

超高黄土不稳定斜坡的防治设计及效果评价

Prevention and Control Design and Effectiveness Evaluation of Unstable Slopes on Ultra-high Loess

魏中凯, 杨智强, 李锐鹏

(河南省地质矿产勘查开发局第四地质勘查院, 河南 郑州 450000)

摘要: 为有效保证超高黄土不稳定斜坡的稳定性, 以上合院不稳定斜坡为工程背景, 在边坡基本特征及稳定性分析基础上, 开展其防治设计, 再通过变形预测构建防治效果评价指标, 并以其评价防治手段的效果。分析结果表明: 结合边坡防治现状及基本特征, 可将其防治现状划分为了三段, 其中, II分段未采取防治措施, 且其对前缘建设场地具有直接威胁, 并经稳定性评价, 得出II分段边坡在工况1(天然工况)条件下属基本稳定~稳定状态, 但在工况2(暴雨工况)条件下属不稳定状态, 并将安全系数设置为1.2时, 得其最不利剩余下滑力为191.47 kN/m, 因此, 此段治理必要性显著。为切实保证不稳定斜坡的稳定, 提出采用“桩板墙”进行防治, 且在防治后进行变形监测及后续预测, 得出边坡防治后的变形虽会进一步增加, 但增加速率趋于减小, 所得评价指标 X_s 的取值范围介于0.60~0.92, 防治效果等级为II级, 即边坡后续变形具一般收敛趋势, 其防治效果较优, 能有效保证其稳定。

关键词: 边坡; 基本特征; 稳定性分析; 变形预测; 防治效果

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249(2023)03-0009-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.009

WEI Zhongkai, YANG Zhiqiang, LI Ruipeng

(The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Geology and Mineral Bureau, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to effectively ensure the stability of unstable slopes on ultra-high loess, the unstable slopes of the above institute are taken as the engineering background. Based on the basic characteristics and stability analysis of the slopes, prevention and control design is carried out, and then deformation prediction is used to construct evaluation indicators for prevention and control effectiveness, and the effectiveness of prevention and control measures is evaluated. The analysis results show that the current prevention and control situation of the slope can be divided into three sections according to the current prevention and control situation and basic characteristics of the slope. Among them, the prevention and control measures are not taken in Section II, which poses a direct threat to the front edge construction site. Through stability evaluation, it is concluded that the slope of Section II is basically stable~stable under Condition 1 (natural condition), but unstable under Condition 2 (rainstorm condition), when the safety factor is set to 1.2, the most unfavorable remaining sliding force is 191.47 kN/m, therefore, the necessity of governance in this section is significant. In order to effectively ensure the stability of unstable slopes, it is proposed to use "sheet pile wall" for prevention and control, and conduct deformation monitoring and subsequent prediction after the prevention and control. It is concluded that the deformation of the slope after prevention and

作者简介: 魏中凯(1989—), 男, 本科, 工程师, 生态环境修复治理、地质灾害勘查设计、治理。

收稿日期: 2023-04-23

control will further increase, but the increase rate tends to decrease. The value range of the evaluation index X_i is 0.60~0.92, and the prevention and control effect is Grade II, that is, the subsequent deformation of the slope has a general convergence trend, and its prevention and control effect is better, which can effectively ensure its stability.

Keywords: lope; basic characteristics; stability analysis; deformation prediction; prevention and control effect

0 引言

近年我国房屋建设速度较快,受建设区地质环境条件限制,在房建过程中,形成了较多的人工边坡,引发了较多的不稳定斜坡灾害,尤其在黄土地区,此类边坡的工程重要性较高,因此,开展黄土地区不稳定斜坡的防治研究显得尤为重要^[1-2]。目前,不少学者也开展了相关研究,常晁瑜等^[3]利用卫星影像开展了黄土滑坡识别方法研究;陈大伟等^[4]分析了黄土滑坡的成灾机理;王会娟等^[5]研究了地震对黄土滑坡的动力响应;孙萍萍等^[6]探讨了降雨诱发浅层黄土滑坡的破坏机制。上述研究虽取得了相应成果,但均未针对黄土区人工形成的不稳定斜坡进行分析,也未涉及此类灾害的防治设计及效果评价,因此仍有必要拓展此方面研究。

综合上述,该文以上合院不稳定斜坡为工程背景,先结合其地质环境条件,开展其基本特征及稳定性评价,再进一步开展其防治设计,并通过变形预测来评价防治效果,以期为其安全运营提供理论指导。

1 基本原理

该文分析过程主要可分为两阶段,一:结合边坡基本条件,开展其防治设计;二:结合防治后的变形监测数据,通过变形预测开展防治效果评价。该文涉及的主要理论是第二阶段的防治效果评价,因此该节重点对预测模型的构建过程进行详述。

一般来说,变形是边坡稳定状态的直观体现,可以防治后的变形监测数据为基础,通过变形预测来评价其防治效果。在边坡变形监测过程中,受多种不确定因素影响,其监测数据会含有一定的噪声信息,这会影响到预测效果,因此,在进行

变形预测前,需先进行变形数据的去噪处理。

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)对非平稳信号具有较强的去噪能力,是一种常用的时频数据处理方法,其去噪思想为将边坡变形数据分解为若干模态分量和一个噪声分量,即:

$$Y_i(t) = \sum_{j=1}^m C_{ij}(t) + R_i(t) \quad (1)$$

式中: $Y_i(t)$ 为边坡变形数据; m 为模态分量数; $C_{ij}(t)$ 为分解后的模态分量; $R_i(t)$ 为噪声分量。结合文献[7]研究成果,提出将降噪误差比 $dnSNR$ 作为分解效果评价指标,其计算公式为:

$$dnSNR = 10 * \lg\left(\frac{P_s}{P_g}\right) \quad (2)$$

式中: P_s 为含误差因素的功率; P_g 为滤除误差因素的功率。 $dnSNR$ 值越小,说明其数据分解效果越好。通过EMD将边坡变形数据分解为了趋势分量和噪声分量,后续对两分量进行针对性的预测模型构建。考虑到相关向量机(Relevance Vector Machine, RVM)可不受Mercer定理约束,且其应用过程也较为简单,泛化能力较强^[8-9],因此,提出以其构建趋势分量的预测模型。

据RVM基本原理,将其训练函数表示为:

$$t_i = \sum_{i=1}^N w_i K(x, x_i) + z_i + w_0 \quad (3)$$

式中: t_i 为趋势分量预测值; N 为样本数; $K(x, x_i)$ 为核函数; w_i 为权重向量; z_i 为噪声向量; w_0 为偏置向量。在RVM的使用经验中,核函数、权重向量是由模型随机产生,会影响预测精度,为保证预测效果,需对RVM的核函数及权重向量参数进行优化处理。海鸥算法(Seagull Optimization Algorithm, SOA)具有较强的全局寻优能力^[10],提出以其开展RVM的核函数、权重向量参数的优化处理,其优化过程为:

岩土力学

①参数初始化处理。对海鸥初始位置进行设置，如将种群规模设置为 450，最大迭代次数为 1500 次，频率系数为 0.8，其余参数随机设置。

②海鸥迁徙策略。海鸥迁徙过程包括三步，即避免出现冲突阶段、寻找最优海鸥的飞行阶段和保持与最优海鸥的维持阶段。

③海鸥攻击策略。在海鸥迁徙策略的执行过程中，不断改变海鸥的速度及其攻击角度，并采用螺旋形式飞行，通过不断的攻击猎物来实现更新。

综上，通过 SOA 实现了 RVM 的优化处理，有效保证其模型参数的最优性，即将边坡趋势分量的预测模型确定为 SOA-RVM 模型。

一般来说，噪声分量具有一定的混沌特性，提出利用混沌理论 (Chaos Theory, CT) 构建噪声分量的预测模型。在噪声分量预测模型构建过程中，先采用 Lyapunov 指数法计算 λ_{max} 参数，若其值大于 0，说明噪声分量具混沌特征，可利用混沌理论进行预测。

其次，再引入延迟时间参数和嵌入维数参数将噪声分量进行相空间重构，其中，将此两参数求解过程设置如下。

a. 延迟时间参数。将延迟时间参数的相关函数 $C(\tau)$ 构建为：

$$C(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} (\varepsilon_i - \varepsilon') (\varepsilon_{i+\tau} - \varepsilon') \quad (4)$$

式中： n 为噪声分量个数； m 为嵌入维数； ε_i 为噪声分量值； ε' 为噪声分量均值。随 τ 值增加，当 $C(\tau)$ 值达到 $1-1/e$ 时，其对应 τ 值即为延迟时间参数。

b. 嵌入维数参数。将嵌入维数参数的关联维数 $d(m)$ 构建为：

$$d(m) = \frac{\ln C(m)}{\ln(m)} \quad (5)$$

式中： $C(m)$ 为嵌入函数。当 m 值增加后， $d(m)$ 值会逐步趋于稳定，其拐点对应 m 值即为嵌入维数。最后，再利用 Lyapunov 指数法进行噪声分量的预测处理，且在该过程中，以相空间点 ψ_i 为中心，构建其与邻近相空间点间的距离 d ：

$$d = \min_j \|\psi_i - \psi_j\| \quad (6)$$

式中： ψ_j 为 ψ_i 的最近相邻点。当 d 值最小时，反推出噪声分量的预测值。据前述，分别构建了趋势分量、噪声分量的预测模型，将两者预测值相加即为边坡最终预测结果，并提出以其构建出防治效果评价指标 X_s ：

$$X_s = S_1/S_2 \quad (7)$$

式中： S_1 为现有速率，即最近 4 期的变形速率均值； S_2 为预测速率，即外推预测 4 期的变形速率均值。评价指标 X_s 值越小，说明防治效果越好；反之，防治效果越差。以指标 X_s 为基础，构建出边坡防治效果等级划分标准如表 1 所示。

表 1 边坡防治效果等级划分标准
Table 1 Grading standards for slope prevention and control effects

防治效果等级	I 级	II 级	III 级	IV 级
X_s 指标范围	$X_s \leq 0.5$	$0.5 < X_s \leq 1.0$	$1.0 < X_s \leq 1.3$	$X_s > 1.3$
防治效果评价	边坡后续变形具有较强的收敛趋势，其防治效果优。	边坡后续变形具一般收敛趋势，其防治效果较优。	边坡后续变形具一般加速特征，其防治较差。	边坡后续变形具较快的加速变形特征，其防治极差。

2 实例分析

2.1 不稳定边坡的基本信息

2.1.1 边坡区地质环境条件

结合勘查成果，将边坡区地质环境条件介绍如下：

①地形地貌。勘查区跨两个地貌单元，包括黄土塬前缘边坡与青龙涧河 II 级阶地后缘交接地

带。在场地地形方面，区内地势西南高东北低，高程约 363.5~452.3 m，最大高差 88.8 m，地形起伏较大。

②地层岩性。区内地层主要为新近填土及上、中更新统风积成因类型的黄土状粉土与黄土状粉质黏土，其中，填土层主要是以黄土状粉土进行回填，含有少量植物根系，厚度多介于 0.5 m~2.6 m；黄土状粉土层呈灰黄色，粉质为主，含有

大量孔隙，孔径介于 0.1 mm~2.0 mm，具一定湿陷性，分布厚度多介于 4.6 m~17.5 m；黄土状粉质黏土呈棕黄色，依旧以粉质为主，黏质稍增，土质较为均匀，不具湿陷性，分布厚度多介于 2.2 m~15.5 m。

③地质构造。边坡区附近未见大型地质构造发育，最近构造为温塘-高庙断裂，最小距离约 3.4 km；推测有一小断裂从边坡区南侧穿过，距离约 400 m，因此，边坡区内及其附近的断裂构造不发育，影响较小。

④水文地质条件。边坡区及附近未见地表水发育。地下水类型主要为孔隙水，赋存于浅表层孔隙中，区内难见统一自由水面，水位埋深多介于 5~30 m 之间。

2.1.2 边坡基本特征

上合院不稳定斜坡位于三门峡市上合院项目建设场地西南部，属人工边坡；斜坡整体走向 119°，总长度 468 m，整体高约 88.8 m，坡向 29°，坡体整体呈西部陡东部缓的状态，坡度约 36°~40°，其中，坡体西部整体坡度约 40°；中东部坡度稍缓，整体坡度约 36°；坡体东部前缘呈缓台阶状。该不稳定斜坡平面示意图见图 1。

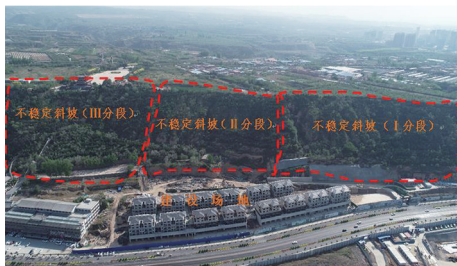


图 1 不稳定斜坡平面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of unstable slope plan

据区内边坡防治现状及基本特征，将其防治现状划分为了三段，各段基本特征介绍如下：

I 分段长 175 m，位于坡体西部，已进行工程治理，对坡体上部土体进行分级放坡、锚杆格构梁防护、格构梁间挂网喷护，在坡体下部修建防护采用衡重式挡墙，现状运营状况良好，无破坏特征。

II 分段长 160 m，位于坡体中部，未进行工程治理。

III 分段长 133 m，位于坡体东部，已进行工程治理，坡体分 3 级台阶放坡，台阶高 5 m~8 m，坡面修建有挡墙工程，现状运营状况良好，无破坏特征。

整个坡体顶部修建有一条挡水墙和排水渠，运营状况良好。



(a) I 分段坡体治理工程现状



(b) III 分段坡体治理工程

图 2 边坡已治理工程现状

Fig. 2 Current situation of slope treatment projects

据上，I 分段和 III 分段已采取治理措施，II 分段未采取防治措施，且其对前缘建设场地具有直接威胁，因此，后续重点对该段进行防治设计及其效果评价。

2.1.3 II 分段边坡稳定性分析

由于本文研究重点是 II 分段，该节细化介绍其基本特征及稳定性。

(1) II 分段基本特征

II 分段位于不稳定斜坡中部，高程介于 370 m~452.5 m，高差约 82.5 m，前缘由于建设工程开挖形成了高陡边坡，高度多介于 12 m~30 m，因此，该段属超高不稳定斜坡。

岩土力学

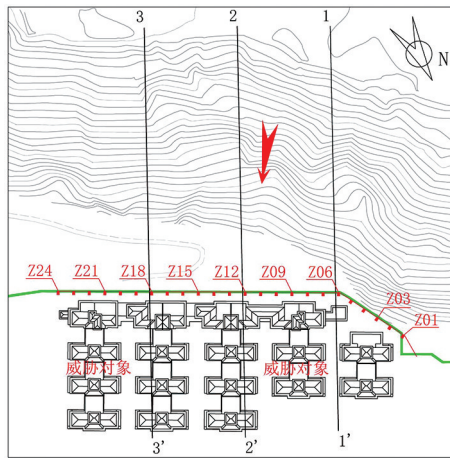
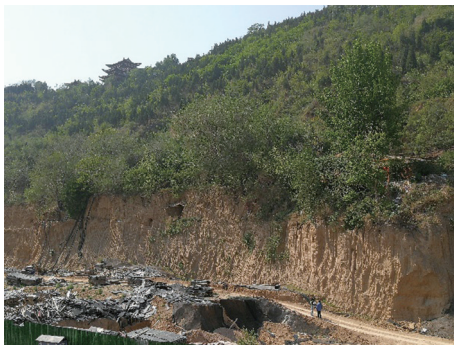


图 3 边坡平面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of slope plan



(a) II 分段坡体临空面现状 1



(b) II 分段坡体临空面现状 2

图 4 II 分段边坡前缘临空面发育特征

Fig. 4 Development characteristics of the free face at the front edge of the II segmented slope

II 分段坡体主要由黄土状粉土、黄土状粉质黏土交替组成；坡面物质结构较松散，透水性较强，力学强度较低，抗水浸润软化能力低，受地下水作用后，岩土体自重增加，抗剪强度降低，容易产生变形破坏。

(2) II 分段稳定性评价

在 II 分段边坡的稳定性评价过程中，采用瑞典条分法作为稳定性计算方法，且结合试验值及反演值综合确定边坡稳定性计算参数。

滑带土天然重度为 16.0 kN/m^3 ，饱和重度为 19.5 kN/m^3 ；滑带土天然抗剪参数为：黏聚力为 22.2 kPa ，内摩擦角为 26.3° ；滑带土饱和抗剪参数为：黏聚力为 17.3 kPa ，内摩擦角为 19.4° 。为保证稳定性分析结果的准确性，对 II 分段共计设置了 3 个计算剖面，剖面位置见图 3；计算工况设置为两类工况，其一是天然工况，用天然参数进行计算；其二是暴雨工况，用饱和参数进行计算。经计算结果统计，得到 3 个剖面的稳定性计算结果如表 2 所示。据表 2，在相应工况条件下，3 个剖面的稳定性由好至差为：3-3' 剖面 > 2-2' 剖面 > 1-1' 剖面，说明 II 分段边坡在西北侧的稳定性相对更差，东南侧的稳定性相对更好；按照稳定系数大小判断，3 个剖面在工况 1 条件下属基本稳定至稳定状态，但在工况 2 条件下属不稳定状态。

表 2 II 分段的稳定性计算结果

计算剖面	工况 1	工况 2
1-1'	1.062	0.693
2-2'	1.078	0.670
3-3'	1.248	0.880

注：表中数据为稳定系数

据上，该边坡设计工况为工况 2（暴雨工况），将安全系数设置 1.2，得 3 个计算剖面的剩余下滑力为：剖面 1-1' 的剩余下滑力为 191.47 kN/m ；剖面 2-2' 的剩余下滑力为 84.40 kN/m ；剖面 3-3' 的剩余下滑力为 99.90 kN/m 。不同计算剖面的剩余下滑力存在一定差异，为保证安全，按最不利情况将后续防治设计的剩余下滑力设置为 191.47 kN/m 。

2.2 边坡防治设计

为切实保证 II 分段边坡的安全，结合其基本地质条件特征，将该段边坡的防治设计方案设定为“桩板墙”，桩间再采用梁进行连接，各类防治措施的具体设计如下：

①抗滑桩。本次设计在坡体前缘陡坎处修建一排抗滑桩，桩长为 26.0 m，桩埋深 18 m，上部露出 8 m，桩心距 6.7 m，共 24 根（见图 3）；桩型的截面尺寸为 1.2 m×1.6 m；抗滑桩施工部位土层为粉土，易发生塌孔，以此需对桩孔进行护壁。

②桩间梁。设计抗滑桩间采用桩间梁进行连接，桩间梁布置在抗滑桩地面以上的桩段，其埋深不小于 0.5 m；每段梁长度为 5.5 m，梁截面尺寸为 5.5 m×1.6 m×0.5 m；桩间梁的横向主筋需与抗滑桩钢筋笼进行焊接；在现场情况允许的条件下，为保证工程的整体性，抗滑桩应与桩间梁应同时立模浇注。

③桩间板。为防止桩间梁中间部位的土体溢出，在两根桩间梁中间设计桩间板，每块板长 5.5 m，高 2.0 m，厚 0.4 m，桩间板上的横向主筋需与抗滑桩钢筋笼进行焊接；在现场情况允许的条件下，为保证工程的整体性，抗滑桩应与桩间板同时立模浇注。

结合工程实际，将典型剖面（3-3' 剖面）的防治示意图如图 5 所示。

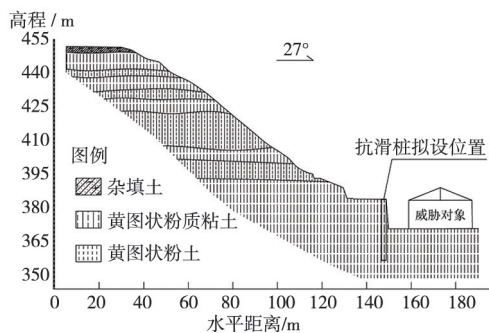


图 5 边坡典型剖面的防治示意图

Fig. 5 Schematic diagram of typical slope profile prevention and control

2.3 边坡防治效果评价

在实施防治措施后，为合理掌握防治效果，进行了边坡防治后的变形监测，共计布置了 4 个监测点（其布置位置见图 4，即 YC1~YC4 监测点），其监测频率为 1 次/d，共计统计得到 42 期变形数据如图 6 所示。据图 6，边坡防治后的变形总体持增加趋势，其中，YC1 监测点的累计变形值达 37.84 mm，YC2 监测点的累计变形值达 29.21 mm，

YC3 监测点的累计变形值达 34.15 mm，YC4 监测点的累计变形值达 38.11 mm；4 个监测点的累计变形值相对均较小，初步验证了边坡防治效果较优。

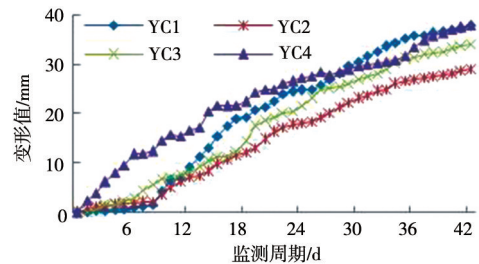


图 6 边坡防治后的变形曲线

Fig. 6 Deformation curve after slope prevention and control

为保证后续防治效果评价的全面性，提出将上述 4 个监测点均作为后续分析的数据来源。

按照第 1 节论文思路，利用变形预测开展边坡防治效果评价，先利用 EMD 进行监测数据的去噪处理，且为验证 EMD 的去噪效果，进一步提出利用小波去噪、Kalman 滤波进行同样处理，得到不同分解方法的去噪结果如表 3 所示。据表 3，EMD 的 $dnSNR$ 值为 23.61，小波去噪的 $dnSNR$ 值为 30.48，Kalman 滤波的 $dnSNR$ 值为 29.48，三者对比，EMD 的 $dnSNR$ 值明显小于其余两类分解方法的 $dnSNR$ 值，说明其去噪效果明显优于其余两类分解方法。

表 3 不同分解方法的去噪结果

Table 3 Denoising results of different decomposition methods

分解方法	EMD	小波去噪	Kalman 滤波
$dnSNR$ 值	23.61	30.48	29.48

EMD 在边坡变形数据中的分解效果具有显著的优越性，且经过 EMD 的去噪处理，将边坡监测数据分解为了趋势分量和噪声分量。

在后续变形预测过程中，为充分验证本文预测思路的有效性，提出以 YC1 监测点为例，详述不同模型的预测效果；在 YC1 监测点的趋势分量预测过程中，再引入支持向量机、GM(1, 1) 模型进行同样预测，所得结果如表 4 所示。据表 4，4 类预测模型对 YC1 监测点的趋势分量具不同预测效果，以各预测结果中的相对误差为评价指标，对其特征参数进行统计，得：模型 1。相对误差介于 2.98%~3.16%，平均值为 3.08%，方差值为

岩土力学

0.0046 (%)²; 模型 2。相对误差介于 3.09% ~ 3.26%, 平均值为 3.16%, 方差值为 0.0041 (%)²; 模型 3。相对误差介于 2.78%~2.92%, 平均值为 2.85%, 方差值为 0.0035 (%)²; 模型 4。相对误差介于 2.35%~2.47%, 平均值为 2.42%, 方差值为 0.0025 (%)²。

其中, 模型 4 和模型 1、模型 2 对比, 得出 SOA-RVM 模型相对支持向量机及 GM (1, 1) 模型具有更优的预测效果; 模型 4 和模型 3 对比, 得出通过 SOA 优化处理能有效提高预测精度及其稳定性。由此充分说明 SOA-RVM 神经网络在趋势分量中的预测效果较优。

表 4 YC1 监测点的趋势分量预测结果
Table 4 Trend component prediction results of YC1 monitoring point

监测周期 /d	变形值 /mm	模型 1		模型 2		模型 3		模型 4	
		支持向量机模型的预测结果		GM (1, 1) 模型的预测结果		RVM 模型的预测结果		SOA-RVM 模型的预测结果	
		预测值/mm	相对误差/%	预测值/mm	相对误差/%	预测值/mm	相对误差/%	预测值/mm	相对误差/%
38	35.02	33.93	3.11	33.88	3.26	34.05	2.78	34.20	2.35
39	35.15	34.04	3.16	34.04	3.17	34.16	2.81	34.29	2.45
40	35.49	34.41	3.05	34.39	3.09	34.45	2.92	34.61	2.47
41	36.14	35.06	2.98	35.01	3.14	35.09	2.90	35.28	2.39
42	36.97	35.82	3.10	35.81	3.13	35.92	2.85	36.06	2.45

在趋势分量预测基础上, 再利用混沌理论开展其噪声分量, 并结合趋势分量预测结果, 得到 YC1 监测点的最终预测结果如表 5 所示。据表 5, 经过混沌理论的补充预测, 得到其预测结果的相对误差介于 1.97%~2.10%, 平均值为 2.04%, 方差值为 0.0023 (%)², 具有较高预测精度及稳定性, 相较趋势分量的预测效果有所提高, 充分验证了该文预测思路的合理性。

在前述预测分析基础上, 再对其余监测点进行同样预测, 所得预测结果如表 6 所示。

表 5 YC1 监测点的最终预测结果
Table 5 Final prediction results of YC1 monitoring point

监测周期 /d	变形值 /mm	分项预测结果/mm		最终预测结果	
		趋势分量	噪声分量	预测值/mm	相对误差/%
		38	36.35	34.20	1.42
39	36.76	34.29	1.75	36.04	1.97
40	37.05	34.61	1.66	36.27	2.10
41	37.46	35.28	1.41	36.69	2.06
42	37.84	36.06	1.00	37.06	2.05

表 6 4 个监测点的最终预测结果
Table 6 Final prediction results of four monitoring points

监测周期/d	YC1 监测点的预测结果			YC2 监测点的预测结果			YC3 监测点的预测结果			YC4 监测点的预测结果		
	变形值 /mm	预测值 /mm	相对误差 /%	变形值 /mm	预测值 /mm	相对误差 /%	变形值 /mm	预测值 /mm	相对误差 /%	变形值 /mm	预测值 /mm	相对误差 /%
	38	36.35	35.61	2.03	27.76	27.22	1.96	32.26	31.61	2.01	35.77	35.08
39	36.76	36.04	1.97	28.03	27.46	2.02	32.68	32.00	2.07	36.37	35.64	2.02
40	37.05	36.27	2.10	28.35	27.77	2.06	33.11	32.44	2.03	37.08	36.33	2.04
41	37.46	36.69	2.06	28.88	28.31	1.98	33.76	33.08	2.00	37.56	36.79	2.06
42	37.84	37.06	2.05	29.21	28.61	2.04	34.15	33.45	2.05	38.11	37.35	2.00
43		37.22			28.97			33.89			37.92	
44		37.79			29.16			34.23			38.46	
45		38.04			29.22			34.85			39.06	
46		38.30			29.46			35.14			39.22	

据表 6, 在相应验证节点处, 4 个监测点的相对误差值虽存在一定差异, 但波动范围均较小; 类比也以预测结果中的相对误差为评价指标, 对其特征参数进行统计, 得:

YC1 监测点。相对误差介于 1.97%~2.10%, 平

均值为 2.04%, 方差值为 0.0023 (%)²; YC2 监测点。相对误差介于 1.96%~2.06%, 平均值为 2.01%, 方差值为 0.0017 (%)²; YC3 监测点。相对误差介于 2.00%~2.07%, 平均值为 2.03%, 方差值为 0.0008 (%)²; YC4 监测点。相对误差介于 1.95%~2.06%,

平均值为 2.01%，方差值为 0.0018 (%)²。

据上，4 个监测点的预测效果相当，进一步验证了 SOA-RVM-CT 模型在边坡变形预测中的稳健性。据表 6 中的外推预测结果，得出边坡后续变形虽会进一步增加，但增加速率均较小；按照式 7 思路，计算得到 YC1 监测点至 YC4 监测点的 X_s 值依次为 0.85、0.60、0.92 及 0.82，四者虽具有一定差异，但按照表 1 中的标准，得出该边坡的防治效果等级为 II 级，即边坡后续变形具一般收敛趋势，其防治效果较优。

3 结论

通过对超高黄土不稳定斜坡的防治设计及效果评价，主要得出如下结论：

(1) 上合院不稳定斜坡具超高、黄土性质，特殊性较为显著，据其防治现状及基本特征，可将其防治现状划分为三段，其中，II 分段未采取防治措施，且其对前缘建设场地具有直接威胁。

(2) 通过对 II 分段边坡的稳定性评价，工况 1 (天然工况) 条件下属基本稳定~稳定状态，但在工况 2 (暴雨工况) 条件下属不稳定状态，并将安全系数设置为 1.2，得其最不利剩余下滑力为 191.47 kN/m。

(3) 通过边坡防治效果评价，得出边坡防治后的变形虽会进一步增加，但增加速率趋于减小，

所得评价指标 X_s 的取值范围介于 0.60~0.92，防治效果等级为 II 级，即边坡后续变形具一般收敛趋势，其防治效果较优。

参 考 文 献

- [1] 孙萍萍, 张茂省, 贾俊, 等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展 [J]. 西北地质, 2022, 55 (3): 96-107.
- [2] 曾磊, 贾俊. 季节性冻融过程黄土斜坡失稳机制及稳定性趋势 [J]. 地质通报, 2022, 41 (8): 1494-1503.
- [3] 常晁瑜, 杨顺, 薄景山, 等. 黄土地震滑坡卫星影像识别方法 [J]. 地震工程学报, 2022, 44 (4): 811-818.
- [4] 陈大伟, 吴志坚, 梁超, 等. 通渭黄土滑坡变形特征及致灾机理分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42 (1): 24-33.
- [5] 王会娟, 王平, 李旭东, 等. 地震诱发低角度黄土-泥岩滑坡动力响应及变形分析 [J]. 地震工程学报, 2021, 43 (6): 1409-1418.
- [6] 孙萍萍, 张茂省, 江睿君, 等. 降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制 [J]. 地质通报, 2021, 40 (10): 1617-1625.
- [7] 郝付军. 运营桥梁的变形程度评价和预测分析 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42 (4): 121-126+137.
- [8] 李晓斌. 基于极限位移准则和变形预测的滑坡变形潜势分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42 (6): 588-593.
- [9] 曹恩华, 包腾飞, 刘永涛, 等. 基于 EMD-RVM-Arima 的大坝变形预测模型及其应用 [J]. 水利水电技术, 2018, 49 (12): 59-64.
- [10] 胡顺强, 崔东文. 基于海鸥优化算法的相关向量机模型在径流预测中的应用 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (5): 46-49+45.

杂志社网址: <http://fmhzhly.com/>