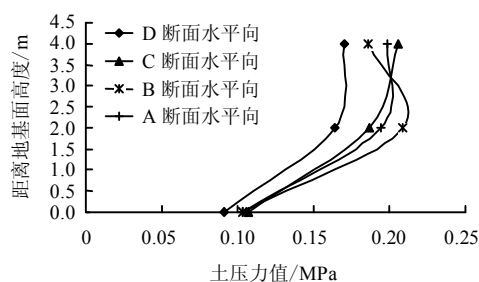


图 13 暗道侧向土压力分布曲线
Fig.13 Curves of lateral earth pressure on the side of conduit

分析暗道侧竖向 (6# 盒、8# 盒、10# 盒) 土压力分布可以得到, 顶部填土 22.5 m 时, 侧部竖向土压力在距离底面 2 m 时土压力最大, 底面处竖向土压力最小; 分析侧壁 (5# 盒、7# 盒、9# 盒) 土压力盒读数, 可以得到填土高度较高情况下, 暗道侧侧向土压力底部最小, 中部最大, 且向上稍稍减小, 土压力分布形状类似梯形。整理暗道周边土压力监测数据, 绘制周边土压力分布如图 14 所示。

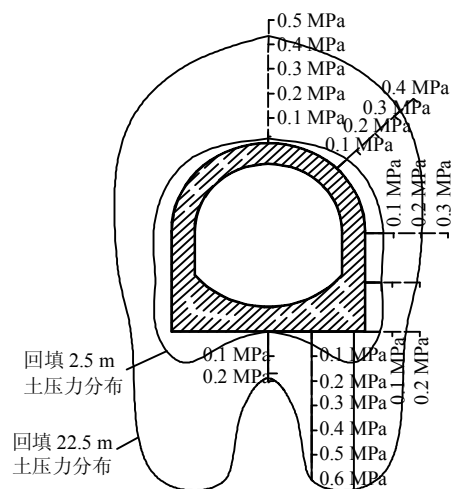


图 14 暗道周边土压力分布图
Fig.14 Distribution of earth pressure in the conduit periphery

4 现场测试 results 和现行理论计算对比分析

4.1 顶部竖向土压力对比分析

将现场实测数据分析结果与几种常用的土压力计算理论方法对比, 模拟整个回填过程得到竖向土压力分布曲线, 如图 15 所示。

由对比分析可以得出, 对宽敞沟谷地区设置的暗道结构, 当填土高度较低时, 除顾安全方法^[14]外, 各种理论方法均与实测数据接近; 填土高度较大时,

普氏理论和公路桥涵设计规范方法土压力明显小于实测数值,对工程是不安全的;土压力集中系数法计算结果,随着填土高度增加,土压力数值增长较快,完全没有考虑土体固结后压力拱的减载作用。

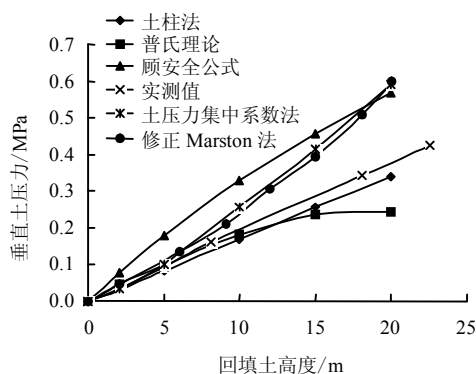


图 15 各计算理论结果对比曲线

Fig.15 Comparison curves of results adopted various computational theories

分析认为,普氏理论适用于深埋洞室开挖的土压力计算,土压力计算应该是先有土体后才开挖洞室。若要在高填方土压力计算中使用该理论,应该是在填方土体固结沉降后采用该理论。实例工程中,高填方土体碎散,颗粒间孔隙大,没有经过压实固结,压力拱难以形成,不应考虑压力拱减荷作用。土柱法土压力大小与填土高度成正比关系,没有考虑回填土在逐渐密实过程中产生的应力集中,是简单的叠加关系,对高填方土压力计算不适宜。

相比土柱法与普氏理论,曾国熙^[6]提出的 Marston 公式修正法,虽然考虑到了回填土黏聚力的影响,但对于公式推导的基本理论未作修改,导致计算结果和土压力集中系数法类似,数值随填土高度增加,增长较快。顾安全方法相对其他方法,土压力随填土高度增加较快,当填土高度较大时,压力数值增加逐渐减缓,土压力增加趋势与实测数据较类似,更适合进行高填方土压力分析。

高填方暗道土压力影响因素很多,不同的土质、不同的结构形式及回填高度时,采用不同的理论计算公式都会得出不同的结果。本文建议在回填土高度较低时,宜采用土柱法计算,回填土高度较大时宜采用顾安全公式法。具体应用时要比对工程条件,综合现场因素,建立合理计算模型。

4.2 侧向土压力对比分析

侧部水平土压力计算中,无论给排水规范、公路桥涵设计规范还是铁路规范,计算侧压力时,都将侧向土压力考虑为竖向土压力乘以一个小于 1 的

系数,这个系数大小因深埋结构尺寸、埋置深度、及结构与填土刚度比的差异而变化。

工程实例中,暗道结构与涵洞及埋管等结构相比埋深大、尺寸大、结构与回填土刚度比亦大。按照目前广泛应用的各种计算方法,在填土高度较大时由克列恩^[17]估算法侧压力系数在 0.25~0.33 之间;朗肯主动土压力计算法得到的侧压力系数在 0.42~0.49;由静止土压力系数法得到的侧向土压力系数为 0.57~0.66。实际工程中对监测数据进行分析,得到侧向土压力与竖向土压力比值系数在 0.47~0.55 之间,大于克列恩的估算值和朗肯主动土压力值,与静止侧向土压力系数最为接近。

分析认为,工程中暗道侧向土压力系数与地下埋管侧压力系数相差较大。主要因为暗道结构刚度、尺寸相比管道结构大,两侧鼓胀趋势很弱,使结构从原本的承受被动土压力转化为承受静止土压力;另一方面暗道结构表面粗糙,土体受到的摩擦作用较强,传递到侧部的土体荷载受到影响,使侧向土压力分布接近静止土压力分布模式。所以本工程中采取对朗肯主动土压力系数乘以一个 1.12 的修正系数,这样计算结果更符合实际。对类似工程而言,当边界条件不很明确时,为安全起见,建议采取静止土压力系数法计算作用在暗道上的侧向土压力。

5 结 论

(1) 通过对现场测试数据分析看出,高填方暗道结构顶部存在竖向土压力集中现象,其竖向土压力均值小于按土柱法计算结果。且在高填方工程中,未必存在“土拱”,当工程填料适宜,碾压密实或土体在高应力下固结较长时间时才考虑拱效应。

(2) 高填方暗道侧部竖向土压力分布,当填土高度较低时,土压力随填土高度增加较快,当填土高度较大时变化缓慢。

(3) 目前高填方暗道竖向土压力计算,其方法还较混乱,任何一种计算方法都不够完善。本文建议在高填方暗道竖向土压力计算时,当填土高度较低时,宜采用土柱法,填土高度较大时,宜选用顾安全公式法。暗道结构相比公路桥涵与地下埋管,尺寸和刚度较大,故建议计算侧向土压力系数采用静止土压力系数。

参 考 文 献

- [1] MARSTON A. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments[M]. Ames: Iowa State College, 1930.

- [2] SPANGLER M G. Underground conduits—An appraisal of modern research[J]. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, 1948, 113(1): 316—345.
- [3] DASGUPTA A, SENGUPTA B. Large-scale model test on square box culvert backfilled with sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(1): 156—161.
- [4] YANG M Z, DRUMM E C, BENNETT R M, et al. Measurement of earth pressures on concrete box culverts under highway embankments[C]//Field Instrumentation for Soil and Rock. Atlanta, Georgia: [s.n.], 1998: 87—100.
- [5] KATONA M G. Seismic design and analysis of buried culverts and structures[J]. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, 2010, 1(3): 111—119.
- [6] 曾国熙. 土坝下涵管竖向土压力的计算[J]. 浙江大学学报, 1960, 4(1): 79—97.
- ZENG Guo-xi. On the vertical pressure on the pipe line under an earth dam[J]. **Journal of Zhejiang University**, 1960, 4(1): 79—97.
- [7] 折学森, 顾安全. 高填土下管道土压力的分析[J]. 西安公路学院学报, 1992, 12(4): 27—33.
- SHE Xue-sen, GU An-quan. Study of the earth pressure on conduit under the deeper earth[J]. **Journal of Xi'an University of Highway**, 1992, 12(4): 27—33.
- [8] 折学森, 顾安全. 沟谷地形中埋设管道的土压力研究[J]. 西安公路学院学报, 1989, 7(4): 33—39.
- SHE Xue-sen, GU An-quan. Study on the earth pressure on conduit lying hidden in the trench terrain[J]. **Journal of Xi'an University of Highway**, 1989, 7(4): 33—39.
- [9] 杨锡武, 张永兴. 公路高填方涵洞土压力变化规律及计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 119—124.
- YANG Xi-wu, ZHANG Yong-xing. A study on the earth pressure theory for high fill culverts[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(9): 119—124.
- [10] 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.
- [11] 刘保健, 谢永利, 程海涛, 等. 上埋式公路涵洞地基及基础的设计[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(3): 17—20.
- LIU Bao-jian, XIE Yong-li, CHENG Hai-tao, et al. Design of soil-foundation system of culvert under high embankment[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2006, 26(3): 17—20.
- [12] 陈保国, 焦俊杰, 宋丁豹. 钢筋混凝土箱涵竖向土压力理论研究—梯形沟谷设涵[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2911—2918.
- CHEN Bao-guo, JIAO Jun-jie, SONG Ding-bao. Study of vertical earth pressure on reinforced concrete box culvert—Trapezoidal trench installing culvert[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(10): 2911—2918.
- [13] 马强, 郑俊杰, 张军. 高填方涵洞加筋减载的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2337—2342+2348.
- MA Qiang, ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun. Experimental study of high embankment culvert treated by imperfect ditch covered with a geogrid layer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2337—2342+2348.
- [14] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 3—15.
- GU An-quan. Investigation of the vertical earth pressure on projecting conduit and underground chamber under a high embankment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1981, 3(1): 3—15.
- [15] 黄清猷. 填埋式地下圆形结构物周边土压力分布的有限元解[J]. 土木工程学报, 1982, 15(3): 52—63.
- HUANG Qing-you. FEM solution of circumferential distribution of soil pressure over tube structures[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1982, 15(3): 52—63.
- [16] 韩伟平. 涵洞土压力有限元施工分层填筑模拟与试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007: 17—18.
- [17] 克列恩 Г К. 地下管计算[M]. 北京: 中国工业出版社, 1961: 65—72.