

(15) 57-61

中国黄土山城“依山造居”的几个灾害问题讨论

——黄土滑坡分析

王家鼎

P642.22

(西北大学城市与资源学系, 710069, 西安; 33岁, 男, 副教授)

摘要 对中国黄土山城“依山造居”的几个灾害问题(如黄土层地震反应、黄土滑坡、黄土液化、黄土湿陷与震陷等)进行了分析,重点对黄土滑坡问题进行了探讨。分析了由于灌溉或暴雨造成黄土滑坡的形成条件、滑坡机理、稳定性评价、滑坡监测预报以及治理措施等。

关键词 黄土滑坡; 稳定性; 监测; 抗滑设计

分类号 P642.22

随着我国市场经济的飞速发展,城市开发与建设的速度十分迅猛。然而我国黄土高原的大部分城市(如兰州、宝鸡、西宁、天水、延安等)由于受地形的限制阻碍了城市的发展与建设。为了解决这一矛盾,人们不得不开发黄土山坡,“依山造居”,但在开发的过程中遇到了一些灾害问题需要研究解决,如土层地震反应、滑坡、液化、湿陷与震陷等。文献1对黄土层的地震反应问题已做了分析,本文主要讨论黄土滑坡问题,其他问题将在以后陆续展开讨论。

由于我国的黄土高原气候为干旱或半干旱性质,在大多数黄土山坡上几乎没有植被或植被零星分布,给城市环境造成巨大影响。80年代初,中央领导号召“种草种树,绿化城市”。这一举措经过10年的实践验证,效果明显,大部分黄土山坡都披上了绿装。然而由于在黄土山坡上种草种树需要大量的灌溉,很多高陡斜坡失稳,造成较为严重的灾害。所以在进行依山造居之前必须对黄土滑坡问题做深入的研究。本文分析了黄土滑坡的形成条件、机理、稳定性评价、监测预报方法以及治理措施。

1 黄土滑坡的形成条件

1.1 岩性

各个时期各种成因的黄土常产生新黄土沿老黄土顶面的滑坡;沿老黄土中古土壤层或钙质结核层或砂卵石层滑动;次生黄土沿原生黄土顶面或其中不同成因黄土堆积层顶面滑动;黄土沿下伏基岩顶面滑动。黄土中常有粘土、砂、砾石、碎石、卵石等,老黄土中有古土壤、钙质结核等夹层或下卧层。黄土中常有裂隙、节理和落水洞发育。

1.2 地貌和构造条件

黄土滑坡往往发生在河流不同的阶地上,相对高差较大,坡度较陡。如陕西渭、泾、霸、洛等河流域;山西沁河流域;甘肃黄河、白龙江、葫芦河、西汉水流域等地的不同阶地上都发育有较大规模的黄土滑坡。

黄土滑坡往往发生在地质构造复杂、新构造运动活跃、地震活动频繁的地带。

1.3 触发因素

黄土滑坡往往是由地震、强降雨、灌溉或其他外动力作用触发的。本文主要讨论强降雨和灌溉因素

• 兰州市、天水市重大工程项目部分资助课题

收稿日期:1995-04-14

触发的黄土滑坡(如兰州皋兰山北坡数处滑坡及滑坡群,天水市锻压机床厂滑坡,泰山庙、椒树湾滑坡,兰州附近盐锅峡库区 10 km 长黑方台滑坡群,宝鸡市卧龙寺、斗鸡台滑坡等)。

2 黄土滑坡的机理

关于黄土滑坡的机理问题,很多学者从不同的角度提出了自己的观点。大多数人认为是孔隙水压力影响的结果,但它是如何影响的,尚未做透彻分析。本文提出一种饱和黄土蠕、滑动液化的观点。

2.1 饱和黄土蠕、滑动液化导致高速滑坡的过程

在大量的野外调查中发现,黄土滑坡往往是“二元结构”,它们都是在不同的阶地上发生。滑坡结构自上而下的地层依次为:马兰黄土、黄土状粉砂土、红色粘土层、砂砾石层、第三系(或白垩系)泥岩,有时是黄土直接与泥岩接触。而泥岩倾向往往与坡向一致,倾角 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。强降雨或灌溉沿地表裂隙或落水洞(黄土疏松,具大孔隙性、裂隙和落水洞发育)灌入,在红色粘土层或第三系泥岩(该层有良好的隔水性能)以上形成一饱和层。这个饱和层的长期滞留,对黄土的强度有削弱作用(即降低黄土的 c, φ 值)并在黄土层内形成滑裂面。由库伦定律可知,黄土的 c, φ 值减小,其抗剪强度 c 值必然降低,其结果使高陡斜坡体在重力作用下产生蠕变变形。饱和土层在外动力作用之前,土骨架没有产生滑移,外界重力全部由土骨架来承担,一旦有蠕变所产生的剪切力作用,土颗粒就会产生滑移,改变排列状态,产生孔隙水压力,导致有效应力降低,产生轻微液化。轻微液化的结果加速了滑坡体变形的发展产生滑移。随着滑移速度的提高,产生的孔隙水压力不断增加,有效应力不断降低。这种状况持续发展,循环往复,直至有效应力消失,总应力等于孔隙水压力,饱和黄土完全液化。此时不但外力全部由孔隙水来承担,而且土颗粒本身的重量也施加于孔隙水上,产生液化物质。这种物质接近液体,不能承受任何剪切力,而只依靠非常微弱的粘滞力起阻碍作用。这时便会发生高速滑坡。接着便有残留于滑床上的液化物质在高速滑体的带动作用产生黄土泥流。

由于饱和土层在没有外力的作用下仅降低黄土的 c, φ 值,因此可从下式中 c, φ 值的变化分析土抗剪强度 τ 的降低原因。

$$\tau = \sigma_e \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1)$$

式中 τ 为土的抗剪强度; σ_e 为土的有效应力; σ 为总应力; u 为孔隙水压力; c 为土的粘聚力; φ 为土的内摩擦角。

而饱和土层在外界力的作用下,往往产生液化作用,可从式(1)中的 $(\sigma - u)$ 的变化来分析 τ 值降低的原因。这两种现象都是导致高速滑坡的原因。有时是这种起主导作用,有时是那种起主导作用,大多数情况下是二者兼而有之。

2.2 饱和黄土蠕、滑动液化的机理

黄土的蠕、滑动液化是从滑坡体蠕、滑动引起土体结构失稳开始,通过孔隙压力的增长导致土体中有效应力的降低,并随着时间的推移产生了孔隙压力的消散,从而可能在某种程度上促使有效应力的恢复。换句话说,饱和黄土体的蠕、滑动液化是土体受蠕、滑动剪切力的作用,结构破坏同时伴生的孔隙压力的增长和消散这个全部过程的总概括和总效果。

蠕、滑动液化的机理一般用两种原理描述:①土水复合体系的力学特征及在滑体蠕、滑动作用下这种复合体系中孔隙水压力的增长(详见文献 2);②土体结构内部强度的变化,即基于室内土工试验定量分析孔隙水压力的改变(详见文献 3)。

2.3 滑坡速度的讨论

笔者曾对均质滑坡体的滑动轨迹进行求解^[4],得出泛函方程

$$2(y - \mu x)y'' + (1 + \mu y')(1 + y'^2) = 0, \quad (2)$$

用伽辽金法求得式(2)的一、二级近似解(公式很冗长,略去)。

现根据能量守恒原理求得滑坡速度为

$$v = \sqrt{2gy - 2g \cdot \mu \cdot x}. \quad (3)$$

将伽辽金求解结果代入得速度一、二级近似解的表达式如下:

一级近似解:

$$v_1 = \sqrt{2g \left[a_1 \frac{x}{l} (2l - x) \right] - \mu \cdot x}, \quad (4)$$

二级近似解:

$$v_2 = \sqrt{2g \left\{ \frac{x}{l} [a_1(2l - x) + a_2(3l^2 - x^2)] - \mu x \right\}}. \quad (5)$$

式中的 a_1 、 a_2 是常系数,由具体实例的一些已知参数通过解方程组求得。 l 是滑体质点滑动的水平距离。 μ 是动摩擦系数,一般用实验无法求得,需用反算法。

我们根据实际情况知,当 $x_{\max} = l$ 时, $v = 0$, 即滑体质点停止时,速度为零。

$$v_2 = \sqrt{2g \left\{ \frac{l}{l} [a_1(2l - l) + a_2(3l^2 - l^2)] - \mu l \right\}} = 0, \quad (6)$$

解方程(6)得,

$$\mu = a_1 + 2a_2l. \quad (7)$$

3 黄土滑坡稳定性的评价

滑坡稳定性与所处的发育阶段有密切关系,不同的发育阶段有与之相应的稳定系数范围。对于一个具体滑坡的研究,必须了解该滑坡的具体稳定状态,同时应了解滑坡稳定状态的变化趋势。当需要采取工程措施整治滑坡时,还必须在定性判断的基础上,根据边界条件和计算参数定量计算滑坡稳定性。

3.1 黄土滑坡稳定性的定性判断

定性判断是定量计算的必要基础。对地质条件、地形地貌特征、变形迹象以及当前所处的状态及其今后变化趋势,对滑坡当前所处的稳定状态及其发展趋势做出总的分析、判断,是进行稳定性计算的前提。

地质比较法是定性判断滑坡稳定性的主要方法。其内容包括发生条件对比、地貌形态对比、促发因素及其变化趋势分析、滑动迹象分析等。

3.2 黄土滑坡稳定性定量计算法

定量计算则是以数量方面具体求得稳定性系数的大小。定量计算法仅仅对已处于不同滑动阶段(蠕动、缓动、滑动和剧动)的滑坡才能适用。定量计算往往是计算滑体的下滑力与抗滑力的比值,即稳定性系数 F_s 。一般情况下滑体稳定性系数的计算,大多数文献中都有介绍,在此不必赘述。

3.2.1 滑体全部饱水时

$$F_s = \frac{W_1 \cos \alpha + \text{tg} \varphi + c \cdot l}{W_1 \sin \alpha + \gamma_w \cdot A \cdot \sin \alpha} \quad (8)$$

式中, W_1 为饱水滑体的重量(T),其值等于 $\gamma' \cdot A$, 其中 γ' 为滑体土的浮容重(T/m^3), A 为整个滑体断面面积(m^2); γ_w 为水的容重(T/m^3), α 为滑面与水平面的夹角($^\circ$), φ 为滑带土的内摩擦角($^\circ$), c 为滑带土单位粘聚力(T/m^2); l 为滑动面的长度(m)。

3.2.2 滑体部分饱水时 设 A_1 为滑体断面未饱水部分, A_2 为滑体断面饱水部分, 则稳定系数为

$$F_s = \frac{W_2 \cos \alpha + \text{tg} \varphi + c \cdot l}{W_2 \sin \alpha + \gamma_w \cdot A_2 \cdot \sin \alpha} \quad (9)$$

式中 W_2 为滑体的总重量(T),其值为 $\gamma \cdot A_1 + \gamma' \cdot A_2$, 其中 γ 为黄土的天然容重(T/m^3), 其他符号同前。我们曾在兰州市皋兰山北部的 7 个滑坡剖面,天水市泰山庙、椒树湾的 5 个滑坡剖面,宝鸡市斗鸡台、卧龙寺等滑坡的 6 个剖面中,分别利用式(8)、(9)进行了滑坡稳定性计算,为抗滑设计提供了基础资料。当然稳定性评价还可采用其他方法,如有限元法、模糊信息分析法^[5]等。

4 滑坡监测及预报

4.1 滑坡监测

滑坡监测的内容一般包括地面及建筑物位移观测、地表及建筑物裂缝监测、地面高程变化监测、地面倾斜变化监测、滑体深部位移监测、地下水动态监测以及滑坡推力监测。

以上监测使用不同的方法,有的用简易的钢卷尺测量,有的使用较为精密的测量仪器。如用经纬仪、电子测距仪等在滑坡工点建立观测网,以测定地面位移情况;用日本板田式自动记录仪进行滑坡单点自动记录监测;用有线遥测或无线遥测的计算机监控法进行滑坡多点测量;用声发射仪在滑坡深部进行地下位移测量;用倾斜仪观测地面倾斜变化等。

笔者曾在水市锻压机床厂、泰山庙、椒树湾等地滑坡中,开展了地面位移监测、地面及建筑物裂缝监测和地面倾斜监测,收到良好效果,为居民的及时疏散和抗滑治理工程提供了依据^[6]。

4.2 滑坡预报

滑坡预报一般分为长期预报、短期预报和临滑预报。国外学者往往以蠕变理论为基础进行滑坡破坏时间的预报,如日本学者福圃、斋藤等的时间预报公式^[7]。我国学者则往往建立一些加速度阶段的公式,用以预报。

笔者曾在水市泰山庙、椒树湾滑坡中,利用灰色理论建立了滑坡预报模型(见文献 6),求出了位移、速度和加速度曲线公式。其式分别为

$$s(t+1) = 18.434\ 616\ 37e^{0.471\ 938t} - 18.434\ 616\ 37, \quad (10)$$

$$v(t+1) = \frac{ds(t+1)}{dt} = 8.70 e^{0.471\ 938t}, \quad (11)$$

$$a(t+1) = \frac{d^2s(t+1)}{dt^2} = 4.11 e^{0.471\ 938t}. \quad (12)$$

预测滑坡体滑动的时间:当斜率 $k = \frac{\pi}{2}$ 时,滑体滑动。但在 $s-t$ 曲线上,总有一个时间间隔,即 Δt 很小,往往取 $k = \tan 89^\circ 30' = 114.588\ 650\ 1$, $k = \frac{ds}{dt}$,代入式(11)求解得, $t = 5.46$ 。由于我们在建立模型时按 5 日一个间隔取值,故预报日期为 $T = 5.46 \times 5 = 27.3$ 日,这样就较准确地预报了这次滑坡,从而为抗滑治理提供了决策依据。

5 滑坡治理措施

在黄土山城上依山造居,若遇到滑坡不稳定问题,就要设法进行工程治理。

5.1 恢复山坡平衡条件的措施

滑坡的发生发展过程就是山坡自然平衡条件不断遭到破坏的过程。因此,恢复山体平衡常常是带有根本的有效治理措施。

5.1.1 填土反压 对于滑床呈上陡下缓的推动式滑坡,可采用在滑坡前部阻抗部分填土反压,填土数量以能平衡滑坡的下滑力为宜。

5.1.2 抗滑片石垛 它是一种垛石块干砌墙阻止滑坡下滑的措施。

5.1.3 抗滑挡墙 设计抗滑挡墙必须充分掌握滑坡的工程地质条件。如滑坡的立体形状和范围、滑动面层数、位置及形态、滑体及滑带土的各项物理力学性质及指标等。然后计算挡墙所要承受的推力数值及界限,据此进行设计。

5.1.4 抗滑桩 钢筋混凝土抗滑桩是利用桩的形式埋置在滑坡前部以稳定滑坡的一种抗滑建筑物。

5.1.5 支撑盲沟 这是设于滑坡中、前部的一种以抵御山坡滑动为主要作用,同时可疏引、排泄滑体地下水的抗滑建筑物。

5.1.6 滑坡后部刷方减重 当滑床坡度和滑体地面坡度都较陡的情况下,为减少滑坡推力可采取在滑

坡后部刷方减重措施。

5.2 消除或减少地面水和地下水作用的措施

强降雨或灌溉水经过地面沿裂隙渗入滑体并达到滑动带,造成滑带土强度降低,产生蠕、滑动液化而产生滑坡。因此排水是滑坡治理的一项重要内容。其工程措施有:①截水盲沟,这是为截除可能渗入滑体的地下水而设置在滑体以外地面以下的排水沟;②排水盲洞,这是排除滑体及滑带水的重要措施;③仰斜孔,利用机械向滑体内钻一仰斜角度不大(一般小于 5°)的孔,使地下水沿此仰斜孔排出滑体或滑带;④渗沟,分为支撑渗沟和边坡渗沟。

5.3 改善滑带和滑体土壤性质方面的措施

利用化学和物理的方法改善滑带土或滑体土壤的性质,提高其力学强度,是滑坡治理的重要方法之一。一般有焙烧法、爆破法和化学灌浆法等。

总之,在黄土滑坡的治理中,只有采用多种方法综合治理方能奏效。如天水泰山庙、椒树湾两处大滑坡就是采用了一、二级抗滑桩、挡土墙、排水盲沟等多种方法综合治理,才收到了良好效果。

参 考 文 献

- 1 王家鼎. 中国黄土山城“依山造居”的几个灾害问题讨论(1)——黄土层地震反应分析. 西北大学学报(自然科学版), 1995, 25(5): 461~464
- 2 王家鼎. 砂土滑动液化的初步分析. 灾害学, 1990, 5(2): 14~18
- 3 王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化. 地质论评, 1992, 38(6): 532~539
- 4 王家鼎, 黄海国. 滑坡体滑动轨迹的研究. 中国地质灾害与防治学报, 1991, 2(2): 1~10
- 5 Wang Jiading. The analysis of loess slope instability based on fuzzy information methods. BUSEFAL, France, 1993, 53: 83~92
- 6 王家鼎, 王念秦. 天水市椒树湾、泰山庙滑坡变形监测与分析. 兰州大学学报(自然科学版), 1992, 28(5): 48~55
- 7 Fukuzono. Recent studies on time prediction of slope failure. Landslide News, Japon, 1990(4): 23~24

责任编辑 徐象平

A Discussion on a Few Hazards in City Building along Loess Mountain in China ——Analysis of Loess Landslide

Wang Jiading

(Department of Urban and Resource Science, Northwest University, 710069, Xi'an)

Abstract Some hazards, such as loess seismic response, landslide, liquefaction and damp and seimo-sinkage deformation in the city building along loess mountain in China, such as in Lanzhou, Xining, Baoji, Tianshui and Yanan etc are discussed. Based on reference 1, the problem of loess landslide is studied which deal with its forming conditions, mechanism, evaluation of stability, surveillance, prediction and harness measure discussed.

Key words loess landslide; stability; surveillance; anti-slide design