

水位循环升降作用下粉土变形及沉降机理

张英平^{1,2}, 唐益群¹, 徐杰¹, 周洁¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要: 地下水位升降变化是浅层地下水普遍存在现象, 常常导致土层结构与土体性质发生变化, 从而影响地基土变形与沉降. 以洛阳地区粉土为研究对象, 通过水位循环升降模拟试验, 研究水位循环升降作用下粉土孔隙水压力、土压力周期性变化规律及由此产生的变形沉降特性. 试验表明: 孔隙水压力周期性变化是导致土体周期性变形的主要原因, 两者具有相似的周期性变化规律; 孔隙水压力对水位升降表现出瞬时响应, 而变形则呈现滞后性. 通过机理分析发现, 振荡孔隙水压力是土体中饱和-非饱和状态转变的根本原因, 而残余孔隙水压力的衰减消散是土层产生固结沉降的驱动力.

关键词: 水位循环升降; 沉降变形量; 孔隙水压力; 土压力
中图分类号: P642.5 **文献标志码:** A

Deformation Law and Settlement Mechanism of Silt Caused by Cyclic Rise-fall of Water Table

ZHANG Yingping^{1,2}, TANG Yiqun¹, XU Jie¹, ZHOU Jie¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: As a common phenomenon of groundwater in shallow soil layers, the cyclic rise-fall of water table usually causes the change of soil structure and properties, having impacts on the deformation and subsidence of foundations. In order to solve the above problems, this paper takes the silt in Luoyang area as the research object for the model test, and studies the periodic variation law of pore water pressure and earth pressure in different layers of silt at different stages under the action of cyclic rise-fall of water table. Based on the above exploration, the arising settlement deformation can be studied. The results show that the periodic change of pore pressure is the main reason of the periodic deformation of silt, and the variation laws have the similarity. The pore water pressure responses instantaneously with the cyclic rise-fall of

water table while the variation of deformation shows the hysteresis. The oscillating pore water pressure is the primary cause of the saturation-unsaturated state transition in the silt and the dissipation of the residual pore water pressure is the driving force of the settlement deformation.

Key words: cyclic rise-fall of water table; settlement; pore water pressure; earth pressure

土体的变形不仅与土体的类型有关, 而且还与土体的应力路径具有很大的相关性^[1-6]. 水位循环升降变动造成的含水量循环变化加卸载路径实际上反映了土体所经历的有效应力的变化过程, 是一种复杂的变值加载模式, 它直接影响到土体内部应力场的重新分布, 导致土体结构和力学性质发生变化. 水位循环升降使土体在干燥和湿润状态之间相互转化, 内部应力重新分布, 内部结构产生不可逆的疲劳累积损伤^[7-8], 土体结构的完整性和力学性质发生劣化, 导致边坡失稳, 轨道路基、建筑物地基的工程性质发生衰变^[9-11]. 目前, 关于水位升降对于土体变形影响的研究主要集中在以下 2 个方面: 水位循环升降导致边坡失稳和水位变化引起地面沉降. 水位周期性涨落引起水体在库岸边坡内周期性渗入或渗出, 导致库岸边坡内地下水渗流场发生变化, 造成坡内土体孔隙水压力和有效应力的周期性加卸载, 同时产生的内应力导致新裂隙的产生和原生裂隙的发展, 最终导致岸坡滑塌失稳^[12-22]. 水位反复升降变动使水压力增大, 同时滑带土的孔隙水压力增大, 黏聚力降低, 滑动带的裂隙逐渐扩展、贯通, 最终导致滑坡的产生^[23-27]. 水位变化引起地层变形的研究在太沙基有效应力原理的应力分析基础上得到了比较完善的发展, 建立了较为完善的渗流-变形耦合理论^[28-31]. 然而, 上述研究均是针对水位单调变化引起

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(41572285); 地质调查项目(1212011300400); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费专项资金(SK201401)

第一作者: 张英平(1976—), 女, 工学博士, 主要研究方向为工程地质及环境岩土. E-mail: zhangyingping1976@126.com

通讯作者: 唐益群(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程地质与环境地质. E-mail: tangyiqun2@tongji.edu.cn

的土体变形,考虑水位循环升降影响的研究比较少见。

研究区的粉土主要由黄土高原的黄土经河流再搬运形成的,为第四纪松散河流堆积物,在路基、基坑及堤岸边坡等工程中比较常见。粉土既不同于砂类土,又异于黏性土,由砂粒、粉粒、黏粒3种粒种组成,其比表面积不大,但毛细现象活跃,渗透系数通常介于黏土和砂土之间,且具有较强的非饱和土力学特性。粉土堤岸或边坡在水位循环升降变化情况下受到含水量循环加卸载路径变化和渗流力等多重因素的影响,其沉降变形及失稳变形模式显得较为复杂,分析过程也更为困难,因此研究粉土的水体加卸载路径变化规律有助于进一步研究粉土的路基或堤岸由于含水率变化、干湿循环等引起的沉降或失稳变形问题。目前针对土体的干湿循环研究大多集中在膨胀土和黄土^[32-35],而对粉土干湿循环或水位循环升降引起的沉降或失稳变形研究很少,使得水位循环变化引起的粉土堤岸或路基的承载力变化和沉降变形等预测及控制缺乏理论与试验指导,因此研究水位循环升降引起的粉土变形具有重要意义。

上述干湿循环土体研究多以小尺寸试样研究为主,试验结果受尺寸效应影响很大,无法很好地反映实际情况。干湿循环引起的土体变形多以边坡为主,并且干湿循环引起的沉降变形研究不多,孔隙水压力和土压力随水位循环升降变化作用下的规律研究更是少见。因此,本文采用自行研制的水位循环升降装置^[36],以洛阳地区第四纪沉积粉土为研究对象,通过多次水位循环升降组合模拟试验再现粉土在水位循环升降条件下诱发沉降变形的全过程,揭示交变荷载条件下土体变形的发展规律,以期为沿江近河区域水土相互作用机理及路基或边坡工程稳定性理论的完善提供科学依据。

1 试验概况

1.1 试验背景

本文模拟试验在中国地质科学院水文地质环境地质研究所正定试验基地进行,试验时间从4月份持续到7月份,环境温度随季节变化,故采取了温度补偿措施。模拟对象为洛阳地区冲积平原区第四纪沉积层的二元结构,其下部为砂卵石,上部为黄土状的粉土或粉质黏土。洛阳境内河渠密布,地下水位埋深8~15 m,地下水的排泄和补给基本持平,但地下水位受降水量影响季节变化较大,水位升降年变幅

1.0~2.5 m,且变化迅速。多年周期性快速变化的地下水水位在一定程度上影响沿河两岸建筑物或构筑物的稳定性。

1.2 试验装置

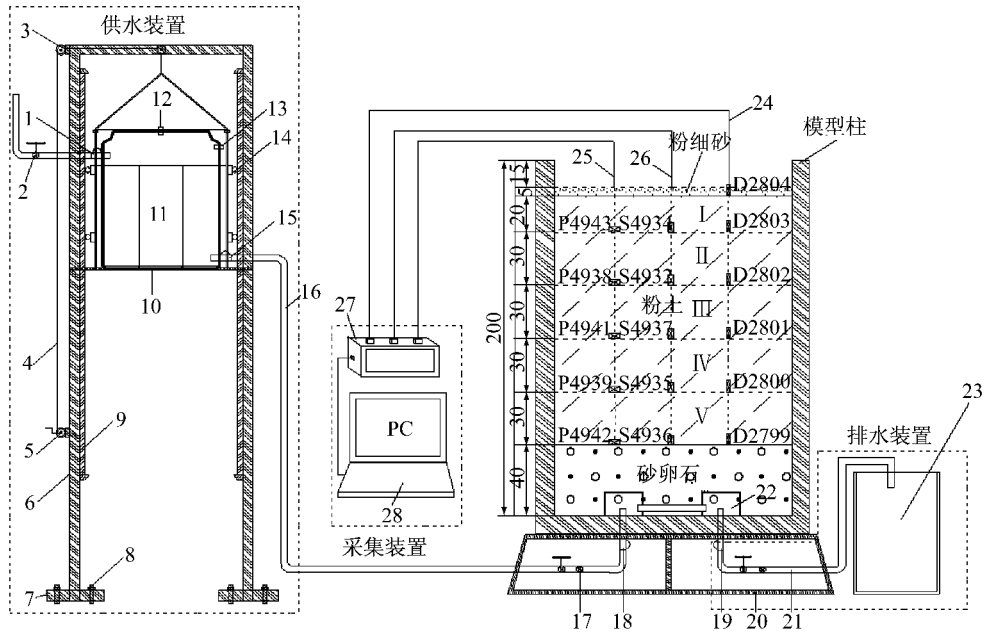
本文试验装置主要用于模拟浅层地下水水位循环升降过程,整个装置由模型柱、供水装置、排水装置、数据采集装置等4个部分组成(见图1)。模型柱高2 m,直径1 m,壁厚2 cm,由有机玻璃制成。模型柱上部开口,底部注水口与排水口通过聚氯乙烯(PVC)管分别连接供水装置和排水装置。在注水口和排水口上装有反滤装置,反滤装置由2个布满小孔的PVC管和一个未布设小孔的PVC管粘接而成。布满小孔的PVC管内部填满鹅卵石,外部包裹一层网眼为200目的玻璃纱使得水流向模型柱四周径向流动,并防止试验介质的细小颗粒进入管内堵塞注水口和排水口。为了有效减弱模型柱与装填试验介质的边壁效应,模型柱内壁先用砂纸打磨并均匀刷上一层AB胶,随后粘上一层厚度为2~3 mm的级配良好的砂砾层。

数据采集装置由土压力传感器(量程:30~100 kPa;灵敏度:0.005~0.010 mV·kPa⁻¹;准确度误差:≤0.3%)、孔隙水压力传感器(量程:30~50 kPa;灵敏度:0.003~0.010 mV·kPa⁻¹;准确度误差:≤0.3%)、位移传感器(量程:10~30 mm;精度:±0.001 mm)、沉降标尺、DH-3816N静态采集仪和计算机组成。位移传感器和沉降标尺测量试验介质不同高度处的沉降量,土压力传感器和孔隙水压力传感器分别测量试验介质不同高度处的土压力和孔隙水压力。

1.3 试验材料及方案

模型柱下部的砂卵石根据原位的砂卵石进行配制,从下到上依次为卵石、石子、砾砂、粗砂、中砂、粉细砂。模型柱上部的粉土取自洛阳地区冲积平原距地表8~10 m深度的扰动土,采用机械洛阳铲实施取土。试验所用粉土的颗粒分析与物理特性指标如图2和表1所示,吸脱湿曲线如图3所示。

模型柱的下部铺一层厚40 cm的砂卵石层,并在卵石与砾砂中间铺设网眼为160目的玻璃纱以防止细小颗粒被水流带走。砂卵石上部装填140 cm厚的黄土状粉土,在砂卵石层与粉土层的交界面铺设网眼为200目的玻璃纱以防止粉土与下面的砂土及砂卵石相互混合。装填试验介质时采用逐层填装分层夯实的方法保证介质的均匀性,粉土的装填控制密度为1.65 g·cm⁻³,水的质量分数控制在15.2%~



1. 水箱进水口;2. 阀门;3. 大滑轮;4. 钢绳索;5. 变速手摇绞盘;6. 升降架;7. 底座;8. 膨胀螺丝;9. 滑轮槽;10. 水箱托架;11. 水箱;12. 曝气溢出口;13. 高水位溢出水孔;14. 小滑轮;15. 水箱出水孔;16. PVC管;17. 流量计;18. 模型柱注水口;19. 模型柱排水口;20. 模型柱支架;21. 模型柱排水水管;22. 反滤装置;23. 带有刻度的水桶;24. 位移传感器;25. 孔隙水压力传感器;26. 土压力传感器;27. 静态采集仪;28. 计算机

图 1 试验模型示意图(单位:cm)

Fig.1 Schematic diagram of experimental model (unit: cm)

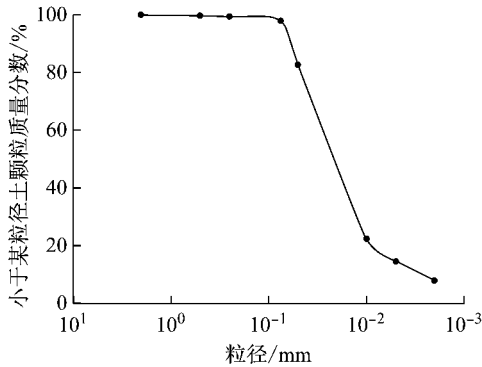


图 2 粉土的颗粒级配曲线
Fig.2 Grading curve of silt

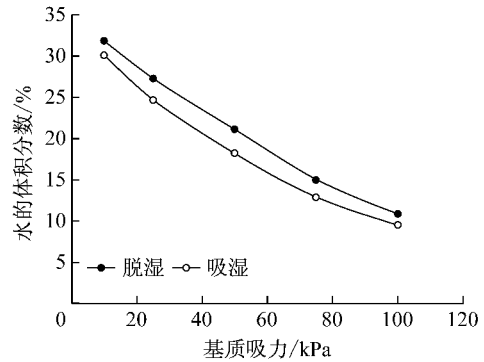


图 3 粉土吸湿和脱湿曲线
Fig.3 Soil-water characteristic curve of silt

表 1 粉土的基本物理力学指标

Tab.1 Physical indexes of Luoyang silt

水的质量分数/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	饱和度/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	压缩系数/MPa ⁻¹	垂直渗透系数/(cm·s ⁻¹)	非自重湿陷系数
14.8~21.6	1.55~1.84	0.77~0.82	43~67	24.7~25.3	15.8~16.8	7.9~9.6	0.30~0.40	1.07×10 ⁻⁵	0.006~0.023

17.5%。为了减弱外界温度和湿度对试验介质的影响,在粉土层顶部铺设一层 5 cm 厚的粉细砂进行隔离。试验介质装填完成后静置 48 h。

为了获得土体的沉降量及压力参数随水位升降的变化,在试验介质里布置了沉降标尺和压力传感器。土压力传感器(S4932、S4934、S4935、S4936、S4937)、孔隙水压力传感器(P4938、P4939、P4941、P4942、P4943)、分层沉降标尺(D2799~D2804)埋设位置处于试验介质的同一高度,距模型土柱顶部的

距离分别为 25、55、85、115、145 cm。传感器埋设位置如图 1 所示。

1.4 试验过程

试验开始前,先将沉降标尺连接位移传感器,同时将位移传感器、土压力传感器和孔隙水压力传感器连接采集仪,再将采集仪与计算机连接,同时把各种传感器调零。本文水位循环升降模拟试验的每次水位升降分为水位上升阶段、水位保持阶段、水位下降阶段等 3 个阶段。

水位上升阶段:通过供水装置中的升降架把水箱底部调整到距离模型柱底部 60 cm 的高度,开启供水装置的注水球阀,关闭排水装置球阀的同时开启采集装置进行压力和位移数据的读取和采集,数据采集装置的采集频率为 6 Hz. 通过调整水箱高度来控制模型柱内水位高度(通过测压管观测得到),使水箱底部始终高于模型柱水位 30 cm,当水位到达粉土顶部时关闭注水球阀,以此作为此阶段结束标志,水位上升阶段持续时长为 25~43 h.

水位保持阶段:供水装置注水口的球阀阀门和模型柱排水口的球阀阀门都处于关闭状态,以孔隙水压力值达到稳定状态作为此阶段结束的标志,此阶段持续时长为 36 h.

水位下降阶段:模型柱注水口的球阀阀门处于关闭状态,排水口的阀门处于开启状态,模型柱中的水在重力的作用下经排水口自然排出. 为了保持砂卵石层始终处于饱水的状态,排水装置的排水管保持在距离模型柱底部 40 cm 的高度,以排水管的水不再流出作为此阶段结束的标志,水位下降阶段持续时长为 26~44 h.

3 个阶段结束后为完成 1 次水位升降,重复上述步骤进行下一次水位升降模拟,共进行 12 次水位升降模拟. 在水位循环升降过程中,模型柱内水位保持在 40~180 cm 范围内.

2 结果及分析

本次模拟试验的土层由承压含水层与弱透土层组成. 承压含水层为渗透性好、压缩性低的砂卵石层,弱透土层为渗透性较差、压缩性较高的粉性土层. 模拟试验前试验介质处于非饱和状态,注水后试验介质逐渐从非饱和状态转为饱和状态,持水阶段试验介质仍处于饱和状态,降水阶段粉土从饱和状态转化为非饱和状态,水位循环升降过程就是使粉土从非饱和状态到饱和状态再到非饱和状态的循环过程. 为了研究此种状态循环转变对洛阳粉土变形特性的影响,本模拟试验量测了孔隙水压力、土压力及沉降变形量.

2.1 水位初始升降阶段粉土各监测量的变化规律

2.1.1 孔隙水压力

在模拟试验先期填土过程中,并未对土体进行堆载预压,其目的主要是为了研究松散堆积物在初始水位升降阶段的固结特性.

图 4 给出了在初次水位循环升降过程中不同层

位孔隙水压力的响应规律. 本模拟试验假定在水位循环升降开始前,土层中不存在地下水,即认为初始状态孔隙水压力传感器测得的孔隙水压力值均为零. 图 4 中的曲线均表现出相似的规律:注水阶段,孔隙水压力迅速上升并在此阶段结束时上升至峰值;持水阶段,孔隙水压力缓慢消散;降水阶段,孔隙水压力随土中水位的降低而减小并逐渐趋于稳定. 纵向对比,随孔隙水压力传感器埋深的增加,在注水阶段孔隙水压力的增长速率明显增大,且增长幅值同样增大. 对比孔隙水压力增长的响应时间,距粉土-砂卵石界面 0.9 m 范围内的孔隙水压力传感器在注水初期出现响应,而 0.9 m 以上土层需要 8 h 左右的时间出现孔隙水压力的增长. 这种现象的出现是由于粉土从非饱和到饱和状态的转变过程中,粉土中孔隙水的渗流在 0.9~1.2 m 的范围内出现了基质吸力与重力的动态平衡,打破这种动态平衡需要一定的时间.

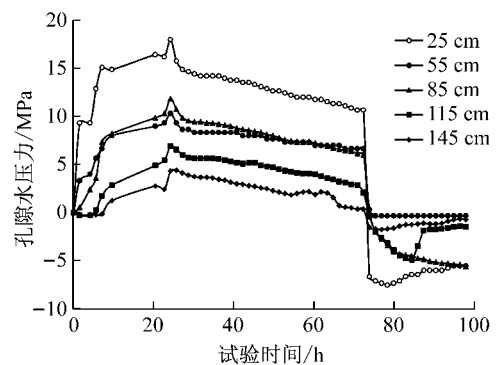


图 4 初始固结阶段不同层位孔隙水压力变化曲线
Fig. 4 Variation of pore water pressure in initial cycle at different layers

2.1.2 土压力

图 5 给出了初次水位循环升降过程中不同层位竖向土压力的响应规律. 由于土压力传感器 S4935 (115 cm)、S4937 (85 cm) 在试验过程中损坏,因此只获得了土压力传感器 S4936 (145 cm)、S4932 (55 cm)、S4934 (25 cm) 测得的试验介质的竖向土压力值. 土压力传感器在埋入土层前调零,基于粉土层在水位循环升降开始前不考虑孔隙水对应力影响的假设,土压力传感器的初始值正比于埋深. S4936 土压力传感器位于土层底部,在注水阶段,由于孔隙水的介入,总应力增大,土压力传感器读数增大;降水阶段,土压力数值陡降,可能是由于该土压力传感器位于粉土-砂卵石层分界面,降水瞬间猛增的水力梯度致使该土压力传感器周围土体被部分冲走,待孔隙水压力趋稳,土体复位,土压力逐渐恢复. 位于中上

部的 S4932 土压力传感器的读数在整个循环过程中趋于稳定,表明孔隙水对上部土体自重应力的增加作用与该埋深土体的膨胀作用相互抵消.位于顶部的 S4934 土压力传感器土压力变化与下部土压力成相反趋势.注水阶段伊始,孔隙水的加入导致上部土体自重应力增大,土压力呈增大趋势;随后,由于顶部土层缺乏上部约束,土体产生竖向膨胀导致土压力值下降;降水阶段,土体沉降变形导致的土压力增量大于孔隙水消散导致的自重应力减小,因此土压力数值反而减小.

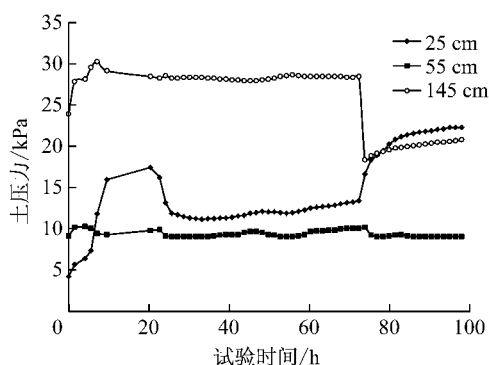


图 5 初始固结阶段不同层位土压力变化曲线
Fig.5 Variation of earth pressure in initial cycle at different layers

2.1.3 竖向变形量

在模拟试验土层未预应力固结的情况下,第 1 次水位循环升降是土体经历的非饱和渗流固结过程.图 6 给出了第 1 个水位循环升降内各土层竖向变形量.图中正值代表土层膨胀,负值代表土层压缩.在注水阶段,第 I 层(顶层)先压缩后膨胀,第 II 层先膨胀后压缩,第 III 层先压缩后小幅膨胀,第 IV 层膨胀,第 V 层压缩,并未出现明显规律性,可能是由于原始土体内部结构分布不均,对于初次水位升降的响应呈现紊乱性.在降水阶段,由于孔隙水压力的消散,有效应力增大,土层大幅固结.其中,粉土

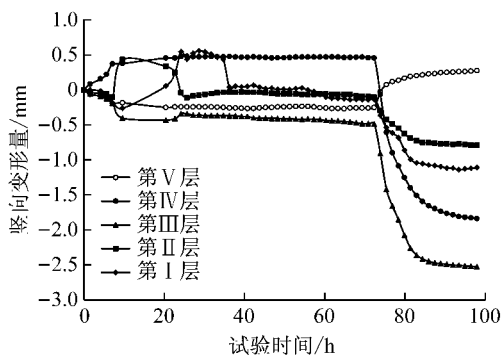


图 6 初始固结阶段各层竖向变形量

Fig.6 Vertical deformation of each layer in initial cycle

层底层土体呈现膨胀趋势,可能是由于该层位靠近透水砂卵石层,丰富的水源补给使得土颗粒孔隙增大.

2.2 水位循环升降下粉土变形特性分析

2.2.1 孔隙水压力

循环水位升降作用下,土体内的渗流场将发生改变.注水时,下部孔隙水压力最大,形成压力梯度,渗流方向向上;降水时则相反.因此,土体中的渗流场是随着水位循环升降而呈周期性变化.

各次循环结束时的孔隙水压力即为经过一次水位循环升降后的残余孔隙水压力,将每个水位循环升降孔隙水压力最大值与最小值相减即为该次循环孔隙水压力变化幅值,将下一个循环结束时的孔隙水压力值与上一个循环结束时的孔隙水压力值相减为经过一个水位循环升降后孔隙水压力的消散,即孔隙水压力损失量.在长期水位循环升降作用下,模型土样中孔隙水压力发生周期性变化,由此得到残余孔隙水压力、孔隙水压力变化幅值、孔隙水压力损失量随水位循环升降次数的变化曲线如图 7~9 所示.

图 7 显示了孔隙水压力随着水位循环升降振荡消散的规律.在水位循环升降开始前,认为土体中不存在使孔隙水压力传感器产生变化的孔隙水.假定第 1 次注水结束时,土体处于饱和状态,此时的孔隙水压力值作为整个循环的初始基值,且正比于孔隙水压力传感器埋深.在整个循环周期内,各层孔隙水压力数值保持了比较一致的大小关系,并未出现突变的情况.

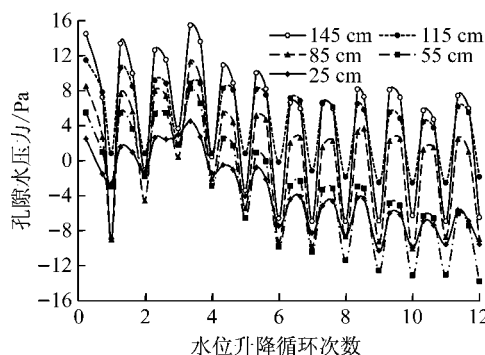


图 7 不同层位孔隙水压力周期性变化曲线

Fig.7 Periodic variation of pore water pressure at different layers

图 8 表明随着埋深的增加,孔隙水压力周期性变化的幅值增大.图 9 显示了每个周期结束时经历当次水位循环升降之后孔隙水压力的损失情况.前 3 个周期,孔隙水压力变化处于非稳定状态,每一次的

循环都使土体更接近饱和状态,因此这一过程中孔隙水压力是循环累积的.当孔隙水压力周期性振荡稳定以后,随着土体沉降变形的积累,有效水头高度相对减小,孔隙水压力随之减小,到后期,孔隙水压力逐渐衰减直至消失.

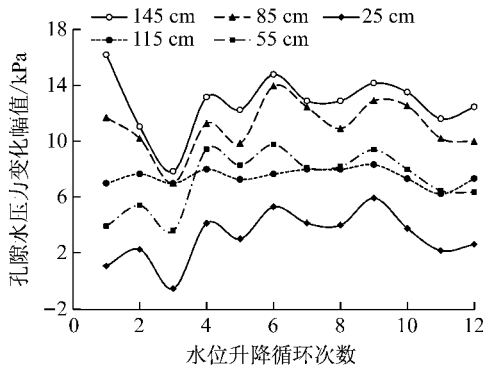


图 8 不同层位孔隙水压力变化幅值

Fig. 8 Variation amplitude of pore water pressure at different layers

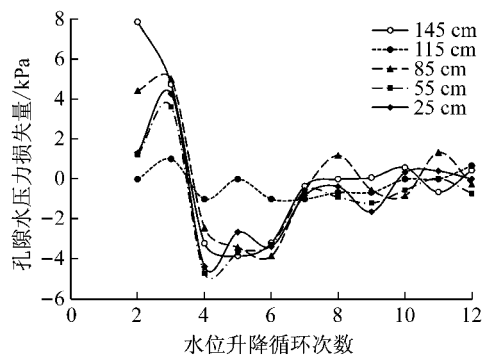


图 9 各循环内不同层位孔隙水压力损失量

Fig. 9 Attenuation of pore water pressure at different layers during each cycle

通过以上结果分析,可将水位循环升降过程在粉土中产生的孔隙水压力分解为振荡孔隙水压力和残余孔隙水压力,其既有振荡特性又有消散趋势.振荡孔隙水压力是土体中饱和-非饱和状态转变的根本原因,是渗流场产生的驱动力,而残余孔隙水压力的衰减消散是土层产生固结沉降的原因.

2.2.2 土压力

图 10 给出了水位循环升降过程中不同层位土压力周期性变化规律.在整个循环过程中,经过先期土体渗流固结,土体结构稳定后,土压力呈振荡增大趋势,且增大趋势基本一致.底部的土压力周期性变化趋势与顶部的土压力变化趋势在升降过程中呈现相反的规律,具体原因将在第 2.3.2 节中解释.

2.2.3 竖向变形量

将每一次水位升降结束时两相邻沉降标尺测得的竖向变形量相减即为该层试验介质经过一次水位

循环升降后的竖向变形量.随水位循环升降次数的增加,各层竖向变形量逐渐累积,由此获得各试验介质层累积竖向变形量随水位循环升降次数的变化规律(见图 11).

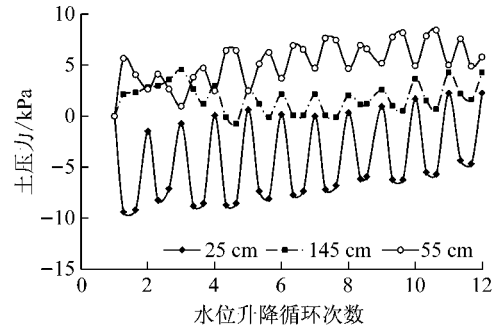


图 10 各循环内不同层位土压力

Fig. 10 Earth pressure at different layers during each cycle

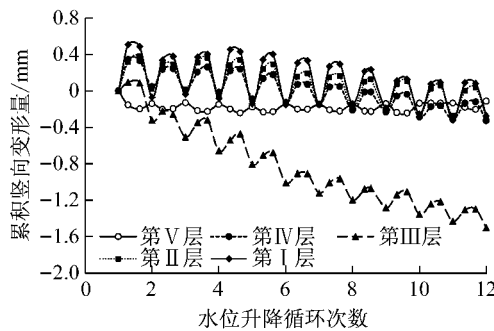


图 11 各层累积沉降变形

Fig. 11 Accumulative settlement of each layer

透水层试验介质为 40 cm 厚砂卵石层,砂卵石层在第 1 次循环之后始终处于饱和状态.随着水位循环升降上覆土压力反复波动变化,在第 2~3 次循环时砂卵石层充分饱水,粗颗粒之间的位置重新排列,在水的作用下粗颗粒之间孔隙增大,导致该层厚度的增大.经过第 4~12 次水位循环升降,砂卵石层中的大孔隙被细颗粒所填充,砂卵石粗颗粒间的孔隙减小,且粉土层不断被压密,导致该层厚度逐渐减小,最终趋于稳定.由于受到毛细水作用影响,第 V 层粉土在水位下降阶段仍保持较高的饱和度,因此发生土层的隆起.其余 I 至 IV 层试验介质初始厚度相同,累积竖向变形量变化规律相似,均随着水位循环升降次数增加继续增加,粉土趋于密实,各分层厚度减小,且累积变化速率减小.由于各层试验介质具有各向异性,因此各层试验介质的累积竖向变形量也不尽相同.

2.2.4 累积沉降量

各次水位循环升降结束时各试验介质层顶沉降

标尺测得的沉降变形量即为该埋深以下土体经过一次水位循环升降后的累积沉降量(见图 12).

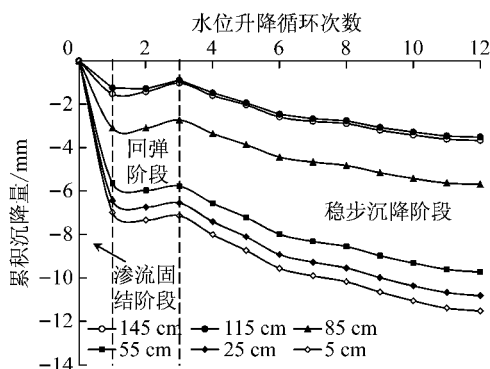


图 12 不同层位累积沉降量

Fig.12 Accumulative settlement at different layers

累积沉降量随水位循环升降次数的变化分为 3 个阶段:渗流固结阶段(第 1 次循环)、回弹阶段(第 2~3 次循环)、稳定沉降阶段(第 4~12 次循环). 渗流固结阶段(第 1 次循环),试验介质在水位上升阶段由干燥状态转变为准饱和状态,孔隙水压力增大,砂卵石及粉土颗粒内部之间的联结力减弱,密度降低,在动水压力的作用下发生土颗粒的移动;水位下降阶段,孔隙水压力减小,土颗粒重新排列紧密,累积沉降量急剧增大. 回弹阶段(第 2~3 次循环),该阶段粉土中孔隙水压力的往复变化主要引起了土体的弹性变形. 当单次水位循环升降完成后,弹性变形恢复,该周期内土体累积沉降量基本为零. 稳步沉降阶段(第 4~12 次循环),该阶段随着水位循环升降次数的继续增加,土体发生塑性变形. 当单次水位循环升降完成后,塑性变形不能恢复,随着水位循环升降次数的增加,累积沉降量不断增大.

2.3 单次循环参数联合分析

2.3.1 孔隙水压力变化率

在地下水研究领域,水力梯度一直是一个研究热点,相关学者致力于量测水力梯度,在厚的弱透土层中埋设了大量的孔隙水压力传感器,研究了该层内水力梯度的变化.

图 13 给出了孔隙水压力稳定周期性变化的第 7 次循环的孔隙水压力曲线. 由图 13 可以清晰地观察到,注水阶段孔隙水压力首先迅速上升,随后上升趋势有所减缓并最终趋于稳定;降水阶段作为注水阶段的可逆过程,孔隙水压力同样是在初期剧烈变化,随后变化趋势渐缓并最终趋于稳定. 同时,孔隙水压力损失现象依然存在.

对图 13 中的孔隙水压力曲线求导获取曲线的切线斜率,列于图 14 中. 在注水阶段,孔隙水压力曲

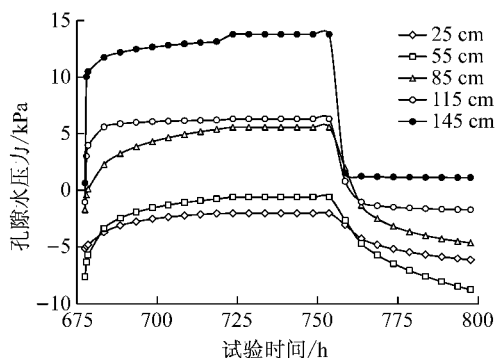


图 13 第 7 次循环不同层位孔隙水压力

Fig.13 Pore water pressure at different layers in the 7th cycle

线斜率在注水初期由高值骤降,随后下降速度减缓并于注水结束后趋于零;降水阶段,孔隙水压力曲线由负的极值骤升,随后逐渐减缓,但在整个降水过程中并不会趋于零,说明孔隙水压力消散是一个长期过程. 注水阶段,随着非饱和和粉土中渗流的推进,土体饱和度逐渐增加,基质吸力逐渐减小,孔隙水压力增速放缓;同理,降水阶段,随着孔隙水的流出,土体非饱和度逐渐增加,基质吸力逐渐增大,因此后期孔隙水压力消散速率明显减小. 对比 2 个阶段,降水阶段斜率初值的极值略大于注水阶段,说明粉土对于孔隙水压力消散的灵敏度要稍高于孔隙水压力增加的灵敏度.

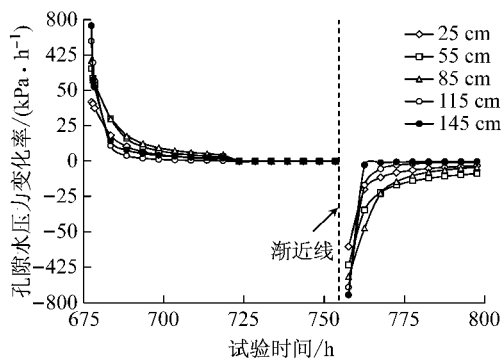


图 14 第 7 次循环不同层位孔隙水压力变化率

Fig.14 Variation ratio of pore water pressure at different layers in the 7th cycle

2.3.2 土压力

图 15 给出了土压力稳定周期性变化的第 7 次循环的土压力曲线. 位于土层上部的第 I、II 层在注水阶段土压力减小,可能是由土层的膨胀作用及孔隙水的浮力共同作用导致的结果;在降水阶段土压力增大,间接证明了土层的固结沉降. 位于土层底部的第 V 层土压力的变化规律则刚好相反,推测是上部土层的约束作用限制了注水过程中土层的膨胀,

同时注水引起的自重应力的增加抵消了孔隙水浮力的影响。

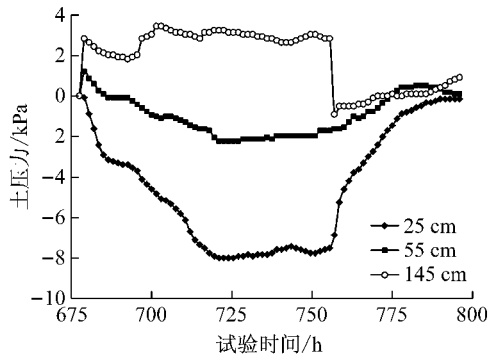


图 15 第 7 次循环不同层位土压力

Fig. 15 Earth pressure at different lays in the 7th cycle

2.3.3 沉降变形量

粉性土层的沉降通常包括瞬时沉降与固结沉降。饱和状态时,粉性土的骨架结构相对松散,因此瞬时沉降主要是降水瞬间排出水的体积损失所致。固结沉降可用太沙基有效应力原理进行解释:在没有外荷载的情况下,土体的自重荷载转化为土层中的有效应力,从而引起土层的变形。自重荷载开始全部由土中的水承担,随着孔隙水排出使孔隙水压力逐渐消散,自重荷载逐渐转为土骨架承担,土粒间相互错动和滑移使土颗粒重新排列,这一过程使土体产生压缩变形,直到自重荷载全部由骨架承担为止。

本文中的水文地质剖面由弱透水层(粉土层)、承压含水层(砂卵石层)组成。排水过程中的沉降变形主要由粉土层提供,在此二元地质结构中,排水沉降机理为:降水后引起含水层系统水头下降,含水层孔隙水压力很快达到新的平衡,而渗透性低的弱透水层孔隙水压力与邻近含水层低孔隙水压力之间的压力差需要较长时间通过弱含水层向含水层释水才能达到平衡,此即弱含水层的排水固结。因此,弱含水层具有明显的滞后排水性且产生滞后的固结变形,最终表现为地面沉降的滞后性。弱含水层的厚度和渗透系数的大小决定着地下水的渗流速度,或即决定着弱含水层与相邻含水层的水力平衡速度和持续时间,决定着其固结变形的快慢,也决定了地面沉降的速率。

图 16 给出了第 7 次水位循环升降过程内各层土体沉降变形量。层位越靠上的土层在注水阶段膨胀变形越大,相应地,在降水阶段沉降变形也就越大。最靠近含水砂卵石层的第 V 层在注水阶段由于上部土体自重应力增量的影响发生压缩变形,而在降水阶段,孔隙水压力的集中效应导致土层相对膨

胀。注水阶段,土层膨胀速率在初期较快,中期减慢,于后期又重新加快;降水阶段,初始沉降变形的速率要明显小于孔隙水压力消散的速率,证明了弱透水层固结沉降的滞后性。

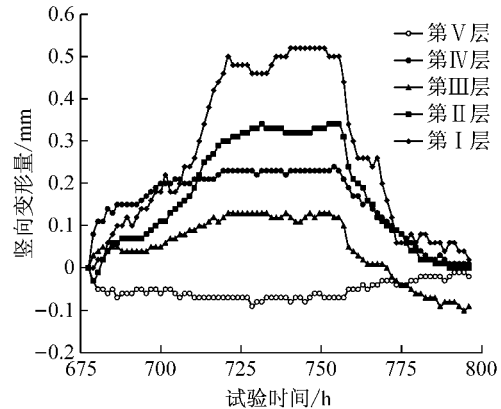


图 16 第 7 次循环不同层位竖向变形量

Fig. 16 Vertical deformation at different layers in the 7th cycle

试验表明,水位循环升降产生的孔隙水压力梯度是粉土结构强度衰减的动力,而孔隙水压力的消散则是粉土固结变形的诱因。分析结果表明,水位循环升降引起的粉土层固结变形是长效的作用机制,不同于循环荷载引起的土体软化及孔隙水压力累积机制。这种孔隙水压力消散机制是水位循环升降作用下粉土层沉降形成的主要原因。

3 结论

本文针对沿江近河地段水位循环升降加卸载引起的土体沉降变形问题,以洛阳地区沿河两岸的二元结构为研究背景,研制了一套室内水位循环升降模拟试验装置。通过水位循环升降模拟试验,研究水位循环升降作用下粉土孔隙水压力、土压力周期性变化规律及由此产生的变形沉降特性。通过试验得到如下结论:

(1) 初始固结阶段,第 1 次循环内孔隙水压力经历了注水阶段增大、持水阶段缓慢消散、降水阶段下降的过程,上部土体中的孔隙水压力在第 1 次水位上升时存在响应滞后现象。土压力的变化是水的加入导致土体自重应力增加与土体膨胀导致土压力减小两方面因素共同作用的结果。第 1 次水位循环使土体完成了整个试验周期 60% 的沉降量,粉土层底层土体由于丰富的水源补给,在降水阶段仍呈现膨胀趋势。

(2) 稳定沉降阶段,整个土体可分上部土体及底部土体 2 个区域对孔隙水压力、土压力、沉降变形的规律进行分析. 孔隙水压力周期性变化是导致土体周期性变形的主要原因,因此两者具有相似的周期性变化规律,孔隙水压力对水位升降表现出瞬时响应的特征,而变形则呈现滞后性. 底部土体土压力与变形的异常变化原因类似于第 1 次循环.

(3) 振荡孔隙水压力是土体中饱和-非饱和状态转变的根本原因,也是土体强度衰减软化的原因.

(4) 粉性土层的沉降由瞬时沉降与固结沉降共同构成. 瞬时沉降主要是降水瞬间排出水的体积损失所致,而残余孔隙水压力的衰减消散导致的有效应力的增加是土层产生固结沉降的主要原因. 降水阶段弱透水层-承压含水层二元结构孔隙水压力之间的差异是粉性土层中残余孔隙水压力衰减消散的驱动力.

参考文献:

- [1] 杨雪强,朱志政,韩高升. 不同应力路径下土体的变形特性与破坏特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2181.
YANG Xueqiang, ZHU Zhizheng, HAN Gaosheng. Deformation and failure characteristics of soil mass under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2181.
- [2] GARGA V K, KHAN M A, VANAPALLI S K. Stress-path dependent behavior of a weathered clay crust[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(6): 1481.
- [3] WON J Y, COTTON B, PORTER B W. Deformation and shear strength behaviors of over consolidated clay from stress-path testing for a deep open cut excavation[J]. Geotechnical Special Publication, 2014, 233: 388.
- [4] 陈存礼,郭娟,杨鹏. 应力路径对固结排水条件下饱和原状黄土变形与强度特性的影响[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 703.
CHEN Cunli, GUO Juan, YANG Peng. Influence of stress path on deformation and strength characteristics of saturated intact loess under drainage condition [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 703.
- [5] 殷杰,刘夫江,刘辰,等. 天然沉积粉质黏土的应力路径试验研究[J]. 岩石力学, 2013, 34(12): 3389.
YIN Jie, LIU Fujiang, LIU Chen, *et al.* Stress path tests on natural sedimentary silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3389.
- [6] 李校兵,郭林,蔡袁强,等. K_0 固结饱和和软黏土的三轴应力路径试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1820.
LI Xiaobing, GUO Lin, CAI Yuanqiang, *et al.* Stress path triaxial tests on K_0 -consolidated saturated soft clay[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(5): 1820.
- [7] ESTABRAGH A R, PARSAEI B, JAVADI A A. Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(2): 304.
- [8] PIRES L F, COOPER M, CASSARO F A M, *et al.* Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles[J]. Catena, 2008, 72(2): 297.
- [9] 陈仁朋,赵星,蒋红光,等. 水位变化对无砟轨道路基变形特性影响的研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 1.
CHEN Rempeng, ZHAO Xing, JIANG Hongguang, *et al.* Model test on deformation characteristics of slab track-subgrade under changes of water level[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 1.
- [10] WANG J X, WU Y B, LIU X T, *et al.* A real subsidence under pumping well-curtain interaction in subway foundation pit dewatering: conceptual model and numerical simulations[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 198.
- [11] 钱劲松,王朋,凌建明,等. 潮湿多雨地区高速公路路基湿度的实测特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 1812.
QIAN Jinsong, WANG Peng, LING Jianming, *et al.* In-situ investigation of subgrade moisture of expressway in humid zone [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(12): 1812.
- [12] 刘之葵,梁金城. 地下水位变化对桂林地区地基基础的影响[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 245.
LIU Zhikui, LIANG Jincheng. Effect water table variation on the foundation in Guilin region [J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(3): 245.
- [13] 张文杰,詹良通,凌道盛,等. 水位升降对库区非饱和土质岸坡稳定性的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(8): 1365.
ZHANG Wenjie, ZHAN Liangtong, LING Daosheng, *et al.* Influence of reservoir water level fluctuations on stability of unsaturated soil banks [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(8): 1365.
- [14] 李邵军,KNAPPETT J A,冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1586.
LI Shaojun, KNAPPETT J A, FENG Xiating. Centrifugal test on slope instability influenced by rise and fall of reservoir water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1586.
- [15] ZHANG M S, DONG Y, SUN P P. Impact of reservoir impoundment-caused groundwater level changes on regional slope stability: a case study in the Loess Plateau of Western China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66: 1715.
- [16] JIA G W, ZHAN T L T, CHEN Y M, *et al.* Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels[J]. Engineering Geology, 2009, 106(1/2): 92.
- [17] CHEN X P, HUANG J W. Stability analysis of bank slope under conditions of reservoir impounding and rapid drawdown[J]. Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering, 2011, 3(S1): 429.
- [18] LIU Q Q, LI J C. Effects of water seepage on the stability of soil-slopes[J]. Procedia IUTAM, 2015, 17: 29.
- [19] 陈勇,韦双,CHAN Dave. 库水循环加卸载条件下岸坡饱和土

- 体变形特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 611.
- CHEN Yong, WEI Shuang, CHAN Dave. Experiment study on deformation characteristics of slope deep soil under the cyclic loading and unloading action of reservoir water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 611.
- [20] 沈银斌, 朱大勇, 姚华彦. 水位变化过程中边坡临界滑动场[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2): 179.
- SHEN Yinbin, ZHU Dayong, YAO Huayan. Critical slip field of slope in process of reservoir water level fluctuations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 179.
- [21] 何忠明, 史振宁, 付宏渊, 等. 水位下降对沿湖路堤边坡渗流特征及稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(9): 3227.
- HE Zhongming, SHI Zhenning, FU Hongyuan, *et al.* Influence of water decline on seepage characteristic and slope stability of embankment along lake [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9): 3227.
- [22] 杨春宝, 朱斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1261.
- YANG Chunbao, ZHU Bin, KONG Linggang, *et al.* Centrifugal model tests on failure of silty slopes induced by change of water level [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1261.
- [23] 张均锋, 孟祥跃, 朱而千. 水位变化引起分层边坡滑动的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2676.
- ZHANG Junfeng, MENG Xiangyue, ZHU Erqian. Testing study on landslide of layered slope induced by fluctuation of water level [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2676.
- [24] 姜晨光, 李少红, 贺勇, 等. 地下水位变化与库岸滑坡体稳定性关系的研究[J]. 岩土力学, 2008, 28(增刊): 403.
- JIANG Chenguang, LI Shaohong, HE Yong, *et al.* Research on relations between bank stability of a reservoir and variations of groundwater level [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 28(S): 403.
- [25] 宋琨, 晏鄂川, 朱大鹏, 等. 基于滑体渗透性与库水变动的滑坡稳定性变化规律研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2798.
- SONG Kun, YAN Echuang, ZHU Dapeng, *et al.* Base on permeability of landslide and reservoir water change to research variational regularity of landslide stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2798.
- [26] HONG Y M. Forecasting groundwater level fluctuations for rainfall-induced landslide [J]. Natural Hazards, 2011, 57(2): 167.
- [27] KALENCHUK K S, HUTCHINSON D J, DIEDERICHS M S. Downie Slide: numerical simulation of groundwater fluctuations influencing the behaviour of a massive landslide [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2013, 72: 397.
- [28] LIN P L, HSU K C, LIN C W, *et al.* Modeling compaction of multi-layer-aquifer system due to groundwater withdrawal [J]. Engineering Geology, 2015, 187: 143.
- [29] XU Y S, SHEN S L, HAYASHI S, *et al.* Analysis on groundwater withdrawal and land subsidence in Shanghai [J]. Lowland Technology International, 2007, 9(2): 2.
- [30] ZHANG Y, XUE Y Q, WU J C, *et al.* Characteristics of aquifer system deformation in the Southern Yangtze Delta, China [J]. Engineering Geology, 2007, 90(3): 160.
- [31] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 抽灌水条件下上海砂土层的变形特征和变形参数[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 560.
- ZHANG Yun, XUE Yuqun, WU Jichun, *et al.* Characteristics and parameters of sand strata deformation due to groundwater pumping in Shanghai [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 560.
- [32] 曹玲, 王志俭, 张振华. 降雨-蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 413.
- CAO Ling, WANG Zhijian, ZHANG Zhenhua. Experimental research of cracking process of expansive soil under rainfall infiltration and evaporation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 413.
- [33] 杨和平, 王兴正, 肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949.
- YANG Heping, WANG Xingzheng, XIAO Jie. Influence of wetting-drying cycles on strength characteristics of Nanning expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 949.
- [34] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环过程孔径分布试验研究及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 322.
- ZENG Zhaotian, LÜ Haibo, ZHAO Yanlin, *et al.* Study of pore size distribution of expansive soil during wetting-drying cycle and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 322.
- [35] 王飞, 李国玉, 穆彦虎, 等. 干湿循环条件下压实黄土变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2306.
- WANG Fei, LI Guoyu, MU Yanhu, *et al.* Experimental study of deformation characteristics of compacted loess subjected to drying-wetting cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2306.
- [36] 张英平, 唐益群, 严婧婧, 等. 一种水位循环升降引起的地面沉降试验装置及试验方法: 2016102901389 [P]. 2016-09-28.
- ZHANG Yingping, TANG Yiqun, YAN Jingjing, *et al.* Test method and device for the settlement caused by cyclic rise and fall of water table: 2016102901389 [P]. 2016-09-28.