

文章编号:1673-9469(2024)06-0053-05

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.008

## 真空预压过程中水分运移机理研究

吴其海<sup>1,2</sup>, 吴跃东<sup>1,2\*</sup>, 刘坚<sup>1,2</sup>, 刘世旭<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 依托连云港炼化—徐圩电缆隧道项目, 考虑真空预压过程中出现的非饱和硬壳层, 通过开展室内模型试验, 结合非饱和土相关理论研究了真空预压过程中的水分运移机理, 结果表明: 地下水位在抽真空过程中不断下降, 上部土体变为非饱和状态, 孔隙水压力出现负值; 饱和区水分运移是不断汇入并向排水板汇聚的过程, 非饱和区水分向排水板汇聚的同时产生汽化, 在水分汽化与基质吸力增大的循环之下, 孔隙水压力进一步减小, 土体得以继续固结。

**关键词:** 真空预压; 硬壳层; 非饱和理论; 水分运移机理

中图分类号: TU41

文献标识码: A

## Study on Water Transport Mechanism During Vacuum Preloading Process

WU Qihai<sup>1,2</sup>, WU Yuedong<sup>1,2\*</sup>, LIU Jian<sup>1,2</sup>, LIU Shixu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

**Abstract:** Based on the Lianyungang Refining and Chemical Xuwei Cable Tunnel Project, considering the unsaturated hard shell layer that occurs during the vacuum preloading process, indoor model tests were conducted to study the water transport mechanism during the vacuum preloading process, combined with relevant theories of unsaturated soil. The results showed that the groundwater level continuously decreased during the vacuum pumping process, the upper soil became unsaturated, and the pore water pressure showed negative values; The transport of water in the saturated zone is a process of continuously merging and converging towards the drainage plate, while the water in the unsaturated zone converges towards the drainage plate and vaporizes. Under the cycle of water vaporization and increased matrix suction, the pore water pressure further decreases, and the soil can continue to consolidate.

**Key words:** vacuum preloading; hard crust layer; unsaturated theory; water transport mechanism

真空预压法最早在1952年由瑞典学者Kjellman提出<sup>[1]</sup>, 具有施工工艺简单、工程周期短、成本低等优势, 在机场码头、高速公路、新疏浚填土地基处理、垃圾填埋场等工程中得到了广泛应用。经过多年的发展, 真空预压法已形成较为完备的施工工艺, 虽然有学者解释了真空预压加固软土地基的机理<sup>[2]</sup>, 但是在理论研究上仍存在一定不足, 主要表现在真空预压过程中“水”的变化规律、机理研究和考虑地基土出现非饱和“硬壳层”等方面。国内外学者对此做了一些研究, 岑仰

润<sup>[3]</sup>认为真空预压会造成地下水位的下降; 刘汉龙等<sup>[4]</sup>提出了一种地下水位测试方法, 可以测得负压条件下加固区内的地下水位; 吴跃东等<sup>[5]</sup>假设真空度沿线性产生衰减, 推导出超孔隙水压力的计算公式, 掌握了真空预压过程中孔隙水压力的分布及变化; 吴跃东等<sup>[6]</sup>推导出了真空预压在稳态下水分运移的控制方程式, 得到了真空预压处理区内非饱和与饱和土体的孔隙水压力分布规律; Fan等<sup>[7]</sup>得到了真空预压线性衰减下砂井固结方程的解析解。上述研究大都是将土体看

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(523043411)

作者简介: 吴其海(2000-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 从事软土地基处理方面的研究。

\* 通信作者: 吴跃东(1969-), 男, 福建漳州人, 博士, 教授, 从事软土地基处理等方面的研究。

作完全饱和,对于土体中实际存在的非饱和硬壳层研究较少。

非饱和土体中水分运移过程是水气两相在孔隙通道中相互驱替的过程,研究表明孔隙中气体的存在和分布对水相的运动产生极大的影响<sup>[8]</sup>。赵乐<sup>[9]</sup>以试坑积水入渗作为浸水期试验条件,获得了管廊场地复杂入渗环境下的水分场运移变化规律;王玲丽<sup>[10]</sup>通过模拟二维孔隙尺度非饱和土体水分运移情况,研究了不同静态接触角和不同颗粒级配情况下吸水过程和脱水过程的特征变化。但是目前对于真空预压过程中的土体水分运移机理研究尚不够清楚。

鉴于此,本文围绕真空预压法中土体水分的运移机理进行研究:利用取自连云港炼化—徐圩项目的软土开展室内模型试验,分析真空预压过程中地下水位、孔隙水压力、排水速率的变化规律,结合非饱和土理论得到考虑上部非饱和硬壳层的土体水分运移机理。

## 1 室内模型试验

### 1.1 试验方案

为了得到真空预压过程中土体的水分运移机理,本文开展土柱模型试验。试验测量方案设置如表1所示。

### 1.2 试验装置

#### 1.2.1 模型装置

模型筒由壁厚为10 mm的有机玻璃加工而成,其内径为400 mm,高度为1 800 mm。为了便于试验操作,将模型筒制作成为500、500、800 mm三段,采用螺栓连接。为了保证气密性良好,两段之

间用O形圈连接,外侧涂密封胶。为了方便测量仪器布设,模型筒侧壁对称开设螺纹孔,测量仪器与模型筒之间的密封装置运用了陈锐等的专利<sup>[11]</sup>。采用直排式真空预压方式,不在顶部铺设水平排水砂垫层,竖向排水系统采用单根SPB-A型塑料排水板,板宽100 mm,板长1 600 mm,通过装置与内径10 mm的PU材质排水滤管相连。土柱顶部采用“一层土工布+两层密封膜”形式密封,真空度测量管及排水管出膜处用胶带绑扎好并涂抹一层密封胶。抽真空设备采用GTX-2000V 30L数控式真空泵,电机功率为0.45 kW,极限真空度为-93 kPa,抽速为200 L/min。为保证真空泵的正常工作,在真空泵与模型筒之间设置水气分离装置,气体和水在负压作用下通过排水滤管排入水气分离瓶,用天平量测排水量,气体则通过真空泵排出,模型试验布置图见图1。

#### 1.2.2 测量仪器

试验中测量仪器见表1。本文所采用的张力计是一种装配式张力计,更多信息可参考文献[12]。本文所采用的土壤水分计为型号EC-5土壤湿度传感器,标定后测量误差为3%以下。本文所采用的真空表为Y100BF不锈钢压力真空表,量程为-100~100 kPa。本文所采用的百分表量程为0~50 mm,精确度为0.01 mm。

### 1.3 试验材料

本文所使用的软土取自连云港炼化—徐圩工程现场,土体呈现灰色、灰褐色,饱和流塑,含有机质,混有贝壳碎片,有光泽,有关物理性质如表2所示。

表1 土柱模型试验测量方案

Tab.1 Measurement plan for soil column model test

项目	测量仪器	数量/个	布置	监测频率
含水率	土壤水分计	5	由底部间隔30 cm布置	
孔压、吸力	张力计	5	由底部间隔30 cm布置	真空泵开始抽真空后,前两小时
地下水位	水位管	1	底部引出,管长2 m	监测频率为10 min/次,
表层沉降	百分表	1	布置于排水板中心处	前一周3 h/次,其余时间6 h/次
膜下真空度	真空表	1	在土柱顶部与测量管连接	

表2 土体物理性质指标

Tab.2 Physical properties index of soil

取土深度/m	土分类名称	含水率 $\omega/\%$	重力密度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	干密度 $\rho_d$ $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$
7.8~8.0	淤泥	59.4	16.2	1.04	52.5	26.0	1.3

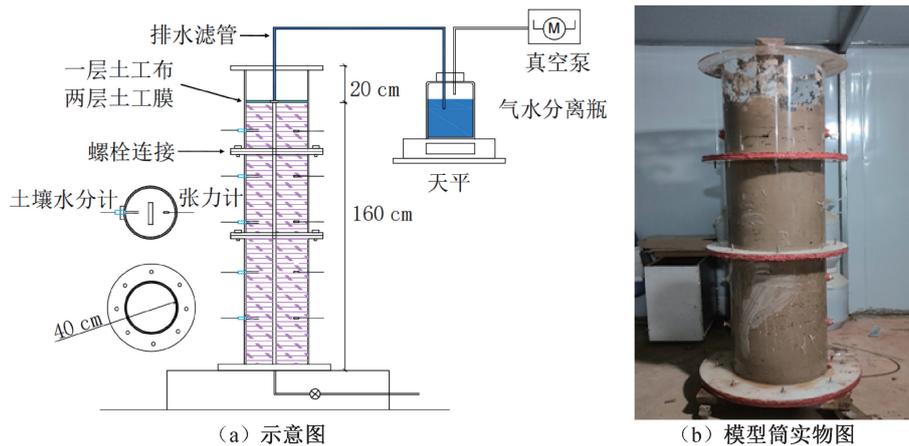


图1 模型试验布置图

Fig. 1 Layout of model tests

## 1.4 试验步骤

### 1.4.1 准备阶段

按照试验设计,将三层模型筒连接组装完整。向模型筒内注满水,检查模型箱的四周与底部是否存在漏水,静置 24 h,检查模型箱是否存在渗水。若发现漏水和渗水现象,对相应位置进行标记,待排水后,采用密封胶以及环氧树脂对标记处进行修补。修补后再次检验其密闭性,直至模型筒不发生漏水和渗水现象。

密闭性测试结束后排空模型筒内的水,干燥后在筒内侧壁涂抹一层润滑油。将排水板放置于模型筒底部中央,按照要求在模型筒内由下往上进行土样的分层填筑,每层厚度为 30 cm,上一层填筑完毕后再进行下一层的填筑,土样填筑高度为 160 cm,期间需保证排水板的位置保持在模型筒的中部。在保证密实的条件下需尽快完成填筑,防止土体水分蒸发导致含水率变化过大。

填筑土样的过程中,将水位管埋设在预定位置。分层填筑完成之后,将排水板与手型接头相连,并用软管将手型接头连接至水气分离瓶上,水气分离瓶另一接口通过软管连接真空泵。使用土工膜、密封膜进行装置的顶部密封,将密封膜沿侧壁掖入土中。

布置百分表。将张力计与土壤水分计通过侧壁的孔洞埋设在模型筒侧壁预留位置,随后用适当压实的土样填充安装孔,并采用图 2 所示的出线密封装置进行密封。最后将所有仪器都连接到数据记录器和计算机上。静置 36 h,待密封胶干透以及水位管水位稳定后开始试验并进行记录。

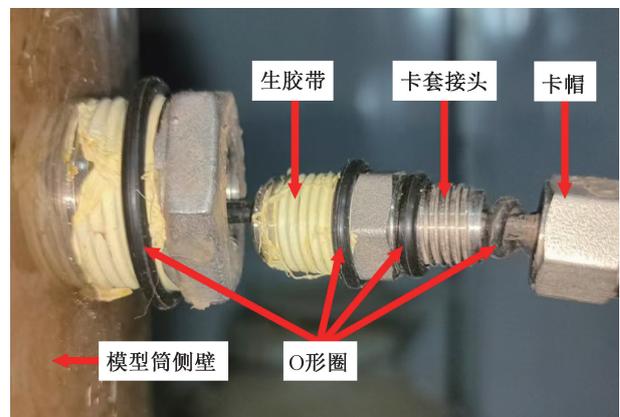


图2 出线处密封装置图

Fig. 2 Sealing device diagram at the outlet

### 1.4.2 开展阶段

打开真空泵进行试验,按表 1 所示频率记录。试验采用分级加载,真空压力分 20、40、60 和 80 kPa 四级加载,依据土体表层沉降的变化趋势决定下一级真空压力的施加,当土体每 10 h 的沉降量小于 0.1 mm 时,可以认为土体固结趋于稳定,停止试验。试验中加载方式为 20 kPa(50 h)→40 kPa(72 h)→60 kPa(48 h)→80 kPa(120 h),真空荷载加载时间为 290 h,试验总共持续时间为 290 h,试验结束后回收仪器,对试验数据进行整理分析。

## 2 试验结果分析

### 2.1 地下水位变化规律

图 3 展示了真空预压模型试验中地下水位随时间的变化曲线。随着真空负压的增加,地下水位不断下降,地下水位下降呈先快后慢、最后平缓的趋势。

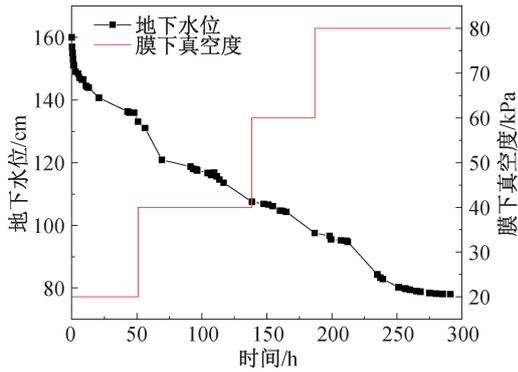


图3 地下水位随时间变化曲线

Fig. 3 Time varying curve of groundwater level

试验过程中地下水位总下降量为 81 cm。真空压力加载至 20 kPa 时,由于装置的密封性较好,模型筒内的膜下真空负压很快就达到 20 kPa,此时地下水位下降速度达到整个试验过程中的最大值,地下水位下降量也达到最大值,由初始水位  $h = 160.0$  cm 下降至稳定水位  $h = 135.9$  cm,占总下降量的 29.8%。真空压力加载 40 kPa 时,地下水位的下降速率先快后慢,且与 20 kPa 真空负压时相比,达到水位稳定所需的时间变长,水位下降了 23.1 cm。真空压力加载 60 kPa 以及 80 kPa 时,地下水位分别下降了 9.8、24 cm,下降速率仍是先快后慢,但加载初期地下水位的下降速率远小于前两级荷载加载初期。

## 2.2 孔隙水压力变化规律

图 4 展示了真空预压试验中不同深度处测得的孔隙水压力随时间的变化规律,膜下 0.7 m 处的张力计因损坏出现较大数据波动被剔除。真空预压过程是排水固结过程,会产生负的超静孔隙水压力,导致不同深度孔隙水压力均减小,孔隙水压力随时间变化曲线总体呈下降趋势。由于不同深

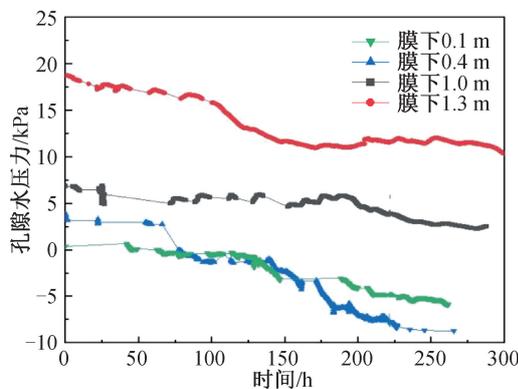


图4 孔隙水压力随时间变化曲线

Fig. 4 Time dependent curve of pore water pressure

度土体渗透性不同,孔隙水压力变化幅度随着深度增加大体上逐渐减小,孔压消散效果降低,这说明竖直方向真空度沿塑料排水板向下传递且随深度增加逐渐衰减,水平方向真空度先沿渗透性好的排水板向下传递,然后向四周土体传递。

## 2.3 水分运移机理

绘制膜下 0.1 m 处的土体体积含水率与基质吸力关系,即土水特征曲线,如图 5 所示。

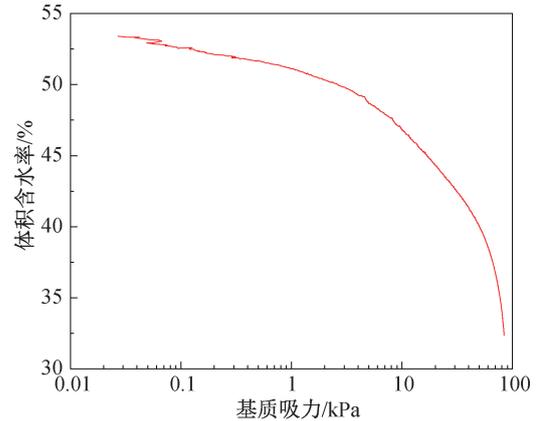


图5 土水特征曲线

Fig. 5 Characteristic curve of soil-water

根据土水特征曲线,可以拟合得到真空预压过程中渗透系数与基质吸力的关系,如图 6 所示。随着基质吸力的不断增大,土体的渗透系数逐渐减小。在基质吸力不大时,渗透系数的减小速度较缓,而在基质吸力较大时,渗透系数的减小速度变大,与基质吸力呈近正比关系。

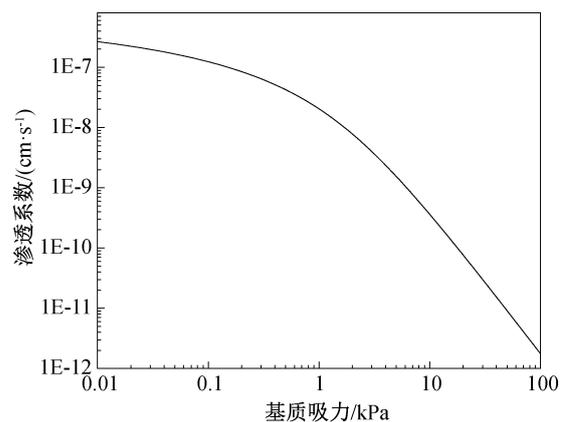


图6 渗透系数与基质吸力关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between permeability coefficient and matric suction

图 7 为排水速率随时间的变化曲线图,排水速率通过分阶段排水量与时间的比值确定。从图中可以看出,在每一级真空压力施加初期,排水速率

最大,后逐渐减小为0。试验中水分的排出主要以土体孔隙中自由水渗流为主。分级荷载刚施加时,真空压力沿竖向排水板向下传递,由于土体受到的总应力是一定的,孔隙水压力迅速降低,则有效应力迅速增加,致使土体产生压缩变形,土体中的水分被迅速排出,排水量较多。在该级荷载持续作用下,孔隙水压力下降速度趋缓,有效应力增加速度降低,土体中已具有一定的结构强度,现有真空压力很难使土体发生更大的压缩变形,且土体中持有水分变少,因此随时间的增加排水量越来越少,排水速率越来越慢。施加下一级荷载时,瞬间施加的较大荷载冲破了排水板周围的淤堵泥层,排水速率会瞬间增大。加载至80 kPa时,土体排水速率相较于前几级荷载有所减小,这是因为此时在排水板周围形成了新的更加致密的泥层。加载至80 kPa后期,几乎没有水分排出,表明土体已基本固结完成。

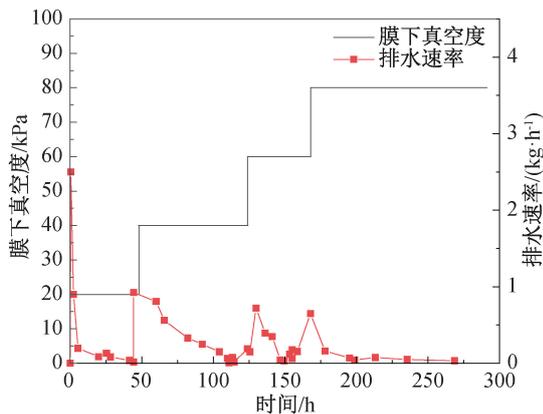


图7 排水速率随时间变化曲线

Fig. 7 Time dependent curve of drainage rate

通过分析,可以得到真空预压过程中的水分运移机理:在饱和区,土体中的水分在真空吸力的作用下向着塑料排水板运移,土体中产生负的超静孔隙水压力,随后逐渐消散,孔隙水压力减小但始终保持为正值,土颗粒之间的孔隙依然由上部的重力水不断补充,水分的运移是一个不断汇入并向排水板运移的过程。由于土体始终是饱和状态,渗透系数保持不变,水分运移的速度也保持不变,运移量与真空吸力的大小及孔隙水压力的下降幅度相关。在非饱和区,土体中的水分除了在真空吸力的作用下向着塑料排水板运移之外,由于孔隙水压力和孔隙气压力的同时存在,产生了一定的基质吸力,使得土体中一部分水分汽化,这又使得孔隙水压力进一步减小,基质吸力进一步增大。在水分汽化与基质吸力增大的循环之

下,尽管土体的渗透系数有所减小,但孔隙水压力的减小值仍然会大于饱和区,土体依然能够产生固结,强度得以进一步增长,这也是非饱和硬壳层的存在可以提高真空预压效果的原因。随着排水量的不断增大,地下水位不断下降,更多的饱和区变为非饱和区,水分运移的方式也随之改变。

### 3 结论

本文依托连云港炼化—徐圩工程,通过开展室内模型试验,分析了真空预压过程中地下水位、孔隙水压力、排水速率的变化规律,得到了饱和区与非饱和区土体的水分运移机理。

1) 地下水位随着真空负压的增加而不断下降,下降速度先快后慢,水位最后趋于不变。随着孔隙水的不断排出,上部土体逐渐由饱和状态变成非饱和状态,孔隙水压力出现负值(吸力),而下部土体依旧为饱和土体。

2) 随着基质吸力的不断增大,土体的渗透系数逐渐减小。真空预压下土体的水分运移规律可表示为:在饱和区,水分的运移是一个不断汇入并向排水板汇聚的过程,运移量与真空吸力的大小及孔隙水压力的下降幅度相关;在非饱和区,水分向排水板汇聚的同时产生汽化,在水分汽化与基质吸力增大的循环之下,土体的孔隙水压力的减小幅度大于饱和区,土体依然能够产生固结。

### 参考文献:

- [1] KJELLMAN W. Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure[C]//Proc of Conf on Soil Stabilization, MIT. 1952:258-263.
- [2] 龚晓南,岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002(2): 7-10.
- [3] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州:浙江大学, 2003.
- [4] 刘汉龙,周琦,顾长存. 真空预压条件下地下水位测试新方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 48-51.
- [5] 吴跃东,吴鸿昇,罗如平,等. 考虑真空度衰减及涂抹区渗透系数变化的真空预压固结解析解[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 122-128.
- [6] 吴跃东,石晓燕,刘坚,等. 真空预压加固区硬壳层的水分运移解析解[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 110-114.

(下转第86页)

- [4] 马玉龙. 公路曲线连续梁桥车桥耦合振动研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [5] 唐云伟, 郑宏伟, 宋辉, 等. 曲线桥梁横向力作用系数的研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 51-55.
- [6] WANG T L, HUANG D Z, SHAHAWY M. Dynamic response of multi-girder bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8): 2222-2238.
- [7] GUO F, CAI H, LI H F, et al. Impact coefficient analysis of curved box girder bridge based on vehicle-bridge coupling [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022(1): 8628479.
- [8] 张霞, 陈恩利, 李凌云. 多车荷载作用下沥青桥面铺装动力学响应[J]. 振动与冲击, 2021, 40(11): 109-115+133. 2021. 11. 015.
- [9] 林玉森, 石君龙, 吴雄飞, 等. 汽车荷载作用下桥梁冲击系数影响规律研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 21-25.
- [10] 李凌云. 基于 UM 的曲线梁桥车-路-桥耦合动力学响应研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- [11] 董婉. 基于 UM 仿真分析的车桥耦合振动及冲击系数研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [12] 王同威. 重载条件下的波形钢腹板连续箱梁桥车-铺装-桥耦合动力学响应研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [13] 李小珍, 马文彬, 强士中. 车桥系统耦合振动分析的数值解法[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 21-25.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 57 页)

- [7] FAN L, CHEN S F. Consolidation analysis and effect analysis in the treatment of soft foundation by vacuum preloading [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 647(1): 012135.
- [8] LIU G, TONG F G, TIAN B. A finite element model for simulating surface run-off and unsaturated seepage flow in the shallow subsurface[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(26): 3378-3390.
- [9] 赵乐. 湿陷黄土区管廊场地水分运移及沉降变形规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [10] 王玲丽. 非饱和土体水分运移的孔隙尺度模拟研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [11] 陈锐, 刘坚, 乔劫. 多股管线大内径的传感器密封装置及其组装方法: CN103364020A [P]. 2013-10-23.
- [12] 陈锐, 刘坚, 吴宏伟, 等. 一种装配式新型张力计的研制 [J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 3028-3032.

(责任编辑 张爱丽)

## 《河北工程大学学报(自然科学版)》2024年起由季刊变更为双月刊

为进一步缩短论文出版周期,更快推动科研成果的传播,满足广大专家学者学术交流需要,经主管主办单位同意,申请期刊刊期变更,获得河北省新闻出版局批复(冀新闻出版[2024]-060000001),《河北工程大学学报(自然科学版)》于2024年第1期起由季刊变更为双月刊,每逢双月的25号出版,特此公告。