

深挖方膨胀土边坡时空变形特征分析

胡 江^{1,2}, 李 星^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

摘 要: 深挖方膨胀土边坡受降水、地下水以及地质构造、支护措施等多因素影响, 变形呈现复杂的时空异质性。以南水北调中线总干渠陶岔渠首段边坡为例, 开展时空变形特征分析。借助变分模态分解、加权多尺度局部异常系数以及聚类分析等数据挖掘方法, 分析变形的时间变化规律, 识别空间分布特征; 阐释降水量、地下水位等因素对边坡变形趋势性、周期性和波动性分量的影响机制; 对边坡变形进行分区分析, 推测潜在滑动面和滑动体; 讨论边坡变形机制。结果表明, 边坡变形呈现显著的趋势性变化, 还表现出季节性和间歇性。下部变形值较大, 往上逐渐减少。上部显著变形区深度为 3 m, 位于大气影响层内; 中部受地下水波动和裂隙密集带影响, 显著变形区较深, 达 11 m; 下部受支护体系限制, 变形主要位于浅层。上层滞水受雨水补给, 波动范围大, 导致中上部变形深度较深, 在 16.5 m 深度内仍存在一定变形。潜在滑动面为折线形, 前缘受地下水、裂隙密集带和边坡支护体系影响, 近似水平。为减少地下水波动对膨胀土胀缩变形的影响, 建议采用排水井降排深层地下水。该研究成果可为深挖方膨胀土边坡运行管理和加固处置提供技术支撑。

关 键 词: 膨胀土; 边坡; 变形; 滑动面; 地下水; 数据挖掘

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2024) 10—3071—10

Analysis of spatiotemporal deformation characteristics of deep excavated expansive soil slopes

HU Jiang^{1,2}, LI Xing^{1,2}

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

2. Dam Safety Management Center of Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Deep excavated expansive soil slopes are influenced by multiple factors, including precipitation, groundwater, geological structure, and support measures, resulting in complex spatiotemporal heterogeneity in deformation. Using the slope of Taocha canal segment in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project as a case study, the spatiotemporal deformation characteristics were analyzed. Data mining methods, including variational modal decomposition, weighted multiscale local outlier factor, and clustering analysis, were applied. The temporal variation of deformation was analyzed, and spatial distribution characteristics were identified. The influence mechanisms of factors such as precipitation and groundwater on the trend, periodic, and fluctuating components of deformation were explained. Deformation measuring points were clustered, and potential sliding surfaces and sliding bodies were speculated. The deformation mechanism was discussed, and reinforcement measures were proposed. The results indicate that slope deformation exhibits significant trend changes, as well as seasonal and intermittent fluctuations. Deformation in the lower part is relatively large and gradually decreases upwards. The depth of the significant deformation in the upper part is 3 m, located within the climate-influenced layer. Deformation in the central part is influenced by groundwater fluctuation and dense fissure zones, with a significant deformation depth of up to 11 m. Deformation in the lower part is limited by the retaining system and occurs only in the shallow layer. Perched water in the upper part is replenished by rainwater, causing large fluctuation depths and resulting in deep deformation in the middle and upper parts, and there is a certain degree of deformation within the depth of 16.5 m. The potential sliding surface is a polyline. Due to the influence of groundwater, densely fissure zones, and retaining system, the leading edge is approximately horizontal. Drainage wells should be installed to drain groundwater to reduce the impact of groundwater fluctuations on the swelling-shrinkage deformation of expansive soil. The research results can provide technical support for the operation management and reinforcement disposal of deep excavated expansive soil slopes.

Keywords: expansive soil; slope; deformation; sliding surface; groundwater; data mining

收稿日期: 2023-11-20

录用日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52179138, No.U2243244, No.52209165)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52179138, U2243244, 52209165).

第一作者简介: 胡江, 男, 1983 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事水工结构安全监控和病害机理研究。E-mail: huj@nhri.cn

1 引言

膨胀土在我国分布广泛, 多项跨流域调水工程都经过大片膨胀土地区, 如南水北调中线总干渠穿过膨胀土(岩)渠段累计 340 km^[1], 引江济淮工程江淮分水岭膨胀土段长达 80 km^[2]。其中, 南水北调中线总干渠挖深超过 10 m 的渠段长 144 km, 施工期发生一定规模的滑坡超过 100 处^[1]。当前我国正处于国家水网主骨架和大动脉快速建设时期, 长距离调水工程线路不可避免地会形成大量挖方膨胀土边坡。

膨胀土边坡变形破坏主要由膨胀土的胀缩性、裂隙性和超固结性决定^[3], 对气候变化和人类活动等外部因素敏感, 且与工程区气候特征、水文地质条件、工程排水支护措施等多因素相关。内外因素综合作用导致膨胀土边坡滑坡具有渐进性、季节性和反复性等特征^[4-6]。如陶岔引丹灌区 20 世纪 70 年代投入运行, 30 年后在渠首段仍发生了一起大型膨胀土渠坡滑坡^[7]。北疆供水总干渠在渠坡设计时采取了针对性排水措施, 但通水运行 20 年中持续出现了膨胀土渠段的滑坡破坏, 累计超过 30 km^[8]。安徽淠史杭灌区 1972 年开始运行, 深挖方膨胀土渠段多次发生滑坡。2020 年汛期, 瓦东干渠膨胀土渠段还发生了一起较大型滑坡^[9]。开挖 4 年后, 南水北调中线总干渠深挖方膨胀土渠段存在多处严重变形边坡, 威胁渠道正常运行^[10]。膨胀土边坡变形破坏严重影响重大水利工程安全运行, 需投入大量资金治理, 其长期安全稳定问题备受关注。

边坡变形是内外多因素综合作用的结果, 也是滑坡预报预警的重要指标。外界因素与地质体之间的作用关系控制着浅层土体含水率的变化、内部地下水的波动规律。经受降水蒸发和地下水位波动等反复作用, 膨胀土产生一定程度的不可逆式胀缩变形, 边坡表现出渐进性、牵引式破坏。开展深挖方膨胀土边坡时空变形特征分析对确保安全具有重要意义。刘祖强等^[11]采用实测资料, 分析了膨胀土渠顶的胀缩变形特征, 气温对垂直位移有较大影响, 时效因子在运行初期有一定影响, 降水、蒸发和土体含水率影响相对较小。胡江等^[12]融合变分模式分解(variational mode decomposition, 简称 VMD)和最小二乘支持向量机, 构建了深挖方膨胀土渠道边坡垂直位移的预测模型, 垂直位移与地下水位、降水量和气温呈负相关, 与渠道水位呈正相关。Li 等^[13]对膨胀土渠段表面变形的绝对、增量和增速位移进行度量, 从而对时间序列相似性进行分析, 较

好地识别了变形较大的区域。由于环境不同, 边坡不同部位变形发生发展不同步, 变形大小也存在显著差异。随着监测数据的丰富完善, 通过对变形及其影响因素的信息挖掘, 结合渐进性、牵引式变形破坏等特点, 分析深挖方膨胀土边坡时空变形特征, 可指导运行管理和维修养护。

在这一背景下, 以南水北调中线总干渠陶岔渠首段为例, 开展深挖方膨胀土渠道边坡时空变形特征分析。综合应用 VMD、加权多尺度局部异常系数(weighted multiscale local outlier factor, 简称 WMLOF)以及聚类分析等数据挖掘方法, 分析变形的时间变化规律, 识别空间分布特征; 阐释降水量、地下水位等因素对渠道边坡变形趋势性、周期性和波动性分量的影响机制, 对边坡变形进行分区分析; 最后, 总结深挖方膨胀土渠道边坡时空变形特征, 提出加固处置建议, 可为类似工程设计和运行管理提供借鉴。

2 工程及变形监测概况

2.1 工程与地质概况

南水北调中线总干渠段南阳盆地膨胀土渠段边坡具有挖深大、地质结构复杂等特点。所处区域为湿润性大陆气候区, 四季分明, 夏秋两季炎热多雨, 冬春干燥少雨, 多年平均降水量为 815 mm。桩号 8+000~12+000 段挖深为 39~45 m。运行后, 部分断面边坡变形呈趋势性发展且未收敛, 护坡出现了上部拱圈拉裂、坡脚拱圈断裂翘起、过水断面衬砌板开裂等刚性结构破损现象。渠段于 2013 年 3 月开挖完成, 2014 年 10 月投入运行。重点对 9+300 左岸边坡进行分析(见图 1)。

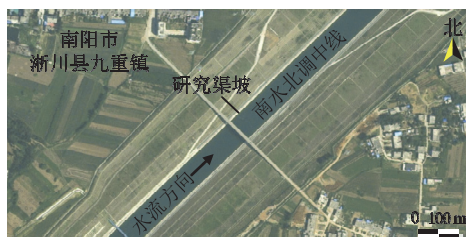
一级马道以上的边坡依据开挖揭露裂隙情况采取局部支护措施, 该断面地质剖面如图 1(c)所示, 一级马道以上未揭露大裂隙面, 故未设置抗滑桩。

2.2 安全监测概况

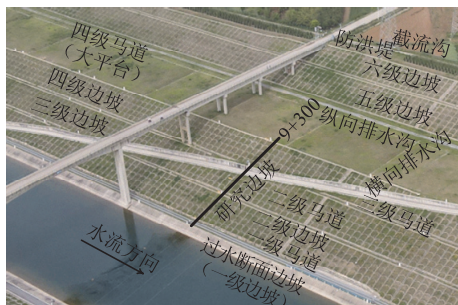
为监测边坡变形情况, 2017 年在该段增设变形和地下水位监测设施(见图 2)。测斜管布置于三级边坡及一、二、四级马道, 考虑裂隙密集带分布, 孔深为 25~28.5 m, 设施信息列于表 1。渗压计布置于一、二级马道, 埋深为 25 m; 测压管布置于三级边坡和四级马道, 孔深为 19、27 m, 设施信息列于表 2。该段渠道还布置有降水量、渠道水位和气温等环境量监测设施。

测斜管、测压管/渗压计的观测频次一般为 1 次/周。重点分析测斜管测得的向渠道内部的变形, 以朝渠内变形为正。渠道水位年变幅一般在 1 m 以

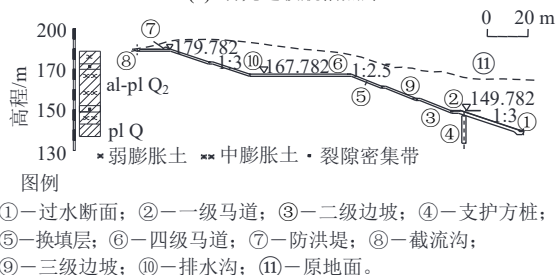
内, 相对于坡高 39.762 m, 渠道水位波动较小, 故不分析渠道水位变化对边坡变形的影响。



(a) 研究渠段卫星图片



(b) 研究边坡航拍照片



(c) 9+300 断面布置和土层分布图

图 1 研究边坡照片和断面图

Fig.1 Photos and cross-sectional view of the studied slope

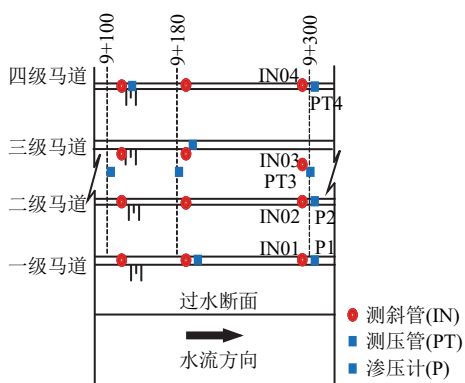


图 2 边坡安全监测设施布置图

Fig.2 Layout of safety monitoring facilities of the slope

表 1 测斜管布置表

Table 1 Information on inclinometer tubes

编号	埋设时间/年-月	孔深/m	位置
IN01	2017-04	25.0	一级马道
IN02	2017-04	25.0	二级马道
IN03	2017-04	24.5	三级边坡
IN04	2017-04	28.5	四级马道

表 2 地下水位观测设施布置表

Table 2 Information on observation facilities for groundwater level

编号	位置	管口高程/m	孔深/m	安装高程/m
P1	一级马道	149.802	25	124.392
P2	二级马道	155.302	25	129.921
PT3	三级边坡	158.104	19	—
PT4	四级马道	167.782	27	—

3 时空变形规律分析

3.1 变形的时间变化规律分析

以各测斜管位移最大值测点为例, 测点过程线见图 3。IN01~IN04 最大值测点距管口深度分别为 0.5、4.0、6.5、2.5 m。IN02、IN03 两根测斜管在 2020 年 7 月 16 日后重新取基准值开始自动化观测, 分析数据截止到 2020 年 7 月 9 日, 另外两根测斜管数据截止到 2021 年 6 月 10 日。IN01~IN04 最大位移值分别为 51.86、33.20、25.97、20.63 mm。一、二级马道水平位移均已经超出设计警戒值 (30 mm)。

从图 3 可见, 边坡变形呈现显著的趋势性变化, 主要为向渠道内部方向的变形。还可看出, ①①①变形在年内也有一定的波动, 并呈现一定的季节性和间歇性, 符合膨胀土边坡变形的一般规律。其中, IN01、IN04 的最大位移的测点距离管口较近, 季节性位移较显著。

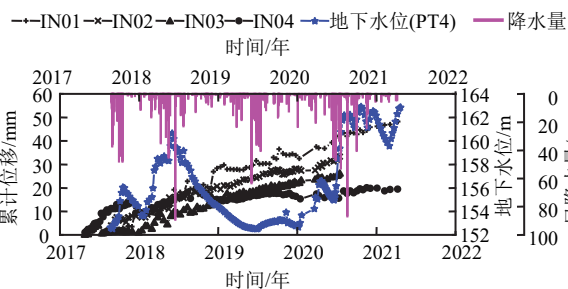


图 3 测斜管最大位移测点位移与地下水位和降水量
Fig.3 Displacements of maximum displacement measuring points of inclinometers, and groundwater levels and precipitations

日降水量从 2017 年 7 月开始观测 (见图 3)。一年中降水主要集中在 6—9 月, 部分年份 5 月和 10 月也有较多降水, 冬春季降水较少。观测以来, 最大年降水量为 824 mm, 出现在 2020 年。其中, 6—8 月的月降水量分别为 174.5、181.5、141.5 mm, 分别占全年降水量的 21.2%、22.0%、17.2%。日均气温呈年周期性变化, 最高日均气温一般出现在 6—8 月, 最低日均气温一般出现在 12 月至次年 2 月。降水和气温为大气影响层内的干湿循环提供了

良好的条件。

VMD 可根据时间序列不同尺度上的特征进行自适应分解,使每个分量都具有明确的物理意义^[12]。为更好地分析时间变化规律,采用 VMD 对变形的时间序列进行分解。考虑变形的趋势性、周期性和波动性特征,模态数 K 设为 3。以残余项最小为目标,通过多次试算,惩罚参数 a 和上升步长 τ 分别设为 0.5、0.1。图 3 中各测点时间序列分解后结果见图 4。

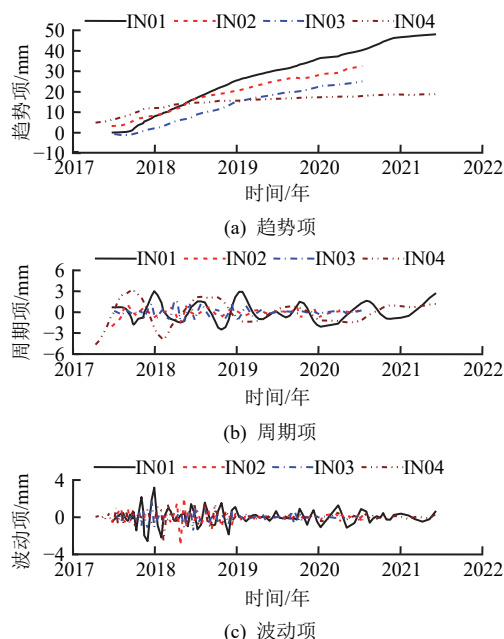


图 4 测斜管最大位移测点位移的 VMD 分解结果

Fig.4 VMD decomposition result of displacements of maximum displacement measuring points of inclinometers

从图 4 可看出,各测点位移趋势性增加较明显,其中以 IN01 最为显著,呈对数函数型式发展。同时,各测点周期性位移的变化幅度不尽相同,IN01、IN04 测点变幅最大,且表现出较好的年周期性;坡中的 IN02、IN03 测点变幅最小。波动性位移跳跃均较频繁,采用 Box-Ljung 检验判别,均拒绝白噪声假设,表明波动性位移中蕴含了一定规律。

3.2 变形的空间变化规律分析

选取部分观测日绘制各测斜管位移分布图,如图 5 所示。由图可见,各测斜管不同深度测点的变形差异较大。整体上看,沿深度方向存在上部的显著变形区、下部的稳定区以及中间的过渡区。此外,各测斜管的显著变形区、中间过渡区的深度也各不相同。IN01~IN04 的显著变形区距离孔口分别深 1、11、11、3.5 m。

为更好地说明边坡变形的空间特征,选取 2018 年 8 月 13 日、2020 年 7 月 10 日两个观测日,绘制

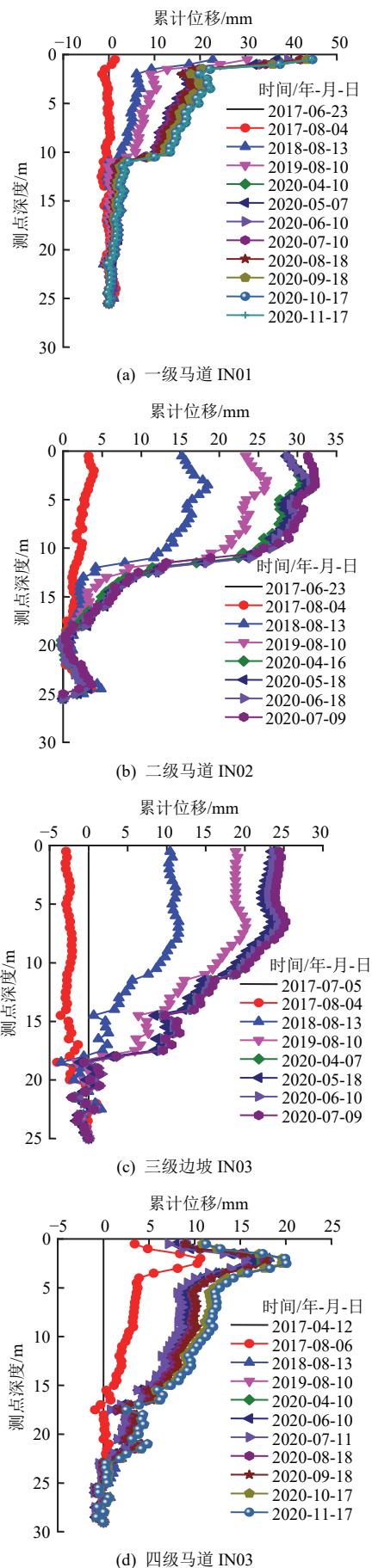


图 5 各测斜管部分观测日的位移分布图

Fig.5 Displacement distribution maps of partial observation days for inclinometers

位移等值线, 如图 6 所示。由图可看出, 二级边坡底部的累积位移明显大于四级边坡坡肩。由于过水断面受方桩和坡面梁支护体系制约, 过水断面边坡下部变形较小。

整体看, 边坡变形分布与一般膨胀土边坡的变形分布一致, 即坡脚位移较大, 坡顶位移较小。同时, 该处边坡二级边坡坡脚抬升和拱圈断裂, 变形分布规律与外观破损分布也较为吻合。

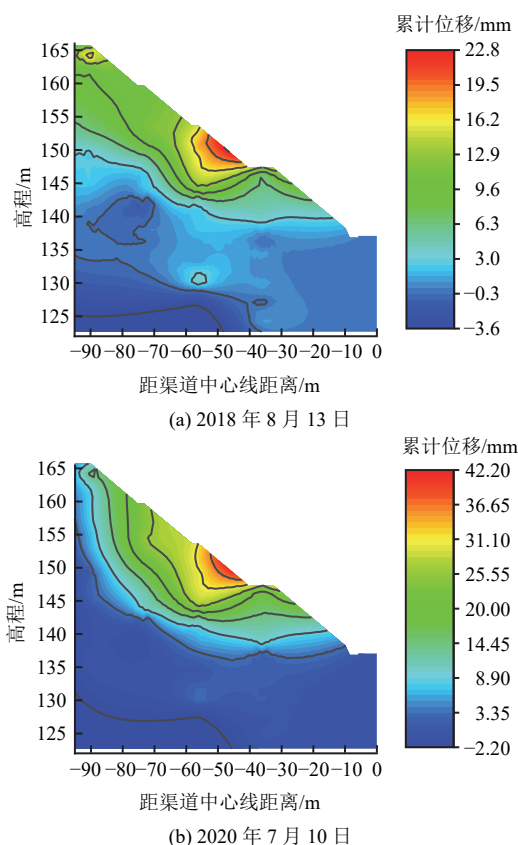


图 6 部分观测日的边坡位移等值线图
Fig.6 Displacement contour maps of the canal slope on some observation days

4 渠坡时空变形机制分析

4.1 地下水位对渠坡内部变形的影响分析

从图 3 可见, 边坡地下水位较高, 且与降水量存在一定相关性, 持续降雨地下水位抬升, 反之地下水位下降。为更好地说明地下水位对边坡变形的影响, 采用 VMD 对 PT4 测点观测到的地下水位进行分解, 参数设置同变形, 比较 IN04 最大值测点位移分量与地下水位成分关系, 见图 7。由图可看出, 地下水位与位移均呈现趋势性发展, 但趋势性位移初期增长显著, 此后减缓。考虑到观测时边坡已开挖完成 4 年, 回弹变形已趋于稳定, 地下水位趋势性变化影响显著。除受地下水位波动性成分影响外, 波动性位移还受到其他因素影响, 跳跃较频繁。

4.2 降水对渠坡上部变形的影响分析

同样地, 采用 VMD 对降水量进行分解, 以便分析降水量成分对位移分量的影响。考虑降水量的年际变化特征, 模态数 K 设为 2, 将其分解为周期性和波动性成分。比较位移分量与地下水位成分关系, 如图 8 所示。由图可见, 周期性位移与降水量周期性成分呈较好相关性, 降水量较多时段, 位移增长; 降水量较少时段, 位移恢复, 但由于膨胀土渗透性小, 降水入渗过程较缓慢, 位移变化均呈现一定滞后性。相对于地下水位波动性成分, 波动性位移与降水量波动性成分相关性更好, 波动性位移随降水量波动而波动。

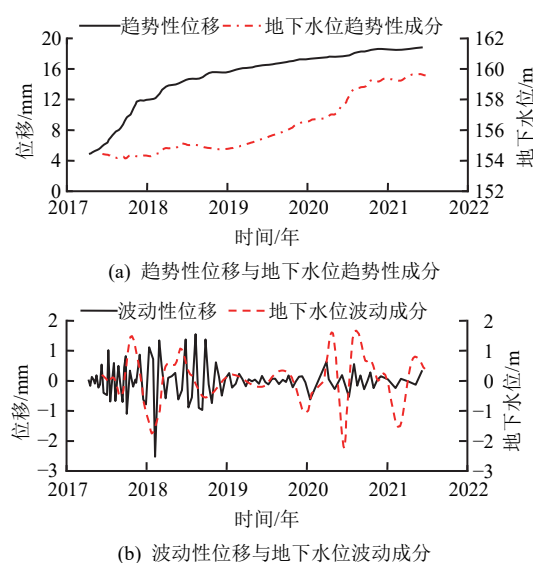


图 7 位移分量与地下水位成分之间的关系
Fig.7 Relationships between displacement components and groundwater level

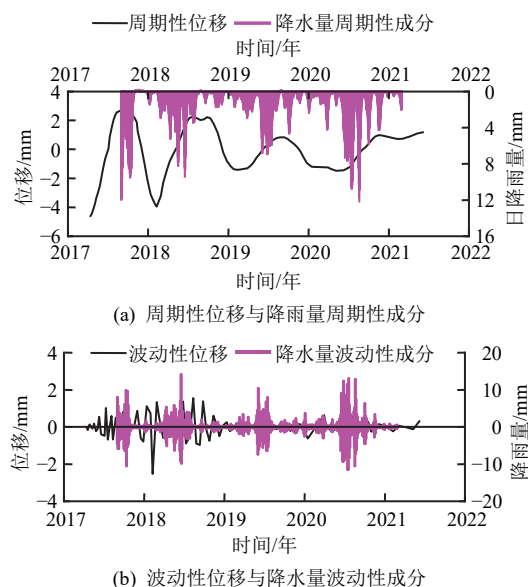


图 8 位移分量与降水量成分之间的关系
Fig.8 Relationships between displacement components and precipitation

4.3 测点位移时间序列的聚类分析

聚类分析可创建对象不同的集群（类）。理想情况下，同一聚类中的对象彼此相似，且与其他聚类中的对象尽可能不同。动态时间规整（dynamic time warping, 简称 DTW）用时间规整函数描述一个时间序列和参考时间序列之间的对应关系，利用形状相似特点找到两个时间序列之间的最优翘曲路径，求得空间距离^[14]。soft-DTW 采用可微损失函数，它的值和梯度均可以用二次时间/空间复杂度来计算^[15]。这种正则化适用于时间序列的相似性衡量。层次聚类不需要指定特定聚类数，对于一组选定的对象，总是给出相同的结果。在 soft-DTW 距离度量基础上，采用层次聚类对各测斜管测点进行聚类分析。

以 IN03 为例描述测点聚类过程。使用 soft-DTW 计算测点间的空间距离。低平滑参数 γ 的 soft-DTW 算法产生伪质心， γ 足够高时 soft-DTW 算法可收敛到合理的解， γ 设为 1。对测点进行层次聚类，最优聚类数是 3，结果见图 9。其中，距管口深度 11.5~20.5 m 之间的测点被划分为聚类 2，其上、下测点分别归为聚类 1 和 3。为更好地说明聚类结果，在图 9 中还绘制了测斜管 2020 年 7 月 9 日（IN02、IN03）和 2021 年 6 月 10 日（IN01、IN04）的位移分布。

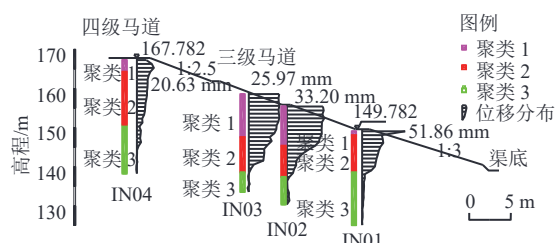


图 9 各测斜管测点聚类分区结果示意图
Fig.9 Clustering results for measuring points of inclinometers

为说明聚类结果的合理性，以 IN03 上的测点 26 和 32 为例，分析聚类 2 内测点位移时间序列的相似性，两测点距管口分别为 13 m 和 16 m。两测点时间序列的归一化距离为 0.69，对应变化过程见图 10(a)。可观察到，聚类 2 中测点 26 和 32 位移的趋势性、周期性和波动性均呈现较好的相似性。为了比较不同聚类间的异同，还选取了聚类 1 的测点 6 进行对比，测点 6 距管口 3 m 深。测点 26 和 6 时间序列的归一化距离为 1.51，明显大于其与测点 32 的距离。测点 26 和 6 位移对应变化过程见图 10(b)。两测点位移趋势性、2019 年以后的周期性和波动性均存在一定差异。聚类 1 的测点位移的趋势更显著、跳跃波动也更频繁。

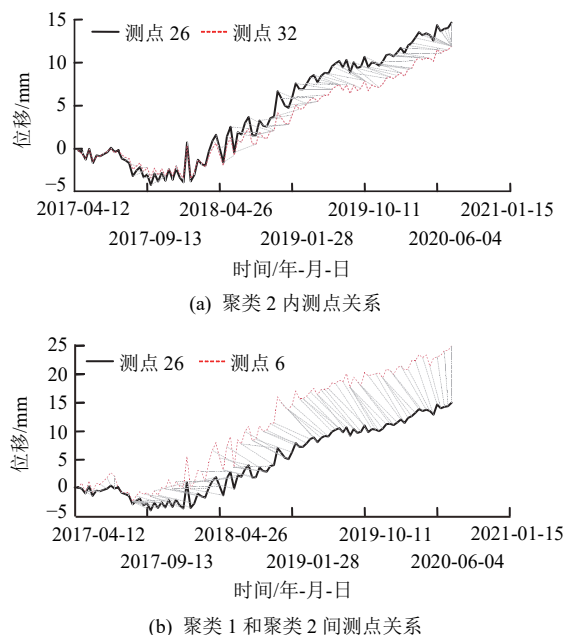


图 10 聚类内和聚类间测点之间的变化对比
Fig.10 Comparison between internal and external measuring points in clusters

同样地，采用层次聚类法对其余 3 根测斜管上的测点进行聚类分析，结果也绘于图 9，边坡上各测斜管测点聚类数均为 3。对比四级马道的 IN04 和三级边坡的 IN03 聚类结果，聚类 1 深度分别为 3.5 m 和 11 m，存在显著差异。然而，三级边坡的 IN03 和二级马道 IN02 中的聚类 1 的深度接近，分别为 11 m 和 10 m。此外，方桩和坡面梁框架支护体系对过水断面的变形影响很大，过水断面边坡变形主要发生在上部，IN01 的聚类 1 的深度为 1 m。聚类 1 与从图 5 判断的显著变形区深度大致相同。

4.4 变形体及潜在滑动面判定

局部异常因子（local outlier factor, 简称 LOF）是根据对象点与其相邻点间的密度来衡量该点异常程度的指标，LOF 异常点检测在工程应用中效果良好，但 LOF 结果高度依赖于最近邻域 l 的数量^[14]。一旦改变 l ，异常值结果显著不同。WMLOF 算法基于对不同参数 l 的结果进行加权，确定不同 l 值下初始 LOF 值的熵权重，采用滑动窗口计算 WMLOF 值，可最大限度地发挥自适应滑动窗口策略的优势，在多个尺度上组合 LOF 特征^[16]。一般地，采用原始时间序列的 $1/10$ 作为滑动窗口长度 W 。

窗口长度 W 设为 20，应用 WMLOF 计算了 4 根测斜管上测点的 LOF 值。以 IN04 和 IN03 为例，结果如图 11 所示。核密度估计是一种确定离散样本概率密度的非参数方法，采用该方法估计 LOF 值阈值，带宽为 0.05，置信水平为 95%。IN04 和

IN03 的阈值分别为 3.81 和 3.30。如 IN03 上的测点 22 的 LOF 值为 3.42, 超过阈值 3.30。可以看出, 两个相邻聚类之间的测量点的 LOF 值相对较大。特别地, 聚类 1 和聚类 2 之间测点的 LOF 值超过了阈值。这与两个聚类间的测点之间变形变化规律的骤变有关。

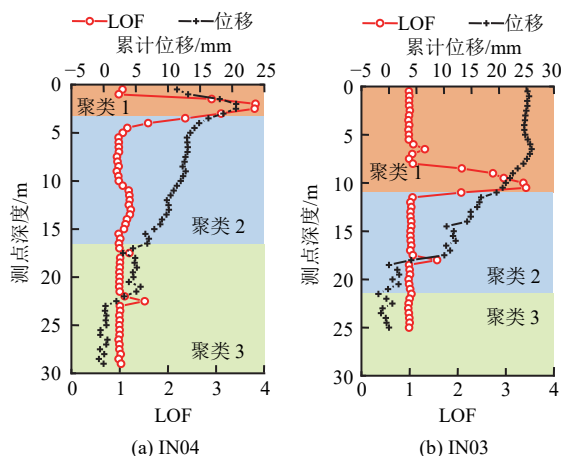


图 11 IN04 和 IN03 的测点位移分布和聚类分区

Fig.11 Displacement distribution and clustering results of measuring points on IN04 and IN03

从图 11 还可观察到, IN04 和 IN03 的聚类 1 的深度显著不同。IN04 的聚类 1 距管口深度仅 3 m, 而 IN03 的聚类 1 深度为 11 m。通过连接相邻测斜管的聚类 1 和聚类 2 间 LOF 值最大测点, 即变形存在骤变的测点, 可得到潜在滑动面, 潜在滑动面上部为变形体。潜在滑动面如图 12 所示。由图可看出, 潜在滑动面前缘大致水平; 因受到一级边坡支护体系的限制, 潜在滑出口位于接近一级马道的浅层处。

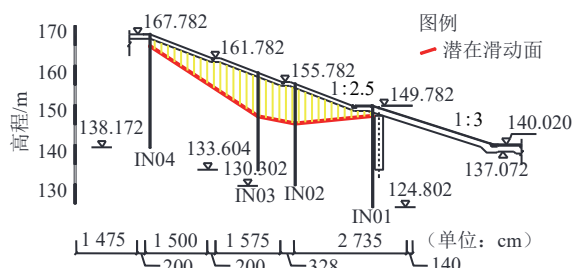


图 12 推测的潜在滑动面和滑动体

Fig.12 Inferred potential sliding surface and sliding body

5 讨 论

5.1 变形机制

进一步分析地下水位与降水的关系, 各测点地下水位与日降水量变化过程如图 13 所示。其中, 三级边坡 PT3 测点在 2020 年 8 月之后灵敏度不符

合要求, 测值不能反映实际情况。可以看出, 地下水位与降水量之间存在良好的相关性。多雨时段地下水位上升, 反之下降。如 2020 年 6 月持续降雨, 6 月 9 日至 30 日累计降水量 174.5 mm。从 6 月 9 日至 19 日, PT4 测点地下水位保持在 155 m 左右, 然后持续上升, 到 7 月 9 日达到 159 m。换言之, 地下水位在一个月内上升了 4 m。同时也表明, 地下水位上升相比降水存在一定的滞后性。PT4 测点 2018—2020 年的年变幅分别为 7.043、1.904 和 10.264 m, 年际变化较大。

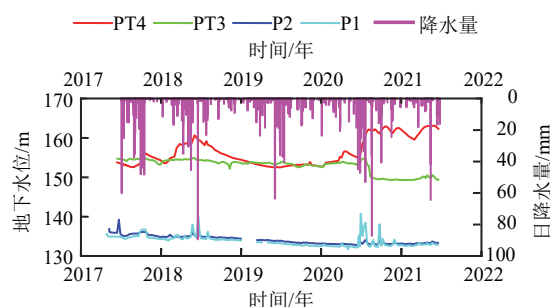


图 13 各点的地下水位与降水量的关系

Fig.13 Relationship between groundwater level and precipitation

应用灰色关联度分析降水与地下水位的相关性。考虑到降水入渗的滞后性, 且入渗量要小于降水量, 采用有效降水量表示当日及前 15 日的降水量^[12]。灰色关联度分析分辨率系数设为 0.5, 即当两个物理量的灰色关联度大于 0.6 时, 表明具有良好的相关性。其中, PT3 测点取 2020 年 7 月前的数据。PT4、PT3、P2 和 P1 的地下水位与有效降水量之间的灰色关联度分别为 0.645、0.632、0.586 和 0.511。可见, 二级马道以上的地下水位与降水量之间存在良好的相关性, 降水入渗补给给了坡面上部的地下水。地质勘察资料也表明, 该渠段地下水位较高, 主要为上层滞水。

地下水位变化引起土体有效应力变化, 进而引起土体变形。观测以来, 4 个测点的地下水位波动深度如图 14 所示。由图可看出, 地下水位的波动深度较大。四级马道上的 PT4 测点最高地下水位为 163.11 m, 距管口仅 4.672 m, 发生在 2021 年 5 月 30 日; 最低地下水位为 152.495 m, 发生在 2019 年 6 月 28 日。最高和最低地下水位之间的高差为 10.615 m。相应地, 四级马道上 IN04 测点在 16.5 m 的深度范围内均表现出一定的变形, 其变形深度略大于最深地下水位 15.287 m。

根据该段地质调查, 大气影响急剧层、大气影响层深度分别为 1.6~2.4 m 和 3.6~5.3 m, 坡肩地

带大气影响层深度可接近 10 m (见图 15) [17]。大气影响层深度随地形及地下水埋深变化而变化。多雨时段地下水位最浅埋深为 3~4 m, 少雨时段埋藏较深, 可达 8 m。与该地区的地质调查结果相比, PT4 测点的地下水位波动深度明显更大。

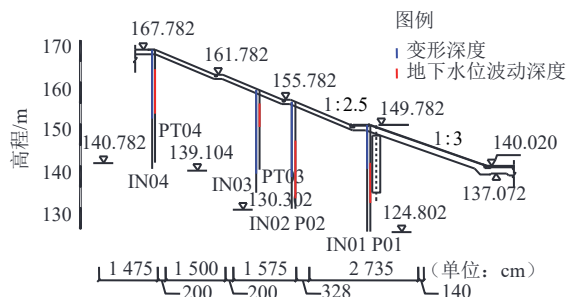


图 14 地下水位与变形深度的变化范围
Fig.14 Fluctuation range of groundwater level and deformation depth

其余各处的地下水位波动深度和变形范围也绘于图 14。对 IN03 进行分析, 可以看出, 该处变形范围比地下水位波动深度深得多。根据图 1(c), 在高程 150 m 附近有一个裂隙密集带。可以推断, 该处变形还与裂隙密集带有关。对于 IN04 和 IN02, 地下水位的波动深度与变形深度之间存在良好的一致性。对于过水断面边坡, 变形受边坡支护体系影响, 仅发生在上部。

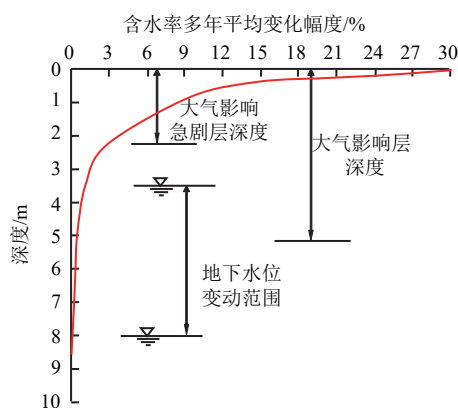


图 15 土体含水率变化幅度与深度的关系
Fig.15 Relationship between change amplitude of soil moisture content and depth

在一定荷载范围内, 荷载越大, 经历相同的干湿循环次数, 膨胀土的绝对和相对胀缩率越小。荷载对干湿循环过程中膨胀土的胀缩幅度及强度衰减具有明显抑制作用[18]。开挖改变了膨胀土的上覆荷载大小和环境条件, 该渠段施工期滑坡调查结果表明, 受干湿循环影响的浅层变形破坏位于大气影响急剧层, 浅层滑动一般沿地下水变化区或地下水

位附近剪出。深层滑坡主要受控于各种裂隙, 滑动面后缘主要受垂直裂隙控制, 拉裂面倾角通常大于 60°; 中下部受坡中、坡脚缓倾结构面控制, 底滑面近于水平。滑动面呈折线型, 而非传统均质土坡滑坡的圆弧型。深层第 1 类主要受环境作用形成的缓倾角裂隙控制, 埋深为 3~12 m; 第 2 类是结构面, 深度变化大[1]。

结合图 12、14 可知, 二级马道以上的边坡地下水波动范围较大, 导致边坡变形深度较大, 边坡上部显著变形区位于大气影响层。边坡中部受到地下水位波动和裂隙密集带双重影响, 导致显著变形区域埋深较深, 超过 10 m。边坡下部受支护体系限制, 变形主要位于浅层。潜在滑动面呈折线形, 且受裂隙密集带、一级边坡支护体系的影响, 滑动面前缘近似水平。

5.2 加固处置措施建议

尽管采取了全断面换填改性土措施, 通水运行 3 年即开挖完成 4 年后, 渠坡仍发生了较严重变形。渠坡上部的地下水位与降水量呈较好的相关性, 地下水波动范围较大。

在地下水长期波动作用下, 膨胀土强度降低, 裂隙密集带进一步弱化, 导致渠坡变形范围较深。除采取微型桩、抗滑桩等支护措施外, 还需在边坡上部采取深层排水措施降低地下水[19-20]。该段已有多处存在严重变形的边坡在三、二级马道布置了 2 m 深排水盲沟来降低边坡地下水, 但排水盲沟只对渠坡浅层起到降排水作用。建议采用排水井进一步降排地下水。针对该边坡, 可在二级、三级马道采用排水盲沟+排水井组合形式降排浅层和深层地下水。

6 结 论

本文基于实测数据和工程地质资料, 借助变分模态分解、加权多尺度局部异常系数以及聚类分析等数据挖掘方法, 以南水北调中线总干渠陶岔渠首段边坡为例, 分析了深挖方膨胀土渠道边坡时空变形特征, 得到以下主要结论:

(1) 开挖完成后的膨胀土渠道边坡变形呈现显著的趋势性变化, 还表现出季节性和间歇性。深挖方膨胀土渠道边坡空间分布呈现显著不均匀性, 下部变形值较大, 往上逐渐减少。

(2) 边坡上部显著变形区深 3 m, 位于大气影响层; 中部受地下水波动和裂隙密集带影响, 显著变形区埋深较深, 达 11 m; 下部受支护体系限制, 变形主要位于浅层。边坡上层滞水受雨水补给, 波

动范围大, 导致上部变形深度较深, 在 16.5 m 深度范围内都存在一定变形。

(3) 采用聚类分析对不同深度测点进行聚类, 聚类数均为 3, 从上到下对应于显著变形区、过渡区和稳定区。通过局部异常系数推测了潜在滑动面, 潜在滑动面通过聚类 1 和聚类 2 之间的测点, 为折线形。潜在滑动面前缘受气候条件、边坡地下水、裂隙密集带和支护措施影响, 近似水平。

(4) 为减少地下水波动对膨胀土胀缩变形的影响, 除采取加固支护措施外, 还应采用排水盲沟与排水井结合的措施降排地下水。该研究成果可为对气候条件敏感的开挖渠道的运行管理和加固处置提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] NIU X. The first stage of the Middle-Line South-to-North Water-Transfer Project[J]. **Engineering**, 2022, 16: 21-28.
- [2] 陈新苗. 引江济淮膨胀土工程特性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(7): 1072-1075.
CHEN Xin-miao. Research on the engineering properties of expansive soil in the water transfer project from the Yangtze River to Huaihe River[J]. **Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)**, 2009, 32(7): 1072-1075.
- [3] 冷挺, 唐朝生, 徐丹, 等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 112-128.
LENG Ting, TANG Chao-sheng, XU Dan, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2018, 26(1): 112-128.
- [4] 殷宗泽, 韦杰, 袁俊平, 等. 膨胀土边坡的失稳机理及其加固[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 1-6.
YIN Zong-ze, WEI Jie, YUAN Jun-ping, et al. Mechanism of slope slide of expansive soil and reinforcement for the slope[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 41(1): 1-6.
- [5] 陈生水, 郑澄锋, 王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 795-799.
CHEN Sheng-shui, ZHENG Cheng-feng, WANG Guo-li. Researches on long-term strength deformation characteristics and stability of expansive soil slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(6): 795-799.
- [6] 程展林, 李青云, 郭熙灵, 等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 102-111.
CHENG Zhan-lin, LI Qing-yun, GUO Xi-lin, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. **Journal of Changjiang River Scientific Research Institute**, 2011, 28(10): 102-111.
- [7] 李锋, 朱瑛洁, 赵旻, 等. 南水北调中线工程陶岔膨胀土滑坡稳定性研究[J]. 人民长江, 2007(9): 48-51.
LI Feng, ZHU Ying-jie, ZHAO Min, et al. Research for stability of expansive soil landslide at Taocha canal head of S-N water transfer project[J]. **Yangtze River**, 2007(9): 48-51.
- [8] 蔡正银, 陈皓, 黄英豪, 等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 1977-1982.
CAI Zheng-yin, CHEN Hao, HUANG Ying-hao, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(11): 1977-1982.
- [9] 叶为民, 孔令伟, 胡瑞林, 等. 膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1295-1309.
YE Wei-min, KONG Ling-wei, HU Rui-lin, et al. New prevention and treatment techniques and their applications to landslides and engineering slopes of expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(7): 1295-1309.
- [10] HU J, MA F H, LI X. Analysis of deformation formation causes and reinforcement disposal effects in deep excavated expansive soil canal slope: case study[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2023, 23(5): 8265.
- [11] 刘祖强, 罗红明, 郑敏, 等. 南水北调渠坡膨胀土胀缩特性及变形模型研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 409-414.
LIU Zu-qiang, LUO Hong-ming, ZHENG Min, et al. Study on expansion-shrinkage characteristics and deformation model for expansive soils in canal slope of South-to-North Water Diversion Project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(Suppl.1): 409-414.
- [12] 胡江, 李星, 马福恒. 基于变分模态分解的深挖方膨胀土渠道边坡变形预测[J/OL]. 工程地质学报, 2023: 1-15. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0725>.
HU Jiang, LI Xing, MA Fu-heng. Deformation prediction of expansive soil canal slope of deep excavation based on variational mode decomposition[J/OL]. **Journal of**

- Engineering Geology**, 2023: 1-15. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0725>.
- [13] LI X, MA F H, HU J. A spatiotemporal identification method for deformation characteristics of expansive soil canal slope based on spectral clustering[J]. **Expert Systems with Applications**, 2023, 225: 120108.
- [14] HU J, MA F H, WU S H. Anomaly identification of foundation uplift pressures of gravity dams based on DTW and LOF[J]. **Structural Control and Health Monitoring**, 2018, 25(5): e2153.
- [15] CUTURI M, BLONDEL M. Soft-DTW: a differentiable loss function for time-series[C]//Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning-Volume 70. [S. l.]: JMLR, 2017: 894-903.
- [16] SHUAI C, SUN Y, ZHANG X, et al. Intelligent diagnosis of abnormal charging for electric bicycles based on improved dynamic time warping[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2023, 70(7): 7280-7289.
- [17] 阳云华, 赵旻, 郭伟, 等. 南阳盆地膨胀土大气影响深度及其工程意义[J]. 人民长江, 2007(9): 11-13.
- YANG Yun-hua, ZHAO Min, GUO Wei, et al. Air influenced depth to expansive soil in Nanyang basin and its engineering significance[J]. **Yangtze River**, 2007(9): 11-13.
- [18] 杨和平, 唐咸远, 王兴正, 等. 有荷干湿循环条件下不同膨胀土抗剪强度基本特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2311-2317.
- YANG He-ping, TANG Xian-yuan, WANG Xing-zheng, et al. Shear strength of expansive soils under wet-dry cycles with loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(7): 2311-2317.
- [19] 邓铭江, 蔡正银, 郭万里, 等. 竖向排水井对北疆膨胀土渠道稳定性的作用分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 1-6.
- DENG Ming-jiang, CAI Zheng-yin, GUO Wan-li, et al. Influences of vertical drainage wells on stability of expansive soil canals in North Xinjiang[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(Suppl.2): 1-6.
- [20] 马鹏杰, 芮瑞, 曹先振, 等. 微型桩加固长大缓倾裂隙土边坡模型试验[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1695-1707.
- MA Peng-jie, RUI Rui, CAO Xian-zhen, et al. Model tests of micropile-reinforced soil slope with long and gently inclined fissures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(6): 1695-1707.

《岩土力学》2023 年第 12 期被 EI 收录论文 (27 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
1	下伏空洞桥梁群桩桩端岩层极限承载力计算方法研究	雷 勇, 陈于斯, 谭 豪, 等	3339—3348
2	宽广吸力范围非饱和土剪切强度试验研究及其预测	牛 庚, 朱晓凤, 李俊星, 等	3349—3359
3	加筋稻壳灰改性土动力特性研究	李丽华, 张东方, 肖衡林, 等	3360—3369
4	含砂量对砂-细粒混合土一维蠕变行为的影响	常留成, 王红雨, 王 亚, 等	3370—3382
5	土颗粒材料中的复杂网络结构演化分析	刘恩龙, 蒋 炼, 姜晓琼, 等	3383—3404
6	筏板基础下薄层土地基承载力研究	杨光华, 廖汉阳	3405—3414
7	水位波动条件下有封底基坑渗流场孔压解析解	余 俊, 张志中, 郑靖凡, 等	3415—3423
8	土工格室加筋土挡墙静载模型试验研究	屈畅姿, 李梦竹, 刘 泽, 等	3424—3434
9	不同坡度植被边坡降雨入渗和径流侵蚀规律的试验研究	黄少平, 陈俊毅, 肖衡林, 等	3435—3447
10	煤岩组合物卸围压能量演化规律及耗散能损伤本构模型研究	茹文凯, 胡善超, 李地元, 等	3448—3458
11	改性黄麻纤维联合微生物胶结铀尾砂的抗渗性能试验研究	贺桂成, 唐孟媛, 李咏梅, 等	3459—3470
12	环氧树脂基脆性透明岩石相似材料配比试验研究	胡南燕, 黄建彬, 罗斌玉, 等	3471—3480
13	多期地震作用的台阶式顺层岩质边坡震裂破坏机制	信春雷, 杨 飞, 冯文凯, 等	3481—3494