

强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究

A study on compound mechanism of earthquake-related sliding displacements on gently inclined loess slope

王家鼎^{1,3}, 白铭学², 肖树芳³

(1. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069; 2. 宁夏地震局, 宁夏银川 750000; 3. 吉林大学, 吉林长春 130026)

摘要: 针对1920年宁夏海原大地震($M_s = 8.5$)时固原清水河IV级黄土台塬所发生大面积低角度黄土斜坡滑移现象及其种种特征, 经过现场勘察、室内试验及理论推导, 提出了一种强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理——位于第一层古土壤层下部饱和黄土和砂土震动液化; 位于其上部黄土层受地震力和液化的双重作用而呈现波浪状地貌, 进而部分黄土体解体、斜抛、粉尘化和远程运移而形成黄土流或黄土瀑布。用笔者提出的滑距公式对滑移体的滑距进行了计算, 效果良好。

关键词: 低角度; 黄土滑移; 强震; 液化

中图分类号: P 642.22; TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)04-0445-05

作者简介: 王家鼎, 男, 1962年生, 博士后, 教授, 博士生导师。从事工程地震、工程地质及岩土工程方面的教学与科研工作。

WANG Jia-ding^{1,3}, BAI Ming-xue², XIAO Shu-fang³

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. The Seismological Bureau of Ningxia Autonomous Region of Hui Minority, Yinchuan 750000, China; 3. Geological Engineering Department, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Due consideration has been paid to the characteristic features and phenomena of the tremendous sliding displacements triggered by 1920 Haiyuan earthquake ($M_s = 8.5$) on gently inclined loess slope which is located in the loess terrace 4 along Qingshui River, Guyuan County, Ningxia Autonomous Region of Hui Minority, China. Based on the features and phenomena such as high sliding speeds, long traveling distance, loess falls, wave form topographic surfaces and liquefaction, a compound mechanism is presented with the help of field exploration, mechanical and dynamic tests of soil and computed results. That is, saturated loess under the first fossil soil liquefied, and the upper loess produced mass disintegration oblique projection collision between loess blocks, pulverization and loess fall. The traveling distance of gently inclined loess slope is calculated with the author's formulae. The computed results quite agree with the evidences in field.

Key words: gently inclined; loess sliding displacement; strong ground motion; liquefaction

1 引言*

有关地震引起低角度斜坡滑移的报道很多, 如1964年新泻7.4级地震中, 新泻市大泻区在平均坡度为0.5%的4 m厚的土层沿着Tsuson河方向滑移6 m之多(Yasuda等, 1989)^[1]; 1971年费尔南多6.6级地震时, Van Norman水库西岸的基底坡度为 $1^\circ \sim 2^\circ$ 的人工填土层向前滑移了3.0 m(O'Rourke等, 1989)^[2]; 1989年前苏联塔吉克5.5级地震在半干旱的缓斜坡丘陵下, 近乎平坦的风成黄土层中触发了广泛的液化, 并形成大规模泥流, 向前流滑了2.0 km(K. Ishihara等, 1990)^[3]; 1920年海原8.5级地震时, 宁夏固原清水河IV级黄土台塬的马兰黄土粉尘(黄土瀑布)向前运移1~1.5 km, 在斜坡中、后部出现了波浪起伏状滑移概貌(垂直方向为半波浪状起伏, 水平方向为脉络状)^[4]。

对这种低角度斜坡滑移, 许多学者(日、美、中、加、土耳其、新西兰、南斯拉夫等国)从不同的角度作了解释。但较为一致的认识是滑移的驱动力主要是土的自重力在流滑方向上的分力, 地震水平力因作用时间短,

不是主要的, 但却控制着液化土中的孔压上升进程, 滑移的时间取决于液化后土中的孔压消散时间(Steadman, 1989^[5]; Sasake, 1992^[6]及Pilgrim, 1998^[7])。一些学者(H. Sato等, 1994; I. Towhata等, 1994及M. Miyajima等, 1994)对埋于液化土中的管子与土产生相对位移时管子的受力机理进行了试验研究, 讨论了土的液化程度、粘滞系数与位移的关系。刘惠珊^[8]在总结液化引起斜坡滑程的大小时, 指出了许多学者提出的一些预测公式(如Hamada; Bartlett, 1992; Yasuda, 1991; Dobry, 1991及Towhata, 1994等)。然而, 对于黄土区低角度的滑移问题研究的并不是很多, Ishihara(1990)^[3]对塔吉克地震引起饱和黄土层液化进而导致泥流产生这种现象调查后认为是由于农业灌溉水湿化了7~17 m范围内的孔隙风成黄土层。白铭学等(1990)^[4]对1920年海原大地震时石碑塬黄土层低角度滑移进行研究, 仍认为是液化层托浮上覆黄土层而滑移。王家鼎等

* 基金项目: 中国博士后基金资助项目(2000年); 陕西省教育厅科研计划项目资助(00JK152)

收稿日期: 2000-11-16

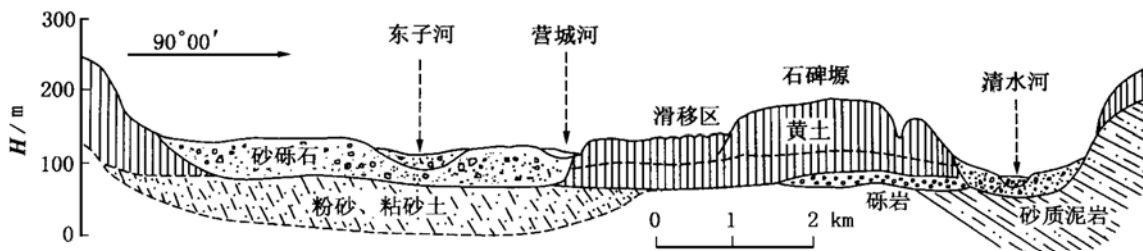


图 1 石碑塬地层剖面图

Fig. 1 Geologic section of Shibei platform

(1999)^[9]针对黄土高原的数次大地震所诱发的黄土滑坡,提出了“黄土体解体、斜抛、粉尘化”机理。王兰民等(2000)^[10]基于土动力学方法探讨了黄土层的液化机理。

纵观以上研究结果,认为是地震引起饱和土层发生液化进而导致低角度斜坡滑移。然而在 1920 年海原大地震诱发大面积的低角度滑移中,不仅出现液化的特征,而且还有地表呈波浪状滑移地貌以及“黄土瀑布或黄土流”等现象,对于这种同时出现多种现象的复合机理,尚未见研究报道,本文拟开展此方面的工作。

2 本区黄土斜坡滑移、地层和水文地质概况

2.1 滑移概况

1920 年宁夏海原大地震 ($M_s = 8.5$) 触发了大量的黄土滑坡、滑移和崩塌群,其中低角度黄土斜坡滑移在 VIII~X 度区内十分密集,如固原(该区烈度为 IX 度)石碑黄土塬西北部斜坡发生的滑移(液化层面以上体积 $4.7 \times 10^7 \text{ m}^3$) 就是典型一例。石碑塬位于清水河沉降带南部头营与固原之间(图 1),原面向西和向北方向倾斜,滑移发生在黄土塬以西的 IV 级黄土台塬上,地震前地面坡降为 2.5%。从滑移后壁开始,沿着滑体方向为一系列波浪状的黄土滑移体。滑移区的后段和中段,波峰波谷相间排列、节律性很强。滑体前缘为黄土瀑布的降落区,同样表现出水波状。整个滑移区表现为波浪状起伏,峰谷相间,波峰在平行走向方向的延展为蛇曲形和斜列形,从平面上看,是脉络状(图 2),构成奇特的阵列地貌景观。

对于滑移距离的问题,据详细考察和访问,滑移区内牛嘴村某农户的石碾和另一农户的院墙在滑移时向西分别推出了 155 m 和 124 m。滑移使石河堡村被压埋,营城河改道向西推移约 400 m。另外,对访问者所谓的“弥天劫尘,滑移数里”等说法,经考察是上部黄土粉尘化后的远程运移,也即“黄土流或黄土瀑布”。

2.2 滑移区地层、水文地质情况

据现场数个探槽、探井开挖揭示,本区的地层情况

如图 3 所示。



图 2 波浪状滑移体地貌特征

Fig. 2 Geomorphic feature of sliding loess mass in wave form

时代	地 层	图 例	层底深度 (m)
晚更新世马兰黄土 Q_3	上部黄土层		7
	第一古土壤层		11
	含砂层段	砂质黄土	20
		粉细中砂	
	下部黄土层		25
中离更新世黄土 Q_2	第二古土壤层		27
	黄土		>30

图 3 滑移区黄土地层剖面

Fig. 3 Profile of loess layer in sliding region

由图 3 可看出:在第一古土壤层(红粘土层)之下存在一饱水的含砂(非纯净砂)段,埋藏深度为 11~20 m。此层在石碑塬普遍存在,按粒径分为粉、细、中砂,砂质黄土层中含有较多砂粒,平均粒径高于一般黄土。在探槽中还发现许多液化上涌层和砂脉。

表1 土的物理、力学指标

Table 1 Soil parameters

土名	颗粒含量/%			含水率 $w / \%$	比重 G_s	容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙比 e	饱和度 $S_r / \%$	平均标贯击数 $N / \text{次}$	粘聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	最大动模量 $E_{d\max} / \text{MPa}$
	砂	粉粒	粘粒									
第一古土壤层 以上黄土层	36	51	12	16.0	2.72	15.45	1.04	41.85				
第一古土壤层以下 砂质黄土(上)	23	53	24	26.8	2.70	17.75	0.90	80.25	13.4	30(29)	5.6(16.4)	137.0
粉砂	58	26	16	21.32	2.65	19.41	0.67	84.34	7.2	30	8	64.5
砂质黄土(下)	28	52	20	28.75	2.73	17.77	0.91	86.25	14.0	43(35)	4(15.9)	93.5

注: () 中的数字表示静三轴试验结果

滑移区的地下水主要来自大气降水, 沿黄土中的大孔隙、垂直节理和落水洞渗入第一古壤层, 再沿古壤层的裂隙继续下渗。黄土层中的上部潜水埋藏于第一古壤层以下的砂土层中, 水位一般为 8~20 m。

3 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理

从滑移区的探槽地层剖面和大量的液化砂脉、滑移区后、中部波浪状(脉络状)地貌景观以及滑移前部的黄土降落粉尘现象可看出: 位于第一层古壤层下部饱和黄土和砂土震动液化; 位于其上部分黄土层受地震力和液化的双重作用而呈现脉络状地貌, 进而部分黄土体解体、斜抛、粉尘化, 远程运移而形成黄土流或黄土瀑布。

3.1 饱和砂质黄土、砂土的震动液化判断及滑速、滑距的计算

在滑移区的探井、探槽中采集图3剖面中第二古壤层以上各土层的十几组样品, 在室内进行了一系列土的物理、力学指标试验(见表1)。

由于地下水位在 8~20 m 之间变化, 第一古壤层以上的黄土层不讨论液化问题, 第一古壤层以下的砂质黄土层的粘粒含量都超过 16%。按《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89) 的 IX 度液化初判标准判断为不液化。但此处地震烈度为 X 度, 《规范》方法没有 X 度液化判别标准。白铭学、张苏民^[4]曾取样做了动三轴试验, 并按 H. B. Seed 等多种判别方法皆判为液化。所以, 本文将第一古土壤层以下的两层砂质黄土层皆按液化处理。对粉砂层可按《规范》方法判断液化情况, 有公式:

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \cdot \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (1)$$

按此公式判断整个含粉砂段各标贯点皆发生液化, 进一步按《规范》方法的液化指数计算该段发生严重液化。同时, 还用 DS-1 单道工程地震仪测得 13.2 m 处粉砂层的剪切波速 $v_s = 247 \text{ m/s}$ 。用石兆吉提出的波速

法仍判为液化。这种液化物质叠加后续地震波形成上涌作用, 使地层抬起在地表表现为波峰, 相应未抬起的部分在地表表现为波谷。同时, 这种液化物质还会沿倾斜方向流动并托浮上部土体一起运移。

国内外的许多研究者都认为: 由于地震历时短暂, 斜坡在地震中的位移很小, 而是在地震结束后由于液化物质的润滑作用下使斜坡发生较大位移。此处先采用 Hamada 的经验公式计算斜坡体在地震中的位移:

$$D_H = 0.75 \sqrt{H} \sqrt{\theta} \quad (2)$$

式中 H 为液化层厚度(m); θ 为液化层面的倾角($^\circ$); D_H 为水平方向的斜坡位移值(m)。将本区的液化层厚度 4.5 m, 液化层倾角 5° 代入式(2)计算的斜坡位移为 2.72 m。

对于地震停止时由液化物质托浮上部载体向前流滑的距离, 可采用笔者^[12]推导出的考虑孔隙水压力的影响滑(斜)坡的运动距离公式来计算, 即

$$l = \frac{h(1 - A_D B_D \mu)}{(1 - B_D) \mu} \quad (3)$$

式中 l 为斜坡运动距离(m); h 为斜坡后缘顶点至滑体停止点之间的高差(m); μ 为动摩擦系数; A_D 、 B_D 分别为与饱和度和孔隙比有关的孔隙水压力参数。

由于石碑塬滑移体体积(液化层以上)为 $4.7 \times 10^7 \text{ m}^3$, 按 Scheidegger^[13]的统计公式:

$$\lg \mu = -0.1566 \times \lg V + 0.62419 \quad (4)$$

(式中 V 为滑体体积) 计算出动摩擦系数 $\mu = 0.2644$ 。查表1粉砂层的饱和度为 84.34%, 孔隙比为 0.67, 查文献[12]第94页图4.3.6~7得 $B_D = 0.75$, $A_D = -0.4$, h 为 30 m, 将这些参数代入式(3)求斜坡位移 $l = 489.8 \text{ m}$, 与现场调查营城河改道向西推移 400 余 m 是相符的。

3.2 滑移区后、中部地表呈波浪状的形成机理

在石碑原滑移体后、中部出现了波浪状(脉络状)地貌形迹, 迄今仍清晰可见(图2)。

这种形迹是由于沟谷或陡坡斜坡竖向切割地形, 使之成为一端不连续的介质, 因而对这一地段的地面运动具有反射作用。这种波的反射在平面上受到“凹”

字形地貌边界沟谷的控制,产生了聚能作用(图4)。

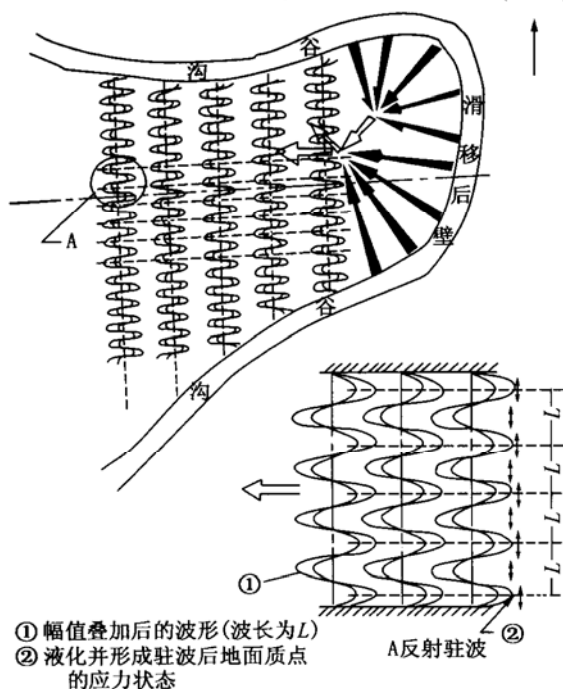


图4 特殊地形地表面波的聚能作用

Fig. 4 The energy convergence of surface wave in a special topographic region

在地面波动的来回反射聚能过程中,很容易引起同相位幅值的叠加,即产生局部的振动激化——驻波。

根据驻波的定义可知驻波的通式为

$$u(x, t) = X(x)T(t) \quad (5)$$

式中 u 为波动振幅向量。

任一条带的地面运动可近似模拟为固定端且长度为 l 的弦或杆的自由振动,即

$$Ut - a^2 U_{xx} = 0 \quad (6)$$

边界条件为

$$\begin{cases} u(0, t) = 0 \\ u(l, t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)得

$$\begin{cases} XT'' - a^2 X''T = 0 \\ X(0)T(t) = 0 \\ X(l)T(t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

变换式(8),并设

$$T'' + \lambda^2 T = 0 \quad (9)$$

此式可分为两个方程,并随有原来的边界条件

$$\begin{cases} X'' + \lambda^2 X = 0 \\ X(0) = 0, X(l) = 0 \end{cases}$$

只有当 $\lambda > 0$ 时,此式可解为

$$X(x) = c_1 \sin \sqrt{\lambda} x + c_2 \cos \sqrt{\lambda} x \quad (10)$$

由边界条件可得

$$\begin{cases} c_2 = 0 \\ c_1 \sin \sqrt{\lambda} l = 0 \end{cases}$$

其中 $c_1 \neq 0$, 所以 $\sin \sqrt{\lambda} l = 0$, 即式(9)的解为

$$T(t) = A \sin \frac{n\pi a}{l} t + B \cos \frac{n\pi a}{l} t \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

A, B 为任意常数,并包括了 c 值,驻波运动方程为

$$u_n(x, t) = (A \sin \frac{n\pi a}{l} t + B \cos \frac{n\pi a}{l} t) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (12)$$

式(12)中每一 n 值对应于一种驻波,液化场地上的地面波动应受地表层自振频率 f 的驻波控制。当其频率通过波速测量为已知时,则得 $a = \frac{2fl}{n}$ 。 l 可取两近似平行的沟谷间距离; n 为地面脉络状形迹在 l 长度内的均匀分布的数目; a 相应于 n 值的土层运动的半波速。

将石碑塬黄土斜坡的一系列参数(物性、几何参数)代入式(12),求得该区的驻波运动方程曲线,然后与石碑塬斜坡地貌波浪状波形相对比,二者大致吻合。

3.3 滑移区中、前部黄土粉尘化的机理

在海原大地震中,黄土滑坡伴随着黄土粉尘(黄土瀑布)遍布很广,在石碑塬滑移区也不例外。这是由于图3中第一古壤土层以上的马兰黄土在强烈双向地震力的作用下,发生解体、斜抛和粉尘化所致。对这种形成机理、滑移全过程及滑速、滑距的问题,笔者在文献[9]中作了深入的研究,提出了地震作用下黄土体滑移的“土体解体、斜抛和粉尘化机理”,并用实例验证,效果良好。这种观点对本区黄土远程滑移进而形成“黄土流或黄土瀑布”仍然适用。此处不再赘述,仅按文献[9]中的滑距公式来验证本文的实例。滑距公式为

$$l = \frac{(1 - \mu \cot \phi + 2\xi \mu_D B_D) h + V_0^2 / 2g}{2\xi \mu_D} \quad (13)$$

式中 ϕ 为土的有效内摩擦角; V_0 为地震结束后滑移体获得的初速度(m/s);其它符号同式(3), ξ 用下式求取:

$$\xi = (S_r - S'_r) / (100\% - S'_r) \quad (14)$$

式中 S_r 为饱和度; S'_r 为残余饱和度。

石碑塬滑移体第一古壤层以上的黄土体体积为 $2.17 \times 10^7 \text{ m}^3$, 仍按 Scheidegger 的统计公式(式(4))求得本例的动摩擦数 $\mu = 0.2985$, 查表1得饱和度和孔隙比分别为 $S_r = 41.85\%$, $e = 1.04$, 按文献[9]中的图2、图3求得 $B_D = 0.05$, $A_D = 3$, $h = 30$; $S'_r = 0$ (粉尘化), 故 $\xi = 0.4$, 随机地震荷载作用黄土动摩擦角 ϕ 为 22° [15], $V_0^2 / 2g$ 很小,可以忽略。所以由式(13)计算出的黄土粉尘运移距离 $l = 746.25 \text{ m}$ 。再叠加下部由液化物质引起移动体的滑距 489.8 m , 即 $746.25 + 489.8 = 1236.05(\text{m}) = 1.236 \text{ km}$ 。这与调查中的“弥天劫尘,滑移数里”的说法一致。

3.4 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的过程

按上述分析, 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的过程如图5。

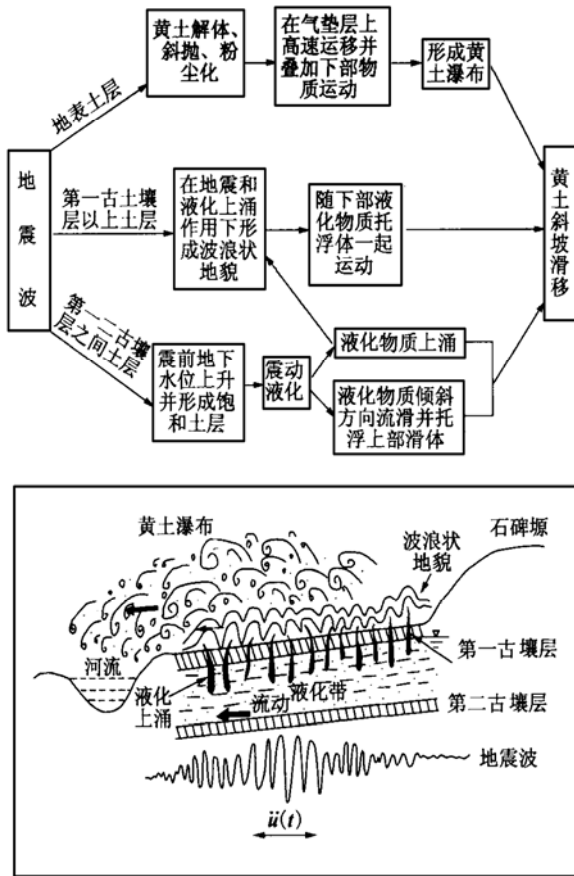


图5 地震作用下低角度黄土斜坡滑移的过程

Fig. 5 The sliding of gently inclined loess slope triggered by earthquake

4 结 论

(1) 本文所提出的强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理能合理地解释滑移现场出现的种种迹象, 并从力学机制方面深入探讨。

(2) 用笔者提出的滑距公式对石碑塬斜坡的滑移进行分层计算, 然后叠加, 结果与实际情况一致。这是因为公式中充分考虑了震动液化引起饱和孔隙水压力及黄土解体、斜抛、粉尘化过程中产生的孔隙气压带来的影响, 较客观、实际。

参考文献:

- [1] Yasuda S, Hamada M, et al. Liquefaction induced permanent ground displacements in Niigata City [A]. Proc 2nd US- Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and their Effects on Lifelines [C]. Buffalo, 1989. 67~ 81.
- [2] O' Rourke T D, Roth B L, Hamada M. A case study of large ground deformation during the 1971 San Fernando Earthquake [A]. Proc 2nd US- Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines [C]. Buffalo, 1989. 50~ 66.
- [3] Ishihara K, Okusa S, Oyagi N, et al. Liquefaction induced flow slide in the collapsing loess deposit in Soviet Tajik [J]. Soils and Foundations, 1990, 30(4): 73~ 89.
- [4] 白铭学, 张苏民. 高烈度地震时黄土层的液化移动 [J]. 工程勘察, 1990, (6): 1~ 5.
- [5] Steadman R S. Centrifuge modelling of large ground motions and their effects on structures [A]. Proc 2nd US- Japan Workshop in Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines [C]. Buffalo, 1989. 218~ 232.
- [6] Sasaki Y, Towhata I, et al. Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction [J]. Soils and Foundations, 1992, 32(3): 79~ 96.
- [7] Pilgrim N K. Earthquake related deformation beneath gently inclined ground [J]. Geotechnique, 1998, 48(2): 187~ 199.
- [8] 刘惠珊, 徐凤萍, 李鹏程. 液化引起的地面大位移对工程的影响及研究现状 [J]. 工程抗震, 1997(2): 21~ 26.
- [9] 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.
- [10] 王兰民, 刘红玫, 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): 89~ 94.
- [11] GBJ 11—89, 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [12] 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: 四川科技出版社, 1999.
- [13] Scheidegger A E. On the prediction of the reach velocity of catastrophic landslides [J]. Rock Mech, 1973, 5: 231~ 236.
- [14] 王钟琦, 等. 地震工程地质导论 [M]. 北京: 地震出版社, 1984.
- [15] 张振中, 等. 黄土地震灾害预测 [M]. 北京: 地震出版社, 1999.