DOI：10.16285/j.rsm.2017.12.035

基于滑坡等速变形速率的临滑预报判据研究

王 珣，李 刚，刘 勇，伏 坤

（中国中铁二院工程集团有限责任公司，四川 成都 610031）

摘 要：前人根据滑坡的变形监测曲线，分别提出了以位移速率、位移切线角、改进切线角等参数作为滑坡预警判据的方法，但因滑坡个性特征差异明显，采用统一固定判据是不充分的。在改进切线角和岩土体材料蠕变强度特征点的基础上，提出了 *T-t* 曲线转换的适用范围。以西原模型为基础，研究了蠕变参数在等速变形阶段发展至恒定值或稳定值，等速变形速率可看作滑坡蠕变过程中各参数的综合外在表现，与临滑切线角存在相关性，并呈反比关系。通过对 16 个典型蠕变滑坡进行阶段划分和 *T-t* 曲线转换，获得滑坡等速变形速率和临滑切线角，并建立两者之间关系，相关系数较高，同时结合未破坏滑坡变形过程的最大切线角，以下限作为滑坡预警判据，保证了预测预报的可靠度。

关 键 词：滑坡；等速变形速率；西原模型；临滑切线角；预报判据

中图分类号：TU 42 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 12－3670－10

Critical sliding prediction criterion of landslide based on constant deformation rate

WANG Xun, LI Gang, LIU Yong, FU Kun

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Based on the monitoring curves of landslide deformation, the early warning criteria are established separately by previous researchers according to the parameters such as the displacement rate, displacement tangent angle, and improved tangle angle. However, the uniformly fixed criterion is not sufficient for the early warning of the landslide, due to the significant differences in the characteristics of landslides. The applicable range of *Time-time* curve conversion was obtained by considering the improved tangential angle and the characteristic of creep strength. This study also analysed the developments of creep parameters during the constant velocity deformation stage, until reaching the constant or steady values by using the Nishihara model. The constant deformation rate can be regarded as a comprehensive external performance of the parameters in the creep process of the landslide. Moreover, it was inversely related to critical sliding tangential angle. The constant deformation rate and critical sliding tangential angle were obtained by dividing the stages and conversing *Time-time* curve of 16 typical graded landslides. There was a high correlation between them. By combing with the maximum tangential angle of the undisturbed landslide deformation process, the lower limit was used as the criterion of landslide warning to ensure the reliability of forecasting.

Keywords: landslide; constant deformation rate; Nishihara model; critical sliding tangential angle; prediction criteria

1 引 言

滑坡作为一种自然地质灾害，常常对人类的生命财产安全带来较大的危害。为减少滑坡灾害带来的严重危害，科学准确地预测预报是关键。滑坡变形演化的预测预报模型和判据研究是滑坡成功预报的关键，也是滑坡预测预报的核心。

目前国内外学者提出了不少于 40 种滑坡预报模型、方法及一系列预报判据，并且也有成功预报的实例。但由于滑坡赋存的地质环境条件不同，在

收稿日期：2017-03-10
基金项目：国家重点研发计划（No.2016YFC0802200）；四川省科技支撑计划（No.2013GZ0147）。
This work was supported by the National Key Research and Development Project (2016YFC0802200) and the Sichuan Science and Technology Support Project (2013GZ0147).
第一作者简介：王珣，男，1981 年生，硕士，高级工程师，主要从事岩土工程监测技术方面的研究工作。E-mail: 49481181@qq.com
通讯作者：李刚，男，1983 年生，博士，工程师，主要从事岩土工程监测技术方面的研究工作。E-mail: 32336847@qq.com

整个时空变形演化过程中存在明显的差异，表现出不同的变形破坏形式和特征，个性特征明显[1]。而现行的预报模型主要基于单一滑坡的变形监测数据建立，无法全面地考虑滑坡的特征，从而导致大量的预报模型、方法和预报判据不能对滑坡的变形演化行为和具体的滑坡发生时间作出准确的预报，其适用性和预报的准确性是不言而喻的。

近年来，许多学者针对某一类型的滑坡提出了临滑预报判据预警预报模型，并取得了一定的成果。代表性的有王家鼎等[2]根据蠕变型滑坡累计位移-时间曲线（以下简称 *S-t* 曲线）特征，提出了临滑切线角判据，范围值为 89°～89.5°。滑坡 ε-*t* 曲线在不同量纲坐标系下，切线角差异较大，因此，该条件下制定的滑坡预报判据是不严密的。许强等[3]对渐进型滑坡 ε-*t* 曲线进行纵、横坐标同量纲化坐标转换，进而利用改进的切线角，提出了滑坡加速变形阶段进一步细分的定量划分标准和滑坡临滑预警判据。从宏观的角度划分等速变形阶段和计算等速变形速率，受人为因素的影响，势必会造成相同临滑预警判据（改进切线角大于 85°）对应的临滑预警时间不同。王立伟等[4]基于典型滑坡累积位移-时间曲线特征，提出了采用位移速率比作为通用指标来判定滑坡上各点变形阶段的方法。王延平等[5]依据秦四清的锁固段理论以及速度倒数法滑坡预警模型分析流变试验曲线中速度阶跃点与破坏点变形特征的相似性，推断用早期位移曲线中的阶跃点变形特征确定失稳破坏时的预警模型参数的可行性。基于前人对滑坡临滑切线角的研究，部分滑坡从宏观判断已经完全进入临滑阶段的滑坡，对应改进切线角未必达到临滑预警值，可能降低预报的准确率。即使对同一滑坡体上不同位置的监测点，其发生破坏时各个监测点的变形速率也相差很大，对应的临滑切线角也不尽相同，因此，采用固定的临滑切线角阀值是不充分的。

鉴于目前的研究现状，本文将重点在 ε-*t* 曲线的基础上，对以等速速率转换后的时间-时间曲线（以下简称改进 *T-t* 曲线）的适用条件及范围进行研究。由西原模型知，蠕变参数在等速变形阶段发展至恒定值或稳定值，等速变形速率可看作滑坡蠕变过程中各参数的综合外在表现。滑坡发生过程中均对应惟一的等速速率和临滑切线角，并存在较强的相关性，采用优定斜率法对 16 个已破坏蠕变型滑坡进行临滑切线角分析，并结合 22 个未破坏滑坡变形过程的最大切线角，提出以破坏滑坡临滑切线角下限值作为临滑预警判据。以某黄土滑坡的实际监测资料为例，进行滑坡临滑预报，以验证该方法的科学性和合理性。

2　滑坡改进 *T-t* 曲线适用性研究

2.1　蠕变特征分析

岩土体室内流变试验是了解其流变力学特性的主要手段，试验结果可以揭示其在不同应力水平条件下的流变力学属性，为建立合适的流变本构模型提供有关流变参数。自 20 世纪 50 年代末以来，我国学者为对岩石力学基本特征进行了研究，开展了大量的岩石流变力学试验，涵盖了硬岩、软岩、节理发育的硬岩和软弱夹层等方面的流变试验资料。郭志[6]论述了岩体软弱夹层充填物的流变变形特性，根据流变过程曲线分析了初始流变与等速流变之间的关系，并指出软弱夹层的临界等速流变变形始终存在，还提出一种临界等速流变剪切应力的确定方法。李永盛[7]分别对大理岩、红砂岩、粉砂岩和泥岩 4 种不同强度的岩石材料进行了单轴压缩条件下的蠕变试验，指出岩石材料随时间增长在不同应力水平条件下一般都会出现蠕变速率减小、稳定和增长 3 大变化阶段，并建立旨在描述岩石材料应力-应变-时间的非线性本构方程。杨淑碧等[8]对砂岩和泥岩的流变特性进行了系统的流变试验研究认为，岩体的流变特性主要受岩性和风化程度控制，砂岩较泥岩的长期强度高。

在恒定应力作用下，岩土体材料一般出现初始、等速和加速变形阶段（见图 1，图中，ε 为累计变形量；$\dot{\varepsilon}$ 为变形速率；$\ddot{\varepsilon}$ 为变形加速度），但各阶段出现与否及其延续时间，则与物质组成和施加的应力水平有关。低强度的软岩和软弱结构面最容易产生流变。相同岩土体材料随施加应力水平的增加，应变速率和应变大小均逐渐增大（见图 2，图中，*t* 为时间；σ_i 为相同材料施加应力荷载）。

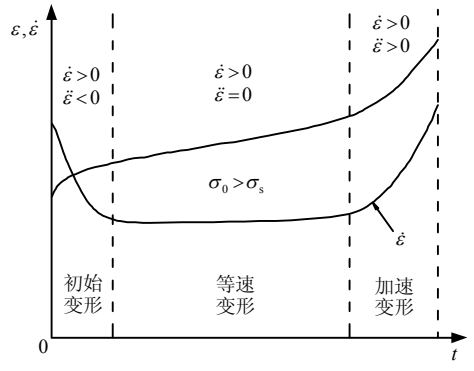


图 1　典型滑坡蠕变特征曲线

Fig.1　Creep characteristic curves of typical graded landslide

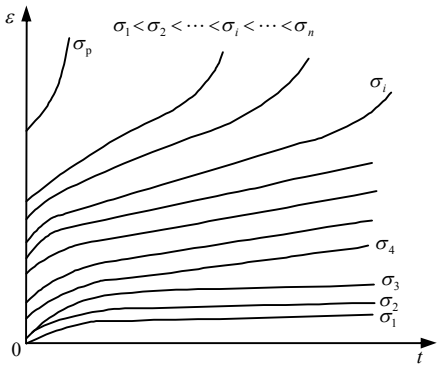


图 2 不同荷载条件下蠕变与时间关系

Fig.2 Relationships between rheological deformation and time under different stresses

2.2 改进切线角

滑坡表面位移能很好地反应岩土体的变形破坏特征，是滑坡变形的外在表现，滑坡位移监测作为滑坡稳定性评价的一个重要手段，在评价滑坡稳定性及其发展趋势、预警预报等方面有着重要的意义。

位移切线角是指 ε-t 曲线中，某一时刻变形曲线的切线与横坐标之间的夹角，其实质就是位移-时间曲线上某一时刻用角度表示的曲线斜率。若将监测 ε-t 曲线纵、横坐标单位固定为 mm 和 d，通过大量滑坡统计获得临滑位移切线角范围为 63°～90°，位移切线角跨度大。另若时间-位移曲线纵、横坐标量纲不同，可能导致同一滑坡曲线坐标在不同尺度下获得的位移切线角不同。为统一量纲，采用滑坡等速变形速率对 ε-t 曲线进行转换，确保等速阶段的切线角为 45°，并提出以改进切线角来判定滑坡进入加速变形阶段的时间[9]。

ε-t 曲线转换为 T-t 曲线公式为

$$T(i)=\frac{\Delta\varepsilon(i)}{\dot{\varepsilon}_0} \tag{1}$$

式中：$\Delta\varepsilon(i)$ 为某一单位时间段（一般采用一个监测周期，如 1 d、1 周、1 h 等）内滑坡位移的变化量；$\dot{\varepsilon}_0$ 为等速变形阶段的变形速率；$T(i)$ 为变换后与时间相同量纲的纵坐标值。

根据 T-t 曲线，可以得到改进的切线角 α_i [9]的表达式为

$$\alpha_i=\arctan\frac{T(i)-T(i-1)}{t_i-t_{i-1}}=\arctan\frac{\Delta T}{\Delta t} \tag{2}$$

式中：α_i 为改进的切线角；t_i 为某一监测时刻，ΔT 为与式（1）计算 $\Delta\varepsilon$ 时对应的单位时间段（一般采用一个监测周期）；ΔT 为单位时间段内 $T(i)$ 的变化量。

2.3 改进 *T-t* 曲线适用范围

改进 T-t 曲线以滑坡等速变形速率作为恒定量值，对 ε-t 曲线坐标轴进行等量纲处理，结果保证了等速变形阶段曲线切线角为 45° 左右，前提条件是蠕变变形过程出现等速变形阶段。在不同应力条件下，岩土体材料所产生的蠕变过程和流变速度是不一样的，且等速变形阶段是蠕变的主要部分，研究等速变形速率的影响规律对滑坡的预警预报显得十分重要，有必要对改进切线角转换的适用范围进行研究。郭志[10]通过分析软岩流变特征找出流变速度与作用荷载之间的关系。根据特征点的变化规律确定临界等速流变应力的方法和流变强度取值原则。杨圣奇[11]对泥板岩开展了剪切流变试验，得出等速变形速率与剪应力可以用幂律关系来表征。且同剪应力水平下，正应力水平越小，岩石的等速变形速率越大。

在恒定正应力水平条件下，等速变形速率与剪应力之间的关系为

$$\dot{\varepsilon}_0=a\tau^{\mathrm{b}} \tag{3}$$

式中：τ 为剪应力；a 和 b 为岩土体材料参数。

图 3 为某泥岩在多级荷载下，各级剪应力与稳态蠕变速率的关系图。通过对蠕变过程分析，得到蠕变不同阶段特征应力点，并根据摩尔-库仑判据求出各特征点（初始蠕变起点、等速蠕变起始点、加速蠕变起始点、蠕变破坏点）的流变强度的表达式：

$$\tau_i=c_i\sigma_n+d_i \tag{4}$$

式中：$\tau_i(i=1,2,3,4)$ 为各特征点的蠕变强度；$\sigma_n(nj=1,2,\cdots)$ 为施加的正应力；$c_i(i=1,2,3,4)$ 和 $d_i(i=1,2,3,4)$ 为岩土体材料参数。

由蠕变过程可知，τ_1 为初始蠕变强度，当剪应力 $\tau\geqslant\tau_1$ 时，岩土体进入蠕变变形过程，变形速率随时间逐渐减小并趋于恒定，属于稳定蠕变型；τ_2 为等速蠕变强度，当 $\tau\geqslant\tau_2$ 时，岩土体在经过初始变形后，可发展至等速变形阶段，等速变形速率随剪应力的增大呈非线性增加。τ_3 为加速蠕变强度，当 $\tau\geqslant\tau_3$ 时，岩土体在经过前 2 个变形阶段后，变形过程可发展到加速变形阶段直至破坏。τ_4 为瞬时破坏强度，当 $\tau\geqslant\tau_4$ 时，材料在很短的时间内发生破坏，各变形阶段的发展较难区分，属于突发型。

综上可知，根据室内试验获得岩土体材料的蠕变强度特征点及 38 个滑坡监测数据（具有蠕变型的 16 个典型已破坏滑坡（如斋藤试验滑坡、白山别当谷滑坡等）和 22 个未破坏滑坡（如白水河滑坡、八

字门滑坡等），提出了 *T-t* 曲线转换的适用范围为：剪应力大于等速蠕变强度和小于瞬时破坏强度的蠕变型滑坡，见图 3、表 1。

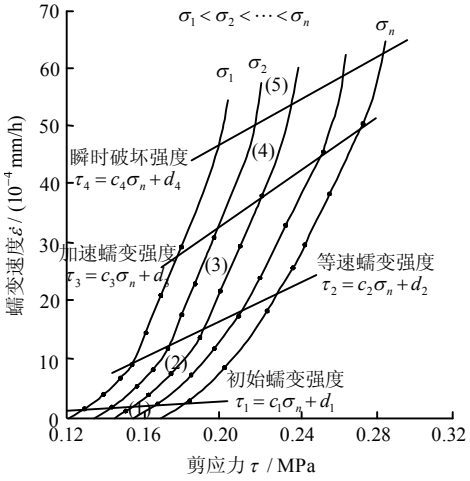


图 3　某泥岩剪流变 $\dot{\varepsilon}$-τ 的关系

Fig.3　Relationship curves between $\dot{\varepsilon}$ and τ of a certain mudstone

表 1　滑坡改进切线角适用范围

Table 1　Landslide improvement tangent angle conditions

编号	应力条件	是否适用	对应滑坡类型
(1)	$\tau<\tau_c$	否	稳定滑坡
(2)	$\tau_c\leqslant\tau<\tau_d$	否	稳定蠕变型
(3)	$\tau_d\leqslant\tau<\tau_j$	是	蠕变型
(4)	$\tau_j\leqslant\tau<\tau_s$	是	蠕变型
(5)	$\tau>\tau_s$		

注：τ 为剪应力；τ_c 为蠕变下限；τ_d 为等速蠕变强度；τ_j 为加速蠕变强度；τ_s 为瞬时破坏强度。

3　滑坡临滑判据研究

在滑坡监测评估的实际工作中，常常会遇到根据同一信息得到不同判断结果的情况，这往往是滑坡固定临滑判据不具有普适性造成的。本文采用改进 *T-t* 曲线对滑坡进行位移监测评估，采用这一手段研究蠕变型滑坡位移场的动态变化。由于滑坡变形速率受滑坡体物质组成、变形破坏类型以及外界诱发因素影响，其形态各异，但各滑坡均对应惟一的等速变形速率和改进临滑切线角。由西原模型知，岩土体材料的蠕变特征由蠕变参数决定，蠕变参数的变化受应力、时间及外部条件等因素影响。除黏塑性黏滞系数外，其他参数由材料特性或在蠕变等速变形阶段确定为恒定值（稳定值）。由三维西原公式转化后改进切线角公式可知，临滑改进切线角为材料特征确定的参数常量 K、G_0、σ_s 和等速变形阶段恒定的参数 $\dot{\varepsilon}_0$、G_1、η_1 的时间函数。在蠕变过程中，等速速率 $\dot{\varepsilon}_0$ 可看作滑坡蠕变过程中各参数的综合外在表现，可通过监测数据获得，改进临滑切线角可在破坏阶段确定，两者之间存在一定的相关性。

依前人经验公式和模型对滑坡进行预警预报，较难准确地获得滑坡的蠕变参数，可能存在误报漏报的可能。为此，需要普适的预报模型通过较容易获得的监测数据对滑坡进行预警预报。本文通过对 16 个典型蠕变型滑坡的 ε-t 曲线进行阶段划分和 *T-t* 转换，获得各滑坡等速变形阶段的变形速率和对应临滑阶段的改进临滑切线角。通过拟合发现，两者之间有着很好的相关性，并呈现线性减小的趋势。为保证滑坡预警的可靠度，减少误报和漏报的情况，依据等速变形速率与临滑阶段改进切线角相关性，采用优定斜率法获得已破坏滑坡的临滑切线角下限值，以下限值作为滑坡临滑预警判据的建议值。

3.1　临滑切线角与等速变形速率的关系

岩土体材料的蠕变具有明显的非线性特征，在蠕变模型中考虑蠕变参数随应力、时间等因素而变化是解决非线性蠕变问题的方法之一。已有的试验证实，应力、时间及渗流等外部条件会引起岩土体某些参数的改变，因此，将蠕变参数视为变量符合岩石材料的本质属性。孙钧[12]提出：将黏滞系数 η 视为非定常的变数值， 由试验确定，再进行非线性流变本构关系的分析计算。阎岩等[13]以西原模型（见图 4）为基础，通过试验获得各蠕变参数与应力及时间的表达式，进而得到变参数的蠕变方程。

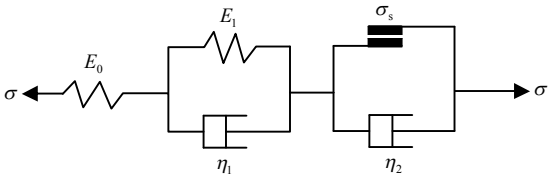


图 4　西原模型

Fig.4　Nishihara model

三维黏弹塑性蠕变方程为

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{ij}&=\frac{\sigma_m}{3K}+\frac{S_{ij}}{2G_0}+\frac{S_{ij}}{2G_1}\left(1-\exp(-\frac{G_1}{\eta_1}t)\right),\ S_{ij}\leqslant\sigma_s\\ \varepsilon_{ij}&=\frac{\sigma_m}{3K}+\frac{S_{ij}}{2G_0}+\frac{S_{ij}}{2G_1}\left(1-\exp(-\frac{G_1}{\eta_1}t)\right)+\\ &\quad\frac{S_{ij}-\sigma_s}{2\eta_2}t,\ S_{ij}>\sigma_s\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

式中：K 为体积模量；G_0 为瞬时变形模量；G_1 为黏弹性模量；σ_m 为球应力张量；S_{ij} 为偏应力张量；η_1 为黏弹性黏滞系数；η_2 为黏塑性黏滞系数；σ_s 为岩土体长期强度。

由试验证实[13]，试件的 K、σ_{m}、S_{ij} 和 σ_{s} 由材料特性及应力条件决定。G_0 不随时间发生变化，主要决定于瞬时应变。G_1 决定减速蠕变阶段的变形量，此阶段的蠕变曲线为衰减型，应变逐渐增大到某个值就基本保持恒定，在不同应力作用下 G_1 随时间不断减小到某个值后基本保持稳定。对于衰减型蠕变，η_1 决定蠕变达到稳定阶段时间的长短；对于非衰减型蠕变，η_1 影响蠕变进入稳定或加速阶段的快慢。η_1 的变化只影响蠕变达到稳定阶段的时间，不影响最终总变形量，并随时间增大到某一定值。η_2 决定非衰减蠕变，即等速蠕变和加速蠕变。若偏应力略大于 σ_{s} 或时间较短时，仅有等速蠕变产生；若偏应力大于 σ_{s} 较多或时间较长时，等速蠕变会转变为加速蠕变。在蠕变变形前两个阶段，η_2 会随时间增长，在加速蠕变阶段，η_2 则会有明显的降低。

由于滑坡变形速率受滑坡体物质组成、变形破坏类型以及外界诱发因素影响，实际上大多数情况下的位移历时曲线都具有不同程度的波动和起伏，其形态各异，主要取决于坡体荷载条件和滑面长期强度。岩土体承受的应力一旦超过了长期强度，则将进入累进性破坏阶段，它相当于岩土体的加速变形阶段。

依据三维西原模型，对变形表达式求导，得到变形速率的表达式为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_{ij}=&\left(\frac{\sigma_{\mathrm{m}}}{3K}\right)'+\left(\frac{S_{ij}}{2G_0}\right)'+\frac{S_{ij}}{2G_1}\left(1-\exp(-\frac{G_1}{\eta_1}t)\right)'+\\&\left(\frac{S_{ij}-\sigma_{\mathrm{s}}}{2\eta_2}t\right)',\ S_{ij}>\sigma_{\mathrm{s}}\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

对于单一蠕变型滑坡来讲，K、G_0、G_1、σ_{m}、偏应力张量（下滑力）S_{ij} 及 σ_{s} 6 个蠕变参数可看作固定值（常数值），式（6）可进一步转化为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_{ij}=&\frac{S_{ij}}{2\eta_1}\exp(-\frac{G_1}{\eta_1}t)+\frac{S_{ij}-\sigma_{\mathrm{s}}}{2\eta_2}\\&S_{ij}>\sigma_{\mathrm{s}}\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

η_2 的表达式为

$$\left.\begin{aligned}\eta_2=&\frac{S_{ij}-\sigma_{\mathrm{s}}}{2\left(\dot{\varepsilon}_{ij}-\dfrac{S_{ij}}{2\eta_1}\exp(-\dfrac{G_1}{\eta_1}t)\right)}\\&S_{ij}>\sigma_{\mathrm{s}}\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

蠕变型滑坡进入等速阶段后，变形速率为一恒定值，η_1 增大到一定值即保持稳定。由式（8）可知，η_2 可看作时间的减函数，随时间呈非线性减小。由蠕变方程式（5）可知，进入加速阶段后，黏塑性应变与 η_2 及 t 有关，并随时间呈非线性增大。

假设蠕变曲线监测单位时间为 Δt，等速变形阶段的变形速率为 $\dot{\varepsilon}_0$，取任意 3 个时间点：$t-\Delta t$、t、$t+\Delta t$。由式（1）、（2）、（5）得到 *T-t* 转换曲线的表达式为

$$\left.\begin{aligned}T(t)=&\\&\frac{\dfrac{S_{ij}}{2G_1}\left[\exp\left(-\dfrac{G_1}{\eta_1}t\right)-\exp\left(-\dfrac{G_1}{\eta_1}(t+\Delta t)\right)+\dfrac{S_{ij}-\sigma_{\mathrm{s}}}{2\eta_2}\Delta t\right]}{\dot{\varepsilon}_0}\\&S_{ij}>\sigma_{\mathrm{s}}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

改进切线角的表达式为

$$\left.\begin{aligned}\alpha_{\mathrm{t}}=&\arctan\frac{T(t)-T(t-\Delta t)}{\dot{\varepsilon}_0}\\&S_{ij}>\sigma_{\mathrm{s}}\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

把式（9）带入式（10）得

$$\left.\begin{aligned}\alpha_{\mathrm{t}}=&\arctan\\&\frac{\dfrac{S_{ij}}{2G_1}\left\{\exp\left(-\dfrac{G_1}{\eta_1}t\right)\left[2-\exp\left(-\dfrac{G_1}{\eta_1}\Delta t\right)-\exp\left(\dfrac{G_1}{\eta_1}\Delta t\right)\right]\right\}}{\dot{\varepsilon}_0\Delta t}\\&S_{ij}>\sigma_{\mathrm{s}}\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

若滑坡变形破坏时间（临滑时间）为 t_{Max}，则临滑切线角 α_{Max} 可由式（9）获得：

$$\left.\begin{aligned}\alpha_{\mathrm{Max}}=&\arctan\frac{\dfrac{S_{ij}}{2G_1}\left\{\exp\left(-\dfrac{G_1}{\eta_1}t_{\mathrm{Max}}\right)\left[2-\exp\left(-\dfrac{G_1}{\eta_1}\Delta t\right)-\exp\left(\dfrac{G_1}{\eta_1}\Delta t\right)\right]\right\}}{\dot{\varepsilon}_0\Delta t}\\&S_{ij}>\sigma_{\mathrm{s}}\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

通过蠕变型滑坡的变形破坏过程可知，滑坡的蠕变参数 K、G_0、σ_s 由滑带的物质组成决定，G_1、η_1 在滑坡进入等速阶段基本处于稳定值。因此，等速速率 $\dot{\varepsilon}_0$ 可看作滑坡蠕变过程中各参数的综合外在表现。由临滑切线角表达式（12）可知，滑坡的临滑切线角 α_1 与等速变形阶段的蠕变参数有着较强的相关性，即 α_{Max} 与 $\dot{\varepsilon}_0$ 相关。

综上可知，蠕变参数在等速变形阶段发展至一恒定值或稳定值，等速速率 $\dot{\varepsilon}_0$ 可看作滑坡蠕变过程中各参数的综合外在表现，与临滑切线角存在相关性，并呈反比关系。

3.2　蠕变型滑坡临滑切线角与等速速率的相关性

由西原模型和 ε-t 曲线可知，各滑坡在外界条件不变的情况下，均对应惟一的等速变形速率（临界速率）和临滑切线角，下面对 16 个典型蠕变型滑坡进行阶段划分和 T-t 转换，分别获得各滑坡的等速变形速率和改进临滑切线角，结果见表 2。

由于滑坡体特征和外界影响因素等不同，滑坡

表 2　16 个典型蠕变型滑坡阶段划分、等速变形速率及临滑改进切线角统计表

Table 2　16 typical progressive landslides phases, constant deformation rate and improved critical sliding tangential angle tables

编号	滑坡名称	滑坡类型	滑坡各阶段划分/ d			等速变形速率	临滑阶段 T-t 切线角
			初始变形	等速变形	加速变形	/(mm/d)	/(°)
1	斋藤试验[14]	黏土滑坡	0～94	94～334	334～435	0.21	83.50
2	宝成铁路[15]	堆积土滑坡	0～90	90～288	288～399	0.53	78.20
3	天荒坪开关站[16]	岩质滑坡		0～202	202～527	0.12	86.50
4	鸡鸣寺[17]	顺层基岩滑坡	0～132	132～380	380～466	0.18	85.80
5	金川露天矿[18]	反倾岩质滑坡		0～372	372～571	0.64	78.40
6	大冶铁矿[20]	岩质滑坡	0～52	52～212	212～409	0.61	77.70
7	黄茨[18][19]	基覆滑坡		0～290	290～544	0.41	81.60
8	智利[21]			0～248	248～586	0.06	87.40
9	白山别当谷(日本)[22]			0～71	71～113	0.17	84.79
10	卧龙寺[23]	黄土滑坡		0～30	30～66	0.14	87.40
11	Koronowo(波兰)[24]		0～94	94～288	288～714	0.02	85.70
12	洒勒山[25]	岩质滑坡	14～24	24～39	39～64	0.35	83.00
13	Runion 美国[26]			0～1 333	1 333～1 390	0.66	79.90
14	Innertkirchen(瑞士)[27]	岩质滑坡		0～2 541	2 541～3 467	0.08	87.30
15	委内瑞拉高架桥[27]	土石混合体滑坡		0～6 361	6 361～14 105	0.37	82.07
16	意大利瓦伊昂[28]	岩质滑坡		0～470	470～1 100	0.65	77.70

各阶段的时长、等速变形速率及临滑阶段改进切线角存在明显的差异。等速变形速率为 0.06～0.66 mm/d，平均值为 0.31 mm/d，临滑改进切线角范围在 77.7°～87.4° 之间，跨度范围较大。等速变形速率越大对应的临滑切线角反而小，呈现线性减小的趋势，通过拟合发现，两者之间有着很好的相关性，相关系数达到了 0.914，见图 5。

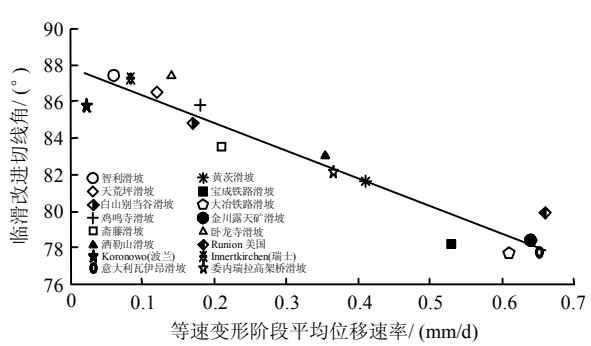


图 5　16 个典型滑坡等速变形速率与临滑切线角关系图

Fig.5　Relation chart of constant deformaton rate and critical sliding tangential angle of 16 landslides

根据以上分析，可以对蠕变型滑坡在确定等速变形阶段后采用拟合公式计算出滑坡可能发生时的临滑切线角，公式如下：

$$\alpha_{Max} = -15.10\dot{\varepsilon}_0 + 87.85 \qquad (13)$$

式中：α_{Max} 为蠕变型滑坡临滑切线角；$\dot{\varepsilon}_0$ 为等速变形阶段的变形速率。

通过式（13）可知，临滑改进切线角主要是由等速变形速率决定的，等速变形速率是各蠕变参数的综合反应，依滑坡的等速变形速率计算出该滑坡的临滑切线角值。

3.3　滑坡预警判据的提出

由于滑坡个性特征，采用固定的临滑切线角作为临滑预警判据，势必会产生误报或漏报的情况。为减少滑坡误报带来的损失，滑坡临滑判据的提出要具有较好的可靠度。

本文对 16 个已破坏滑坡（如斋藤试验滑坡、白山别当谷滑坡等）（见表 2）的临滑切线角、22 个未破坏滑坡（如白水河滑坡、八字门滑坡等）的最大

切线角及等速变形速率进行统计，见图 6。采用优定斜率法求得已破坏滑坡临滑切线角的下限公式为

$$\alpha_{\mathrm{Max}} = -15.10\dot{\varepsilon}_0 + 86.03 \quad (14)$$

未破坏滑坡的最大切线角均位于临滑切线角下限下部，截距差值在 5.89 以上。可以采用临滑切线角下限值作为滑坡预警判据的建议值，既防止已破坏滑坡漏报，又避免未破坏滑坡误报的情况。

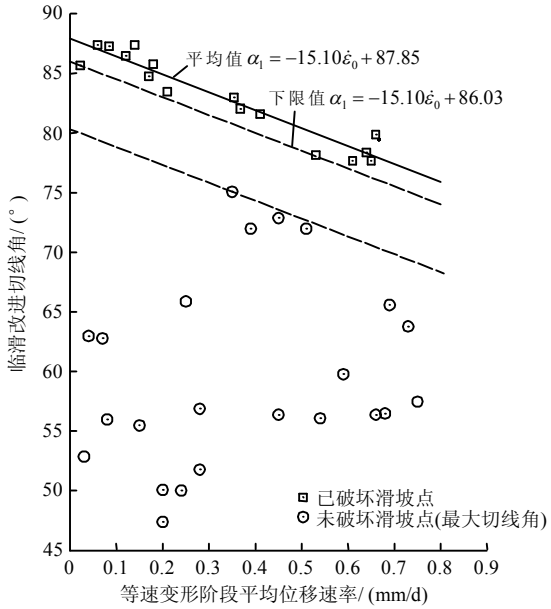


图 6 滑坡临滑等速变形速率与切线角分布图
Fig.6 Distribution of the constant deformation rate and tangential angle of landslides

4 某黄土高填方边坡实例研究

4.1 工程概况

某黄土高填方边坡[29]所处位置地形复杂，地貌上为黄土丘陵地貌，河谷发育，相对高差为 90 m。进山公路为高填方路基，场地平整后，根据地形条件以及建筑规划要求，边坡划分为 A、B、C、D 4 个支护区，A、B、C 区支护对象为填方后边坡，A 区最大高度超过 40 m，B、C 区坡高在 8～12 m； D 区支护对象为挖方边坡，坡高在 35～44 m，见图 6。

依据现场调查、钻探和探井揭露、静力触探探测、室内土工试验资料及新近堆积黄土判别式，工程区地层主要为上更新统马兰黄土和全新统新近堆积黄土。按照地层时代可将场区土层分为两个区：一区位于黄土塬的下部，接受黄土塬下部冲沟洪积物和西涧河冲积物沉积，地层岩性为全新统(Q_4^{al+pl})冲洪积物，共分为 10 个工程地质层，主要分布于一级平台上，以接受沉积为主；二区位于黄土塬上，地层岩性为上更新统(Q_3^{eol})马兰黄土，分为 12 个工程地质层，主要分布于二级和三级平台之上。

地下水主要为赋存于第四系松散堆积物中的孔隙潜水，且地下水稳定水位埋深较大。孔隙潜水接受大气降水补给，大气降水沿黄土中的孔隙和垂直裂隙渗流，局部受地下水冲蚀的影响，形成土洞。地下水主要沿沟谷排泄，排泄条件较好。由于地下水水位埋深较大，对区内地质灾害影响较小。由于地层中存在渗透性小的粉质黏土，对降雨有一定的阻滞，对位于地势较低的支护结构产生潮湿作用。

工程区属西安－怀来地震带的汾渭强震带。据《建筑抗震设计规范》[30]附录 A，场区抗震设防烈度为Ⅶ度，设计地震分组为第 2 组，设计基本地震加速度值为 0.15 g。

自 2014 年 3 月开始对锚拉桩板墙间采用重塑马兰黄土回填，受土压力作用，桩板墙出现变形破坏现象。为了全面掌握高填方边坡的变形情况，相关部门在 A_1 区右侧边坡布设监测点（见图 7），采用三维激光扫描技术对坡体变形情况进行定期观测，监测周期为 3 d/次。边坡变形监测从 2015 年 2 月 1 日开始，一直持续到 2015 年 5 月 4 日 4 点 45 分边坡失稳，滑塌总量为 2.31×10^4 m^3，主要为回填重塑的马兰黄土，造成坡脚房屋受损，给当地人民生命财产造成损失，如图 8 所示。

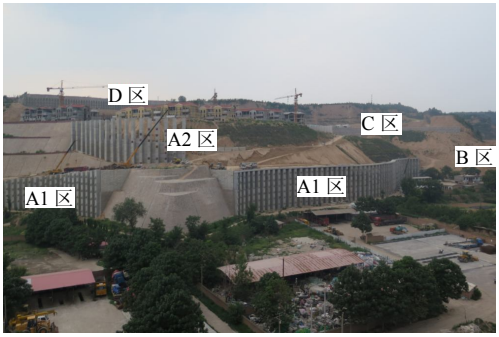


图 7 某黄土边坡全貌及支护区划分图
Fig.7 The complete picture of a certain loess slope and support area's distribution



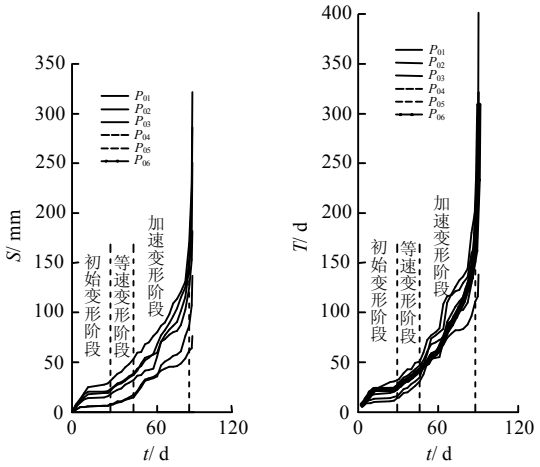
图 8 某黄土边坡 A_1 区失稳后全貌图
Fig.8 The region A_1 damage photo of a certain loess slope

4.2　监测及结果分析

应用三维激光扫描仪对 A_1 区右侧边坡进行位移监测，共布设 6 个监测点，监测点位于桩板墙外侧。

图 9 为 6 个监测点的累计位移–时间曲线和转换后的 *T-t* 曲线，通过分析曲线特征，各监测曲线整体符合蠕变型滑坡变形破坏特征，其中监测点 P_{05} 和 P_{06} 位于滑塌区边缘位置，累计变形量较中间位置监测点小。

通过分析计算获得某黄土滑坡发生的各个阶段和等速变形速率，见图 9、表 3。可以看出，前 29 d 累计位移–时间曲线呈渐缓的趋势，表现为初始变形阶段特征；29～46 d 累计位移呈稳定变化；46 d 后为加速阶段，阶段划分较为明确，等速变形速率在 0.37～0.93 mm/d 范围内。



(a) 黄土滑坡 *S-t* 曲线　　(b) 黄土滑坡 *T-t* 曲线

图 9　某黄土边坡监测曲线图

Fig.9　The monitoring graph of a certain loess slope

表 3　某黄土边坡监测预测结果统计表

Table 3　Statistics of monitoring and prediction results of a certain loess slope

序号	监测点编号	等速变形阶段时间段 / d	等速变形速率 / (mm/d)	采用临滑值计算结果			采用下限值计算结果		真实临滑切线角 / (°)
				临滑切线角 / (°)	误差比 / %	对应临滑时间 / d	临滑切线角 / (°)	对应临滑时间 / d	
1	P_{01}	29～46	0.9281	73.84	2.46	81.10	72.02	80.22	75.70
2	P_{02}	29～46	0.7802	76.07	2.27	81.71	74.25	81.41	77.84
3	P_{03}	29～46	0.7951	75.84	6.38	83.79	74.02	83.37	81.01
4	P_{04}	29～46	0.430	81.36	4.54	84.29	79.54	83.96	85.23
5	P_{05}	29～46	0.5545	79.48	10.38	90.28	77.66	87.73	88.69
6	P_{06}	29～46	0.3722	82.23	0.64	84.93	80.41	84.67	82.76

注：误差比=（真实临滑切线角–预测临滑切线角）/真实临滑切线角×100%。

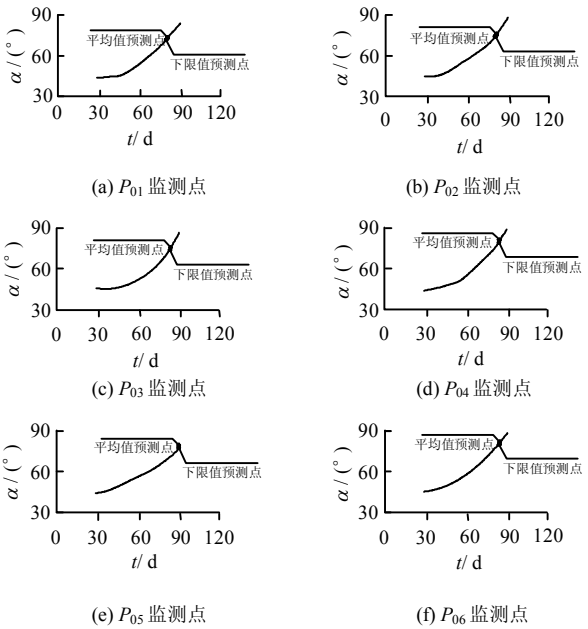
图 9(b) *T-t* 曲线各监测点 *T-t* 曲线在统一量纲的前提条件下，曲线形态基本一致。进一步说明了虽边坡局部变形破坏过程存在差异，但整体过程是一致的。

对滑坡的 6 个监测点进行临滑预报，结果见表 3、图 10。

由上述可知，采用临滑值计算获得临滑切线角范围为 73.84°～82.23°，对应第 1 次达到临滑切线角的时间为 81～90 d。与真实临滑切线角的误差比为 0.64%～10.38%，除 P_{05} 监测点为 10.38%外，其他各监测点均小于 6.5%，该临滑预警判据对滑坡预警预报准确性较高。

采用下限值计算获得临滑切线角为 80.22°～87.73°，对应第 1 次达到临滑切线角的时间为 80～87 d，各监测点均对滑坡的发生进行了提前预警。

综合以上分析，采用临滑切线角下限对某黄土高填方边坡整体失稳进行了很好的预警预报，与实际情况基本相符。



(a) P_{01} 监测点　(b) P_{02} 监测点

(c) P_{03} 监测点　(d) P_{04} 监测点

(e) P_{05} 监测点　(f) P_{06} 监测点

图 10　各监测点改进切线角曲线及临滑预测点图

Fig.10　The improved monitoring points tangent angle curve and sliding prediction dot plot

5 结 论

（1）基于等速变形速率作为一恒定值，对 ε-t 曲线进行 T-t 转换，保证等速变形阶段切线角为 45°。但不同滑坡的变形特征差异较大，较难确定滑坡是否会发展至等速变形阶段或加速变形阶段，基于岩土体材料的蠕变强度特征点，提出了 T-t 曲线转换的适用范围为：剪应力大于等速蠕变强度和小于瞬时破坏强度的蠕变型滑坡。

（2）滑坡变形破坏整个过程，切线角-时间曲线呈现明显的规律性。初始变形阶段切线角由大逐渐减小，等速变形阶段切线角值在一定范围内波动，进入加速变形阶段，切线角逐渐增大直至滑坡发生。

（3）由西原模型知，蠕变参数在等速变形阶段发展至一恒定值或稳定值，等速变形速率 $\dot{\varepsilon}_0$ 可看作滑坡蠕变过程中各参数的综合外在表现，与临滑切线角存在相关性，并呈反比关系，因此，可通过监测滑坡等速变形速率开展蠕变型滑坡预报。

（4）限于样本数量，本文仅对 $\dot{\varepsilon}_0 < 1$ mm/d 的蠕变型滑坡进行统计分析，建立各滑坡等速变形速率和对应改进临滑切线角的关系，两者有着较好的相关性。为扩大改进临滑切线角的适用范围，后续需对 $\dot{\varepsilon}_0 > 1$ mm/d 蠕变型滑坡进行样本补充。

（5）为保证滑坡预警的可靠度，减少误报和漏报的情况，采用优定斜率法求得临滑切线角的下限值，并结合未破坏滑坡变形过程的最大切线角，以下限作为滑坡预警判据。

（6）利用本文所提出的预警判据方法，对某黄土高填方边坡的整体变形进行了很好的预警预报，验证了该方法的可行性和科学性。

参 考 文 献

[1] 黄润秋. 论滑坡预报[J]. 国土资源科技管理, 2004, 6(21): 15－21.
HUANG Run-qiu. On time predication of landslide[J]. **Scientific and Technological Management of Land and Resources**, 2004, 6(21): 15－21.

[2] 王家鼎, 张倬元. 典型高速黄土滑坡群的系统工程地质研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999.
WANG Jia-ding, ZHANG Zhuo-yuan. The study typical high-speed loess landslide in crowds using the systematic analysis in engineering Geology[D]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1999.

[3] 许强, 曾裕平, 钱降澎, 等. 一种改进的切线角就对应的滑坡预警判据[J]. 地质通报, 2009, 28(4): 501－505.
XU Qiang, ZENG Yu-ping, QIAN Jiang-peng, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide prewarning criteria[J]. **Geological bulletin of China**, 2009, 28(4): 501－505.

[4] 王立伟, 谢谟文, 柴小庆. 滑坡变形空间评价的位移速率比方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 519－528.
WANG Li-wei, XIE Mo-wen, CHAI Xiao-qing. Research on method of displacement speed ratio for spatial evaluation of landslide deformation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 519－528.

[5] 王延平, 许强, 郑光, 等. 速度倒数法滑坡预警模型流变试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 35(6): 1606－1614.
WANG Yan-ping, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. A rheology experimental investigation on early warning model for landslide based on inverse-velocity method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 35(6): 1606－1614.

[6] 郭志. 临界等速流变剪应力的确定方法[J]. 勘察科学技术, 1994, (4): 24－26.
GUO Zhi. Method of determination of the critical uniform rheological shear strees[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 1994, (4): 24－26.

[7] 李永盛. 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 39－47.
LI Yong-sheng. Creep and relaxation of 4 kinds of rock under uniaxial compression tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1995, 14(1): 39－47.

[8] 杨淑碧, 徐进, 董孝璧. 红层地区砂泥岩互层状斜坡岩体流变特征研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(2): 12－24.
YANG Shu-bi, XU Jin, DONG Xiao-bi. Rheological feature of slope rockmass composed of alternating beds of sandstone and mudstone in red bdes area[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1996, 7(2): 12－24.

[9] 曾裕平. 重大突发性滑坡灾害预测预报研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
ZENG Yu-ping. Study on forecast and prediction of large scale and sudden landslide hazard[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.

[10] 郭志. 软岩流变过程与强度研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(1): 75－79.
GUO Zhi. Study of incompetent rock rheological process and strength[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1996, 4(1): 75－79.

[11] 杨圣奇. 岩石流变力学特性的研究及其工程应用[D]. 南京: 河海大学, 2006.
YANG Sheng-qi. Study on rheological mechanical properties of rock and its engineering applications[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.

[12] 孙钧. 岩石流变及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081－1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081－1106.

[13] 阎岩, 王思敬, 王恩志. 基于西原模型的变参数蠕变方程[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3025－3035.
YAN Yan, WANG Si-jing, WANG En-zhi. Creep equation of variable parameters based on Nishihara model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3025－3035.

[14] 斎藤迪孝. 斜面崩壊発生時期の予知論文-6[C]. 日本: 日本岩土工程协会, 1969: 29－38.
MICHITAKA SAITO. Reasearch on forecasting the time of occurrence of slope failure Thesis-6[C]. Japanese: The Japanese Geotechnical Society, 1969: 29－38 .

[15] 孟河清. 宝成铁路滑坡与降雨关系探讨[J]. 灾害学, 1994, 9(1): 58－62.
MENG He-qing. Exploration on relationship between Bao-cheng railway lanslide and rainfall[J]. **Journal of Catastrophology**, 1994, 9(1): 58－62.

[16] 梅其岳. 天荒坪开关站滑坡的形成条件和滑动机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 25－28.
MEI Qi-yue. Forming conditions and sliding mechanism of switch yard slope at tianhuangping power station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(1): 25－28.

[17] 吕贵芳. 鸡鸣寺滑坡的形成及监测预报[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(增刊): 376－383.
LÜ Gui-fang. Formation and monitoring and forecast of jimingsi landslide[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1994, 5(Supp.): 376－383.

[18] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.
WU Wei-jiang, WANG Nian-qin. Landslide hazards in Gansu[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006.

[19] 王恭先. 甘肃省永靖县黄茨滑坡的滑动机理与临滑预报[J]. 灾害学, 1997, 12(3): 24－27.
WANG Gong-xian. Sliding mechanism and prediction of critical sliding of huangci landslide in yongjing county Gansu Province[J]. **Journal of Catastrophology**, 1997, 12(3): 24－27.

[20] 周志斌. 大冶铁矿东采场边坡变形破坏特征及滑坡时间预报[J]. 中国矿业, 2000, (增刊 2): 79－82.
ZHOU Zhi-bin. Daye iron mine stope east slope deformation and failure characteristics of landslide time prediction[J]. **China Mining Magazine**, 2000, (Supp.2): 79－82.

[21] 李天斌, 陈明东, 王兰生. 滑坡实时跟踪预报[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999.
LI Tian-bin, CHEN Ming-dong, WANG Lan-sheng. The real-time tracing prediction of landslide[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1999.

[22] 矢部, 満・竹森, 基・坂田, 和宏・西條, 雅博. フィールドモニタリングにおける自動計測技術の現状と今後の展望[J]. 応用地質技術年報, 2006, 26: 1－17.
MITSURU YABE, MOTOI TAKEMORI, KAZUHIRO SAKATA, et al. Present Status and Prospects of Automatic Measurement Technology for Field Monitoring[J]. **Application of Engineering Geology**, 2006, 26: 1－17.

[23] LIU Zao-ba, XU Wei-ya, SHAO Jian-fu. Gauss process based approach for application on landslide displacement analysis and prediction[J]. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**, 2012, 84(2): 99－122.

[24] ZABUSKI LESLAW, SWIDZINSKI WALDEMAR, KULCZYKOWSKI MAREK, et al. Monitoring of landslides in the Brda river valley in Koronowo(Polish Lowlands)[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2015, 73: 8609－8619.

[25] 王士天, 詹铮, 刘汉超. 洒勒山高速滑坡的基本特征及动力学机制[J]. 地质灾害与环境保护, 1990, 1(2): 66－74.
WANG Shi-tian, ZHAN Zheng, LIU Han-chao. Basic characteristic and dynamic mechanism of Sa-leshan high-speed landslide[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1990, 1(2): 66－74.

[26] EVANS STEPHEN G, MUGNOZZA GABRIELE SCARASCIA, STROM ALEXANDER, et al. Landslides from massive rock slope failure[M]. Netherlands: NATO Science Series, 2008.

[27] SALCEDO D A. Behavior of a landslide prior to inducing a viaductfailure, Caracas-La Guaira highway, enezuela[J]. **Engineering Geology**, 2009, 109(1−2): 16－30.

[28] CROSTA G B, AGLIARDI F. How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides[J]. **Physics and Chemistry of the Earth**, 2002, 27(36): 1557－1565.

[29] 张硕. 黄土高填方边坡失稳机理和临灾预警判据研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
ZHANG Shuo. Study on disaster warning criterion and the instability mechanism of the high embankment slope of Loess[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.

[30] 中国建筑科学研究院. GB50011−2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
China Academy of Building Research. Code for seismic design buildings[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.