

马星宇,王兰民,钟秀梅,等.地震诱发石碑塬黄土地层液化滑移距离研究[J].地震工程学报,2020,42(6):1674-1682.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1674

MA Xingyu,WANG Lanmin,ZHONG Xiumei,et al.Slippage Distance of Loess Deposit Triggered by Earthquake-induced Liquefaction in Shibeiyuan Area[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(6):1674-1682.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1674

地震诱发石碑塬黄土地层液化滑移距离研究

马星宇^{1,2}, 王兰民^{1,2}, 钟秀梅^{1,2}, 蒲小武^{1,2}, 刘富强^{1,3}, 王 谦^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000

2. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室,甘肃 兰州 730000;

3. 兰州大学 土木工程与力学学院,甘肃 兰州 730000)

摘要: 为研究 1920 年海原地震中石碑塬地区液化滑移灾害的形成机制、滑移特征及滑移距离,对石碑塬液化滑移区进行钻孔勘探、取样以及探槽开挖。分别对钻孔及所取试样进行剪切波速测试及颗粒分析、室内动三轴试验,得出石碑塬液化滑移区地层分布情况、震时液化土体层位以及不同地震烈度条件下砂质黄土层的液化情况。综合分析钻孔勘探、颗粒分析、动三轴试验结果,揭示出海原地震中石碑塬黄土地层液化滑移灾害的形成机制:砂质黄土层液化后在自重应力以及地震力的共同作用下“托浮”第一古土壤层以及上部“粉尘化”的非饱和黄土层沿缓斜坡运动,并利用液化滑移地层滑距公式对滑移距离进行估算,得到结果为 223.35 m,与实际情况较为相符。研究结果可为黄土地层液化滑移灾害的预防提供一定的借鉴意义。

关键词: 海原地震; 饱和黄土; 液化; 滑距

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1674-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1674

Slippage Distance of Loess Deposit Triggered by Earthquake-induced Liquefaction in Shibeiyuan Area

MA Xingyu^{1,2}, WANG Lanmin^{1,2}, ZHONG Xiumei^{1,2}, PU Xiaowu^{1,2}, LIU Fuqiang^{1,3}, WANG Qian^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. Department of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To study the formation mechanism, slip characteristics, and sliding distance of the liquefaction-induced slip disaster in the Shibeiyuan area during the 1920 Haiyuan earthquake, drilling exploration, sampling, and trench excavation were conducted in the Shibeiyuan liquefaction and slip area. Shear wave velocity tests, particle analysis, and indoor dynamic triaxial tests were

收稿日期:2020-07-10

基金项目:地震科技星火计划项目(XH20057);国家自然科学基金项目(U1939209,51778590)

第一作者简介:马星宇(1994—),男,硕士研究生,主要从事岩土地震工程研究。E-mail:1748214594@qq.com。

通信作者:王 谦(1985—),男,博士,主要从事土动力学、岩土地震工程和岩土工程抗震方面的科研和咨询工作。

E-mail:wangq0930@126.com。

performed on boreholes and samples. The stratum distribution in the liquefied slip zone of Shibeiyuan area, the layer of liquefied soil during the earthquake, and the sand under different seismic intensities were then obtained. The comprehensive analysis results of drilling exploration, particle analysis, and dynamic triaxial test revealed the formation mechanism of liquefaction-induced slip disaster of the loess deposit in Shibeiyuan area during the Haiyuan earthquake. The liquefied sandy loess layer floated the first paleosol layer and the upper “dusting” unsaturated loess layer to move along the gentle slope under the combined action of its own weight stress and seismic force. The slip distance formula of the liquefied slip deposit was used to estimate the slip distance (i.e., 223.35 m), which is consistent with the actual situation. The results of this research provide a reference for the prevention of liquefaction and slip disasters in the loess deposit.

Keywords: Haiyuan earthquake; saturated loess; liquefaction; sliding distance

0 引言

近年来,强震引发土体大规模液化滑移的灾害时有发生,造成了较大的人员伤亡和财产损失,引起了国内外科研人员的广泛关注^[1-2]。国内外的震害实例调查以及室内试验研究都已证实饱和黄土,甚至高含水率的黄土具有液化势,在一定强度的地震作用下可能产生液化现象,从而引发黄土液化滑移灾害^[3-4]。

以往的液化研究主要是围绕饱和砂土和粉土展开的,对于饱和黄土液化方面的研究较少。Prakash 等^[5]于 1982 年首次提出黄土液化问题,随后 Puri^[6]发现饱和黄土试样在受到循环荷载作用时将引起试样中孔隙水压力的升高以及土塑性的增加将抑制孔压的升高,并提出了饱和黄土的破坏标准和液化标准。Ishihara 等^[7]通过研究认为前苏联塔吉克境内的流滑现象是由于黄土地震液化造成的。王兰民等^[8-9]通过室外勘查以及室内试验,运用土动力学方法得出饱和黄土液化过程中孔隙水压力的变化以及黄土的液化判别标准。余跃心等^[10]、杨振茂等^[11]、师伟雄等^[12]利用室内动三轴试验对饱和黄土液化后强度与变形特性进行了研究。刘红玫等^[13]、安亮等^[14]对黄土液化过程中的微结构变化进行了较为详细的研究。

对于黄土地层液化滑移灾害的研究方面,白铭学等^[3]通过对石碑塬黄土地层液化滑移区进行现场考察和室内试验后认为:滑移是由于马兰黄土中含砂层段地震液化上涌推挤两侧土体而造成的。张晓超等^[15]通过对西吉县党家岔滑坡进行现场勘查,并结合工程地质条件及室内动三轴试验,揭示了党家岔滑坡形成机制及运动特征。王谦等^[16]利用动三轴实验研究了石碑塬地区黄土的液化特性,对石碑塬黄土液化滑移灾害形成机制进行了研究。张晓超

等^[17]通过环剪试验,探讨了固结压力、饱和度和剪切速率等因素对黄土稳态强度的影响规律,对石碑塬饱和黄土层侧向流滑的致灾机理进行了研究。王家鼎等^[18-20]对高速远程黄土滑坡的形成机制、滑距预测方法等方面进行了深入研究。王兰民等^[21]通过对石碑塬黄土液化滑移区进行现场考察、室内试验并结合数值模拟研究了黄土大规模地层液化滑移的滑动条件、运动学及动力学特征以及黄土地层大规模地震液化滑移的机制,构建了滑距和致灾范围预测模型。

在滑坡滑距的预测方面,前人提出了大量的经验公式以及方法,刘悦等^[22]将其总结为两大类:其一,基于质点运动学、质量运动学原理等来预测滑速、滑距;其二,基于统计学原理来预测滑距。卢育霞等^[23]根据 Newmark 提出的地震滑动位移分析进行改进,从运动学原理提出了地震诱发黄土滑坡的滑距公式。Kyojz Sassa^[24-25]利用环剪试验测得视摩擦角 φ_A ,考虑滑动能量损失仅发生于滑面上的摩擦作用,把滑动中的滑体近似地看作流体,采用流体介质平衡方程和连续介质方程,推导出滑坡运动的微分方程,实现了滑动范围的预测。张克亮等^[26]基于 Kyojz Sassa 滑动模型假设,推导了二维滑坡运动模拟微分公式。王鼐等^[27]、樊成意等^[28]利用模糊信息有关理论,建立了黄土滑坡预测模型。常晁瑜等^[29]通过引入 BP 神经网络算法,论证了 BP 神经网络模型用于预测黄土地震滑坡滑距的适宜性和可行性,建立了地震诱发黄土滑坡滑距的 BP 神经网络预测模型。

随着我国经济社会的快速发展,使得大中型城市不断向河谷高阶地上大规模扩展,导致黄土地区局部地下水位上升,且地震前往往会出现地下水位异常上升的现象,从而使黄土液化滑移灾害成为黄

土地区的一大潜在灾害。本文在前人研究工作的基础上,在对1920年海原地震中石碑塬黄土地层液化滑移区进行现场考察后,选取滑移区边缘以及中心地带进行钻孔勘探以及探槽开挖,对钻孔进行剪切波速测试以及取样进行颗粒分析实验。利用剪切波速判别法对土层在地震中的液化情况进行判别。通过对探槽剖面测量分析来分析黄土地层液化滑移运动机制。随后选取未扰动的黄土地带开挖探井取样,对所取试样进行饱和原状黄土的动三轴液化试验。利用Seed-Idriss法对黄土试样在不同烈度下的液化情况进行判定,并与剪切波速法所得结果相比较。最后利用液化滑移公式对液化滑移距离进行推测。研究结果可为黄土地区液化滑移灾害的预防提供一定的科学依据。

1 石碑塬液化滑移区概况

1.1 石碑塬液化滑移区地层结构及初步液化判别

为了解石碑塬液化滑移区地层分布情况以及对各地层在海原地震中的液化情况进行初步判别,于2019年10月前往石碑塬液化滑移区进行现场调查及取样。滑移区距离1920年海原地震震中约

70 km,地震烈度达到IX度。石碑塬南滑移区塬面是坡度为 $1^{\circ}45' \sim 2^{\circ}25'$ 的低缓平面,整个黄土地带的地势向西北方向倾斜,东南高、西北低。南滑移区的南北长约2.1 km,东西宽1.2~1.3 km,影响范围约2 km²。南滑移区的滑体厚10~30 m,滑移土体土方量超过4 000万m³^[3,21]。南滑移区的全貌如图1所示。为了解石碑塬液化滑移区地层分布情况,在石碑塬南液化滑移区共布置8个钻孔以及1个探槽,钻孔主要分布于滑移区的后缘,中间位置以及左右两侧缘上,探槽位于滑移区中心位置。钻孔、探槽布置如图2所示。为判断各地层在地震中的液化情况,对所有钻孔每隔1 m进行波速测试并取样进行颗粒分析,综合8个钻孔数据,得出石碑塬地层分布情况、各地层的平均波速以及粒度分布情况(表1、表2)。由于规范中缺少对黄土液化的工程判别方法,且石碑塬各地层颗粒级配中黏粒含量并未超过16%,故通过剪切波速判别法^[30]来判断石碑塬各地层在海原地震中的液化情况(表3),由于地震前地下水位的异常上升以及第一古土壤层具有较好的隔水作用,判断第一古土壤层下土层均为饱水层,利用式(1)来计算土体液化临界波速值,并与实



图1 石碑塬南滑坡(移)区全貌图

Fig.1 Overall picture of the south slip zone in Shibeiyuan area

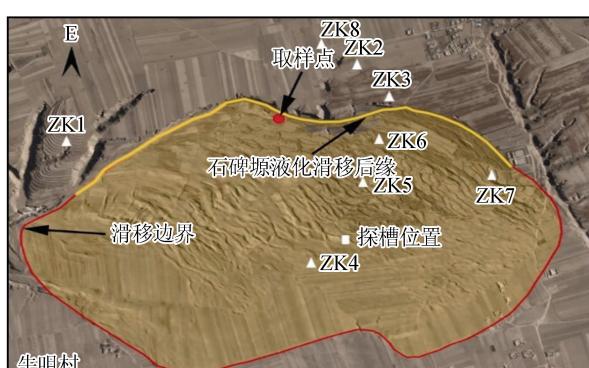


图2 滑移区分布范围及钻孔、探槽分布图^[21]

Fig.2 Distribution range of slip zone and distribution of drilling and trenching

测值相比较,比较结果列于表4。由此可得,当地震烈度为IX度时,只有砂质黄土层会产生液化现象,第一古土壤层、第二古土壤层以及Q₂黄土层均不会产生液化现象,因此判断此次液化主要发生在砂质黄土层内。

$$v_{SCTi} = \overline{v_s} (h_s - 0.0133 h_s^2)^{0.5} \cdot \\ \left[1.0 - 0.185 \left(\frac{d_w}{h_s} \right) \right] \left(\frac{3}{P_c} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: v_{SCTi} 为液化临界剪切波速值; $\overline{v_s}$ 为 h_s 为1 m处的液化临界剪切波速,按表4砂土类取值; h_s 为土体埋深; d_w 为地下水位; P_c 为黏粒含量百分率,当小于3或为砂土时,均应采用3^[30]。

表 1 石碑塬地区地层分部情况表

Table 1 Stratigraphic divisions in Shibeiyuan area

年代	地层	土层厚度/m	土层描述	剪切波速/(m/s)
晚更新世马兰黄土 Q ₃	上部黄土层	10	褐黄色、稍密、具层理、较均匀、岩心成短柱状	151
	第一古土壤层	0.8	褐红色、硬塑、中密、具层理	211
	砂质黄土层	14.2	褐黄色、稍湿、稍密、具层理、土质较为均匀	188
中更新世离石黄土 Q ₂	第二古土壤层	0.5	褐红色、硬塑、中密、具层理	215
	下部黄土层	>45	褐色、软塑、稍密、有缩孔现象、岩心有拉长变形现象	272

表 2 取样钻芯颗粒级配

Table 2 Particle distribution of drilled core of samples

土层	v_s (m · s ⁻¹)	v_{SCTi} /(m · s ⁻¹)			是否液化		
		VII 度	VIII 度	IX 度	VII 度	VIII 度	IX 度
第一古土壤层	211	68	94	135	否	否	否
砂质黄土层	188	98	136	196	否	否	是
第二古土壤层	244	118	163	236	否	否	否
Q ₂ 黄土层	272	122	169	244	否	否	否

表 3 剪切波速法液化判别结果

Table 3 Liquefaction discrimination results of shear wave velocity method

土样	取样深度 /m	颗粒组成/%		
		黏粒	粉粒	砂粒
第一古土壤层	10.5	16.97	81.01	2.02
砂质黄土	15.0	12.20	59.66	28.14
第二古土壤层	26.5	13.49	81	5.51
Q ₂ 黄土层	35.5	13.22	66.21	20.57

表 4 \bar{v}_s 与烈度、土类的关系^[30]Table 4 Relationship between \bar{v}_s , intensity and soil^[30]

土类	\bar{v}_s		
	VII 度	VIII 度	IX 度
砂土	65	90	130
粉土	45	65	90

1.2 石碑塬液化滑移区水文地质情况

为更好分析石碑塬地区各地层在地震前的饱和情况, 对石碑塬液化滑移区的水文地质条件进行了调查: 石碑塬液化滑移区坡度较小, 具备较好的汇水条件, 上部潜水位位于 8~20 m^[3,21]。液化滑移区的地下水主要来源为大气降水以及黄土塬与营城河之间相互补给, 图 3 为后缘出露砂层以及雨后原河道旧址出露的水源。降雨时, 雨水沿黄土裂隙、冲沟等途径渗入砂质黄土层, 加之砂层具有良好的导水性, 黄土良好的持水性, 第一古土壤较好的隔水性, 具有长期周期性雨水的入渗作用, 加之震前地下水位的异常上升, 使得震时砂质黄土层处于饱水状态。

1.3 土层液化滑移运动机制

为研究滑移体的运动情况以及峰谷地貌(图 4)的形成机制, 在石碑塬液化滑移区的中心位置沿波峰、波谷走向的垂直方向, 开挖了如图 5 所示探槽。



(a) 后缘出露砂层



(b) 雨后原河道出露水源

图 3 石碑塬地区水文地质条件

Fig.3 Hydrogeological conditions in Shibeiyuan area

探槽深 12 m、长 21 m、宽 15 m。在对探槽进行实地测量后, 绘制石碑塬探槽剖面简图, 如图 6 所示。综合图 5、图 6 可知, 探槽内土层从上到下分别为: 腐殖土、上部黄土层、第一古土壤层以及砂质黄土液化



(a)



(b)

图4 峰谷地貌

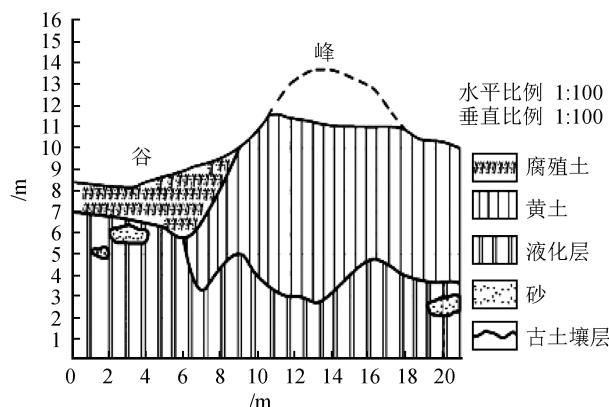
Fig.4 Peak and valley landforms



图5 探槽全貌

Fig.5 Full view of the trench

层。探槽内土层分布情况与石碑塬地区地层分布情况相一致,表明滑移体在运动过程中始终保持土层位置相对不变,在开挖过程中液化层处于“流态状”,且始终处于第一古土壤层之下,并未出现液化层冲

图6 探槽剖面简图^[21]Fig.6 Simple profile of engineering trench^[21]

断第一古土壤层的情况。古土壤层通常与上下地层平行整合接触,但在探槽内第一古土壤层出现多个波峰波谷相间的形态,表明在地震作用下,古土壤层虽未出现液化现象,但在滑移过程中受到下部液化砂质黄土推挤作用以及地震力的长时间作用,变形较为明显。此外在探槽内发现不连续的砂层(图7),与在后缘剖面发生的连续的砂层[图3(a)]相对比,表明砂层在随砂质黄土液化层运动过程中被不同程度地卷入液化层,并可能在砂质黄土层的运动过程中起到“润滑”作用,即加快了液化层的运动速率。综合上述原因,可以得到石碑塬黄土地层液化滑移运动机制为:上部黄土层因第一古土壤的隔断作用而未饱和,在地震力作用下“粉尘化”^[19],砂质黄土层液化后在自重应力以及地震力的共同作用下“托浮”第一古土壤层以及上部“粉尘化”的非饱和黄土层沿缓斜坡运动,致密的古土壤层在运动过程中起到隔水以及传力的双重作用,液化后黄土层呈现非牛顿流体“剪切稀化”特性^[15],即随着流速增加,流动黏度降低。综上,因流速加快而对古土壤层产



图7 探槽内砂层

Fig.7 Sand layer in the trench

生的挤压力,长时间的地震力作用^[16]以及孔隙水压力的上顶作用使得古土壤层出现多个波峰波谷形态,而上部土体由于粉尘化,导致上部重量减轻。由此在滑移区出现峰谷相间的地貌。

2 试验设备与试验方法

2.1 试样及试验设备

由剪切波速判别法可知,液化主要发生在砂质

黄土层,为更加深入了解砂质黄土层在不同地震烈度下的液化情况,对石碑塬黄土液化滑移区后缘未滑动的 15 m 处原生砂质黄土地层进行取样,土样的物性指标如表 5 所列。

室内动三轴试验在中国地震局黄土地震工程重点实验室的 WF-12440 型动三轴-空心圆柱扭剪试验系统上完成。该系统配备了反压饱和系统,通过对试样逐级施加反压力,可有效提高黄土试样的饱

表 5 土样的物性指标

Table 5 Basic physical parameters of loess samples

取样点	取样深度 /m	初始 孔隙比	天然含水率 /%	颗粒组成/%			塑性指数
				黏粒	粉粒	砂粒	
石碑塬	15	0.64	5.6	13.4	34.8	51.8	7.4

和度,进而保证试验的精确度。

2.2 试验方法

室内将现场取备的土样统一切削成直径 50 mm×高 100 mm 的圆柱形备用。采用反压饱和法对试样进行饱和,利用孔隙水压力系数 B 值判定试样的饱和度,待 B 值达到 0.95 时对试样进行固结。为了减小试样在静压过程中的变形量,选择固结比 $K_c=1$,轴向压力和围压均为 100 kPa。待固结变形小于 0.000 5 mm/min 时认为试样固结稳定。对固结稳定的试样施加等幅正弦荷载进行循环剪切,考虑地震作用具有加速度越高,持时越长,频率越低,则破坏越严重的特点,试验采用动荷载为频率 1 Hz,试样液化破坏标准为:轴向动应变 $\epsilon \geq 3\%$ 且孔隙水压力比 $U_d/\sigma'_0 \geq 0.2$ ^[9]。试验时记录动应力、动应变和动孔隙水压力变化过程。

2.3 试验结果分析

根据石碑塬饱和黄土动三轴液化试验结果,得出液化应力比($\sigma_d/2\sigma'_0$)和引起黄土液化破坏的循环次数 N_l 之间的关系如图 8 所示。由图 8 可知:饱和黄土的液化应力比随着振次的增加出现衰减现象,不同振次下液化应力比大小在 0.08~0.14 范围内。根据黄土地区地震烈度与动三轴试验等效振动次数之间的换算关系,地震烈度为Ⅶ度、Ⅷ度以及Ⅸ度时对应的动三轴试验等效振次分别为 12、20 以及 30 次^[31-32]。由图 8 可得振次 12、20 以及 30 次下黄土的液化应力比分别为 0.118、0.113 以及 0.11。分别

用式(2)和式(3)计算黄土地层抗液化强度 τ 和地震作用时的平均剪应力 τ_e ,结果如表 6 所列。

$$\frac{\tau}{\sigma'_v} = C_r \frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \quad (2)$$

式中: τ/σ'_v 为黄土层在天然埋藏状态下的液化剪应力比; C_r 修正系数,一般可取 0.6; $\sigma_d/2\sigma'_0$ 为试验测得饱和黄土的液化应力比

$$\tau_e = 0.65K \frac{a_{max}}{g} \gamma d_s \quad (3)$$

式中: K 为应力折减系数,深度为 15 m 时取 0.815; a_{max} 为地面 PGA/gal^[31]; γ 为深度 d_s 以上的上覆土层天然重度。

计算结果表明,Ⅶ度和Ⅸ度地震作用时平均剪

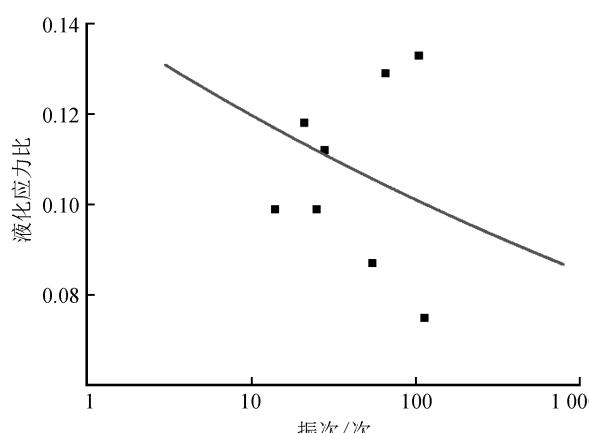


图 8 石碑塬黄土液化应力比-振次关系曲线

Fig.8 Relationship between the number of vibration cycles and liquefaction stress ratio of Shibeiyuan loess

表 6 地震作用下石碑塬黄土液化势判别

Table 6 Discrimination of liquefaction potential of Shibeiyuan loess under earthquake

取样地点	抗液化强度 τ /kPa			地震作用时平均剪应力 τ_e /kPa			是否液化		
	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
石碑塬	11.3	10.8	10.5	11.3	27.5	53.4	否	是	是

应力约为抗液化强度的 2.54 和 5.08 倍,表明石碑塬黄土在Ⅷ度和Ⅸ度地震作用下会产生液化现象,与剪切波速法判别结果较为一致。

2.4 石碑塬液化滑移灾害形成机制

由石碑塬液化滑移区的地层分布情况以及水文地质情况,可以得到石碑塬地区较为特殊的地层结构是液化滑移灾害发生的先决条件。上、下古土壤层的隔水作用、砂层的导水作用、黄土层的持水作用、与河流之间的相互补给,加之震前地下水位的异常上升,使得震时砂质黄土层处于饱和状态。砂质黄土在地震力作用下快速液化,且由于地震力持时较长,导致液化后的土体在自重应力以及地震力的共同作用下“托浮”第一古土壤层以及上部“粉尘化”的非饱和黄土层沿缓斜坡运动。

3 石碑塬液化滑移灾害滑距推测

在滑坡滑距的预测方面,总结为两大类:其一,基于质点运动学、质量运动学原理等来预测滑速、滑距;其二,基于统计学原理来预测滑距。基于统计学原理或者模糊信息理论来研究滑坡滑距问题时,往往受限于所参考样本的限制,此外,这种方法也忽略了对滑坡产生机理的研究。由剪切波速判

别法以及室内动三轴试验可知,砂质黄土层内液化是导致此次灾害发生的主要原因,此外通过探槽开挖可得滑移土体的运动机制为:液化后的砂质黄土层在自重应力以及地震力的共同作用下“托浮”第一古土壤层以及上部非饱和黄土层沿缓斜坡运动。因此,在估测石碑塬液化滑移灾害运动距离时,选用王家鼎等^[18,20]提出的基于流体力学方法,运用变分原理所得到的地震结束后液化土体运动公式,公式内所取参数为探槽土体测试所得参数,如表 7 所列,相比于后缘未滑动土体参数,对公式来讲更加适合,准确。

$$l = \frac{h[1 + A_D B_D \mu]}{[1 - B_D] \mu} \quad (4)$$

$$A_D = \begin{cases} 2.5e - 5.5 & 0.6 < e < 0.8 \\ 16e - 12.8 & e < 0.6 \end{cases} \quad (5)$$

$$B_D(t) = \begin{cases} 0.0023S_r - 0.02 & 30 \leq S_r \leq 60 \\ 0.0225S_r - 1.236 & 60 \leq S_r \leq 100 \end{cases} \quad (6)$$

$$\lg \mu = -0.1566 \times \lg V + 0.62419 \quad (7)$$

式中: l 为斜坡运动滑距(m); h 为斜坡后缘顶点至滑体停止点之间的高差(m); A_D 、 $B_D(t)$ 为两个孔压参数; V 为滑体体积,取 4 000 万 m³^[3,21]; μ 动摩擦系数。

表 7 探槽内土体基本参数

Table 7 Basic parameters of soil in the trench

土层	取样深度/m	密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	孔隙比(e)	饱和度/%
上部黄土层	6	1.58	16.63	0.83	52
第一古土壤层	10	1.95	23.78	0.89	73
砂质黄土层	12	1.82	24.19	0.73	85

联立式(4)~(7)可得滑移距离 l 为 223.35 m,与王兰民等^[21]提出滑移距离在 200~600 m 间相符。与王家鼎等^[18,20]所得出的 489.8 m 相比较,由于所采用的参数是根据石碑塬现场取样测试所得到的,相比于王家鼎等所采用的基于统计所得参数,针对此公式来讲,本文所采用的参数更加符合石碑塬地区的实际情况。但此公式为震后滑移体滑距公式,实际上由于地震持时较长,滑移体会在地震力作用下进行运移,使得所得滑移距离必然小于实际滑移距离。

4 结论与讨论

(1) 剪切波速法以及 Seed-Idriss 法均判定:Ⅸ 度地震作用下,石碑塬饱和砂质黄土的抗液化强度小于地震作用时的平均剪应力,因此其在该烈度下会产生液化现象。

(2) 石碑塬黄土地层液化滑移灾害的形成机制为:砂质黄土在地震力作用下快速液化,液化后的土体在自重应力以及地震力的共同作用下“托浮”第一古土壤层以及上部“粉尘化”的非饱和黄土层沿缓斜坡运动。致密的第一古土壤层在滑移体的长距离运移以及峰谷地貌的形成过程中都起到了较为关键的作用。

(3) 在运用滑移公式时,采用的是震后滑移体滑距公式,实际上由于地震持时较长,滑移体会在地震力作用下进行运移,加之液化黄土运动的“剪切稀化”作用,使得所得滑移距离必然小于实际滑移距离。通过以后对震后滑移体滑距公式作进一步研究,将对该公式进行修正和完善。

参考文献(References)

[1] 黄雨,于森, BHATTACHARYA Subhamoy. 2011 年日本东北

- 地区太平洋近海地震地基液化灾害综述[J].岩土工程学报,2013,35(5):834-840.
- HUANG Yu YU Miao, BHATTACHARYA Subhamoy. Review on Liquefaction-induced Damages of Soils and Foundations during 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan) [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(5):834-840.
- [2] WATKINSON I M, HALL R. Impact of Communal Irrigation on the 2018 Palu Earthquake-triggered Landslides[J]. Nature Geoscience, 2019,12(11):940-945.
- [3] 白铭学,张苏民.高烈度地震时黄土地层的液化移动[J].工程勘察,1990,18(6):1-5.
- BAI Mingxue, ZHANG Sumin. Landslide Induced by Liquefaction of Loessial Soil during Earthquake of High Intensity[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1990,18(6):1-5.
- [4] 王兰民,刘琨,孙军杰,等.饱和原状黄土液化基本特征的振动台试验研究[J].地震工程学报,2015,37(4):1023-1028.
- WANG Lanmin, LIU Kun, SUN Junjie, et al. Shaking-table Tests on Liquefaction Characteristics of Saturated Undisturbed Loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015,37(4):1023-1028.
- [5] PRAKASH S, PURI V K. Liquefaction of Loessial Soils[C]// Anon. Proc. of Third International Conference on Seismic Microzonation, Seattle, Wash. (Vol II). 1982:1101-1107.
- [6] PURI K. Liquefaction Behavior and Dynamic Properties of Loessial (Silty) Soils[D]. Missouri: University of Missouri-Rolla, 1984.
- [7] ISHIHARA K, OKUSA S, OYAGI N, et al. Liquefaction-Induced Flow Slide in the Collapsible Loess Deposit in Soviet Tajikistan[J]. Soils and Foundations, 1990,30(4):73-89.
- [8] 王兰民,刘红玲,李兰,等.饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):92-97.
- WANG Lanmin, LIU Hongmei, LI Lan, et al. Laboratory Study on the Mechanism and Behaviors of Saturated Loess Liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(1):92-97.
- [9] 王兰民,袁中夏,汪国烈.饱和黄土地场液化的工程初判和详判指标与方法研究[J].地震工程学报,2013,35(1):1-8.
- WANG Lanmin, YUAN Zhongxia, WANG Guolie. Study on Method for Preliminary and Detailed Evaluation on Liquefaction of Loess Sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013,35(1):1-8.
- [10] 余跃心,刘汉龙,高玉峰.饱和黄土孔压增长模式与液化机理试验研究[J].岩土力学,2002,23(4):395-399.
- SHE Yuexin, LIU Hanlong, GAO Yufen. Study on Liquefaction Mechanism and Pore-water Pressure Mode of Saturated Original Loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(4):395-399.
- [11] 杨振茂,赵成刚,王兰民.饱和黄土液化的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(5):864-871.
- YANG Zhenmao, ZHAO Chenggang, WANG Lanmin. Testing Study on Saturated Loess Liquefaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (5): 864-871.
- [12] 师伟雄,张子东,高和新,等.饱和黄土液化后强度与变形特性的试验研究[J].地震工程学报,2016,38(6):922-928.
- SHI Weixiong, ZHANG Zidong, GAO Hexin, et al. Experimental Study on the Post-liquefaction Strength and Deformation Behavior of Saturated Loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016,38(6):922-928.
- [13] 刘红玲,王兰民.饱和黄土液化的孔隙微结构特征[J].西北地震学报,2002,24(2):40-44.
- LIU Hongmei, WANG Lanmin. Study On the Liquefaction Mechanism and Pore Microstructure of Saturated Loess[J]. Northwestern Seismological Journal, 2002,24(2):40-44.
- [14] 安亮,邓津,王兰民.黄土液化微观特性试验研究[J].地震工程学报,2018,40(4):752-758.
- An Liang, DENG Jin, WANG Lanmin. Experimental Investigation of Micro-mesoscopic Features of Loess Liquefaction [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018,40(4):752-758.
- [15] 张晓超,裴向军,张茂省,等.强震触发黄土滑坡流滑机理的试验研究:以宁夏党家岔滑坡为例[J].工程地质学报,2018,26(5):1219-1226.
- ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, ZHANG Maosheng, et al. Experimental Study on Mechanism of Flow Slide of Loess Landslides Triggered by Strong Earthquake: a Case Study in Dangjiacha, Ningxia Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2018,26(5):1219-1226.
- [16] 王谦,王峻,王兰民,等.石碑塬饱和黄土地震液化机制探讨[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):4168-4173.
- WANG Qian, WANG Jun, WANG Lanmin, et al. Discussion on Mechanism of Seismic Liquefaction of Saturation Loess in Shihai Tableland, Guyuan City[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(Supp2):4168-4173.
- [17] 张晓超,裴向军,贾俊,等.饱和黄土体侧向流滑机制的试验研究[J].地质力学学报,2018,24(5):730-736.
- ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, JIA Jun, et al. Experimental Study on the Lateral Flow Slide Mechanism of Saturated Loess Mass[J]. Journal Of Geomechanics, 2018,24(5):730-736.
- [18] 王家鼎,白铭学,肖树芳.强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究[J].岩土工程学报,2001,23(4):445-449.
- WANG Jiading, BAIMingxue, XIAO Shu-fang. A Study on Compound Mechanism of Earthquake-related Sliding Displacements on Gently Inclined Loess Slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001,23(4):445-449.
- [19] 王家鼎,张倬元.地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J].岩土工程学报,1999,21(6):670-674.
- WANG Jiading, ZHANG Zhuoyuan. A Study on the Mechanism of High Speed Loess Landslide Induced by Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21 (6): 670-674.

- [20] 王家鼎,谢婉丽.地震液化引起地面大位移预测方法研究
[C]//中国地质学会工程地质专业委员会.2002年中国西北部重大工程地质问题论坛论文集,2002:156-159.
WANG Jiading, XIE Wanli. A Study On Prediction-Method of Large Ground Displacements Caused by Seismic Liquefaction [C]//Engineering Geology Committee of Chinese Geological Society. Proceedings of the Forum on Major Engineering Geological Problems in Northwest China in 2002. 2002: 156-159.
- [21] 王兰民.黄土地层大规模地震液化滑移的机理与风险评估
[J].岩土工程学报,2020,42(1):1-19.
WANG Lanmin. Mechanism and Risk Evaluation of Sliding Flow Triggered by Liquefaction of Loess Deposit during Earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 1-19.
- [22] 刘悦,黄强兵.一种黄土滑坡滑距预测模型[J].灾害学,2001,16(3):6-11.
LIU Yue, HUANG Qiang bing. A Forecast Pattern of the Side Distance of Loess Landslides[J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(3): 6-11.
- [23] 卢育霞,石玉成,陈永明,等.地震诱发黄土滑坡的滑距估测
[J].西北地震学报,2006,28(3):248-251.
LU Yuxia, SHI Yucheng, CHENG Yongming, et al. Slippage Estimation of the Loess Landslide Triggered by Earthquake [J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3): 248-251.
- [24] SASSA K. Development of Ring-shear Apparatus to Simulate Earthquake-induced Landslides[Z]. Grant-in-Aid for Scientific Research, Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, 1994, 106 (Project No. 03556021, Representative: Kyoji Sassa).
- [25] SASSA K. International Symposium on Landslide Hazard Assement[C]. Japan: 2000.
- [26] 张克亮,张亚国,李同录.二维滑坡滑距预测[J].工程地质学报,2012,20(3):311-317.
ZHANG Keliang, ZHANG Yaguo, LI Tonglu. Prediction of Landslide Travel Distance with 2-D Newton Fluid Dynamics [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(3): 311-317.
- [27] 王鼐,王兰民,王谦,等.黄土高原地震作用下黄土滑坡滑距预测方法[J].地震工程学报,2016,38(4):533-540.
WANG Nai, WANG Lanmin, WANG Qian, et al. Forecasting Method for Sliding Distance of Seismic Landslides on the Loess Plateau, China [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(4): 533-540.
- [28] 樊成意,梁收运.黄土台缘滑坡滑距与滑体形态的关系分析
[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(1):18-24.
FAN Chengyi, LIANG Shouyun. Relationship between Sliding Distance and Sliding-body Form of Loess Landslides on Platform [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(1): 18-24.
- [29] 常晁瑜,薄景山,李孝波,等.地震黄土滑坡滑距预测的BP神经网络模型[J/OL].地震工程学报:1-6[2020-07-14]
CHANG Chaoyu, BO Jingshan, LI Xiaobo, et al. A BP Neural Network Model for Forecasting Sliding Distance of Seismic Loess Landslides[J/OL]. China Earthquake Engineering Journal: 1-6[2020-07-14]
- [30] 石兆吉,郁寿松,丰万玲.土壤液化势的剪切波速判别法[J].岩土工程学报,1993,15(1):74-80.
SHI Zhaoji, YU Shousong Feng Wanling. Discrimination Method of Soil Liquefaction Potential by Shear Wave Velocity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(1): 74-80.
- [31] 王峻,王兰民.常德—张家界高速公路某大桥桥基砂土液化评价[J].工程地质学报,2006,14(3):327-332.
WANG Jun, WANG Lanmin. Evaluation of Sand Liquefaction at Site of a Changde—Zhangjiajie Expressway Bridge [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(3): 327-332.
- [32] 王峻,刘旭.白兰高速公路沿线黄土地震陷区判定与评价
[J].水文地质工程地质,2004,31(3):13-16,65.
WANG Jun, LIU Xu. Discrimination and Evaluation for Seismic Subsidence Areas in Loess Sites along the Highway from Baiyin to Lanzhou [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(3): 13-16, 65.