

文章编号: 1006-6616 (2004) 04-0357-09

砂黄土高边坡稳定性的数值模拟研究

张永双, 王红才

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 基于野外调查和室内试验分析, 阐述了黄土高原北部砂黄土边坡破坏的主要形式及其影响因素。结合陕北高等级公路建设, 采用弹塑性有限元法模拟了不同工程开挖条件下坡形、降雨和地震作用等因素对砂黄土高边坡稳定性的影响。结果表明, 随着坡角或坡高的增大, 边坡稳定性不断变差, 鬃雌滦伪纫黄碌蕉廿钠滦胃恪 诒哂孥榷 ê 头阑, 唤涤曜糈枚? 边坡稳定影响极大, 在坡脚积水的情况下, 坡脚处塑性应变值比常态增加近 20 倍; 地震作用促使坡脚应力和应变值升高, 并且随着地震动峰值加速度的增大而变化显著。模拟分析结果为砂黄土高边坡优化设计和灾害治理提供了科学依据。

关键词: 砂黄土; 高边坡; 黄土滑塌; 数值模拟

中图分类号: P642.11

文献标识码: A

0 引言

随着我国西部大开发战略的实施, 黄土高原地区的城市、交通和水利工程建设得到迅速发展, 工程建设等级也相应提高。但是, 目前我国黄土高边坡设计尚缺乏明确的标准, 由于设计不当造成的黄土高边坡变形破坏现象频繁发生, 因此对黄土高边坡破坏形式及其形成机理的研究成为当前工程地质和岩土工程界普遍关注的热点和难点课题^[1-4]。近年来, 作者结合陕北晋西黄土滑塌灾害的形成机理研究, 开展了砂黄土边坡稳定性的野外调查和大量室内测试分析工作。本文试图在地质分析的基础上, 采用有限元法对砂黄土高边坡的变形破坏机理进行模拟分析, 探讨不同工程开挖条件下坡形、降雨和地震作用等因素对边坡稳定性的影响, 为砂黄土高边坡优化设计提供科学依据。

1 砂黄土高边坡的破坏形式和影响因素分析

1.1 砂黄土高边坡的破坏形式

中国西北黄土的颗粒组成具有明显的地带性分布规律, 黄土高原自西北向东南依次划分

收稿日期: 2004-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号 40102025)

作者简介: 张永双 (1968-), 男, 博士后, 副研究员, 主要从事工程地质和地质灾害研究工作。

E-mail: zhangyongshuang@email.com.cn 联系电话: 010-68486765。

为三个带^[1],即砂黄土带、典型黄土带和粘黄土带。砂黄土在物质组成和结构方面与黄土高原中部和东南部的粘粉质黄土具有明显的差异,工程性质也相应地发生了变化。野外调查表明,黄土高原北部公路边坡的变形破坏主要以滑塌形式出现,并且在空间上具有鲜明的地域性,即砂黄土带是滑塌灾害严重发育区、典型黄土带是滑塌灾害弱发育区、粘黄土带滑塌灾害不发育^[2]。黄土滑塌通常具有以下主要特征:

(1) 滑塌前的原始黄土边坡主要由厚层马兰黄土(Q_3)构成,少量边坡底部出露离石黄土(Q_2)。黄土边坡高度通常超过 10m,边坡总体坡角大于 50° ,并且坡面多为一坡到顶的近平直状。

(2) 黄土滑塌体在形态上常呈“马蹄状”或桃形,其后缘均有沿垂直张裂隙形成的高约 0.5~1.0m 的环形陡壁,两侧为不同弧度的弧形,底部一般仅限于天然斜坡或人工边坡的台面(路面)。在剖面上除顶部拉张段外,滑裂面为高角度的光滑弧面,且上陡下缓,总体坡度在 $45^\circ \sim 50^\circ$ 之间。

(3) 单个滑塌体的规模通常不大,高度可超过 50~60m,宽度可达 80~100m,厚度一般在 5m 左右,通常不超过 10m,体积一般仅数千~数万 m^3 。滑塌体通常表现为由黄土碎块、黄土粉状物构成的松散堆积体,当滑塌规模较大时,在滑塌体的上部会偶尔出现较窄的滑落台阶。

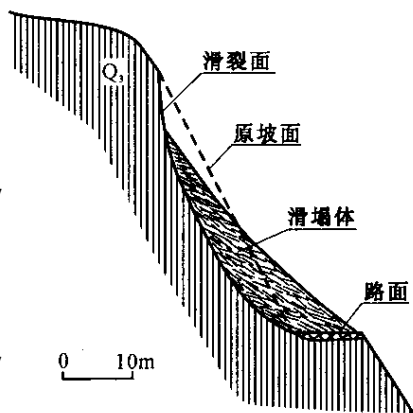


图1 黄土滑塌特征示意图

Fig.1 Sketch map of loess slumping

1.2 砂黄土高边坡稳定性的控制因素分析

根据野外调查和室内测试分析,影响砂黄土边坡发生滑塌的因素主要包括边坡高度和形态、砂黄土颗粒组成和力学性质、降雨作用等方面,它们都不同程度地制约着砂黄土边坡的稳定性。

(1) 边坡高度和形态是决定边坡内部应力状态的直接因素,也是工程设计中最常用的参数。傍山公路、铁路或其它工程建设开挖的边坡,常因坡高、坡比过大而出现强烈滑塌现象。

(2) 颗粒组成和力学性质:砂黄土的砂粒和粗粉粒含量通常高达 85%,而粘粒含量小于 12%,致使砂黄土具有较高的摩擦强度和极低的粘聚力, φ 值达 $26 \sim 31^\circ$, c 值为 5.0~13.2kPa,少部分可达 20kPa。极低的粘聚力导致坡体在滑移过程中极易发生结构解体,而不是保持整体滑动。

(3) 降雨作用:降雨入渗不仅降低土体强度,而且雨水冲刷坡脚更易诱发边坡滑塌。调查发现,一些公路边坡内侧不留排水沟或虽留排水沟而不衬砌,促使雨水聚集、渗透、坡脚浸水软化,是诱发黄土滑塌灾害的重要因素。

2 砂黄土高边坡稳定性的弹塑性数值模拟

2.1 模型选取和参数确定

为了揭示不同因素对砂黄土边坡稳定性的影响,采用有限单元法进行不同工况下的数值模拟。由于陕北砂黄土区以马兰黄土为主,为简单起见,模型中边坡材料全部采用 Q_3 马兰

黄土。根据边坡特点和砂黄土的工程特性，选用弹塑性本构模型（Drucker-Prager 模型），按平面应变问题分析边坡应力和塑性应变的分布特征。屈服准则为：

$$F = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{s\}^T M \{s\} \right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0$$

式中： $\beta = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}$ ； σ_m 为平均应力， s 为应力偏量， M 为变换矩阵； σ_y 为屈服应力， $\sigma_y = \frac{6c \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}$

根据边坡工程的特点，模型边界的约束条件分别为：临空面为自由面；两侧垂直边界在 Y 轴方向自由，在 X 轴方向约束；底面在 X 、 Y 轴方向均为约束边界。载荷类型包括重力和地震力，采用四边形等参元进行网格剖分。模拟过程中，结合陕北高等级公路边坡，设计了 17 种工况。根据室内试验结果和野外观测资料，确定不同工况下的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 不同工况下的基本物理力学参数表

Table 1 Physical-mechanical parameters of sand loess in various states

方案 编号	泊松 比	弹模 (Mpa)	容重 (g/cm ³)	c (Mpa)	φ (°)	膨胀角 (°)	地震加速度 (m/s ²)	坡高 (m)	台宽 (m)	坡角 或坡比	备注
F11	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40		40°	一坡到顶
F12	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40		50°	
F13	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40		60°	
G14	0.3	110	1.55	0.02	28	20		30		50°	一坡到顶
G15	0.3	110	1.55	0.02	28	20		60		50°	
G16	0.3	110	1.55	0.02	28	20		80		50°	
G21	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40	3	1:0.75	阶状边坡 段高 8m
G22	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40	3	1:0.5	
G23	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40	3	1:0.3	
G31	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40	3	1:0.75	阶状边坡段 高 12~16m
G32	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40	3	1:0.5	
G33	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40	3	1:0.3	
G41	0.3	110	1.55	0.02	28	20	0.05g	40	3	1:0.5	地震作用
G42	0.3	110	1.55	0.02	28	20	0.10g	40	3	1:0.5	
G51	0.3	77	1.65	0.01	25	18		40	3	1:0.5	降雨作用
G52	0.30/0.35	77/55*	1.65	0.01/0.05	25/15	18/10		40	3	1:0.5	
G61	0.3	110	1.55	0.02	28	20		40	5	1:0.5	

* “ / ” 后的数据为坡脚处不留排水沟时的参数。

2.2 砂黄土边坡应力和应变分布的一般规律

根据模拟结果，砂黄土边坡开挖后，在坡面附近主应力 σ_1 的方向与坡面平行，而 σ_3 垂直于坡面展布；在底部 σ_1 的方向基本呈水平状态， σ_3 的方向基本呈竖直状态。在坡脚处主应力方向发生明显变化，成为应力方向转化的过渡带，这决定了坡脚处在开挖后将成为应力集中和易破坏的部位（图 2a，文中图件均为有效区域的模拟结果）。主应力等值线的分布也

反映了类似的规律，在坡面附近 σ_1 等值线大致平行于坡面分布，从坡面向坡体内部，应力值逐渐增大； σ_3 等值线的变化规律与 σ_1 等值线相似，二者在坡脚处应力值都明显增大（图 2b）；最大剪应力和塑性应变区分布特征也反映了这一规律，并且等值线的变化显示出明显的上陡下缓形态（图 2c、d），这与边坡滑塌特征极为一致^[5]。上述规律表明，坡脚部位是控制边坡稳定的关键部位，也是工程加固的重点部位。

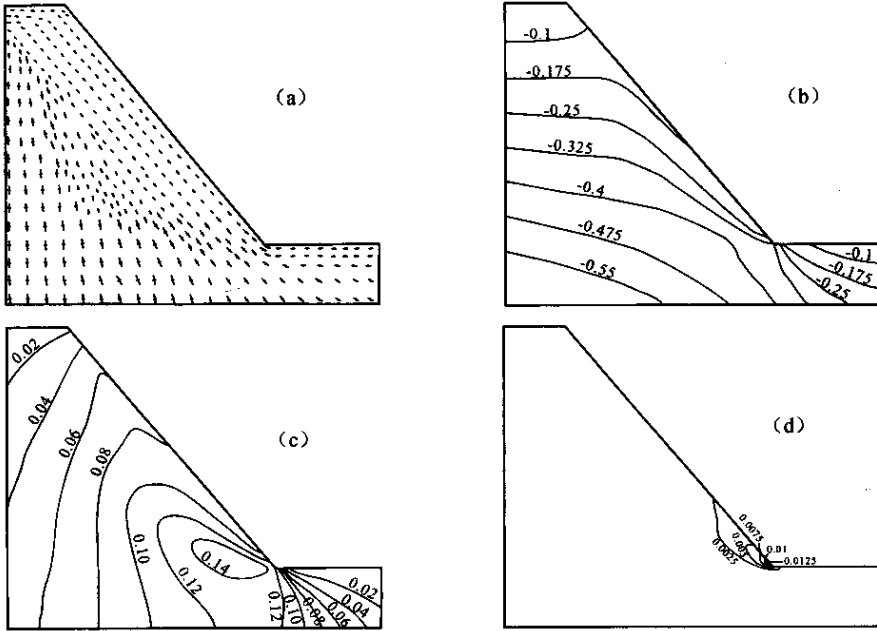


图 2 砂黄土边坡应力和塑性应变区分布

Fig.2 General distribution patterns of stress and plastic strain on a sand loess slope

a. 应力迹线；b. 最大主应力等值线；c. 最大剪应力等值线；d. 塑性应变等值线

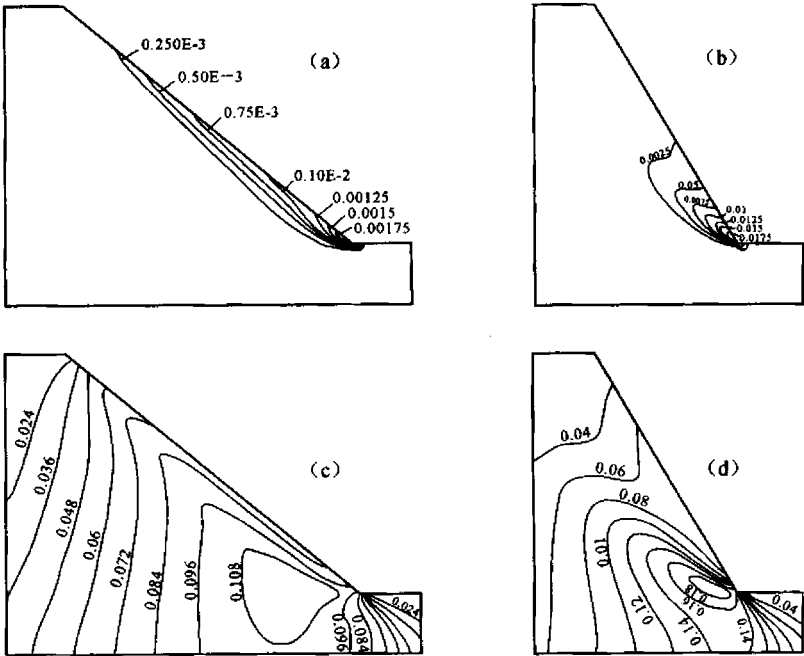
2.3 边坡形态对边坡稳定性的影响

边坡形态包括坡角或坡比、坡面形式和坡高等方面。

（1）在坡高 40m、坡形一坡到顶条件下，分别选取 40°、50°、60°三种坡角进行边坡稳定性比较，结果表明，随着坡度的增大，坡脚附近的最大应力和塑性应变值均依次升高（图 2c、2d，图 3），从塑性应变值看，50°边坡在坡脚处的应变值是 40°边坡的 5 倍；坡角达 60°时，应变值增至 40°边坡的 11 倍，说明随着坡角的增大，坡脚处的应变值急剧升高。对于 40m 的砂黄土边坡，此类坡形的坡角一般不超过 60°就可能破坏。野外调查发现，在滑塌体滑出坡脚附近，滑面有时位于距坡底 0.5~1.5m 的位置，并非全部位于坡脚底部^[5]，在模拟结果中的塑性应变分布图中也显示了该特征，这可能与开挖卸荷作用有关。

（2）假设坡角不变（50°），选取 30m、40m、60m 和 80m 边坡进行比较，四种边坡的坡脚处最大塑性应变值分别为 0.005、0.013、0.026 和 0.044，最大剪应力分别为 0.12、0.13、0.16 和 0.18MPa（图 2b、d，图 4），表明坡脚处的最大剪应力和塑性应变值随着坡高增加呈正比升高，失稳破坏的可能性迅速增大。砂黄土边坡首先由坡脚处开始破坏，然后在坡面下一定深度向上扩展，直至发生滑塌破坏。

（3）如果将一坡到顶的直线坡形改变为阶状，在台阶宽度较小（3m）的情况下，在大致相同的总体坡度下，阶状边坡的塑性应变值略小，并且塑性区分散位于下部几个台阶的拐



角处（易于分步加固）。当单级坡比增大（ $1:0.75 \rightarrow 1:0.5 \rightarrow 1:0.3$ ）时，边坡稳定性依次降低；将阶状边坡台阶加宽（5m），稳定情况又大大改善，每级台阶拐角处的应力和塑性应变值都明显低于台阶宽度为 3m 时的情况（图 5）。

（4）模拟结果表明，阶状边坡的单级高度对边坡稳定的贡献不十分明显，较频繁地留设台阶有时效果并不理想，对于 40m 高的边坡，段高一般 10m 为宜；适当加宽台阶宽度有利于边坡稳定，但一般不要超过 5m。

2.4 降雨作用对砂黄土边坡稳定性的影响

选单级坡比 $1:0.5$ 的阶状边坡，模拟降雨作用对边坡稳定的影响。在降雨量较小、坡脚未有积水情况下，仅考虑边坡土体容重和强度参数的变化；当降雨量较大且坡脚处产生积水时，假定坡脚 2m 范围内砂黄土强度参数进一步降低（表 1）。结果表明，在坡脚处无积水的降雨条件下，坡脚处的塑性应变值比常态升高了 6.5 倍。当坡脚处有积水时，边坡的稳定情况更加恶化，坡脚处塑性应变值比常态升高近 20 倍，并且最大应变位置下移，预示着在这种情况下的滑塌规模可能更大（图 5，图 6）。由此可见，在坡脚处不留设排水沟或虽留设排水沟但不衬砌条件下，降雨产生的坡脚积水对边坡稳定影响极大，因此边坡设计时，坡脚处必须留设排水沟并加以衬砌。

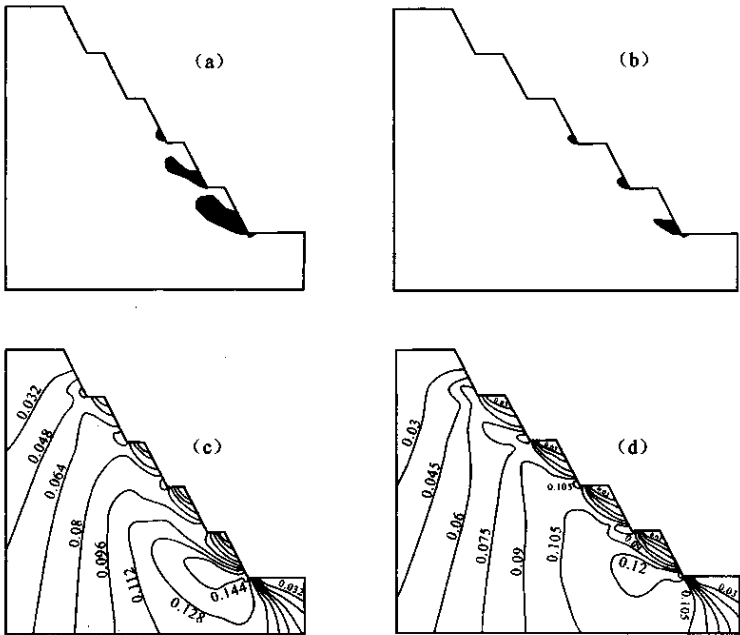


图 5 阶状边坡应力和塑性应变分布图

Fig.5 Distribution of stress and plastic strain on slopes with a stepped surface

a. 台宽 3m，塑性应变；b. 台宽 5m，塑性应变；c. 台宽 3m，最大剪应力；d. 台宽 5m，最大剪应力

2.5 地震作用对边坡稳定性的影响

选单级坡比 $1:0.5$ 的阶状边坡模拟地震作用对边坡稳定性的影响。结果表明，在地震动水平峰值加速度 $0.05g$ 和 $0.10g$ 条件下（按静态载荷处理），坡脚处的塑性应变值比常态分别增大了 0.6 倍和 1.3 倍（图 7）。可见地震作用对边坡稳定性的影响是明显的，尤其是对处于临界状态下的砂黄土边坡，其诱发灾害的可能性更大。

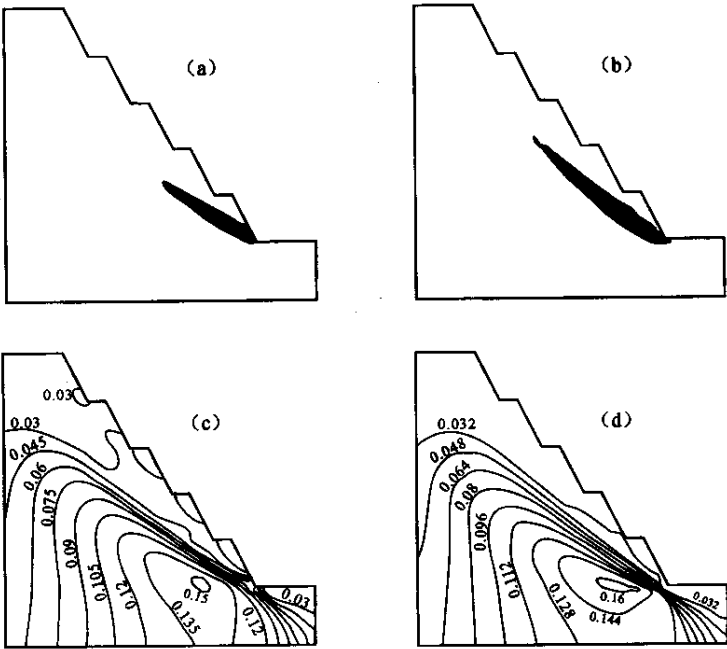


图 6 降雨条件下边坡应力和塑性应变分布图

Fig.6 Distribution of stress and plastic strain on slopes under raining conditional

a. 坡脚无积水，塑性应变；b. 坡脚积水，塑性应变；c. 坡脚无积水，最大剪应力；d. 坡脚积水，最大剪应力

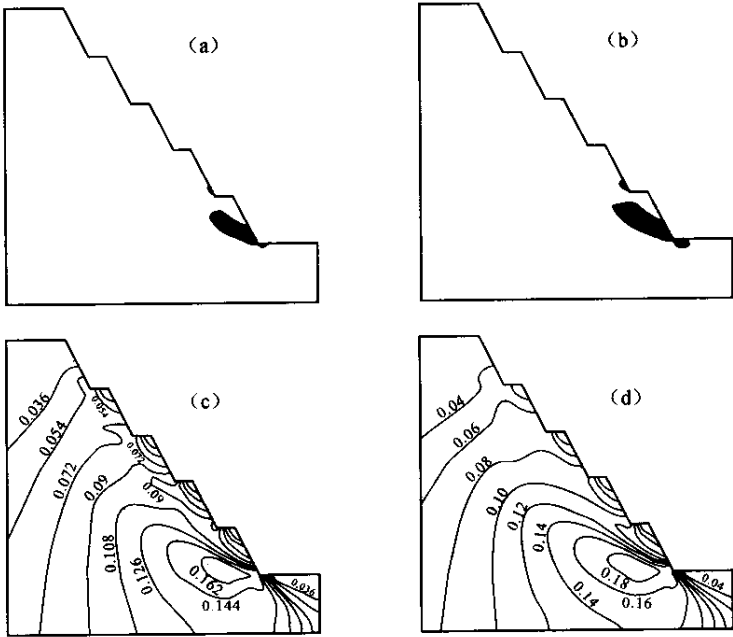


图 7 地震作用下边坡应力和塑性应变分布图

Fig.7 Distribution of stress and plastic strain on slopes during occurrence of an earthquake

a. 0.05g，塑性应变；b. 0.10g，塑性应变；c. 0.05g，最大剪应力；d. 0.10g，最大剪应力

3 讨论和结论

为了揭示工程开挖条件下各种因素对砂黄土公路高边坡稳定性的影响，作者在野外调查和室内试验分析的基础上，采用弹塑性有限元法模拟了不同工程开挖条件下坡形、降雨和地震作用等因素对砂黄土高边坡稳定性的影响。获得如下认识和结论：

- （1）砂黄土高边坡滑塌破坏特征是由砂黄土本身的物质组成和力学性质决定的，黄土滑塌灾害是黄土高原北部地区特有的地质灾害类型。
- （2）对于一坡到顶的边坡，随着坡角或坡高的增大，边坡稳定性不断变差；相比之下，阶状坡形比一坡到顶的坡形更利于边坡稳定和防护，并且适当加大台阶宽度可以大大改善边坡的稳定状况。
- （3）降雨作用对砂黄土边坡稳定性影响极大，当降雨在坡脚处产生积水时，边坡的稳定情况更加恶化，坡脚处塑性应变值比常态升高近 20 倍，并且最大塑性应变区位置下移，预示着在这种情况下砂黄土高边坡产生滑塌的危险性极高且规模更大。
- （4）地震作用促使坡脚应力和应变值升高，并且随着地震动峰值加速度的增大而变化显著。
- （5）根据野外调查和数值模拟结果，砂黄土边坡设计时应注意以下方面：①坡形应尽量选择阶状，高边坡的单级高度视具体情况，一般选择 10m 为宜；②当边坡高度增大(> 40m) 时，可以适当加大台阶宽度；③边坡的坡脚处应留设排水沟，并且排水沟必须衬砌；④对于地震的设防，可以根据地震烈度区划适当提高边坡安全系数。上述措施对已发生滑塌灾害的砂黄土高边坡治理也有较显著的效果。

参 考 文 献

[1] 倪万魁，刘玉海. 黄土高边坡可靠性分析 [J]. 工程地质学报，2000，10 (S) : 454 ~ 458.

[2] 曲永新，张永双，陈情来. 陕北晋西黄土滑塌灾害的初步研究 [J]. 工程地质学报，2001，9 (2) : 233 ~ 240.

[3] 张永双，曲永新，陈情来等. 浅析黄土滑塌与黄土滑坡 [J]. 工程地质学报，2002，10 (S) : 258 ~ 262.

[4] 陈志新. 黄土高边坡稳定性影响因素分析 [A]. 全国岩土与工程学术大会论文集 [C]. 人民交通出版社，2003，601 ~ 607.

[5] 张永双，曲永新. 陕北砂黄土区公路地质灾害及其防治对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2004，15 (2) : 35 ~ 38.

NUMERICAL SIMULATION OF THE STABILITY
OF HIGH SAND LOESS SLOPES

ZHANG Yong-shuang , WANG Hong-cai
(Institute of Geomechanics , Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100081 , China)

Abstract : Based on field investigation and lab tests , the main failure form of the sand loess slope and its impact factors on the northern Loess Plateau are summarized in this paper. Taking for an example from

the construction of high-type highways in northern Shaanxi , a series of numerical simulations have been made using the elastico-plastic finite-element method to illustrate the influences of various factors , including the slope form , rainfall and earthquakes , on the stability of sand loess slopes under the conditions of excavation by different engineering works . The simulation results indicate that : with increasing slope angle or slope height , a slope becomes gradually less and less stable ; a slope with a stepped form is more stable than that with a linear form , and is favorable for protection ; rainfall tremendously influences the stability of a sand loess slope , and especially in the case of water logging at the slope foot , the stain value of the slope foot increases nearly 20 times than that in a normal state ; earthquakes can make the values of both the stress and strain at the slope foot increase obviously with the growth of seismic acceleration . The simulation results provide a scientific basis for the high sand loess slope design and hazard control .

Key words : sand loess ; high slope ; loess slumping ; numerical simulation

.....

(上接第 348 页)

INVESTIGATION OF THE EVOLUTION AND ENVIRONMENT CHANGE OF TYPICAL LAKES IN YUNNAN

SHI Zheng-tao¹ , MING Qing-zhong¹ , ZHANG Hu-cai²

- (1. Tourism and Geographic College , Yunnan Normal University , Kunming 650092 , Yunnan , China ;
2. Nanjing Institute of Geography and Limnology , Chinese Academy of Sciences , Nanjing , 210008 , Jiangsu , China)

Abstract: This paper introduces the primary results of investigations of seven lake systems and geomorphology of the lake areas in Yunnan. A total of 140 m of drilling cores were recovered from the wells in the seven lakes and bed mud samples were taken from some of the lakes. Investigation and study of the lake terraces , layered geomorphology and related strata indicate that there exist two to three distinct highstand banks and that many conch layers are distributed in the lakes , which are higher than dolinen and formed during the later Pleistocene. The sedimentary characteristics of the section at the top of Snake Mountain and previous dating data suggest that the deposition of the Sheshan Formation ended in the late part of the last glacial epoch.

Key words : lake evolution ; environmental changes ; Yunnan Plateau