

稳态渗流条件下复合地层水头损失 模型试验研究

杨党校¹, 贺红¹, 邓国华², 张喆³

(1. 西安中铁轨道交通有限公司, 陕西 西安 710038;

2. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 为了研究复合地层渗流过程中水头损失的变化规律, 采用卵石土、粗砂、细砂、粉质黏土四种不同渗透系数的材料组合成六种类型的复合地层, 利用自主研发的多功能粗粒料渗流试验装置对这六种类型的复合地层进行稳态渗流条件下的水头损失模型试验研究。结果表明: 复合地层渗流过程水头损失受地层交替分布影响明显; 按照渗透系数较大的土层向渗透系数较小的土层方向渗流, 该渗流过程完全连续; 渗透系数小的土层若是位于复合地层的上层或是中层, 会导致复合地层中渗流的不连续, 甚至是水头的消失, 渗流的过程是由其中渗透系数最小的地层来决定的; 模型试验结果与实际工程地层、水头勘察结果相一致。

关键词: 复合地层; 渗透系数; 水头损失; 模型试验

中图分类号: U212

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)01—0062—06

Model Test Study on Water Head Loss in Composite Stratum Under Steady-state Seepage

YANG Dangxiao¹, HE Hong¹, DENG Guohua², ZHANG Zhe³

(1. Xi'an China Railway Transportations Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710038, China;

2. Xi'an Loess Underground Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: In order to analyze the change rules of water head loss in the seepage process of composite stratum, six types of composite stratum were synthesized by using four materials with different permeability coefficients: pebble soil, coarse sand, fine sand and silty clay. The model test of water head loss of these six types of composite stratum under steady-state seepage condition is carried out by using the self-developed multi-functional coarse particle seepage test device. The results show that the water head loss is obviously affected by the alternate distribution of stratum. And the seepage process is completely continuous from the soil layer with larger permeability coefficient to the soil layer with smaller permeability coefficient. If the soil layer with low permeability is located in the upper or middle layer of the composite stratum, it will lead to the discontinuity of seepage flow in the composite stratum, and even the disappearance of water head. The seepage process is determined by the stratum with the lowest permeability. It is also found that the model test results are consistent with the actual engineering strata and water level investigation results.

Keywords: composite stratum; permeability coefficient; water head loss; model test

地下工程中渗流问题一直以来是工程界非常关注的工程重要问题之一。在隧道工程施工时,渗流是常见的现象,是引发隧道施工工程问题的重要因素。因此,对渗流相关特性规律的研究十分必要。

以往关于地层渗流特性规律的研究主要是围绕单一地层的渗透变形特性和渗透破坏过程展开的,多从岩土体颗粒级配^[1-2]、形状^[3-4]、密实度^[5-6]等角度来研究岩土体的渗透相关规律。比如,邱珍锋等^[3]对粗粒土进行渗透特性试验研究,发现粗粒土的颗粒级配对其渗透性的影响作用最大。彭家奕等^[4]研究了颗粒形状对粗粒土的渗透特性的影响,发现球形颗粒的渗透特性最强。唐红梅等^[5]通过对不同砂石比的砂石土进行渗透试验,发现砂石土的渗透系数随孔隙比的增大呈现出增大的变化趋势。还有学者进行了不同渗流方向^[7-8]及不同应力状态下的渗透特性试验研究^[9]。以往这些关于岩土体渗透特性规律的研究多是以单层土体作为试验研究对象,研究问题多集中在岩土体的渗透系数的变化规律及渗透变形规律^[10-13]。

但是在实际工程中,比如隧道工程穿江过河时,土压平衡盾构开挖面的稳定很大程度受到地下水与土压仓之间高水头压力差产生的渗流力的影响^[14-15],且在此过程中水流会经过多个复合地层。而对于每个地层承担的水头压力仅仅按照理论叠加进行计算,这与实际有较大出入。在实际渗流过程中,土体会发生损伤也伴随土层水头压力损失,对于如何确定复合地层中某地层介质中水头压力大小方面的研究较少,目前研究多侧重考察单一地层单一岩土介质对水头压力的影响,对于复合地层对水头压力的综合影响则鲜有报道。

因此本文基于西安地铁 9 号线(临潼线)穿越灞河段区间隧道范围内复合地层工程实际,开展稳态渗流条件下复合地层水头损失模型试验,进行复合地层渗透特性规律及水头变化规律的研究,其研究成果有利于探索岩土体复合地层条件下的渗透特性和水头损失变化规律,对于工程实际具有一定的指导意义。

西安地铁 9 号线(临潼线)穿越灞河段区间隧道地层剖面如图 1 所示,隧道穿越灞河卵石层、粉质黏土等强、弱透水地层的交界地层,且与灞河水流连通。

1 模型试验装置及操作步骤介绍

1.1 试验装置介绍

对于细粒土的渗流试验,目前各试验规程都建

议采用厂家生产的标准仪器,而由于粗粒土粒径变化范围大,给渗透及渗透变形试验标准仪器的生产带来了不便。因此,本次试验装置采用自制的多功能粗粒料渗流试验装置。该装置由供水供压系统、入渗系统与测量系统三部分组成,如图 2 所示。

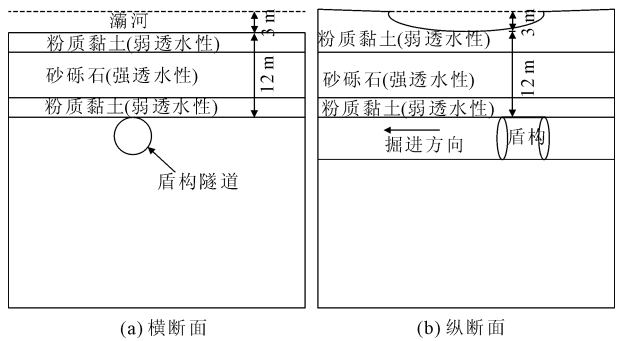


图 1 西安地铁 9 号线穿越灞河段区间隧道地层剖面

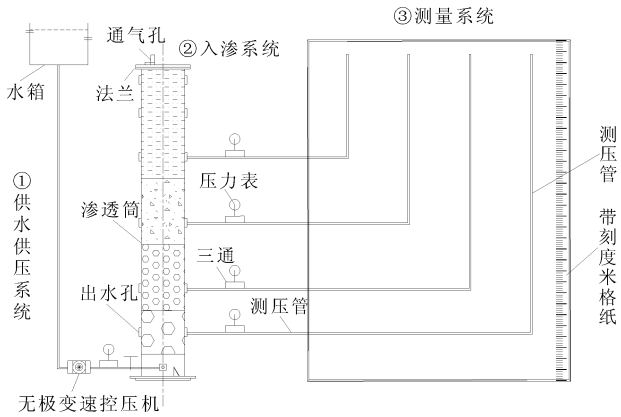


图 2 多功能粗粒料渗流试验装置结构示意图

供水供压系统由升降杆、水箱和无级变速控压机组成。该装置可以实现不同压力级别、由上向下或由下向上 2 种入渗方向进行土体的渗流试验。试验过程中采用纯水进行试验。

入渗系统包括入渗筒体、法兰密封等。模型筒尺寸按照 1:10 比例进行设计,依据项目穿越灞河段实际地层、水位及隧道尺寸等,筒体总高度 1 404 cm,直径 200 mm,筒壁厚度 5 mm。渗流筒体筒壁对称布设测压孔 6 组,从底部注水(排水)口,向上间隔 20 cm、20 cm、30 cm、30 cm、20 cm、20 cm 布置,同时可根据试验设计条件作为排水(排气)孔使用,顶部设置进水加压(排气排水)孔,底部设置有机玻璃多孔滤网隔板,上下端采用法兰连接。模型筒体材料采用耐压性能较好有机玻璃板材,便于试验时实时观察筒内土体试样的渗流变化情况,同时密封加压采用中性玻璃胶实施,方便快捷;缺点在于筒体最

大入渗压力受限在 10 m 水头以内,但能满足西安区域工程应用要求。

测量系统包括侧面的测压管和精密压力表及外接量筒等,测量精度可以达到 0.5 mm 水头压力。

1.2 试验操作步骤

(1) 组装试验装置,按图 2 连接供水供压、渗流入渗系统、量测系统,确保无级变频控压机、测压管、阀门、管路等正确连接,并注纯水检查试验装置是否漏水,是否堵塞(见图 3(a)、图 3(b))。

(2) 铺设过滤层,安放渗流筒体底部透水板,并在其顶部铺设 10 cm 厚的卵石土料,如图 3(c)所示,作为过滤层以防止细颗粒渗流过程中的流失。

(3) 备样,根据试验方案要求干密度、颗粒级配及层厚,称取各粒组重量并充分掺和,为了减少填料时的分离度,掺和时可加 1%~2% 的水。

(4) 分层装样,分层装填,击锤要分布均匀直致击到要求厚度,达到需要的孔隙率,每层厚度控制在 2 cm~3 cm,保证同等击实功下的击实效果,并确保各层密实度的均匀性,底层填料时要尽量注意使颗粒分布均匀。

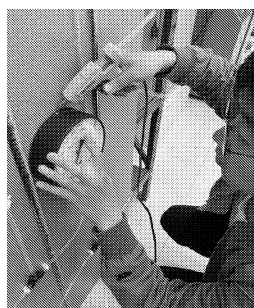
(5) 排气饱和,每层试样装填完毕后均需进行每层的排气饱和处理,见图 3(d)。饱和水头压力不应过大,宜控制在 0.1 mm/s 供水速度左右(务必小流速,否则易出现细颗粒悬浮现象),每次饱和结束不可使液面超出该层土的上表面,以防止下次装填击实时土体拱起造成土体的不均匀性。

(6) 装样结束,继续装样、饱和直至试样高出测压孔 3 cm~4 cm,静置数小时,待液面稳定后检查测压管液面是否齐平,倘若不齐平,表明试验土样内部存在一定数量的气泡,应用橡皮吸球在测压管上连续抽吸,以除去管中空气。

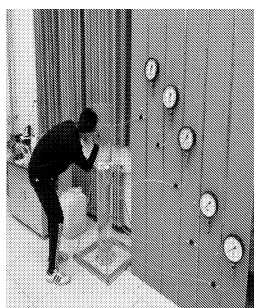
(7) 供水供压,进行试验,打开供水管供水,多余的水由溢水孔溢出,核查三根测压管是否液面齐平,确认后调整供水供压至试验要求按既定水头压力开始渗流试验;逐级增加水压力,观察试样颗粒变化情况,检查气密性与管路,标记液面确定稳定液面,待每次渗透稳定后,测量一定时间内的渗流体积量,同时读取各测压管精密压力表与量测管水注高度,校核数据并记录,如图 3 所示。

(8) 试验结束,拆除试样。筒体试样中小土颗粒发生迁移,认为试样达到临界水力梯度,试样破坏,终止试验,试验结束后拆除测压管,进行卸料工

作并重新安装渗流试样。



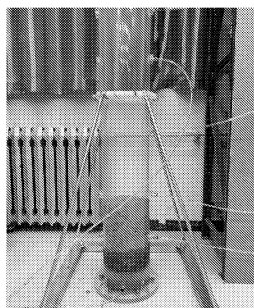
(a) 组装装置



(b) 检查密封性



(c) 铺设滤水层



(d) 排气饱和

图 3 试验操作步骤

2 试验方案

2.1 单一地层试验方案设计

为了验证自主研制的试验装置的可靠性,首先进行单一卵石土地层的渗透特性试验。

单一地层试验用材料取自香一纺区间右线隧道范围内瀾河下地层 80 m 处,该处全断面为卵石土,取样场地地势平坦,在试样场地选取 3 处位置进行取样。经室内试验确定其基本物理参数为:天然重度 2.25 kN/m^3 ,干重度 1.85 kN/m^3 ,孔隙比 0.46,所取卵石土的颗粒级配曲线如图 4 所示。

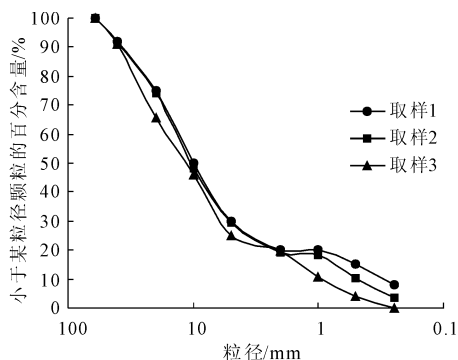


图 4 卵石土颗粒级配曲线

利用现场所取材料制备室内重塑试验样来进行单一卵石土地层的渗透特性试验。按照试验操作步

骤进行 50 cm 厚的卵石土的渗透试验,在试样的底部、中部、顶部分别设有测压孔,在试验过程中进行水头压力量测,详细的单一卵石土地层渗透试验方案设计示意图如图 5 所示。

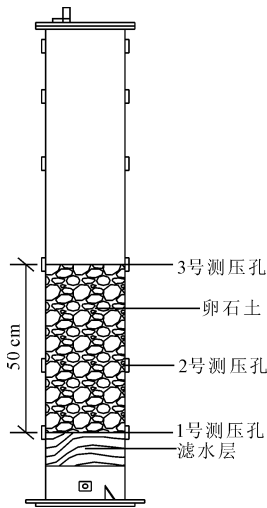


图 5 单一卵石土地层渗透试验方案设计示意图

2.2 复合地层试验方案

为了探索砂土-卵石土-粉质黏土交界复合地层条件下渗透特性和水头变化规律,开展不同水头压力下多重土层组合的复合地层渗透试验。

复合地层试验材料有卵石土、粗砂、细砂、粉质黏土。卵石土由现场取后筛分所得,粗砂、细砂选用标准砂,粉质黏土由现场取后筛分所得。所用材料的粒组划分见表 1。

表 1 试验材料的粒组划分	
材料名称	粒径范围 d/mm
卵石土	$40 \geq d > 10$
粗砂	$2 \geq d > 0.5$
细砂	$0.25 \geq d > 0.075$
粉质黏土	$0.075 \geq d > 0.005$

将试验材料卵石土、粗砂、细砂、粉质黏土分别按照不同组合形成六种不同的复合地层,分别标记为 S1,S2,S3,S4,S5,S6。在土层接触面处布有测压孔,在试验过程中进行水头压力量测,详细的复合地层试验方案设计示意图如图 6 所示。

3 试验结果分析

3.1 单一介质地层试验结果

图 7 给出了单一卵石土地层的渗透试验结果中渗流速度 v 与水力梯度 i 的关系曲线,从图中可以单一卵石土的渗流速度与水力梯度之间呈现出比较好的线性相关关系。

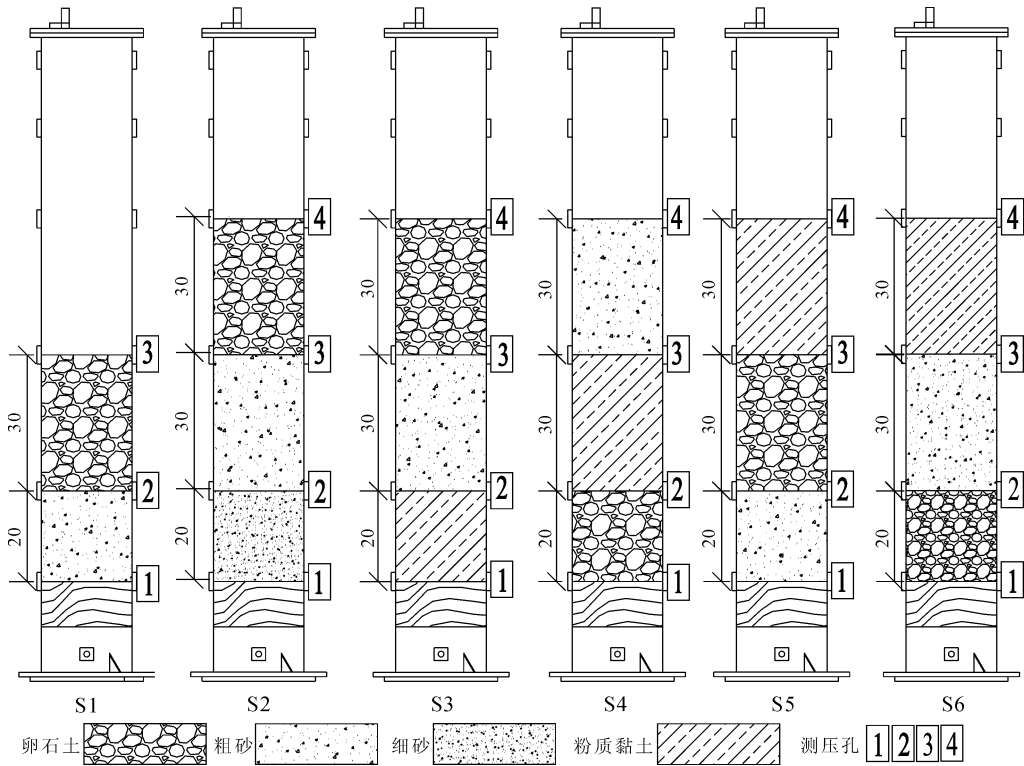


图 6 复合地层渗透试验方案设计示意图(单位:cm)

根据达西定律：

$$v = ki \tag{1}$$

式中： v 表示渗流速度； k 表示渗透系数； i 表示水力梯度。

单一卵石土地层的渗流速度与水力梯度之间呈现出较好的线性正相关关系，基本与达西定律符合，从而验证了自制渗透试验仪的可靠性。

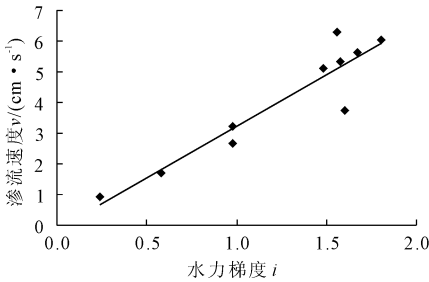


图 7 卵石土的渗流速度与水力梯度的关系

3.2 复合地层试验结果

图 8、图 9、图 10 分别为复合地层 S1、S2、S3 的水头压力随渗流路径的变化关系，从试验设计方案可知复合地层 S1、S2、S3 中土层的渗流顺序都是大粒径土层向小粒径土层渗流。

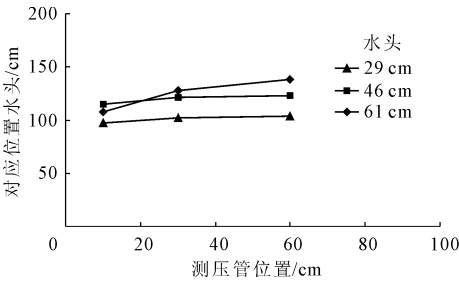


图 8 复合地层 S1 水头压力随渗流路径的变化

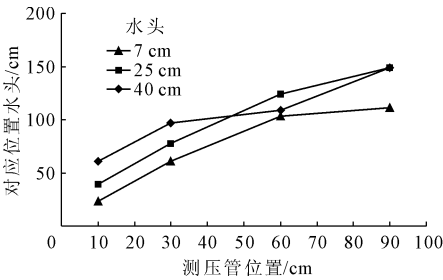


图 9 复合地层 S2 水头压力随渗流路径的变化

从图 8、图 9、图 10 可以看出整个渗流过程中经过卵石土层水头损失较缓，复合地层 S1 中水头损失最快的为底部的细砂层，复合地层 S2 中水头损失最快的为底部的粉质黏土层。而且均表现出随着水头压力的增加，水头损失更加快速显著，复合地层 S3 中水头压力增大到 310 cm 时，水头损失随渗流路径

整体呈现线性变化趋势，分析其原因在于粗砂层中出现细颗粒滚动迁移现象，底部的粉质黏土层出现黏土颗粒迁移到滤水层中，复合地层中的渗流通道贯通，试样发生破坏。

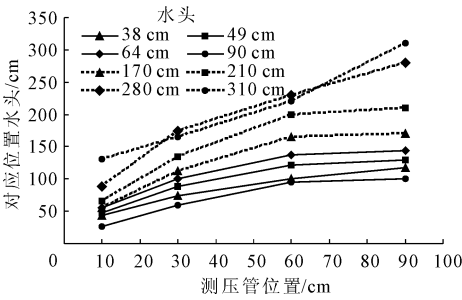


图 10 复合地层 S3 水头压力随渗流路径的变化

图 11、图 12 给出了复合地层 S4、S5 的渗流过程中水头压力随渗流路径的变化关系，复合地层 S4 中粉质黏土层位于中间层，复合地层 S5 粉质黏土层位于最高层，水头压力较小时通过粉质黏土层后水头基本接近 0 cm。

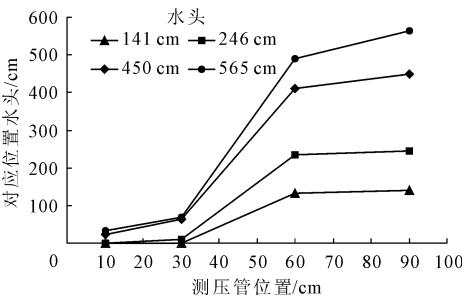


图 11 复合地层 S4 水头压力随渗流路径的变化

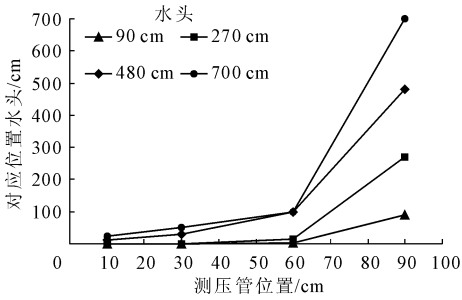


图 12 复合地层 S5 水头压力随渗流路径的变化

在试验过程中观察到复合地层 S5 中的粉质黏土层顶部的 4 号测压管中压力在经过 30 cm 厚的粉质黏土层后水头从 700 cm 减少到 100 cm，水头压力损失率达到 85.71%，分析其原因主要是由于其粉质黏土层黏粒含量高，孔隙比较小，渗流通道较小所导致的。

在试验过程中还观察到粉质黏土层渗流速度

非常缓慢,下层卵石土层排水速度较快,出现了渗流不连续的现象,复合地层 S4 中的粉质黏土层底部的 2 号测压管、复合地层 S5 中的粉质黏土层底部的 3 号测压管产生负压,无法读数,空气沿测压管倒流渗入土柱,在粉质黏土层与卵石土层临界面出现气泡,如图 13 所示,则判定该位置渗流表现出不连续现象,产生“负压区”。

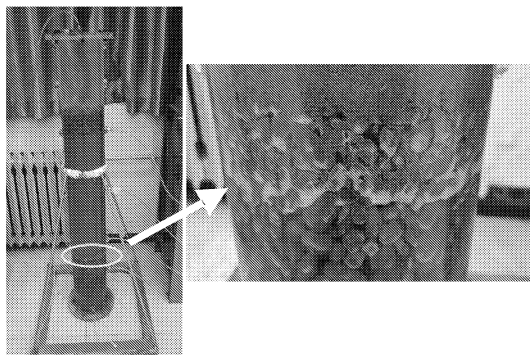


图 13 复合地层 S4、S5 中粉质黏土层与卵石土层临界面产生的气泡现象

对于复合地层 S6 渗流试验过程中发现,水头完全消失,底部卵石土未发现有水渗出。在复合地层 S6 中,粉质黏土层位于最上层,该层颗粒粒径最小,孔隙通道小,渗透系数小,渗流速度非常缓慢,导致出现了水头的消失现象。

经过以上分析可以得出复合地层土层组合分布顺序会对渗流过程的连续性产生显著的影响,由大粒径土层向小粒径土层渗流,即按照渗透系数较大的土层向渗透系数较小的土层方向渗流,该渗流过程完全连续;若是粉质黏土层分布于复合地层的上层或者中间层时会导致下层土层渗流的不连续,甚至是水头的消失,其中渗流过程主要是受其中间粉质黏土层影响,即渗透系数小的土层若是位于复合地层的上层或是中层,会导致复合地层中渗流的不连续,甚至是水头的消失,渗流的过程是由该渗透性最小的地层来决定的。

3.3 试验结果与工程勘察结果的对比

图 14 为香—纺区间右线隧道地层分布与水位线现场勘察结果图,从图 14 可以看出,灞河西岸地层分布主要为卵石土层,水位线变化起伏较小,水力梯度较小。而灞河东岸的地层分布中,中间分布为卵石土层,上下分布有粉质黏土层和粉砂土层,水位线下降,水力梯度较大。且施工补勘发现西岸 2 m ~ 3 m 深度处的卵石土层含水量很大,而东岸 9 m ~ 10 m 深度处的卵石土层含水量很小。稳态渗流条

件下复合地层水头损失模型试验结果与实际工程中地层与水位勘察结果及施工补勘地层含水结果相一致。因而复合地层水头损失模型试验结果对工程实践具有一定的指导意义和参考价值。

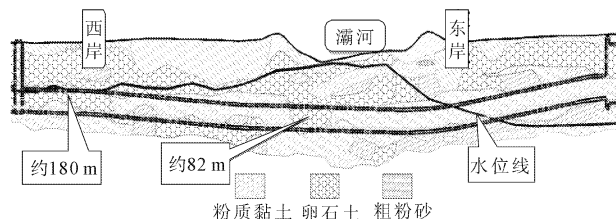


图 14 香—纺区间右线隧道地层分布与水位线示意图

4 结 论

利用自主研发的多功能粗粒料渗流试验装置进行了单一卵石土地层的渗流试验,试验结果规律性良好,验证了仪器的可靠性,然后利用该试验装置进行了稳态渗流条件下六种不同组合的复合地层的水头损失模型试验,得到以下结论:

(1) 复合地层中土层组合分布顺序会对渗流过程的连续性产生显著的影响,由大粒径土层向小粒径土层渗流,即按照渗透系数较大的土层向渗透系数较小的土层方向渗流,该渗流过程完全连续。

(2) 渗透系数小的土层若是位于复合地层的上层或是中层,会导致复合地层中渗流的不连续,甚至是水头的消失,渗流的过程是由该渗透性最小的地层来决定的。

(3) 稳态渗流条件下复合地层水头损失模型试验结果与实际工程中地层与水位勘察结果及施工补勘地层含水结果相一致。复合地层水头损失模型试验结果对工程实践具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 姚志雄,周 健,张 刚,等. 颗粒级配对管涌发展的影响试验研究[J]. 水利学报,2016,47(2):200-208.
- [2] 任玉宾,王 胤,杨 庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. 岩土力学,2018,39(2):491-497.
- [3] 邱珍锋,卢孝志,伍应华. 考虑颗粒形状的粗粒土渗透特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(4):102-106.
- [4] 彭家奕,张家发,沈振中,等. 颗粒形状对粗粒土孔隙特征和渗透性的影响[J]. 岩土力学,2020,41(2):236-244.
- [5] 唐红梅,王林峰,闫 凝. 不同密实度下砂砾土的渗透系数试验分析[J]. 路基工程,2020,213(6):25-30.

(下转第 97 页)