

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222641

基于 PFDGM(1,1)-AR 模型的老滑坡变形预测研究

任文辉

(中国铁建投资集团有限公司, 北京 100855)

摘要: 为有效掌握老滑坡复活机理及其变形规律,以某变质岩区顺层老滑坡为工程背景,结合变形监测结果,开展其变形规律分析及变形预测研究。分析结果表明,老滑坡复活体的变形特征显著,尤其以复活体中部变形更为突出,并经变形预测,得出复活体的累计变形仍会进一步增加,其稳定性趋于减弱,其中,中部的变形无收敛趋势,即增加速率仍趋于增大,其稳定性减弱程度相对更大,对其开展防治必要性显著。

关键词: 老滑坡;复活机理;变形监测;稳定性;变形预测

中图分类号: P642;TV223.3⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0180-05

1 引言

老滑坡形成过程具有特殊性,尤其变质岩区顺层老滑坡表现尤为突出,开展变形预测研究可为其防治提供理论基础,具有切实意义^[1]。目前,在国内研究方面,沈永东^[2]分析了黄土老滑坡的复活成因;尚彦军等^[3]利用物探方法探索了老滑坡地质结构;宋琨等^[4]研究了降雨对老滑坡复活的影响规律;冯文凯等^[5]利用遥感技术分析了老滑坡复活范围及速率特征等;黄金勇等^[6]分析了库水位变化对老滑坡复活的间歇性影响规律。在国外研究方面,DAI ZHENWEI 等^[7]分析了老滑坡变形复活特征;TU GUOXIANG 等^[8]研究了降雨对老滑坡局部复活的影响规律;MA SIYUAN^[9]开展了老滑坡变形监测特征及其失稳风险。已有研究虽取得相应成果,但均未开展老滑坡变形预测分析,尤其未针对变质岩区顺层老滑坡开展相应研究。因此,本文以变质岩区顺层老滑坡为例,基于其地质条件及发育特征,结合变形监测结果,开展其变形规律分析及变形预测研究,且在预测过程中,为避免监测数据所含噪声对预测精度的影响,提出先分离处理滑坡变形数据,再构建变形预测模型,以期老滑坡变形防治提供理论依据。

2 基本原理

2.1 数据分离模型构建

一般来说,滑坡监测过程的不确定因素相对较多,如仪器偏差、环境变化及人为因素等,这些都会在一定程度上影响监测数据的真实性,即滑坡变形监测数据含有真实变形信号和随机噪声信号,其表达式为:

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 为变形监测数据; $s(t)$ 为真实变形信号,代表滑坡变形真实值; $n(t)$ 为随机噪声信号,代表滑坡变形随机误差值

为保证后续预测精度,进行 $s(t)$ 、 $n(t)$ 的分离处理十分必要。Kalman 滤波能有效剔除数据中的随机噪声信号,适用于滑坡变形数据的分离处理,其状态方程为:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{G}_k \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (2)$$

式中, \mathbf{X}_k 为状态矢量; \mathbf{G}_k 为状态转移矩阵; \mathbf{W}_{k-1} 为系统噪声矢量。

观测方程表示为:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{M}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (3)$$

式中, \mathbf{Y}_k 为观测矢量; \mathbf{M}_k 为观测矩阵; \mathbf{V}_k 为观测噪声矢量。

以状态方程和观测方程为基础,将现状时刻观测值和前一刻状态预测值输入方程中,利用递推循环运算来实现最优估计。

根据文献[10]研究成果,噪声矩阵对 Kalman 滤波的分解效果具有较大影响,为保证分离效果,提出通过遗传算法(GA)寻找噪声矩阵的最优解,具体寻优流程见图 1。为合理评价分离效果,结合

收稿日期: 2022-12-27, 修回日期: 2023-03-29

作者简介: 任文辉(1975-),男,本科、高级工程师,研究方向为土木工程施工及管理,E-mail:renwenhui12@163.com

度范围为 75~150 m,分布面积约 $3.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体厚度在 7~15 m 之间,复活体体积约 $35.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,属中型中层滑坡。

3.2 变形预测研究

3.2.1 既有变形规律分析

为充分掌握老滑坡复活变形规律,调查其现状变形特征,其中未复活的老滑坡范围未见明显变形特征,既有变形多在复活体范围内。在复活体范围内,沿滑坡主滑面共布设了 4 个变形监测点,具体位置见图 2。在滑坡变形监测过程中,共得到 45 期数据,监测频率为 2 d 监测 1 次;根据监测结果,复活体变形曲线见图 3。由图 3 可知,复活体累计变形呈持续增加特征,其中 JC1、JC2、JC3、JC4 监测点的累计变形分别达 114.13、191.07、224.78、135.99 mm。

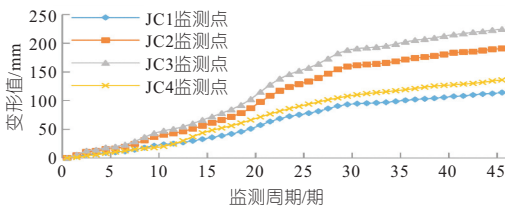


图 3 复活体累计变形曲线

Fig. 3 Accumulated deformation curve of resuscitator

各监测点的变形速率曲线见图 4。由图 4 可知,4 个监测点的变形速率呈波动起伏特征,除 JC4 监测点外,其余 3 个监测点的变化特征较为一致,且在本次监测时间范围内,中期时段的变形速率相对较大,后期时段的变形速率相对略小。

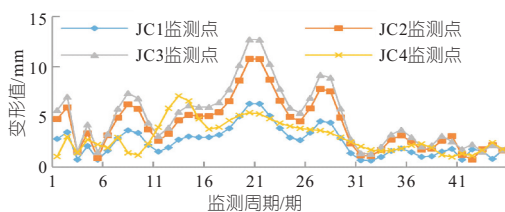


图 4 复活体变形速率曲线

Fig. 4 Resuscitator deformation rate curve

老滑坡复活体的变形特征显著,尤其以复活体中部变形更为突出,说明老滑坡复活对区内居民的威胁相对较大,侧面说明开展其研究十分

必要。

3.2.2 变形数据分离结果分析

利用 GA-Kalman 滤波开展滑坡变形数据的分离处理,由于数据分离模型的构建过程具有多阶段组合优化特征,为充分验证 GA-Kalman 滤波的有效性,提出对多类 Kalman 滤波的分离效果进行对比分析,具体分类设定为分离模型 1(标准型 Kalman 滤波)、分离模型 2(半参数型 Kalman 滤波)、分离模型 3(自适应型 Kalman 滤波)、分离模型 4(GA-Kalman 滤波)。

统计计算结果,得到 4 类分离模型的结果:①标准型 Kalman 滤波的 d_{dnSNR} 值为 40.58;②半参数型 Kalman 滤波的 d_{dnSNR} 值为 32.68;③自适应型 Kalman 滤波的 d_{dnSNR} 值为 35.28;④GA-Kalman 滤波的 d_{dnSNR} 值为 28.44。四者对比,GA-Kalman 滤波的 d_{dnSNR} 值相对最小,说明其分离效果相对最优。因此,利用其将滑坡变形数据分离为真实变形信号和随机噪声信号。

3.2.3 后续变形特征分析

利用分离处理后的滑坡变形数据开展滑坡变形预测研究,考虑到真实变形信号的预测模型由多种方法组合而成,为进一步验证组合过程的有效性,提出以 JC1 监测点为例,分析不同预测模型在真实变形信号中的预测效果,结果见表 1。根据表 1,从 GM(1,1)模型→DGM(1,1)模型→FDGM(1,1)模型→PFDGM(1,1)模型,在相应验证节点处的相对误差值均呈减小趋势,但减小幅度存在一定差异;同时,以相对误差为评价指标,对各模型预测结果的特征参数进行统计,结果表明 GM(1,1)模型、DGM(1,1)模型、FDGM(1,1)模型、PFDGM(1,1)模型的相对误差均值分别为 3.39%、3.06%、2.60%、2.29%,训练时间分别为 276.35、228.49、202.94、176.55 ms。由此得出 PFDGM(1,1)模型在真实变形信号中具有良好预测效果,且在构建过程中逐步组合,不仅能有效提高预测精度,还能有效提升收敛速率,验证了各组合优化过程的有效性。

表 1 JC1 监测点真实变形信号的预测结果

Tab. 1 Prediction results of real deformation signals at JC1 monitoring point

监测周 期/期	变形值 /mm	GM(1,1)模型		DGM(1,1)模型		FDGM(1,1)模型		PFDGM(1,1)模型	
		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/%
40	104.22	100.80	3.28	100.99	3.10	101.39	2.72	101.82	2.30
41	105.07	101.40	3.49	101.85	3.06	102.44	2.50	102.67	2.28
42	107.35	103.81	3.30	104.20	2.93	104.68	2.49	105.02	2.17
43	108.47	104.66	3.51	105.06	3.14	105.56	2.68	105.80	2.46
44	109.58	105.83	3.42	106.26	3.03	106.74	2.59	106.96	2.39
45	110.26	106.61	3.31	106.83	3.11	107.39	2.60	107.89	2.15

在 JC1 监测点真实变形信号预测基础上,利用 AR 模型进行补充预测,得到 JC1 监测点的最终预测结果见表 2。由表 2 可知,最终预测结果的相对误差范围为 1.96%~2.10%,均值为 2.03%,训练时间为 124.66 ms,相较真实变形信号的预测结果,预测精度及训练速度均有所提高,验证了 AR 模型对随机噪声信号的预测效果。

表 2 JC1 监测点的最终预测结果

Tab. 2 Final prediction results of JC1 monitoring point

监测周 期/期	变形值 /mm	分项预测结果		最终预测结果	
		真实分量 预测值/mm	噪声分量 预测值/mm	预测值 /mm	相对误 差/%
40	107.53	101.82	3.54	105.37	2.01
41	108.26	102.67	3.43	106.11	1.99
42	110.02	105.02	2.69	107.71	2.10
43	111.64	105.80	3.65	109.45	1.96
44	112.45	106.96	3.17	110.13	2.06
45	114.13	107.89	3.87	111.76	2.08

类比 JC1 监测点的预测过程,再对其余监测点进行预测,结果见表 3。由表 3 可知,JC1、JC2、JC3、JC4 监测点的相对误差分别为 2.03%、

表 3 所有监测点的预测结果

Tab. 3 Prediction results of all monitoring points

监测周 期/期	JC1 监测点预测结果			JC2 监测点预测结果			JC3 监测点预测结果			JC4 监测点预测结果		
	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/%
40	107.53	105.37	2.01	183.49	179.86	1.98	215.33	210.77	2.12	127.63	125.04	2.03
41	108.26	106.11	1.99	184.69	180.74	2.14	217.11	213.01	1.89	128.97	126.29	2.08
42	110.02	107.71	2.10	185.44	181.58	2.08	219.36	215.04	1.97	130.10	127.63	1.90
43	111.64	109.45	1.96	187.22	183.46	2.01	220.89	216.34	2.06	131.78	129.00	2.11
44	112.45	110.13	2.06	189.40	185.52	2.05	223.07	218.59	2.01	134.21	131.46	2.05
45	114.13	111.76	2.08	191.07	187.06	2.10	224.78	220.28	2.00	135.99	133.22	2.04
46		113.52			188.25			221.46			135.06	
47		115.67			189.87			222.76			136.24	
48		116.08			191.03			224.01			137.11	
49		116.22			193.54			228.37			137.85	

综上所述,老滑坡复活体的累计变形仍会进一步增加,且局部位置并无收敛趋势,增加速率还趋于增大,因此切实开展老滑坡复活体治理的必要性显著。

4 结论

a. 老滑坡复活影响因素相对较多,主要包括坡体结构、地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水与降雨入渗、前缘沟道侵蚀及人类活动等因素,其复活过程是在多种因素耦合作用下产生的,并非单一因素作用的结果。

b. 老滑坡复活体的变形特征显著,分析预测结果,得出复活体的累计变形仍会进一步增加,且复活体中部位置的变形并无收敛趋势,变形速率还趋于增大,稳定性还会趋于减弱。

2.06%、2.01%、2.04%、训练时间分别为 124.66、135.06、120.88、124.87 ms。

综上所述,4 个监测点的预测效果相当,验证了 PFDGM(1,1)-AR 模型在滑坡变形预测中具有良好的预测精度及收敛速度。同时,46~49 期的外推预测显示,4 个监测点的累计变形仍会进一步增加。

为进一步掌握滑坡后续变形规律,对实测结果中后 4 周期的速率均值 V_1 和外推预测 4 周期的预测速率均值 V_2 进行统计,结果表明 JC1、JC2、JC3、JC4 监测点 V_1 速率分别为 1.41、1.58、1.82、1.73 mm/期, V_2 速率分别为 1.12、1.62、2.02、1.16 mm/期。可见 4 个监测点的 V_1 、 V_2 速率均存在一定差异,其中 JC1、JC4 监测点的 V_2 速率相对更小,说明后续累计变形趋于收敛方向发展;其余 2 个监测的 V_2 速率相对更大,说明其累计变形并无收敛特征,且结合各监测点的平面位置,得出老滑坡复活体中部的后续变形强于后缘和前缘变形。

参考文献:

- [1] 钟雨田. 汶川县砂槽头老滑坡复活机理及稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [2] 沈永东. 合阳县北郭村黄土滑坡特征及其复活成因探究[D]. 西安:西北大学,2021.
- [3] 尚彦军,金维浚,伊学涛,等. 新源县加朗普特特大型滑坡地质结构探测及老滑坡影响综合研究[J]. 工程地质学报,2022,30(3):760-771.
- [4] 宋琨,陈伦怡,刘艺梁,等. 降雨诱发深层老滑坡复活变形的动态作用机制[J]. 地球科学,2022,47(10):3665-3676.
- [5] 冯文凯,顿佳伟,易小宇,等. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析[J]. 工程地质学报,2020,28(2):384-393.
- [6] 黄金勇,陈志伟,沈艺璇. 库水位下降速率对库岸老

