

湖底明挖隧道两侧回填材料受力变形特性分析

李晋¹, 石妍茹¹, 左坤^{1*}, 毕崇祯¹, 朱莉¹, 赵根生², 刘宪²

(1. 山东交通学院, 山东 济南 250357; 2. 山东鲁桥建设有限公司)

摘要:湖底明挖隧道采用结构自防水与回填材料主动防水的方案,为研究高水位压力对湖底明挖隧道回填材料受力与变形的影响,通过现场试验测试了泥岩层、黏土层在不同埋深(1、5 m)下的土压力和孔隙水压力;利用数值模拟分析了回填层在不同上覆水位(分别为3、5、7和9 m)下的沉降变化规律。研究表明:随埋深增加,高水位压力对回填层土压力和孔隙水压力的上升程度加剧。埋深5 m处黏土层的土压力和孔隙水压力均最大;同埋深下泥岩层较黏土层承受的土压力和孔隙水压力较小。随着上覆水位压力增大,回填层累计沉降值不断增大;埋深1 m处黏土层的沉降累计最大,达到0.028 m。相同压力和埋深下,泥岩层的受力与位移较黏土层均较小,作为回填材料更具工程稳定性。

关键词:湖底明挖隧道; 回填材料; 土压力; 孔隙水压力; 沉降

1 引言

随着城市交通压力日益增加,城市地下隧道因能优化利用城市空间而不断受到重视。其中明挖隧道作为隧道施工中最基本、最常用的施工方法,若不能合理地选择回填材料、控制回填质量,将极易导致回填层破坏、隧道坍塌、漏水、道路塌陷等工程事故,造成巨大的经济损失和社会影响。

国内外学者对隧道开挖回填材料的类型、性能参

数及变形等方面做了大量研究。吴娟娟等运用数值模拟的方法,以三峡库区实际工程为例,针对回填材料类型对回填效果的影响,提出了有效的回填建议;钱舟利用有限元软件 Ansys 模拟各级围岩下标准二车道公路隧道的受力和变形,将区间分析引入隧道工程用来研究隧道回填层材料的工程参数;杨耀然等运用 LS-DYNA 动力数值分析软件分析了回填层对隧道衬砌竖向位移的影响规律;周德军在冲击荷载的基础上,对隧道拱部不同溶洞高度下的护拱回填厚度进行了计算分析;葛折圣运用理论分析和优化算法计算不同回填

- *****
- [3] 孙智慧,邢逸航,唐勇,等.背斜核部层状软硬岩区隧道变形时空效应分析[J].中外公路,2019(1).
- [4] 武科,马明月,李术才.付家冲隧道监控量测与稳定性评价[J].地下空间与工程学报,2012(3).
- [5] 汪学清,石瑞明,曹新玲,等.月亮山隧道围岩变形规律及稳定性[J].科学技术与工程,2017(31).
- [6] 王明年,赵思光,张霄.郑万高铁大型机械化施工隧道位移控制基准研究[J].隧道建设(中英文),2018(8).
- [7] TB 10121—2015 铁路隧道监控量测技术规程[S].
- [8] TB 10003—2017 铁路隧道设计规范[S].
- [9] JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范[S].
- [10] 马士伟,韩学论,廖凯,等.大断面软弱围岩隧道防塌方实时监测预警标准研究[J].铁道工程学报,2014(9).
- [11] 汪波,杨意,何川,等.破碎千枚岩隧道施工期位移安全控制基准研究[J].岩石力学与工程学报,2016(11).
- [12] 陈伟,曹鹏,郭鸿雁,等.典型公路炭质页岩隧道变形安全基准值研究[J].地下空间与工程学报,2018(S2).
- [13] 王明年,赵思光,张霄.郑万高铁大型机械化施工隧道位移控制基准研究[J].隧道建设(中英文),2018(8).
- [14] 周艺,何川,邹育麟,等.破碎软岩隧道施工期位移控制值的确定及其应用研究[J].水文地质工程地质,2013(3).

收稿日期:2020-11-19

基金项目:山东省重点研发计划项目(编号:2019GSF111008)

作者简介:李晋,男,教授. E-mail:sdzblijin@163.com

* 通信作者:左坤,男,副教授. E-mail:zuoshen2006@163.com

材料的土压力;何晓勇基于重庆轨道交通某线路所涉及的回填土地层,对回填土的力学特性进行了试验研究;田建勃等通过对山西某输煤暗道周边土压力现场测试分析,得出了高填方输煤暗道周边土压力分布和变化规律;陈京贤等对回填土隧道围岩应力应变随施工过程的变化规律进行了初步研究;邓超选择二灰土作为回填材料,发现可以明显减小新老路基的差异沉降。然而,对湖底明挖隧道回填材料在湖水压力和隧道内行车扰动共同作用下的研究则很少。为保证湖底隧道工程的回填质量和长期稳定性,有必要对回填材料的受力变形特性开展系统研究。

该文依托墨子湖隧道工程开展明挖隧道回填材料受力特性现场试验,通过现场埋设土压力盒、渗水计,进行为期2年多的数据监测,对泥岩层、黏土层在不同埋深下的土压力和孔隙水压力进行对比研究;并借助有限元软件分析不同回填层的沉降变形规律,将现场试验与数值模拟两种方法相结合,对隧道回填层受力与变形的统一性研究具有重要的理论与工程意义。

2 现场测试研究

2.1 工程概况

墨子湖隧道位于山东省滕州市高铁新区的墨子湖区,连接着整个墨子湖的东西两岸和滕州新老城区,西起吉山路、下穿京台高速公路、止于首善路,主车道总长2 600 m,其中隧道总长1 751 m。隧道所处空间位置关系如图1所示。隧道封闭段采用折板拱形单箱双室现浇混凝土闭合箱体结构,长度为1 304.1 m,隧道敞开段采用U形槽结构,长度为447 m,城市道路全长849 m。隧道位于墨子湖底部1.5 m处,均采用明挖法施工,箱体顶部设计有离水面7 m的高度。

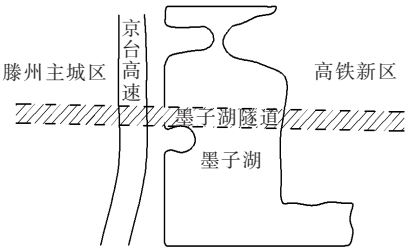


图1 隧道空间位置关系图

经勘察和室内土工试验,将场地地基土划分为7层,分层由上至下如表1所示。考虑到明挖隧道的综合防水、回填质量和经济效益,根据当地条件选择回填

材料尤为重要。因此,采用“黏土+泥岩+黏土”外包层的回填方式,如图2所示。现场回填采取机械碾压,分层多阶段完成,最终回填土的压实度达到设计要求。

表1 场地地基土划分

分层编号(由上至下)	类别	均厚/m
①	耕土	0.43
②	粉土	1.23
	细砂	1.53
③	粉质黏土	1.96
	粉质黏土	1.57
④	粉质黏土	2.97
⑤	中粗砂	3.77
⑥	砂质泥岩	1.69
⑦	砂岩	—

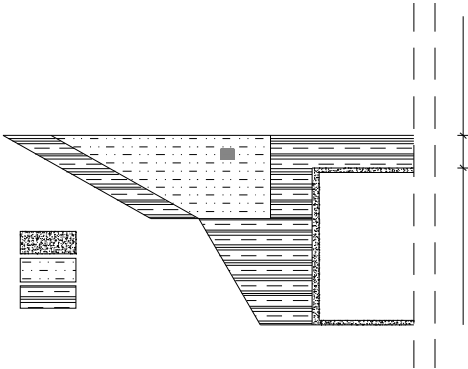


图2 回填方式和元件埋设示意图(单位:m)

2.2 测点布置

如图2所示,测试布置3个测点,每个测点各埋置一个土压力盒、一个渗水计,埋置位置分别在埋深1 m处的泥岩层、埋深为1 m的黏土回填层、埋深5 m处的黏土回填层,通过所测土压力值和孔隙水压力值,研究其在水压与行车扰动长期共同作用下随时间的变化规律。选用双膜土压力盒,在埋设前对土压力盒进行标定、仪器防水性能测试。并在埋设前对仪器调零,确保读数可靠稳定。通过钻孔埋设渗水计,使用智能综合测试仪JMZX-3001采集仪检查渗水计是否正常,直到读数稳定并且稳定读数用作初始读数。

3 现场试验结果与分析

现场监测自2017年9月底至2019年7月中旬。高水位压力自2018年4月中旬施加,在此之前是施工

回填土阶段。受冬歇期影响自 2017 年 11 月中旬至 2018 年 4 月中旬、2018 年 11 月中旬至 2019 年 4 月中旬的数据未能监测。

3.1 土压力分析

3.1.1 不同埋深下土压力监测情况

对埋深 1、5 m 的黏土回填层分别进行了土压力长期监测,监测结果见图 3。

从图 3 可以看出:两测点土压力曲线总体均呈上升趋势,埋置深的测点土压力值始终高于埋置浅的测点。施工回填土阶段,由于施工填土不均等影响,土体

存在移动,土压力值发生上下浮动。当施加高水位压力后,由于压力增大、土层被压缩,土压力值随不同埋置深度发生不同幅度上升。相比较而言,埋置浅的土压力值在施加水压力后基本维持在 0.06 MPa,埋置深的土压力值在施加水压力后上升幅度较大,最终达到 0.12 MPa。表明随回填层深度增加,高水位压力对回填层土压力的影响程度加剧。

3.1.2 不同回填材料土压力监测情况

对埋深 1 m 的黏土、泥岩回填层分别进行了土压力长期监测,监测结果如图 4 所示。

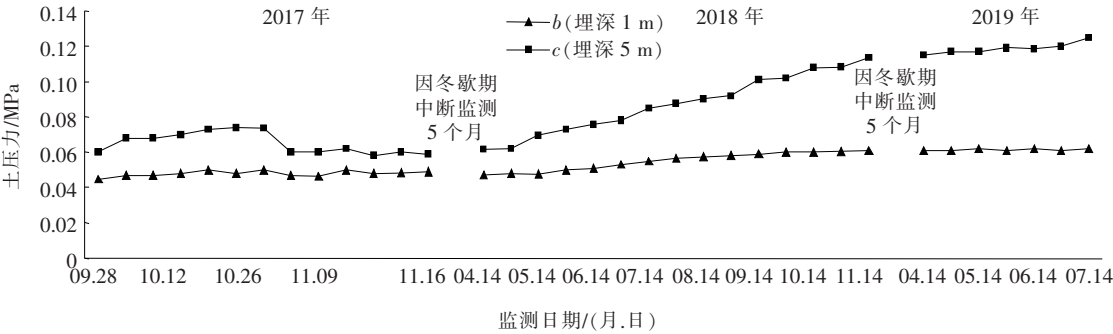


图 3 不同埋深土压力—时间趋势曲线图

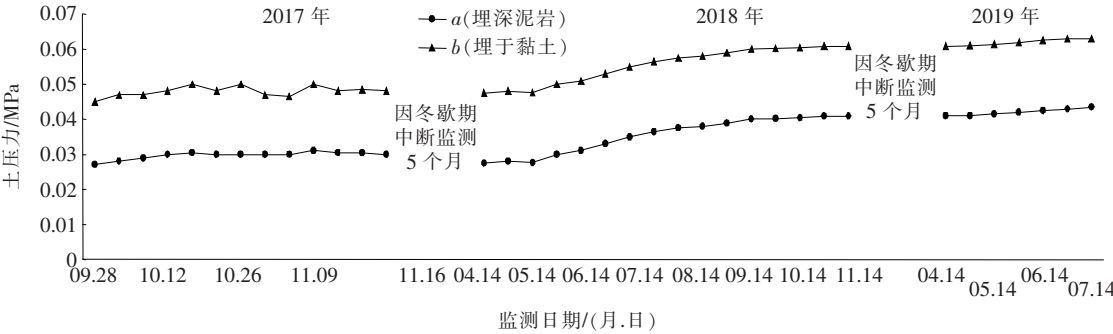


图 4 不同回填材料土压力—时间趋势曲线图

从图 4 可以看出:泥岩层的土压力值始终低于黏土层,且两测点土压力最终均趋于稳定值。与黏土层相比,施工回填土阶段,泥岩层土压力变化曲线更平稳,维持在 0.03 MPa 左右。施加高水压后,泥岩层和黏土层的土压力曲线基本呈平行上升趋势,泥岩层土压力值几乎始终低于黏土层 0.02 MPa,说明高水压作用下,同埋深的泥岩层较黏土层承受的土压力更小。此时土压力主要考虑由土的自重承担,与土密实程度呈正相关。由于两者物理性质的不同,泥岩渗透性优于黏土,即泥岩空隙率小于黏土,故泥岩更加密实,土压力值较大。

据太沙基有效土压力理论 $\sigma = \sigma' + u$ 计算土压力值,泥岩 a 点的值为 0.017 MPa,黏土 b 点值为 0.008

MPa,黏土 c 点值为 0.039 MPa,与现场实测值相差较小,均在合理误差范围内。

3.2 孔隙水压力分析

3.2.1 不同埋深下孔隙水压力监测情况

对埋深 1、5 m 的黏土回填层分别进行了孔隙水压力长期监测,监测结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出:在整个监测期间,两种埋深下的孔隙水压力呈现出明显的起伏变化。施工回填土阶段,两种埋深下孔隙水压力呈曲折上升后略有下降,这可能是因为施工现场部分积水未清除干净。施加高水位压力后,两种埋深下孔隙水压力均出现不同幅度的起伏,且出现波动的拐点日期十分接近,这是由于受自然水位升降的影响。在水位压力变化下,埋置深的孔

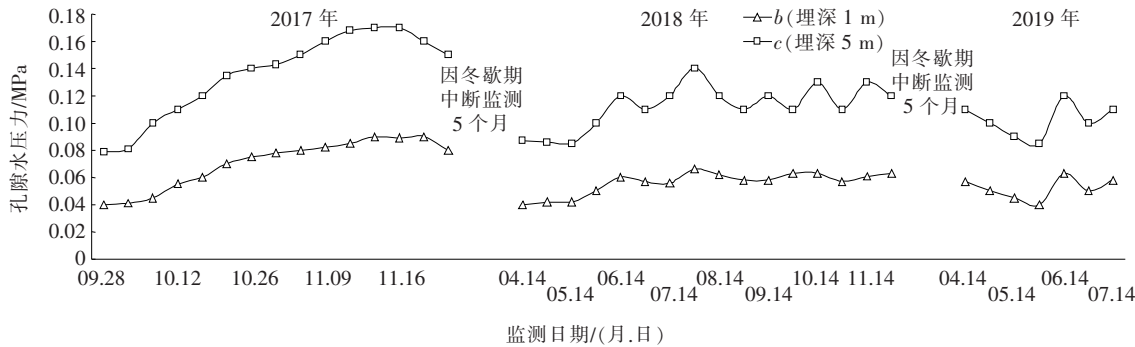


图5 不同埋深孔隙水压力—时间趋势曲线

隙水压力峰值达到 0.14 MPa,埋置浅的峰值为 0.06 MPa。说明在高水压条件下孔隙水压力随土层深度增加而明显增大。

3.2.2 不同回填材料孔隙水压力监测情况

对埋深 1 m 的黏土、泥岩回填层分别进行了孔隙水压力长期监测,监测结果如图 6 所示。

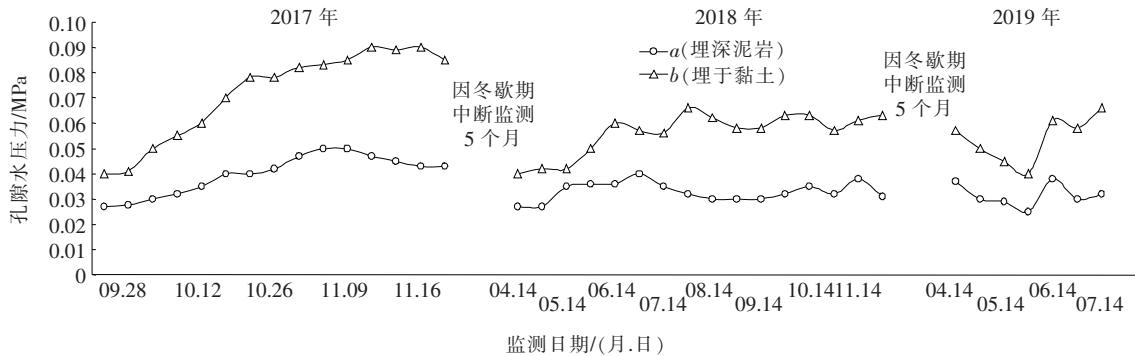


图6 不同回填材料孔隙水压力—时间趋势曲线

从图 6 可以看出:两测点曲线均起伏变化明显,埋于黏土层的孔隙水压力值始终大于泥岩层。施工回填土阶段,两曲线均呈曲折上升趋势,泥岩层较黏土层上升幅度偏小。施加高水位压力后,泥岩层和黏土层出现不同幅度的波动,泥岩层最大孔隙水压力值为 0.04 MPa,黏土层最大值为 0.07 MPa。由此可知作为回填材料,黏土的渗透系数较泥岩渗透系数大,即泥岩孔隙比小,而渗透水实际上仅仅通过土体中孔隙流动,故泥岩孔隙水压力值比黏土孔隙水压力值小。泥岩层的抗渗性能较好,泥岩更加密实,水向泥岩层的渗流较小,其孔隙水压力受水位升降的影响小。

据太沙基有效压力理论 $\sigma = \sigma' + u$ 计算孔隙水压力值,泥岩 a 点的值为 0.039 MPa,黏土 b 点值为 0.039 MPa,黏土 c 点值为 0.078 MPa,与现场实测值相差较小,均在合理误差范围内。

4 数值模拟分析

由于现场施工条件复杂、隧道上覆湖水干扰,采用

常规的埋设沉降观测点存在较大困难,所以借助数值模拟分析不同回填材料的沉降变形。

4.1 建立数值模型

对位移边界条件采用标准固定边界:对模型的左、右边界施加约束,也即在水平方向位移为零,竖直方向上可自由变形;在几何模型底部施加完全固定约束,即在任意方向上位移为零。

隧道本体混凝土结构采用线弹性模型模拟,模型使用各向同性线弹性的 Hooke 定律。线弹性模型包括两个弹性刚度参数,即弹性模量 E 和泊松比 ν 。泥岩(扰动回填土)和黏土采用摩尔库仑本构模型,一般用于岩土性状的初步近似,包括 5 个参数:弹性模量 E 、泊松比 ν 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和剪胀角 ψ 。各模型参数取值见表 2。

表 2 中黏土的渗透系数由室内变水头试验测定,采用环刀法取样,用 TST-55 型土壤渗透仪进行测定,具体试验操作依照 JTG E40—2007《土工试验规范》;泥岩渗透性试验按照 TB 10102—2010《铁路工程土工试验规程》执行。两种材料的渗透系数均由 4 个

表 2 模型参数

岩土名称	本构模型	天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	E / kPa	泊松比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa
C40 抗渗混凝土	线弹性模型	24.5	24.5	2.255×10^{-7}	3.25×10^7	0.20	—	—
泥岩(扰动回填土)	摩尔—库仑模型	26.0	27.0	8.26×10^{-4}	39 100	0.28	30	25
黏土	摩尔—库仑模型	14.8	17.7	1.04×10^{-3}	10 000	0.35	25	5

允许差值符合规定的测值取平均而得。

对该湖底明挖隧道施工过程分 4 个工序进行模拟,第一个工序开挖基坑,开挖深度 9.5 m,第二个工序修筑混凝土隧道,第三个工序回填隧道左右两侧黏土,最后回填隧道上方的黏土和泥岩。基本工序如表 3 所示。所选模拟点与现场试验监测点位置近似,如图 7 所示。为模拟隧道上方承受的长期不同水位(3、5、7、9 m)的湖水压力,相应地在隧道上方 1.5 m 回填土处布置不同均布荷载,如表 4 所示。

表 3 工序简表

工序名称	设计时长/d	工序名称	设计时长/d
开挖基坑	30	第二次回填土	10
修筑隧道	20	施加上覆水压力	200
第一次回填土	10		

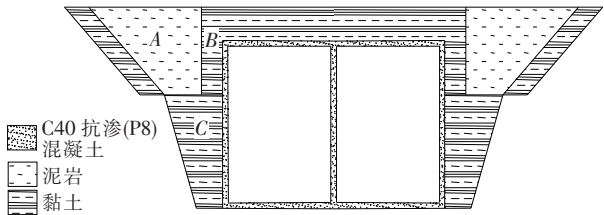


图 7 模拟点位置图

表 4 施加均布荷载

湖水位高度/m	均布荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)
3	29.4
5	49.0
7	68.6
9	88.2

4.2 数据分析

取与现场土压力、孔隙水压力监测位置对应的 A、B、C 3 个点进行分析,即 A 点为埋深 1 m 的泥岩层,B 点为埋深 1 m 的黏土回填层,C 点为埋深 5 m 的黏土回填层。测点曲线图和部分计算结果的沉降云图如图 8、9 所示。

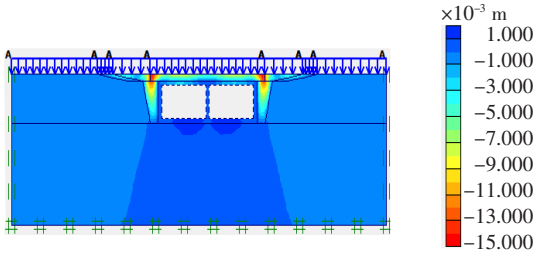
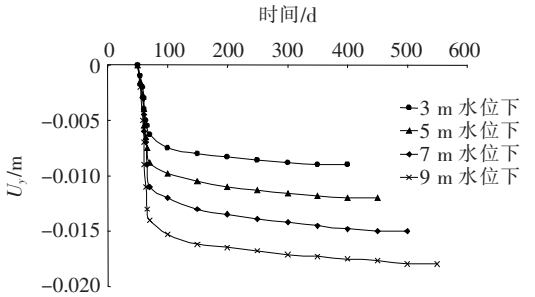
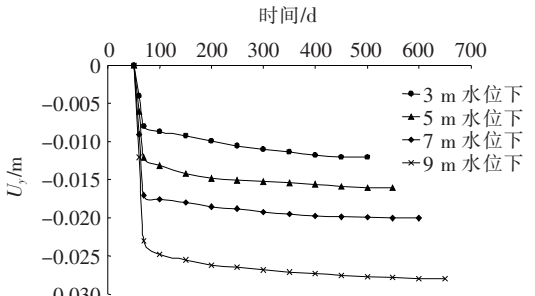


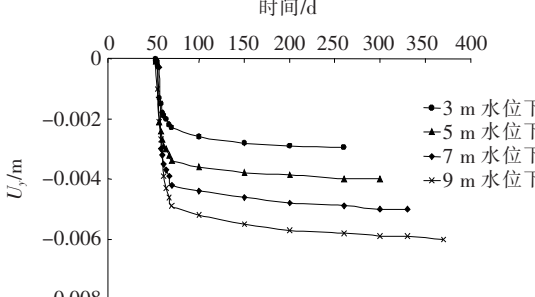
图 8 3 m 水位下沉云图(单位:mm)



(a) A 点



(b) B 点



(c) C 点

图 9 不同水位下测点的沉降图

结合工序简表 3 和图 8 可以看出:在各水位下,泥

岩层监测点A、浅层黏土监测点B、深层黏土监测点C3处沉降均从第一次回填土(第50 d)开始出现。在回填压实土阶段(50~70 d)的沉降增加速率明显大于施加覆水压力阶段(自70 d以后)。随着水位从3 m增加到9 m,3处监测点的沉降均随之增大。测点不同,在不同水位下沉降趋于平稳的时间点也不尽相同。

在同水位下深层黏土监测点C的沉降在3个监测点中均最小,在第60 d附近出现第一个拐点,正是第一次回填土完成点,在第70 d附近出现第二个拐点,沉降增加速率变缓,是因为此时开始施加覆水压力,最后在高水位9 m处有0.006 m的沉降。浅层黏土监测点B在各水位下的沉降量均最大,是由于该点以下土层沉降位移的累加结果,产生位移的时间较其他两点较晚,原因是该部分土最后回填,自60 d开始沉降出现急剧下降趋势,70 d后出现拐点,沉降下降速率减小,并在9 m水位下达到最大值0.028 m。泥岩层监测点A在各水位下的沉降量随时间逐渐增加,70~270 d间施加覆水压力后曲线呈线性趋势,随着水位由3 m增加至9 m,沉降不断增大,最大值达到0.017 m。

用分层总和法按水位最浅3 m时计算,泥岩A点值为0.028 m,黏土B点值为0.017 5 m,黏土C点值为0.005 m。计算值与有限元模拟值相差较小。以上分析可知,上覆荷载越大,土的压缩性越大,压缩层越厚,沉降则越大;在相同压力、相同埋深下,泥岩较黏土产生沉降小,作为回填材料更利于工程稳定。

5 结论

通过对墨子湖隧道的受力监测、有限元模拟位移变化的分析,得到如下结论:

(1) 在高水位压力下,各现场监测点的土压力随不同埋深、不同回填材料呈不同的变化趋势。随埋深增加,高水位压力使回填层土压力的上升程度加剧。同埋深下泥岩层较黏土层承受的土压力更小。

(2) 随工程监测期间的湖水位升降,各测点的孔隙水压力表现出明显波动式变化。在高水压作用下,孔隙水压力随土层深度增加而明显增大。同埋深时,黏土层比泥岩层的孔隙水压力值大,泥岩层抗渗性更好。

(3) 各监测点的模拟沉降值呈现位移累加式增大,随上覆水位从3 m增至9 m,3处监测点的沉降均不断增大。浅层黏土层的沉降累计最大;在相同压力和埋深下,泥岩较黏土产生沉降小,作为回填材料更具工程稳定性。

参考文献:

- [1] 魏巍,王成军.大断面地下通道结构施工对既有下卧盾构隧道影响研究分析[J].公路,2017(7).
- [2] 雷亚峰,何修义.明挖隧道施工期间下方共线地铁盾构区间上浮控制技术——以深圳市桂庙路快速化改造工程为例[J].隧道建设(中英文),2019(11).
- [3] 吴娟娟,黄海峰.三峡库区某滑坡前缘回填材料类型对其稳定性的影响[J].水电能源科学,2016(4).
- [4] 钱舟.不同围岩级别下隧道回填材料合理工程参数分析[D].重庆交通大学硕士学位论文,2016.
- [5] 杨耀然,刘伟东,陈晓.爆炸作用下超挖回填层对隧道衬砌动力响应分析[J].国防交通工程与技术,2015(6).
- [6] 陈晓.以单轴抗压强度解析岩石强度图[C].第一届全国矿山岩石力学会议论文集,1982.
- [7] 周德军.隧道拱顶大型溶洞回填厚度的研究[J].公路工程,2014(5).
- [8] 葛折圣,葛折贵,黄晓明.公路桥涵台背回填稳定性极限分析上限解[J].岩土力学,2004(12).
- [9] 何晓勇,宋鉴学,刘新荣,等.回填土隧道施工方案对比研究[J].地下空间与工程学报,2016(S1).
- [10] 田建勃,陈凯,韩晓雷,等.高填方输煤暗道周边土压力试验研究[J].岩土力学,2014(6).
- [11] 陈京贤,曾德荣,王俊召,等.基于应力释放率的大跨径回填土隧道的围岩稳定性研究[J].中外公路,2018(6).
- [12] 邓超.高架桥基础承台开挖引起的路面差异沉降控制方法研究[J].中外公路,2020(2).